



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**ARVUTUSLIKU KAVANDAMISE MEETODITE
RAKENDAMINE SUVISE ÜLEKUUMENEMISE
ANALÜÜSIMISEL TÜÜPKORTERELAMUTE NÄITEL**

**APPLICATION OF COMPUTATIONAL DESIGN METHODS
FOR THE ANALYSIS OF TYPICAL APARTMENT
BUILDINGS' SUMMERTIME OVERHEATING**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Helene Liivik

Üliõpilaskood: 192685EAKI

Juhendaja: Ergo Pikas, abiprofessor

Kaasjuhendaja: Elisa Iliste, doktorant

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad,

kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

22. mai 2024 a

Autor: Helene Liivik

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

22. mai 2024 a

Juhendajad: Ergo Pikas

/ allkirjastatud digitaalselt /

Elisa Iliste

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

22. mai 2024 a

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Helene Liivik

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Arvutusliku kavandamise meetodite rakendamine suvise ülekuumenemise analüüsimisel tüüp korterelamute näitel“,

mille juhendajad on Ergo Pikas ja Elisa Iliste,

- 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
 2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
 3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.
-

22. mai 2024 a

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtjaks nõusolekut

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Helene Liivik, 192685
Õppekava, peeriala: EAKI, Hoonete sisekliima ja veetehnika
Juhendaja(d): Ergo Pikas, 56455953, abiprofessor
Elisa Iliste, doktorant/nooremteadur

Lõputöö teema:

„Arvutusliku kavandamise meetodite rakendamine suvise ülekuumenemise analüüsimisel tüüpkerelamute näitel.“

„Application of Computational Design Methods for The Analysis of Typical Apartment Buildings’ Summertime Overheating.“

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Kaardistada põhikontseptsioonid, protsessid ja meetodid arvutusliku kavandamise- ja energiasimulatsiooni mootorite rakendamiseks suvise ülekuumenemise analüüsimiseks.
2. Tuvastada päikesekiirguse simulatsiooni abil tüüpkerelamute suvise ülekuumenemise potentsiaaliga eluruumid.
3. Päikesekiirguse mudeli abil tuvastatud ülekuumenemisriskiga ruumide modelleerimine kasutades kahte erinevat varianti – parameetrist modelleerimist ja IDA ICE modelleerimistarkvara. Eeldatavate ja saadud tulemuste analüüsimine ning võrdlemine.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lõputöö eesmärgi ja küsimuste püstitamise ning kirjandusallikate analüüsimine	25.02.24
2.	Pilootala ja hoonete määramine, lähteandmete hõive ja haldamine simulatsioonimudelite koostamiseks	03.24
3.	Päikesekiirguse analüüsi mudeli koostamiseks sobiva meetodi valik, mudeli kalibreerimine ning seejärel selle simuleerimine	03.24
4.	Ülekuumenemise riskiga eluruumide modelleerimine ja simuleerimine kolme erineva arvutusmeetodiga ning tulemuste analüüs	05.24

lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

5.	Tulemuste hindamine, põhijärelduste sõnastamine ja lõputöö vormistamine	15.05.24
----	---	----------

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 22. mai 2024 a

Üliõpilane: Helene Liivik 22. mai 2024 a
/allkirjastatud digitaalselt/

Juhendajad: Ergo Pikas 22. mai 2024 a
/allkirjastatud digitaalselt/

Elisa Iliste22. mai 2024 a
/allkirjastatud digitaalselt/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	8
SISSEJUHATUS	9
1 Kirjanduse ülevaade.....	11
1.1 Suvine ülekuumenemine ja päikesekiirgus	11
1.1.1 Suvise ruumitemperatuuri kontrollarvutus.....	12
1.1.2 Suvise ülekuumenemise arvutusmetoodikad.....	13
1.1.3 Nõuded arvutustarkvarale	15
1.1.4 Päikesekiirguse analüüs	15
1.2 Päikse kiirguse ja suvise ülekuumenemise modelleerimise ja simulatsiooni vahendid.....	16
1.2.1 Modelleerimine ja simuleerimise vajadus.....	17
1.2.2 Enamlevinud energia modelleerimise ja simuleerimise mootorid.....	18
1.2.3 Modelleerimise ja simuleerimise täpsus ja usaldusväärsus.....	19
1.3 Arvutuslik kavandamine hoone toimivuse hindamiseks	22
1.3.1 Esimesed arvutusliku kavandamise meetodid.....	22
1.3.2 Hoone simuleerimine ja optimeerimine	23
1.4 Parameetiline modelleerimine	24
1.4.1 Algoritmi ja skriptimise konseptsioonid	24
1.4.2 Visuaalse esitluse konseptsioonid	25
2 LÕPUTÖÖ METOODIKA	27
2.1 Pilootala hooned ja lähteandmed	28
2.2 Päikesekiirguse ja ülekuumenemise modelleerimine ja simuleerimine.....	30
2.3 Suvine ülekuumenemine.....	30
2.4 IDA ICE parameetrid	32
3 Tüüpkerelamu modelleerimine ja simuleerimine.....	35
3.1 Päikesekiirguse analüüs.....	35
3.2 Ruumitemperatuuride kontrollarvutus	36
3.2.1 IDA ICE arvutustulemused	36
3.2.2 Grasshopperi arvutustulemused	41
3.3 Ruumitemperatuuri kontrollarvutus tuleviku kliimafailiga	45
3.3.1 IDA ICE arvutustulemused	45
3.3.2 Grasshopperi arvutustulemused	47
3.4 IDA ICE ja Grasshopperi arvutustulemuste koodanalüüs	48
4 Arutelu, piirangud ja edasised uuringud.....	53
KOKKUVÕTE	55
SUMMARY.....	57

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU 59

EESSÕNA

Seoses kliimamuutusega on suvine ülekuumenemine korterelamutes tõusnud üha sagedamini esinevaks probleemiks. Eestis on ruumitemperatuuri kontrollarvutuseks enamlevinud modelleerimistarkvara IDA ICE, kuid see võib olla keeruline ja liigselt detailne projekti varajases staadiumis kasutamiseks. Antud lõputöös kasutatakse arvutusliku ja parameetrilise modelleerimise võtteid ruumitemperatuuri kontrollarvutuse tegemiseks.

Käesoleva lõputöö peamiseks eesmärgiks on arvutusliku kavandamise mitme-etapilise töövoore arendamine suvise ülekuumenemise kontrollarvutuseks.

Autor soovib tänada nii juhendajat kui ka kaasjuhendat nende abi eest lõputöö valmimisel ning lisaks Raimo Simsonit ja Martin Thalfeldti, kes olid abiks IDA ICE simulatsioonide tegemisel.

Võtmesõnad – Suvine ülekuumenemine, arvutuslik kavandamine, parameetriline modelleerimine, IDA ICE, Grasshopper, magistritöö

SISSEJUHATUS

Ehitussektori viimaste aastakümnete olulisemaks eesmärgiks on olnud madalate ülalpidamiskuludega hoonete rajamine. Reeglina on madal- ja liginullenergiahoonetel õhutihedad ja madala soojustäbivusega välispiirded, mistõttu on ruumide suurte klaaspindade puhul ülekuumenemine tõusnud üha sagedamini esinevaks probleemiks. Selleks, et mõista päikesekiirguse mõju ehitatavale või rekonstrueeritavale hoonele on vaja selle jaoks läbi viia dünaamiline energiasimulatsioon [1].

Ehitatava või rekonstrueeritava hoone energiatarvet ning soojustlikku mugavust peab saama määrata varajases projekteerimisfaasis. Hilises projekteerimisfaasis võib ebamäärase info põhjal ehitatav hoone osutada energiakulukaks ja hilises ehitusetapis on muudatuste tegemine aja- ja kuluderohke. Soojustliku ja visuaalse mugavuse tasakaal on madala küttevajaduse, väikese ülekuumenemise riski ning piisava päikese- ja päevavalguse saavutamisel kriitiline, eriti jahutuseta hoonetes [2].

Pidevalt arenevas maailmas, kus ilma arvutis läbiviidud hoone toimivuse simulatsioonideta pole võimalik energiatõhusaid hooned luua, on arendatud mitmeid meetodeid, mis aitaksid kiirendada ja lihtsustada keerulisemate hoonetüüpide lahendamist. Arvutuslike kavandamismeetodite ja -tehnikate kasutuselevõtt on hakanud mõjutama inseneride tööd, võimaldades probleemide ja lahenduste süsteemset lahendamist ja hindamist. Arvutusmodelite kiire areng nõuab aga saadud tulemuste kriitilist analüüsi, et hinnata nende usaldusväärsust oluliste otsuste tegemisel. Peamised arvutusliku kavandamise valdkonnad hõlmavad kõrge jõudlusega arvutustehnikat, numbrilisi meetodeid, modelleerimist ja simulatsiooni, andmeanalüüsi ja visualiseerimist ning diskreetsete ja pidevate probleemide lahendamiseks algoritmide arendamist [3].

Laialdane huvi hoone optimeerimisprotsesside vastu on aastatega osutunud keeruliseks ülesandeks, sest soovitakse saavutada mitmeid eesmärgi korruga. Inseneridele on kättesaadavad mitmed ning erinevate keerukusastmetega modelleerimisvahendid, kuid nii mõnedki neist pakuvad piiratud modelleerimisvõimalusi. Seevastu arvutuslik ja parameetiline modelleerimine annavad võimaluse ja vabaduse tegeleda mittetüüpsete olukordade ja probleemidega. Selle rakendamise probleem sesineb aga inseneride oskustes ja valmisolekus sellist tehnoloogiat kasutusele võtta [4].

Käesoleva lõputöö peamiseks eesmärgiks on arvutusliku kavandamise mitme-etapilise töövoog arendamine suvise ülekuumenemise kontrollarvutuseks. Selleks kaardistatakse

ja rakendatakse ülekuumenemise ja arvutusliku kavandamise põhikonseptsioonid, protsessid ja meetodid ning viiakse läbi päikesekiirguse analüüs ülekuumenemiseriskiga ruumide tuvastamiseks nende modelleerimisega ja simuleerimisega.

Lõputööle on püstitatud järgmised ülesanded:

1. Pilootala ja hoonete määramine, lähteandmete hõive ja haldamine simulatsioonimudelite koostamiseks;
2. Päikesekiirguse analüüsi mudeli koostamiseks sobiva meetodi valik, mudeli kalibreerimine ning seejärel selle simuleerimine;
3. Ülekuumenemise riskiga eluruumide modelleerimine ja simuleerimine kolme erineva arvutusmeetodiga ning tulemuste analüüs;
4. Tulemuste hindamine ja põhijärelduste sõnastamine.

Ülesannete täitmiseks on lõputöö jagatud neljaks osaks. Lõputöö esimeses osas tehakse kirjanduse ülevaade suvise ülekuumenemise, modelleerimistarkvarade ning arvutusliku kavandamise teemadel. Lõputöö teises osas kirjeldatakse lõputöö metoodikat, meetodeid ja lähteandmeid. Lõputöö tulemuste osas tuuakse välja, millised on tüüpikorterelamu ülekuumenemiseriskiga ruumid, kolme erineva arvutusmeetodiga saadud väärtused ning nende erinevus kasutades kahte erinevat simulatsioonitarkvara ja kahte erinevat kliimafaili. Lõpuks arutletakse lõputöö tulemustel ja tehakse üldine kokkuvõte.

1 Kirjanduse ülevaade

Lõputöö esimene osa koosneb kirjanduse ülevaatest, mis on jaotatud nelja suurema peatüki vahel. Kõigepealt käsitletakse suvise ülekuumenemise põhjuseid ning arvutusmetoodikaid, seejärel räägitakse lähemalt modelleerimistarkvaradest, millega suvise ülekuumenemise arvutust on võimalik läbi viia. Teised kaks suuremat peatükki on seotud arvutusliku kavandamise meetodite ja parameetrilise modelleerimise tutvustamisega.

1.1 Suvine ülekuumenemine ja päikesekiirgus

Antud peatükis tuuakse välja suvise ruumitemperatuuri ülekuumenemise põhjused, selle arvutamismetoodikad ning päikesekiirguse olemus ja analüüsimine. Viimaste aastakümnetega on Eesti suve keskmine temperatuur märgatavalt tõusnud. Kuumalained on muutunud sagedasemaks ja tõsisemaks ning liigkõrged sisetemperatuurid esinevad paljudel juhtudel ka juba kütteperioodil, mitte ainult suvel. Eelkõige on kütteperioodil ülekõrge temperatuuri põhjuseks küttesüsteemi juhtimine. Liginull- ja madalenergiahooned on reeglina õhutihedate ja madala soojuslähivusega välispiiretega, samas soodustavad viimase aja arhitektuursed trendid suuri klaaspindu. Päikesekiirgus pääseb läbi klaaspindade ruumi sisse ja soojendab ruumi, liigsoojus ei pääse aga enam madala tarindite soojuslähivuse ja madala õhulekke tõttu välja ning tulemuseks on ülekuumenemine [5].

Hea õhupidavus on vältimatult vajalik energiatõhususe, mugava sisekliima ja niiskusturvalise tarindite toimivuse saavutamiseks. Hoone õhulekkearvu nõue on $q_{E50} \leq 1,0 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$, kuid energiaarvutustes on soovitatav kasutada üldjuhul varuga väärtust $1,5 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$. Õhulekkearvu väärtus tõendatakse mõõtmisega enne siseviimistlustööde alustamist ning vajadusel piirdetarindeid tihendatakse kuni projekteeritud väärtuse saavutamiseni. Juhul kui kasutatavad välispiirete lahendused ei võimalda mingil põhjusel saavutada head õhupidavust, siis kasutatakse nende hoonekonstruktsioonide puhul varem praktikas korduvalt saavutatud õhulekkearvu väärtust. Muid lahendusi energiatõhususe parandades on liginullenergia energiatõhususe saavutamine võimalik ka õhulekkearvu väärtustega $q_{E50}=2$ või $3 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$, kuid tuleb arvestada, et sellised lahendused ei ole kulutõhusad [1].

Ruumide ülekuumenemise ohule tuleb mõelda juba hoonet planeerides-projekteerides. Energiatõhususe miinimumnõuetele vastav hoone peab päikesekiirgusest tuleneva ülekuumenemise vältimiseks vastama suvise ruumitemperatuuri nõuetele. Suvise

ruumitemperatuuri nõue loetakse täidetuks, kui ruumitemperatuur ei ületa: elamus ajavahemikul 1. juunist 31. augustini jahutuse seadeväärtust rohkem kui 150 °C h ning mitteelamus ajavahemikul 1. juunist 31. augustini jahutuse seadeväärtust rohkem kui 100 kraadtundi. Eestis on jahutuse seadeväärtused väikeelamutes ja korterelamutes 27 °C [6].

1.1.1 Suvise ruumitemperatuuri kontrollarvutus

Suvise ruumitemperatuuri kontroll tehakse ruumidele, kus on kõige rohkem vabasoojust, ehk kriitilistele ruumidele, millel on suurim risk üle kuumeneda. Hoonete energiatõhususe miinimumnõuete määramises on täpsustus, et suvise ruumitemperatuuri nõude kontroll tehakse energiaarvutuse käigus ruumidele, kus on kõige rohkem vabasoojust või kus on ette näha kasutajate pidevat kohalolekut. Elamus tehakse suvise ruumitemperatuuri arvutus vähemalt ühele, eelnevalt mainitud, tingimustele vastavale magamistoale ja elutoale [6].

Arhitektuuri lahenduse kavandamisel on äärmiselt oluline leida optimaalsed parameetrid klaaspindadele, sh klaaspindade suurused, klaaspakettide omadused ja/või varjestus lahendused, et oleks tagatud piisav päevavalguse ligipääs ning välditud liigne temperatuuritõus, kusjuures eluruumide akende klaaspakettide päikeseläbivustegurit (g) ei ole soovitatav valida alla 0,4. Traditsioonilised jahutussüsteemid on nii paigalduse kui ka eksploatatsiooni osas kulukad ning raskendavad energiatõhususe nõuete täitmist. Mõistlik on projekteerida hoone selliselt, et need üle ei kuumeneks, kasutades eelkõige passiivseid meetmeid [1].

Ruumide ülekuumenemise vältimiseks tuleb aktiivsele jahutussüsteemile eelistada passiivseid, st arhitektuurseid ja ehituslike lahendusi ning öist jahutust ventilatsiooniga. Liigset päikesekiirgust on võimalik blokeerida erinevate varjestuslahendustega, milleks võivad olla näiteks välised ribikardinad/markiisid, konstruktsiooniline ülekate/rõdu või konstruktsiooniline külgnev piire/rõdu. Suurte klaaspindade korral võivad probleemseks osutada ka teistesse ilmakaartesse orienteeritud ruumid, millede ülekuumienemise vältimiseks võib olla vajalik eeltoodud lahenduste rakendamine [1].

Rusiklareegli kohaselt võib väikeelamute ja oluliselt rekonstrueeritava korterelamute korral kagu (135 kraadi) ja lääne (270 kraadi) ilmakaarte vahele jäävate akende osas lähtuda järgmistest tingimustest [6]:

1) elu- ja magamistubade aknad pindalaga üle 1 ruutmeetri on avatavad tuulutusasendisse või muul moel osaliselt avatavad, nii et avatava akna tuulutusasendi aktiivpindala osakaal kogu akna pindalas on vähemalt 10 protsenti;

- 2) akende pindala osakaal fassaadi pindalal on väiksem kui 40 protsenti;
- 3) akende osakaal fassaadi pindalal ja klaaspaketi päikesefaktori korrutise väärtus on väiksem kui 0,2 ja;
- 4) akende pindala suhe vaadeldava ruumi põranda pindalasse on väiksem kui 0,15.

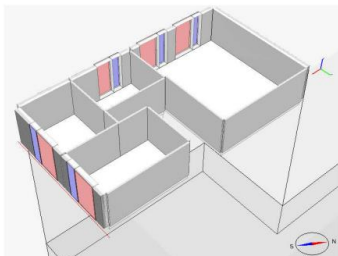
1.1.2 Suvise ülekuumenemise arvutusmeetodid

Suvise ülekuumenemise arvutamiseks on olemas kaks varianti (1) ruumipõhine arvutusmeetod ning (2) korteripõhine arvutusmeetod. Arvutusmeetodika valiku otsustab üldjuhul arvutusi teostav energiatõhususe spetsialist. Valiku aluseks võivad osutada nt kasutatava arvutustarkvara piirangud (nt ei ole võimalik arvestada akende kaudu tuulutamist), hoone asukoht (müra, vandalism), arhitektuursed iseärasused, ruumide erinõuded. Näiteks juhul, kui akende avamine mingil muul põhjusel ei ole võimalik (välisõhu saastatus, õietolmu levik), teostatakse hoonele korteripõhine arvutus [1].

Ruumipõhise meetodi korral modelleeritakse ja simuleeritakse hoone eluruumidest kriitilised tüüpruumid selliselt, et igat ruumi käsitletakse eraldi tsoonina ja avasid (uksi) tsoonide vahel ei arvestata. Kortripõhise arvutuse korral modelleeritakse kogu korter ruumide kaupa eraldi tsoonidena. Erinevalt ruumipõhisest meetodist, sel juhul aknaid ei avata. Korteri ruumide vahelised ukсед modelleeritakse avatuna. Kahe erineva meetodi erinevused on visualiseeritud joonisel 1 [1].

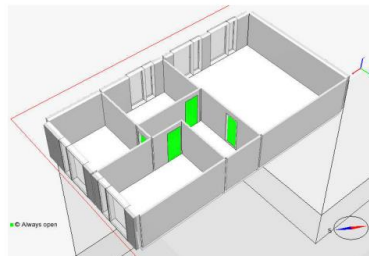
Ruumipõhine meetod

- arvestatakse akende kaudu tuulutamist
- vaadeldakse ruume eraldi
- ei arvesta õhu liikumist ruumide vahel



Kortripõhine meetod

- ei arvestata akende kaudu tuulutamist
- vaadeldakse korterit tervikuna
- arvestab õhu liikumist ruumide vahel



Joonis 1. Visualiseering ruumipõhisest ja korteripõhisest arvutusmeetodist.

Valiku, milliseid ruume kontrollida, teeb üldjuhul energiatõhususe spetsialist koostöös arhitektiga, ning vajadusel teostatakse projektis muudatused ülekuumenemise vältimiseks. Kriitilisi kortereid ja ruume võib hoones olla mitmeid, seega on enamasti juhtudel vajalik kontrollida rohkem kui ühte korterit ja rohkem kui kahte

tüüpruumi. Simulatsioonarvutuseks kriitiliste ruumide valikul võib lähtuda järgnevast põhimõtetest [1]:

- **Ruumi välisseina klaasitud avatäited:**
 - suured varjestamata klaaspinnad, st aknad, rõdu ukсед;
 - klaaspindadel on ebapiisav päikesekaitse või väline varjestus.
- **Ruumi orientatsioon:**
 - ruumi välispiirded on orienteeritud läände, lõunasse või itta (asimuudiga vahemikus 135°...270°).
- **Korteri paiknemine:**
 - Korteri ruumid asuvad ühel fassaadil, st puudub võimalus läbi korteri tuulutamiseks;
 - Korteri paikneb hoone viimasel korrusel, st päiksekiirguse tõttu soojenevad katusekonstruktsioonid, mis omakorda mõjutavad katusealuseid ruume;
 - Puuduvad varjestavad ümberkaudsed objektid, st naaberhooned, kõrghaljastus.
 - Hoone/korteri asukoht: hoone/korteri asukoha tõttu ei ole võimalik teatud korterites aknaid ööpäevaringselt tuulutusasendis hoida, nt mürarikkad piirkonnad, turvakaalutlustel esimeste korruste korterid jne.

Liigkõrged temperatuurid ei ole aga probleemiks ainult Eestis, vaid ka mujal Euroopas [7]. Ülekuumenemise arvutusmeetodid Euroopas erinevad riigist riiki väga suurel määral ning üldjuhul puudub ühne lähenemisviis elamute ülekuumenemise rangeks käsitlemiseks [8]. Edasi tuuakse mõned näited sellest, kuidas arvutatakse suvist ülekuumenemist erinevates riikides.

Šveitsi suvise ülekuumenemise arvutus põhineb konkreettsel suveperioodi määratlusel. Arvutamisel kasutatakse projekteerimise võrdlusaastat, mis hõlmab keskmisi kuumalaineid Šveitsi kliimas ning lisaks arvestatakse ka tulevaste kliimamuutuste stsenaariumitega aastateks 2035 ja 2050. Soojusmugavuse arvutus põhineb operatiivse temperatuuri ja adaptiivsete mugavuspiiride diagrammidel, mis määratlevad künnised loomuliku ventilatsiooniga ja konditsioneeritud hoonete jaoks. Simulatsioon on täielikult dünaamiline ja selle arvutuse samm varieerub ühest tunnist mõne sekundini [9].

Prantsusmaa ülekuumenemise arvutus põhineb kliimatsoonil, mis jagab riigi kaheksaks geograafiliseks tsooniks ning kuumalained eeldatakse kõigis simulatsioonide kliimafailides. Arvutamine põhineb ülekuumenemise hõivatud tundide normaliseeritud indikaatoril tundidena, mis ei tohiks ületada 2600 °C /h aastas. Eristatakse loomuliku

ventilatsiooniga ja konditsioneeritud hooneid. Operatiivse temperatuuri lüvend jääb vahemikku 26 °C kuni 28 °C, arvestades elanike kohanemisvõimet muutuva temperatuuriga. Mudel on dünaamiline ning ajasammuga vähemalt üks tund [9].

Taanis kasutatava ülekuumenemise arvutusmeetoodika kohaselt ei tohiks kriitilise ruumi temperatuur ületada 100 tundi üle 27 °C ja 25 tundi üle 28 °C. Taani arvutusmeetodi kitsakohadena on välja toodud muu hulgas ebamugavuse intensiivsuse kvantifitseerimine ning hõivatud tundide arvu normaliseerimise puudumine [10].

1.1.3 Nõuded arvutustarkvarale

Ruumitemperatuuri kontrollarvutus teostatakse tarkvaraga, mis võimaldab [11]:

- 1) hoone soojuslevi dünaamilist arvutust;
- 2) kliimaprotsessori kasutust, millesse on võimalik lugeda Eesti energiaarvutuse baasaasta selle originaaldetailsusega ja mis arvutab tundide lõikes päikesekiirguse pindadele ja varju jäävad alad;
- 3) tõelist ruumitemperatuuri kasutamist arvutuses;
- 4) sisestada lähteandmeid vastavalt hoone energiatõhususe arvutamise metoodikale.

Arvutustarkvara peab olema kas valideeritud vastavalt asjakohasele standardile või metoodikale või selle valideerimiseks peab olema tehtud võrdlusarvutus vastavalt Euroopa (EVS-EN), ISO, ASHRAE ja CIBSE standardile ning kasutatud IEA BESTEST metoodikat või nendega samaväärset üldtunnustatud standardit või metoodikat. Ruumipõhise arvutusmetoodika rakendamiseks peab tarkvaralahendus võimaldama simuleerida tunnipõhiselt sise- ja väliskeskonna temperatuuride erinevusest tingitud õhuvahetust avatavate akende kaudu [1].

1.1.4 Päikesekiirguse analüüs

Avatäidetest on läbipaistvatel pindadel (eelkõige akendel) olulisim roll suvise ruumitemperatuuri arvutustes, kuna suurem osa vabasoojusest tuleneb päikesekiirgusest [1]. Päevavalgus koosneb päikese- ja taevavalguse kombinatsioonist. Päikesevalgus on otsese päikesekiirguse nähtav osa ehk otsene päikesekiirgus, millel on selge suund. Taevavalgus on taeva hajuskiirguse nähtav osa, millel selge suund puudub. Lihtsustatult võib öelda, et otsene päikesekiirgus tekitab esemetele varju, hajuskiirgus aga mitte. Läbi akende tulev päikesekiirgus ei soojenda õhku otse, vaid muutub soojuseks tahketes pindades, mis omakorda annavad salvestatud soojuse pika aja vältel konvektiivselt ruumiõhule. Päikesekiirguse salvestamist kuni vastava soojuse ruumiõhku ülekandmiseni kuluv aeg oleneb tarindi massist ja pindade omadustest. Kui

hoone tarind on kerge, on viivitus lühike. Seega on päikeselt pärineva soojuse mõju kergkonstruktsiooniga hoones suurem kui massiivses hoones [12].

Ruumis oleva päevavalguse hulka saab kvantifitseerida ja mõõta mitme meetodi abil. Üldjuhul juhindutakse päiksekiirguse analüüsi tegemisel staatilisest meetoditest, milleks on päevavalgusteguri ja valgustuse väärtused, mis annavad üldise ettekujutluse päevavalguse võimsusest ja jaotusest ruumis. Sellegipoolest pakuvad dünaamilised päevavalgustuse mõõdikud, nagu ruumiline päevavalguse autonoomia (Sda), päevavalguse kättesaadavus (Dav) ja kasulik päevavalguse indeks (UDI) täpsemat teavet päevavalguse toimivuse kohta, sest need arvutatakse aasta iga tunni jaoks eraldi. Dünaamilise päevavalguse mõõdikute kontekstis muutub aga relevanteks parameetiline modelleerimine, mille abil on võimalik neid hoonetele välja arvutada ning visualiseerida kõige paremini [2].

Antud lõputöös viiakse enne ülekuumenemise kontrollarvutust läbi tüüp korterelamu päikesekiirguse analüüs, mille abil saadakse teada kui palju langeb päikesekiirgust tüüp korterelamu pinnale (kWh/m²). Selle abil on võimalik kindlaks määrata, millised on kõige kriitilisemad korterid, kus esinevad liigkõrged temperatuurid ning millel on risk ülekuumenemisele.

1.2 Päikse kiirguse ja suvise ülekuumenemise modelleerimise ja simulatsiooni vahendid

Antud peatükis tutvustatakse erinevaid modelleerimistarkvarasi ning selgitatakse nende toimimisprotsesse. Modelleerimistarkvarasi on mitmeid, kuid nendest kõige populaarsemateks on viimastel aastatel osutunud VIP-Energy, IDA ICE, EnergyPlus ja TRNSYS. Eestis on enamlevinud modelleerimistarkvara IDA ICE, kuid see võib olla keeruline ja liigselt detailne projekti varajases staadiumis kasutamiseks. Antud lõputöös kasutatakse modelleerimise ja simuleerimise jaoks EnergyPlus'i, sest see on integreeritud Grasshopperi visuaalse programmeermise tarkvarasse. Parema ettekujutuse saamiseks, aga ka võrdlus eesmärgina, viiakse antud töös tüüp korterelamu ülekuumenemisriskiga ruumide simulatsioonid alguses läbi IDA ICE tarkvaras. Mistahes arvutipõhise tarkvara kasutades on siiski vaja kõigepealt hinnata selle usaldusväärsust.

1.2.1 Modelleerimine ja simuleerimise vajadus

Modelleerimiseks mõeldud tarkvaratööriistad mängivad võtmerolli hoonesüsteemi optimeerimisel erinevatel etappidel, alates eelprojekteerimisest kuni kasutuselevõtuni [13].

Uute hoonete ehitamisel kui ka olemasolevate hoonete renoveerimisel on üheks oluliseks teemaks nende energiatõhusus. Palju ressursse on investeeritud erineva keerukusastmetega modelleerimistarkvarade loomisele, et oleks võimalik saavutada vajalikud eesmärgid ehitatavates hoonetes. Tänapäeval ei tule kõne alla hoone projekteerimine ilma, et projekteerijad selle jaoks vajalikke energiasimulatsioone läbi ei viiks [14] [15]. Laialdane huvi hoone optimeerimisprotsesside vastu on aastatega osutunud keeruliseks ülesandeks, sest soovitakse saavutada mitmeid eesmärgi korraga. Modelleerimine jõudluspõhistes projekteerimisprotsessides on seotud parameetrilise lähenemisega, kus on asjakohane analüüsitava mudeli matemaatiline genereerimine, loogiliste sammude planeerimine ning muutujate, parameetrite ja mudeli piirangusüsteemi kehtestamine [4].

Energiasimulatsioonid võimaldavad tuvastada ehitatava hoone projekteerimispuuduseid ja kitsaskohti. Tänu modelleerimis- ja simulatsioonitarkvaradele on võimalik võrrelda paljusid alternatiive alustades konstruktsioonitüüpidest kuni hoone siseosade detailse valikuni. Simulatsioon võimaldab uurida süsteemi dünaamikat, kuidas see ajas muutub ning kuidas alamsüsteemid ja komponendid omavahel suhtlevad. Simulatsioonimudel pakub peaaegu ainsat meetodit uute, keeruliste dünaamiliste süsteemide uurimiseks, mille jaoks analüütilised või staatilised (arvutustabeli) mudelid annavad parimal juhul madala täpsusega mudeli [16].

Modelleerimisega seotud simulatsiooniprotsessid peaksid: toetama automatiseerimise asemel kavandamist; hõlbustama mitmekriteeriumiliste lahenduste kiiret genereerimist; lubama lühikesi analüüsi- ja sünteesitsükleid ning toetama interaktsiooni ja valikuvõimalust paljude alternatiivide vahel. Hoone projekteerimise algetappide analüüsitööriist peaks integreerima arhitektuurse mudeli, erinevate hoonesiseste komponentide analüüsi ja seejuures tegema seda võimalikult väikse ajakuluga. Mudelite simulatsioonid peaksid aitama insenere otsuste tegemisel, võimaldama võrrelda mitmeid erinevaid lahendusevariante ning üleüldiselt integreerima projekteerimisprotsessi [4].

1.2.2 Enamlevinud energia modelleerimise ja simuleerimise mootorid

VIP-Energy on energiasimulatsiooni programm, mida arendab Strusoft ja mida kasutavad peamiselt Põhjamaade teadlased ja ehitusettevõtted hoonete energiabilansi analüüsimisel. Programmi on kinnitanud Rahvusvahelise Energiaagentuuri BESTEST ja ANSI/ASHRAE standard 140 ja CEN 15265, kuna sellel on usaldusväärsed algoritmid ja arvutusmudelid. Programm aitab mõista, kuidas hoonete seinad ja muud osad soojust koguvad ja hoiavad. Samuti sisaldab see palju erinevaid ehitusmaterjale ja aitab arvutada päikesekiirguse mõju hoonetele [17] [18].

IDA-ICE on dünaamiline modelleerimistarkvara kogu hoone sisekliima ja energiabilansi arvutamiseks, mida haldab Equa simulation AB. IDA ICE on Euroopa riikides laialt levinud ning seda kasutatakse enamjaolt teadusuuringute ja nõustamise eesmärgil. Programmil on mitmetsooniline arvutusfunktsioon ning see modelleerib sisekeskkonda ja hoonete energiatõhusust muutuvate ajasammudega, sealhulgas tunni- ja minutiaja eraldusvõimega. Programm on valideeritud standarditega ASHRAE 140-2004 ning EN 15255-2007 ja 15265-2007, mis näitab, et IDA-ICE suudab anda täpseid arvutusi hoonete energia- ja sisekliima toimivuse kohta. IDA ICE-l on BIM-impordi laiendusfunktsioon, mis võimaldab importida 3D CAD-objekte avatud või IFC-vormingus [17] [18].

DOE-2 on tuntud tarkvara, mida on kasutatud 25 aastat hoonete energiakasutuse ja kulude analüüsimiseks. EnergyPlus on selle järeltulija ja põhineb DOE-2 ning BLAST tarkvarade parimatel omadustel. EnergyPlusi oluline eelis on võime teha alatunniseid arvutusi ning dünaamiliselt integreerida koormusi ja süsteemi jõudlust, mis aitab täpsemalt arvutada hoone energiabilanssi. See teeb EnergyPlusi aeglasemaks kui teised DOE-2 põhised programmid. EnergyPlus kasutab sisendina teksti, võimaldades kasutada graafilisi kasutajaliideseid nagu SKETCH UP või Design Builder, et luua hoonetele visuaalselt arusaadavaid mudeleid [17] [18].

TRNSYS (TRaNsient SYstems Simulation) on energiasimulatsioonitarkvara, millel on modulaarne struktuur, mis võimaldab kasutajatel lisada uusi arvutusmudeleid, mitmetsoonilisi hoonemudeleid ja muid komponente. Üks eriomane osa TRNSYS-is on TRNBuild (tuntud ka kui Type 56), mis on spetsiaalne moodul hoonete termilise käitumise modelleerimiseks. TRNBuild kasutab hoone kohta kasutajalt saadud kirjeldust, loeb sellest genereeritud välistest failidest ja loob ajapõhised kokkuvõtted. Ilmastikuandmete komponent varustab seda vajalike sisendandmetega, mis sisaldavad

hoone geomeetrilisi, füüsikalisi ja termilisi omadusi. TRNSYS võimaldab teha simulatsioone ajavahemikega alates 0,1 sekundist [17] [18].

1.2.3 Modelleerimise ja simuleerimise täpsus ja usaldusväarsus

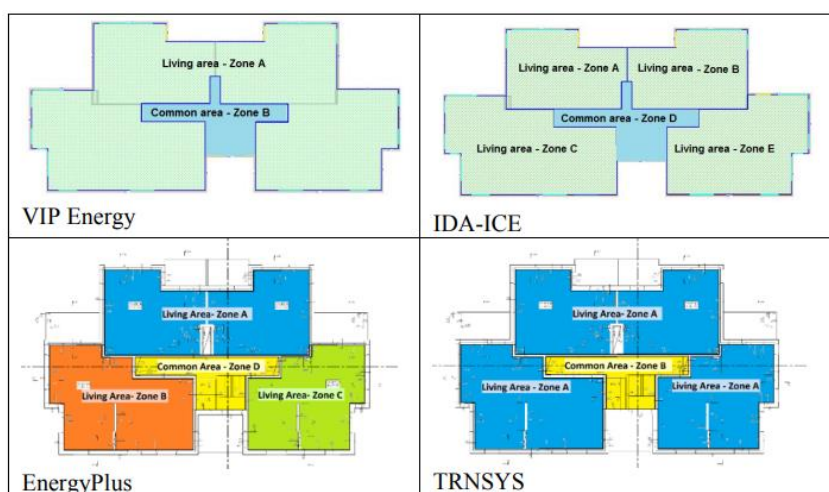
Eelmistes peatükkides on selgelt välja toodud, et simulatsioonimudel pakub peaaegu ainsat meetodit uute, keeruliste dünaamiliste süsteemide uurimiseks, mille jaoks analüütilised või staatilised (arvutustabeli) mudelid annavad parimal juhul madala täpsusega mudeli, kuid nagu iga arvutipõhise arvutusmeetodiga on vaja kriitiliselt suhtuda nende abil saadud tulemustesse.

Energiasimulatsioonid on sageli aeganõudvad, rekonstrueeritavate hoonete andmed ei ole alati kättesaadavad või nende hankimine on kulukas ning otsuste tegemiseni kättesaadav aeg ei ole usaldusväärse uuringu jaoks piisav. Mõnes olukorras võivad simulatsioonid ja muud visuaalsed kuvad koos kõigi projektide ajalise survega viia otsustajad ebapiisavate tõendite põhjal ennatlikele järeldustele. Lisaks võivad kogenematud simulatsioonianalüütikud või simulatsioonitarkvarale ja -tehnoloogiale liiga keskendunud mudelile liiga palju detaile lisada ja kulutada liiga palju aega mudeli väljatöötamisele, mille tulemuseks on algsed eesmärgid ja projekti ajakava unustamine [16].

Eelmises peatükis välja toodud rakendused erinevad oma struktuurilt ja energiasüsteemide modelleerimiseks kasutatavate algoritmide poolest. Samuti erinevad nende parameetrite sisestamise võimalused, isegi sama hoone geomeetria või süsteemikomponentide kirjeldused [17]. Arusaadavalt ei ole võimalik saada identseid energiaarvutusi kasutades erinevaid modelleerimistarkvarasi ühe hoone energiatarbe saamiseks. Erinevad simulatsioonitarkvarad on valideeritud erinevatel tingimustel ning seetõttu võib kahe erineva tarkvaraga simuleeritud sama hoone prognoositav väljund erineda [19]. Kõige olulisem osa mistahes modelleerimistarkvara kasutades on sisendparameetrite õigesti paika panemine, nagu näiteks kliimafail, hoone konstruktsiooni elemendid, hoone paiknevus ilmakaarte suhtes, kütteallikad, ventilatsiooniseadmed, inimeste arv ruumis jms.

Edasi tuuakse näide, kuidas nelja erineva modelleerimistarkvara abil modelleeritakse hoone energiavoogusid külma kliima tingimustes, et uurida, kuidas erinevad põhiparameetrid ja energiabilansi tulemused ruumide küttevajaduse modelleerimisel.

Peamised erinevused nende nelja modelleerimistarkvara vahel tulenevad tsoonide määratlusest, mida on visualiseeritud joonisel 2. VIP-Energyl ja TRNSYS-l on antud hoone modelleerimiseks kaks ühendatud tsooni: mudelites on arvestatud iga korruse elu- ja üldkasutatavad ruumid ning kõik sisesseinad. IDA-ICE-s on kogu hoone jagatud 25 tsooniks, samas kui 4 lisatud tsooni esindavad iga korterit iga korruse kohta ja ühte tsooni kogu hoone ühisruumi jaoks. EnergyPlus koosneb 24 ühendatud tsoonist, sealhulgas 3 elutuba ja üks ühine ala iga korruse kohta. Tsoonide määratlusest tulenevad ka erinevused ruumide aasta keskmistes, maksimaalsetes ja minimaalsetes operatiivsetes temperatuurides, mis on välja toodud joonisel 3. Operatiivsed ruumitemperatuurid erinevad nelja tarkvara vahel 1-2 °C [17].



Joonis 2. Nelja erineva modelleerimistarkvara tsoonide defineerimine.

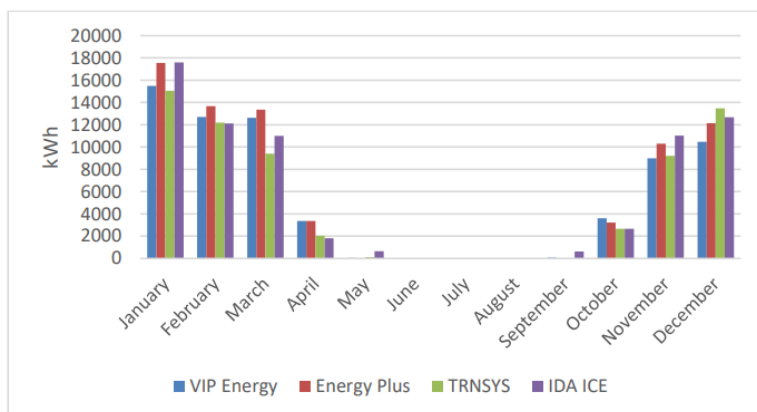
	VIP Energy	Energy plus	TRNSYS	IDA-ICE	Average of four models	Average for three models*
Operative living area temperature						
Average	22.7	22.7	22.1	23.7	22.8	22.5
max	27.0	27.4	25.9	27.6	27.0	26.8
min	20.4	20.1	20.4	21.0	20.5	20.3
Operative common area temperature						
Average	21.5	21.9	21.4	22.9	21.9	21.6
max	27.0	27.4	25.9	27.6	27.0	27.3
min	17.4	18.4	18.7	19.9	18.6	18.2
* Average of three models excluding the model with largest difference with average of four models						
Note: The values with the largest differences with the average of four models are highlighted.						

Joonis 3. Elu- ja üldkasutatavate ruumide aasta keskmised, maksimaalsed ja minimaalsed operatiivsed temperatuurid uuringumudelite jaoks.

IDA ICE annab suurima erievuse keskmiste, maksimaalsete ja minimaalsete eluruumi operatiivsete temperatuuride vahel ning TRNSYS annab suurima erinevuse maksimaalse operatiivse temperatuuri poolest. Üldkasutatava ruumi temperatuuri

muster on ligikaudu sama, mis eluruumide puhul. IDA-ICE annab suurimad erinevused nii keskmises kui ka minimaalses operatiivses ühisruumi temperatuuris võrreldes teiste mudelitega, samas kui TRNSYS annab suurima operatiivse temperatuuri erinevuse võrreldes teiste mudelitega. Näiteks IDA-ICE puhul on üldkasutatav tsoon kogu hoone jaoks üks tsoon ja ühisruumi läbivat põrandat/lage ei ole. Seega ei võeta arvesse ühisruumi põrandate ja lae sisemise soojusmassi mõju. Nendele erinevustele võivad kaasa aidata ka erinevad arvutusvõrrandid hoonesiseste soojusülekannete ja soojuskadude kohta igas simulatsioonivahendis [17].

Joonisel 4 on välja toodud ruumide küttevajadused modelleeritud hoone jaoks. Uuritava hoone aastane ruumide küttevajadus on VIP-Energy, EnergyPlus, TRNSYS 16 ja IDA-ICE hinnangul vastavalt 40, 44, 38 ja 42 kWh/m², mis annab keskmiselt 41 kWh/m². Võrreldes keskmisega annab EnergyPlus mudelitest suurima erinevuse. EnergyPlusi väljajätmisel oleks arvutada keskmiseks 40 kWh/m², mis oli VIP-Energy poolt arvatud tulemuseks. Antud näitest saab selgelt järeldada, et ühe hoone energiatarbe arvutustulemused, kasutades erinevaid modelleerimis tööriistu, erinevad kindlal määral üksteisest [17].



Joonis 4. Ruumi küttevajadus modelleeritud hoone jaoks neljas simulatsioonitööriistas.

Tegeledes mittetüüpsete ja keerukamate hoonetüüpidega, siis eelistada tuleks EnergyPlus ja TRNSYS tarkvarasid. Eelmainitud tarkvarasid saab kasutada energia varustussüsteemide integreerimiseks ning nende mõlema eelis seisneb selles, et neil on olemas graafiline visuaalne liides, võimalus integreerida neid teiste tarkvaradega ja võimalus lisada matemaatilisi alam-moduleid mudelile [17]. EnergyPlus tarkvara kasutatakse laialdaselt ehitussimulatsioonide tegemiseks, aga ka ülekuumenemise uuringutes. Energyplus modelleerimistarkvara abil on võimalik analüüsida soojusjuhtivust, konvektsiooni, infiltartsiooni, varjestust, päikesekiirgust ning elanike käitumist [20] [21].

1.3 Arvutuslik kavandamine hoone toimivuse hindamiseks

Antud peatükis selgitatakse lähemalt arvutusliku kavandamise olemust, selle ajalugu ning selle kasvavat tähtsust ehitussektori valdkonnas.

1.3.1 Esimesed arvutusliku kavandamise meetodid

Arvutuslik kavandamine on multidistsiplinaarne valdkond, mis keskendub keerukate inseneriprobleemide lahendamiseks arvutuslike mudelite ja simulatsioonide arendamisele ja rakendamisele. Arvutusliku kavandamise tehnika integreerib teadmisi matemaatikast, arvutiteadusest ja inseneriteaduste distsipliinidest, et kavandada, analüüsida ja optimeerida süsteeme ning protsesse. Arvutuslik kavandamine mängib olulist rolli mitmesugustes tööstusharudes, võimaldades toodete, protsesside ja tehnoloogiate tõhusat kavandamist ja analüüsi [3].

Juhised ja rusikareeglid olid esimesed meetodid, mida kasutati hoonete projekteerimisel. Tavaliselt koosneb see üldistatud väidetest, diagrammidest või tabelitest, mis põhinevad ulatuslikel empiirilistel uuringutel. Selle eesmärk on anda insenerile lihtsustatud teavet ja juhiseid. Lihtsustatud rusikareegleid ja disainijuhiseid kasutavad siiani mõned koodid ja standardid, nagu ASHRAE standardid USA-s ja Saksa Standardiinstituudi (DIN) standardid Saksamaal. Üksikasjalikke käsiraamatuid kasutatakse tavaliselt arhitektide, inseneride ja disainerite projekteerimise abivahenditena [22].

Esimesed käsiraamatud on kirjutatud aastatel 1957 ja 1963, kus räägiti kliima mõju tähtsusest ehitatavale hoonele ja juhistest varjestuselementide kasutamiseks. G. Z. Brown esitas veel ühe kasuliku ja hõlpsasti kasutatava juhise oma raamatus „Päike, tuul ja valgus“, milles ta esitas mitmeid lähenemisviise, mis on abiks inseneridele, kes soovivad arvestada kliimategureid projekteerimisprotsessi varases staadiumis. Kolmas väljaanne avaldati 2014. aastal, pakkudes rohkem näiteid ja asjakahasemaid meetodeid [23].

Juhised sisaldavad soovitusi orientatsiooni, ehitusasendi, hoone kõrguse, hoone kuju, fassaadi kontseptsiooni, aknapinna suuruse ja proportsiooni, päikesekaitse, klaaside kvaliteedi, isolatsioonistandardi, õhuvahetuse ja ventilatsiooni jms kohta. Vaatamata autorite esitatud igakülgetele ja kasulikele teadmistele on pakutud juhised väga üldistatud. Sellised juhised osutusid kiireks ja kasulikuks kavandamise alguses ning neid kasutavad siiani õpilased, õpetajad ja praktikud. Juhised ja käsiraamatud on tavaliselt

üldistaud tüüpilise ruumi või prototüübi arvutuste põhjal, mis ilmtingimata ei arvesta projekteerijate poolt kasutatavat konkreetset vormi, konteksti ja hoonesiseseid süsteeme [24].

Mittestandardsete ja ainulaadsete kujundusprobleemide puhul võib lihtsustatud juhiste kasutamine viia valesti informeeritud projekteerimisotsuste tegemiseni. Projekteerijate kohustus on tagada, et juhised kehtivad käesoleva juhtumi puhul. Kui on vaja täpsemaid tulemusi, mis on seotud tegeliku disainiga, siis kerkibki esile arvutusliku kavandamise järgmine etapp, milleks on hoone energiasimulatsioonid [24].

1.3.2 Hoone simuleerimine ja optimeerimine

Hoonete projekteerimise keerukuse tõttu ei piisa enam lihtsatest rusikareeglitest ja juhistest. Selleks, et tekiks parem arusaam hoone toimivusest tuleb teha täpsemaid arvutusi. Kiire ja kasvav areng arvutustööstuses algatas simulatsioonitarkvarade tekkimise. Simulatsiooni defineeritakse kui reaalse elu toimingut või süsteemi jäljendamise protsessi kindla perioodi jooksul [24].

Tänapäeval enamasti arvutiga tehtud simulatsiooniprotsess sisaldab tavaliselt tüüpilist mudelit, matemaatilisi mudeleid või käitumist kirjeldavaid võrrandeid; meetod nende matemaatiliste võrrandite lahendamiseks ja lõpuks tulemuste visualiseerimine. Simulatsioonitööriistad on välja töötatud hoone toimivuse peaaegu kõigi aspektide hindamiseks, näiteks energiaanalüüs, päevavalgus, ventilatsioon, siseõhu kvaliteet ja akustika [24].

Traditsioonilises optimeerimisprotsessis leitakse antud funktsiooni miinimumid või maksimumid spetsiaalsete algoritmide abil. See funktsioon, mida tavaliselt nimetatakse sihtfunktsiooniks, võib sõltuda mis tahes arvust parameetritest ja mis tahes parameetrite väärtuste kombinatsioonist, mida määratletud otsinguruumis peetakse teostatavaks lahenduseks. Optimaalne lahendus on teostatav parameetrite kogum, mis minimeerib (või maksimeerib) eesmärgifunktsiooni. Probleemil ei pruugi olla ühte ainulaadset lahendust. Sellel ei pruugi olla kas üldset lahendust, lõpmatu arv lahendusi või lõplik arv lahendusi. Mitme erineva probleemi lahendamisel korraga tuleb kasuks mitme eesmärgiline optimeerimine [24].

Mitme eesmärgiga optimeerimine jagab keeruka süsteemi mitmeks elementaarseks alamsüsteemiks. Alamsüsteemi lahendamise protseduur on sageli hästi teada ja lihtsamini lahendatav. Erinevalt ühe eesmärgi optimeerimisest ei anna mitme eesmärgi optimeerimine üht optimaalset lahendust, vaid terve komplekti samaväärse kvaliteediga

võimalikke lahendusi. See lähenemisviis on arhitektuurilise disaini, aga ka projekteerija vaatenurgast väga asjakohane protsess, kus otsused võetakse vastu konfliktsete objektide vahelisi kompromisse kaaludes [24].

1.4 Parameetiline modelleerimine

Antud peatükis räägitakse lähemalt parameetrisest modelleerimisest ja selle võimekusest analüüsida mittetüüpseid olukordi ja hoonetüüpe.

Piisava teabe esitamine projekti keskkonnategevuse tulemuslikkuse kohta projekteerimise varases etapis on olulise tähtsusega. Hoone üldine suutlikkus/toimimine on tundlikum varajases projekteerimises tehtud muudatuste suhtes, kuna muudatused hilisemates projekteerimisetappides on tavaliselt piiratud, kulukamad ja aeganõudvamad. Aja jooksul on välja töötatud mitmeid otsustustoetuse tööriistu, et aidata projekteerijatel ja arhitektidel teha varajases projekteerimisetapis teadlikke otsuseid. Tänapäeval on projekteerijatele saadaval suur hulk modelleerimistööriistu erineva keerukusastmega. Enamik projekteerimisotsuste tugi- ja simulatsioonitööriistu on aga väga piiratud modelleerimisvõimalustega. Parameetrisest modelleerimise kasutamine seevastu võimaldab suuremat paindlikkust tegeleda ebastandardsete olukordadega [24].

Parameetiline modelleerimine on meetod, mida kasutatakse paljudes disaini valdkondades nagu inseneriteadus, arhitektuur ja arvutigraafika. See meetod võimaldab disaini kergesti muuta, kohandades parameetreid. Parameetiline modelleerimine toetub matemaatilistele võrranditele, et määratleda seoseid erinevate disainielementide vahel, võimaldades inseneridel kiiresti muuta objektide mõõtmeid, kuju ja muid omadusi, lihtsalt muutes eelseadistatud muutujaid. See protsess teeb disainialternatiivide uurimise, lahenduste optimeerimise ja korduvate ülesannete automatiseerimise palju tõhusamaks [22].

1.4.1 Algoritmi ja skriptimise konseptsioonid

Parameetrist disaini võib defineerida kui assotsiatiivse geomeetria parameetrisest struktuuride moodustamise protsessi, mis genereerib soovitud disainiobjektide geomeetria. Skriptimine on PDT (parameetrisest disaini mõtlemise) üldteooria sõnastamisel oluline komponent. Parameetrisest skeemis suhtleb kujundaja parameetrisest modelleerimissüsteemiga (nagu Rhino/Grasshopper), kasutades visuaalseid kodeerimissümboleid. Disaini kujutise genereerib seejärel süsteemi Rhino 3D-modelleerimiskomponent. Grasshopperi süsteemi parameetiline võime võimaldab

kujundust genereerida ja muuta lihtsalt parameetrite muutmise kaudu, selle asemel, et suuri koguseid koodi ümber kirjutada. See on iseloomulik tüüpilisele visuaalse mõtlemise protsessile, kus skripti parameetiline modifikatsioon säilitab peamised parameetrilised seosed, mis on algselt määratletud [25].

Kokkuvõtteks on PDT parameetrilise disaini põhimõisted ja põhimõtted määratletud allpool:

1. Algoritmide mõistmine ja kohandamine disainis: Insenerid kasutavad loovuse tõhustamiseks erilist tüüpi arvutiprogrammi, mida nimetatakse "algoritmiliseks parameetriliseks skeemiks". See tööriist aitab neil oma lahendusi pidevalt kohandada ja täiustada.
2. Lahenduste uurimine: See protsess võimaldab inseneridel katsetada erinevate lahendustega. Nad saavad muuta kujundeid, struktuure, suurusi ja mustreid, et näha, mis kõige paremini toimib.
3. Automaatsed uuendused töövoos: Kaasaegsed disainivahendid uuendavad ja muudavad lahendusi automaatselt, sarnaselt sellele, kuidas kunstnik võib tagasi astuda, mõelda ja seejärel oma kunstiteost kohandada. Sellised tööriistad nagu Grasshopper jälgivad kõiki disaini muudatusi, mis aitab inseneridel oma tööd hinnata ja täiustada.

Parameetrilist disaini on esitletud disainimõtlemise uue paradigmana, mis integreerib ja edendab teatud varasemate disainimõtlemise mudelite kontseptsioone. Selle valdkonna disainiuuringud peaksid muutuma strateegilisemaks, arvutuspõhisemaks ja tulemuspõhisemaks. Neid uuringuid peaks juhtima teadmiste loomine, mis on seotud kindlate funktsionaalsete nõuetega ja olenevad konkreetsest olukorrast. Parameetrilise disaini tööriistad ja meetodid on hakanud mõjutama seda, kuidas disaini õpetatakse ja praktiseeritakse. Samuti on skriptimine ja tööriistade arendamine muutumas üha olulisemaks oskuseks nii teaduses, hariduses kui ka igapäevases praktikas [25] [26].

1.4.2 Visuaalse esitluse kontseptsioonid

Traditsioonilised disaini esitlused keskenduvad visuaalsele kujundusele, kuid nad ei näita selgelt, kuidas disaini struktuur ja valmistamise loogika toimivad. Parameetrilised disainisüsteemid toovad selle loogika esile. Lisaks visuaalsele esitlusele pakuvad parameetrilised süsteemid ka spetsiifilisi disainiprotsesse, nagu jõudlusanalüüs ja tõhususe simulatsioon, mis on seotud generatiivsete protsessidega. Need süsteemid võimaldavad näidata erinevaid disainiprotsesse, sealhulgas nii koodi kui ka generatiivsete ja tõhususe projekteerimisprotsesside visualiseerimist [25].

Parameetriline skeem toetab topoloogilist varieeruvust, mida saab rakendada nii protsessile kui ka vormile. Parameetriline projekteerimisprotsess koosneb seega kahest osast: parameetrilise skeemi kujundamine soovitud lahenduse kavandamiseks ja interaktiivne skeemi parameetrite muutmise protsess. Lahendusruumi muutmisel ja täiustamisel värskendatakse samaaegselt skriptikoodi ja visuaalset kuvandit. Selle tulemusena on parameetrilise disaini tehnoloogiast ja meetoditest saanud digitaalse disaini mõtlemise nurgakivi. Praegused tarkvarapaketid ja parameetrilised pistikprogrammid on loodud selliste interaktiivsete liideste pakkumiseks [25] [27].

Parameetriline disain kasutab disainiprotsessi, mis põhineb algoritmilistel reeglitel, mida insener/projekteerija ise määratleb. Erinevalt traditsioonilisest disainist, kus muudatused tehakse otse objektile, võimaldab parameetriline disain muuta objekti läbi reeglite komplekti. Insener saab muuta parameetrite väärtusi või nende vahelisi seoseid, misjärel süsteem automaatselt kohandab 3D geomeetrilist mudelit ja selle visuaalset esitust. Selline lähenemine erineb oluliselt traditsioonilisest paberil või 3D modelleerimises tehtavatest muudatustest. Iga parameetri muutus mõjutab kohe kogu struktuuri, kuna see on arvutuslikult seotud teiste reeglitega, mis nõuab insenerilt algoritmilise mõtlemise oskust [25].

Jõudluspõhise vormi genereerimise mudeleid toetavad praegu parameetrilistes kujunduskeskkondades spetsiaalsed visuaalsed pistikprogrammid. Pistikprogrammid nagu Kangaroo (Form-finding with Computational Physics); Karamba (Structural Design); ARCH-CFD (Computational Fluid Dynamics); Pachyderm (Acoustical Simulation); Ladybug and Honeybee (Sustainable Environmental Design) jne on olemas selleks, et pakkuda analüütilist võimekust PDT konkreetsete protsessimudelite toetamiseks. Kõigis parameetrilise disaini pistikprogrammides, nagu Kangaroo, Karamba, Ladybug ja HoneBee, genereeritakse visuaalse pildi interaktiivne kuvamine paralleelselt interaktiivse programmeerimisaknaga visuaalse skriptikoodi muutmiseks. Lisaks saab kujutise parameetrilisi variatsioone värskendada ja genereerida samaaegselt visuaalsel kuval paralleelselt koodi muutmise ümbertöötlusprotsessis [25].

2 LÕPUTÖÖ METOODIKA

Lõputöö eesmärgi saavutamiseks, milleks on arvutusliku kavandamise mitme-etapilise töövoogu arendamine suvise ülekuumenemise kontrollarvutuseks, on lõputöö jagatud neljaks etapiks:

1. Uurimistöö eesmärgi ja ülesannete sõnastamine.
2. Päikesekiirguse analüüsi: mudeli koostamine ja simuleerimine.
3. Ülekuumenemise riskiga eluruumide modelleerimine ja simuleerimine.
4. Tulemuste hindamine, põhijärelduste sõnastamine ja lõputöö vormistamine.

Lõputöö esimeses etapis tehakse kirjanduse ülevaade, kus tuuakse välja, millised on eestis suvise ülekuumenemise arvutusmeetodid ning miks seda vaja üldse arvutada. Seejärel räägitakse täpsemalt modelleerimistarkvaradest ja nende usaldusväärsusest. Viimases kahes kirjanduse ülevaate peatükis käsitletakse arvutusliku kavandamise põhikontseptsioone ja parameetrilist modelleerimist, mille abil lõpuks viiakse läbi ka tüüpikorterelamu suvise ülekuumenemise kontrollarvutus.

Tüüpikorterelamu mudel, millele tehakse päikesekiirguse analüüs ning suvise ruumitemperatuuri kontrollarvutus, on kokku pandud arvutigraafika tarkvaras Rhino ning simulatsioonide tegemiseks on kasutatud visuaalse programmeerimise tarkvara Grasshopper.

Rhinoceros on 3D arvutigraafika ja arvutipõhise disaini tarkvara, mille arendajaks on Robert McNeel & Associates. Rhinocerosi geomeetria põhineb NURBS matemaatilisel mudelil, mis keskendub matemaatiliselt täpsete kõverjoonte ja vabakujuliste pindade tekitamisele. Rhinocerosit kasutatakse peamiselt arhitektuuris, tööstuslikus projekteerimises ja toodete modelleerimiseks [28].

Grasshopper on visuaalne programmeerimise keel ja keskkond, mis töötab Rhinocerosi programmi sees. Grasshopper võimaldab luua programme eelprogrammeeritud koodiplokke lõuendile lohistades ning nende väljundeid ja sisendeid omavahel ühendades. Grasshopperit peamiselt kasutatakse generatiivsete algoritmide loomiseks kunsti või arhitektuuri tarbeks. Samuti kasutatakse seda ehitusinseneride, arhitektide ning tootjate poolt parameetriliseks modelleerimiseks, valgustuse toimivuse ning energiasäästliku ehituse analüüsimiseks [28].

Lõputöö teises etapis viiakse läbi päikesekiirguse analüüs. Päikesekiirguse analüüsi tegemiseks kasutatakse Grasshopperi enda lisa nimega Ladybug, mis on võimaldab visualiseerida ja analüüsida ilmastiku mõju ehitatavale hoonele. Ladybug'i abil on võimalik luua diagramme, geomeetriauringuid, analüüsida päiksevalguse jõudmist ruumidesse ning varjestuse mõju hoone soojuslikule mugavusele [29].

Päikesekiirguse mudeli simuleerimise käigus saadakse teada, millised on kõige kriitilisemad korterid, kus tekib risk ülekuumenemisele ehk kus piirtemperatuuri 27°C ületatakse tõenäoliselt rohkem kui 150 °Ch (kraadtundi) ajavahemikul 1. juunist 31. augustini.

Lõputöö kolmandas etapis viiakse läbi ülekuumenemis riskiga ruumide simulatsioonid. Ülekuumenemisriskiga olevad korter/ruumid simuleeritakse kõigepealt IDA ICE modelleerimistarkvaras ning seejärel Grasshopperi visuaalse programmeerimise tarkvaras, mis põhineb EnergyPlus modelleerimistarkvaral. Selleks, et Grasshopperis saadud tulemusi võrrelda IDA ICE omadega, on grasshopper kalibreeritud vastavalt IDA ICE'le.

Enne simulatsioonide läbiviimist eeldatakse, et arvutusliku kavandamise meetodeid kasutades saab luua lihtsustatud ja kiirendatud töövoos, mis aitaks tulevikus automatiseerida suvise ülekuumenemise arvutusprotsessi ehitatavatel ja rekonstrueeritavatel hoonetel.

Antud lõputöö tulemuste peatükis visualiseeritakse kolme erineva meetodiga saadud ülekuumenemisriskiga ruumid ning võrreldakse kahete erinevat modelleerimistarkvara kasutades saadud tulemusi.

Käesoleva lõputöö arutelu ja kokkuvõtte peatükkides tuuakse välja, millised on arvutusliku kavandamismetoodikate eelised, visualiseeritakse tüüp korterelamu ülekuumenemisriskiga ruumid ning hinnatakse saadud tulemusi.

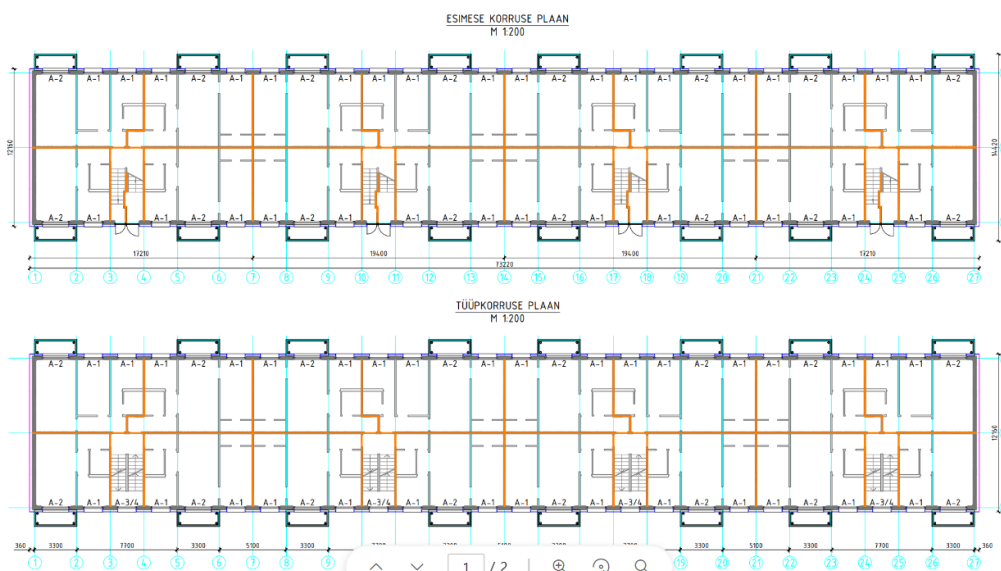
2.1 Pilootala hooned ja lähteandmed

Antud lõputöö eesmärgi saavutamiseks viiakse vajalikud simulatsioonid läbi tüüp korterelamule, milleks on viie korruseline ja nelja trepikojaga mustamäe paneelmaja aadressiga Akadeemia tee 14. Tüüp korterelamu asukoht ja korruseplaan on näidatud vastavalt joonistel 5 ja 6. Tüüp korterelamu valiku aluseks on eelkõige asjaolu, et tegemist on vanema majaga, mille konstruktsioonid ei vasta enam tänapäevastele nõuetele ja kus puudub jahutus. Sellist tüüpi hooned on Mustamäe piirkonnas väga

palju ning lähitulevikus on vaja hakata neid rekonstrueerima. Mustamäel asuvad paneelmajad on suuresti sarnased, erinedes vahel ainult korruste ja trepikodade arvu poolest. Rhino graafilises tarkvaras kokku pandud tüükorterelamu eeliseks on see, et selle parameetrid on kergesti muudetavad.



Joonis 5. Tüükorterelamu asukoht.



Joonis 6. Tüükorterelamu korruse plaanid.

Selleks, et simulatsiooni läbi viia on vaja koostada tüükorterelamu geomeetria. Eraldi tuleb defineerida kõik erinevad seinatüübid, aknad, uksed, rõdud jms. Tüükorterelamu andmed on välja toodud tabelis 1.

Vajalikud andmed, mis ei ole seotud konkreetse hoone konstruktsiooni ja ehituslike omapäradega, võetakse määrusest nr 58 „Hoone energiatõhususe arvutamise metodika“ [11].

Tabel 1. Tüüpkorterelamu andmed.

Üldinfo	Ehitusaasta	1963
	Maapeale osa korruste arv	5
	Maa-aluse osa korruste arv	1
Pinnad	Korterite arv	80
	Korteritetüübid	1-toalised 2-toalised 3-toalised
	Üldkasutatav pind (m ²)	1011,8
	Suletud netopind (m ²)	4519,2
Süsteemid	Välispiirded	Raudbetoonpaneelid
	Kütteallikas	Kaugküte
	Elekter	-
	Ventilatsioon	loomulik, akendega
	Rekonstrueerimise aasta	-

2.2 Päikesekiirguse ja ülekuumenemise modelleerimine ja simuleerimine

Peale geomeetria koostamist ja sellele õigete andmete sisestamist hakatakse koostama päikesekiirguse analüüsi mudelit. Geomeetriamalli paika saamisel on järgmiseks sammuks see simulatsiooniks ette valmistamine. Õigeks tuleb määrata hoone paiknevus ilmakaarte suhtes, simulatsiooni jooksutamise periood ja ajasamm, kasutatav kliimafail, simulatsiooni tüüp (ehk mis parameetrit tahetakse analüüsida).

- Antud tüüpkorterelamu akende ja rõdudega fassaadid on lääne ja ida ilmakaare suunalised;
- Simulatsiooni jooksutamise periood on 1.juuni – 31.august;
- Päikesekiirguse analüüsiks kasutatavaks kliimafailiks on EstonianTRY 1990-2020;
- Simulatsiooni tüübiks on „solar radiation“ ehk päikesekiirgus.

Päikesekiirguse analüüsi käigus määratakse kindlaks, kui palju päikesekiirgust langeb tüüpkorterelamu pinnale (kWh/m²) ning selle järgi saab kindlaks määrata, millised on kõige kriitilisemad korterid, kus hiljem temperatuuri kontrollarvutust tehakse.

2.3 Suvine ülekuumenemine

Eluhoonete suvise ruumitemperatuuri nõue loetakse täidetuks, kui ruumitemperatuur ei ületa piirtemperatuuri 27°C rohkem kui 150 °Ch (kraadtundi) ajavahemikul 1. juunist

31. augustini. Ruumitemperatuuri tunnipõhised väärtused leitakse hoone dünaamilise simulatsiooni teel spetsiaalse arvutustarkvara abil.

Tõendamaks, et ülekuumenemine on projekteeritavas korterelamus välditud, on kohustuslik teostada suvise ruumitemperatuuri kontrollarvutus tüüpruumidele või -korteritele. Selleks valitakse välja vähemalt kaks tüüpset eluruumi (ruumipõhine arvutusmeetod) – üks magamistuba ja üks elutuba – või kriitilised korterid (korteripõhine arvutusmeetod), millele teostatakse dünaamilise simulatsioonitarkvara abil suveperioodile tunnipõhine ruumitemperatuuri arvutus vastavalt EV määrusele „Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika“ [1].

Antud lõputööd viiakse suvise ruumitemperatuuri kontrollarvutuse simulatsioonid läbi kolme erineva meetodiga:

- 1) Mudel, kus ei ole aknad avatavad ja terve korter on üks tsoon;
- 2) Korteri põhine meetod;
- 3) Ruumipõhine meetod.

Lisaks viiakse vajalikud simulatsioonid läbi EstonianTRY 1990-2020 kliimafailiga ning EstonianTRY 2080 kliimafailiga.

2020. aasta algusest on uute hoonete energiatõhususe miinimumnõudeks A-klassi hoone ehk liginullenergia hoone. Liginullenergiahoone on parima võimaliku ehituspraktika kohaselt energiatõhususe- ja taastuvenergiatehnoloogia lahendusega tehniliselt mõistlikult ehitatud hoone. Oluliselt rekonstrueeritavad hooned aga peavad saavutama C-klassi [6].

Sellest tulenevalt tehakse ruumitemperatuuri kontrollarvutused tüüpkorterelamule kolmele erinevale olukorrale. Kolme erineva olukorra konstruktsioonielementide erinevused on näidatud tabelis 2.

- 1) Korter, mille konstruktsioonielemendid vastavad algselt ehitatud väärtustele;
- 2) Korter, mille konstruktsioonielemendid vastavad C-klassi hoonele;
- 3) Korter, mille konstruktsioonielemendid vastavad A-klassi hoonele.

Tabel 2. Konstruksioonelementide erinevused kolme erineva olukorra puhul.

Konstruksioonelemendid	Enne reno.	C-klass	A-klass
Akna U-arv (W/m ² K)	1,7	0,9	0,7
Akna g-arv	0,55	0,50	0,45
Klasspakett	2-kordne	3-kordne	3-kordne
Seina U-arv (W/m ² K)	1,2	0,2	0,11
Seina paksus (mm)	250	500	650
Katuse U-arv (W/m ² K)	1,7	0,17	0,09
Katuse paksus (mm)	200	350	350
Õhulekke arv q50	3	1,5	1,5

Enne ruumitemperatuuri kontrollarvutuse läbiviimist on vaja defineerida järgmised parameetrid: kasutatav kliimafail, ruumi andmed (ruumi tüüp ja pindala), akende tehnilised andmed (klaaspaketi soojusläbivus, päikeseläbivustegur, otsese päikeseläbivustegur, nähtava valguse läbivustegur), pindala ja osakaal ruumi pindalast, varjestuselemendid ning ruumisisesed vabasoojused (inimeste arv, valgustus, seadmed, kasutusaste, kasutusaeg).

2.4 IDA ICE parameetrid

IDA ICE tarkvaras modelleeritakse lihtsustuse mõttes ja kiirema analüüsi saamiseks vaid kriitiline korter, mitte terve hoone. Arvutused teostatakse hoone tüüpilisele kasutusele, st vastavalt hoone kasutamise otstarbele, hoone ja tehnosüsteemide kasutusajale, seadeväärtustele ning vabasoojuskoormustele. Kortereelamu tüüpiline kasutus ja sellele vastav suurim soojuseraldus köetava pinna ruutmeetri kohta on näidatud tabelis 3. Elamute tüüpiline kasutus olenevalt hoone tüübist ja sellele vastav suurim soojuseraldus köetava pinna ruutmeetri kohta on näidatud tabelis 4 [1].

Tabel 3. Eluhoonete tüüpiline kasutus ja sellele vastav suurim soojuseraldus köetava pinna ruutmeetri kohta.

Hoone kasutus-otstarve	Kasutusaeg			Kasutus-aste	Valgustus W/m ²	Seadmed W/m ²	Inimesed		
	kellaaeg	h/24h	p/7p				W/m ²	m ² /in	in/m ²
Väikeelamu <120 m ²	00:00-00:00	24	7	0,6	8	3	3	28,3	0,0353
Väikeelamu 120 - 220 m ² ja ridaelamu	00:00-00:00	24	7	0,6	8	2,4	2	42,5	0,0235
Väikeelamu >220 m ²	00:00-00:00	24	7	0,6	8	2	1,4	60,0	0,0167
Kortereelamu	00:00-00:00	24	7	0,6	8	3	3	28,3	0,0353

Tabel 4. Kasutusastmed ja kasutusprofiilid simulatsioonarvutuste jaoks.

Kellaeg	Elamu valgustuse kasutusprofiil	Elamu seadmete kasutusprofiil	Elanike kasutusprofiil
00:00-01:00	0	0,5	1
01:00-02:00	0	0,5	1
02:00-03:00	0	0,5	1
03:00-04:00	0	0,5	1
04:00-05:00	0	0,5	1
05:00-06:00	0	0,5	1
06:00-07:00	0,15	0,5	0,5
07:00-08:00	0,15	0,7	0,5
08:00-09:00	0,15	0,7	0,5
09:00-10:00	0,15	0,5	0,1
10:00-11:00	0,05	0,5	0,1
11:00-12:00	0,05	0,6	0,1
12:00-13:00	0,05	0,6	0,1
13:00-14:00	0,05	0,6	0,2
14:00-15:00	0,05	0,6	0,2
15:00-16:00	0,05	0,5	0,2
16:00-17:00	0,2	0,5	0,5
17:00-18:00	0,2	0,7	0,5
18:00-19:00	0,2	0,7	0,5
19:00-20:00	0,2	0,8	0,8
20:00-21:00	0,2	0,8	0,8
21:00-22:00	0,2	0,8	0,8
22:00-23:00	0,15	0,6	1
23:00-24:00	0,15	0,6	1

Külmasildade soojusläbivuse väärtustena kasutatakse üldjuhul vastavalt konstruktsiooni liitekohtadele teostatud arvutuste järgseid väärtusi. Täpsemate andmete puudumisel võib arvutamisel kasutada määruses nr 58 toodud väärtusi [1].

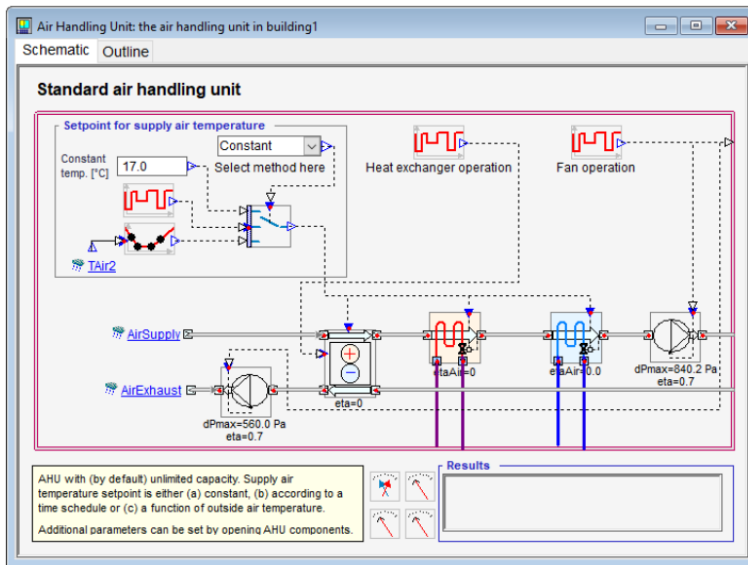
Välispiirde ebatihedusest põhjustatud infiltratsioon võetakse arvutustes arvesse aasta keskmise, st konstantse õhuvooluhulgana. Kui välispiirde õhuleket ei ole mõõdetud või muul viisil selle väärtust tõendatud, tehakse energiaarvutus määruses nr 58 toodud hoone õhulekkearvu baasväärtusega. Juhul kui projekteeritud õhulekkearv on suurem kui määrusejärgne baasväärtus, kasutatakse projekteeritud väärtust. Kui õhuleke on mõõdetud vastavalt standardile EVS-EN 13829 või on tõendatud muul nõuetekohasel viisil maja ehitaja või koostaja poolt, kasutatakse energiaarvutuses vastavalt mõõdetud või tõendatud väärtust [1].

Elamute puhul võetakse akna kaudu tuulutamist arvesse vaid tuulutusakna avamisel tuulutusasendisse ning ruumi- ja välisõhu temperatuurivahest tekkivat õhuvahetust. Juhul, kui täpsemad andmed puuduvad, kasutatakse mehaanilise ventilatsioonisüsteemi modelleerimisel järgnevaid parameetreid:

- ventilatsiooni õhuvooluhulk vastavalt määrusele;
- ventilatsiooniseade töötab konstantselt (24h, 7 päeva nädalas);
- temperatuuritõus sissepuhkeventilaatoris +1K;

- soojustagastus 0% (eeldab plaatsoojustagasti korral möödaviigu olemasolu);

Ventilatsiooniseadme mudel IDA ICE modelleerimistarkvaras on näidatud joonisel 7.



Joonis 7. Ventilatsiooniseadme mudel IDA ICE tarkvaras – soojustagasti efektiivsus 0% ($\eta=0$), kütte- ja jahutus kalorifeerid välja lülitatud ($\eta_{Air}=0$).

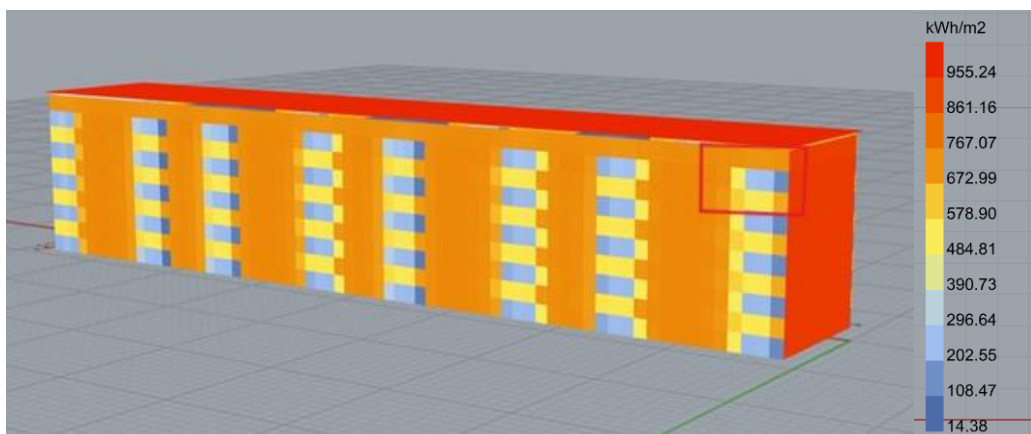
3 Tüüpkorterelamu modelleerimine ja simuleerimine

Antud peatükis esitatakse modelleerimise, simuleerimise ja analüüsi tulemused. Kõigepealt viiakse läbi päikesekiirguse analüüs, seejärel ülekuumenemise kontrollarvutus kriitilistele korteritele ja lõpuks tehakse koodanalüüs kahe erineva simulatsioonitarkvaraga saadud tulemustest.

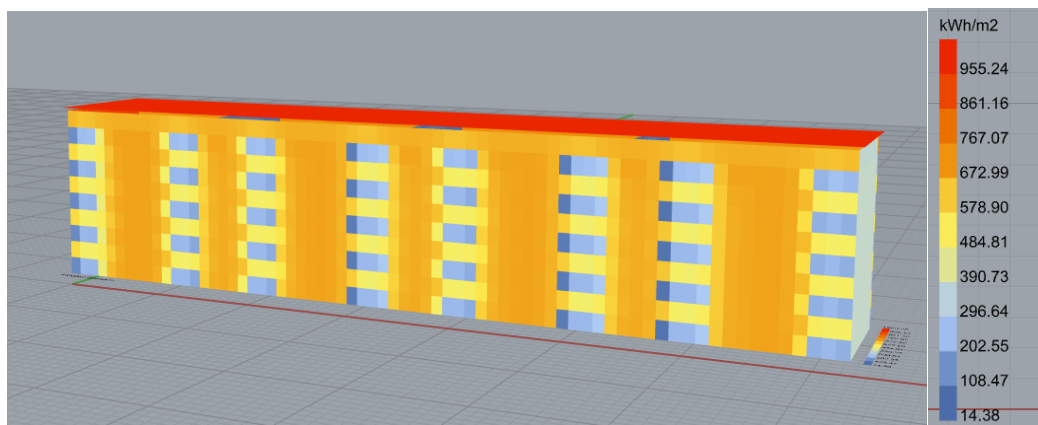
3.1 Päikesekiirguse analüüs

Päikesekiirguse analüüsi käigus tehti aastane simulatsioon tervele hoonele selleks, et näha missugune on päikesekiirguse kogus, mis langeb hoonele. Enne simulatsioonide läbiviimist määratakse õigeks vajalikud parameetrid: kliimafail, akende suurused ning hoone paiknevus ilmakaarte suhtes. Simulatsiooni jaoks on kasutatud kõige uuemat eesti kliimafaili EstonianTRY 1990-2020.

Kõige suurem päikesekiirguse kogus langeb korterelamu katusele ning lõunafassaadile, vastavalt ligikaudu 955 kWh/m^2 ja 861 kWh/m^2 . Tüüpkorterelamu akende ja rõdudega fassaadid on lääne ja ida ilmakaartes, mis on visulaiseeritud joonisel 8. Simulatsiooni tulemusena on näha, et kõige kriitilisemaks korteriks võib pidada viienda korruse kõige lõuna poolsemat korterit (edaspidi Korter 1), mille aknad on suunatud lääne ilmakaarde. Eelkõige sellepärast, et ta on ümbritsetud lõuna ilmakaares asuva välisseinaga ning katusega.



(a)

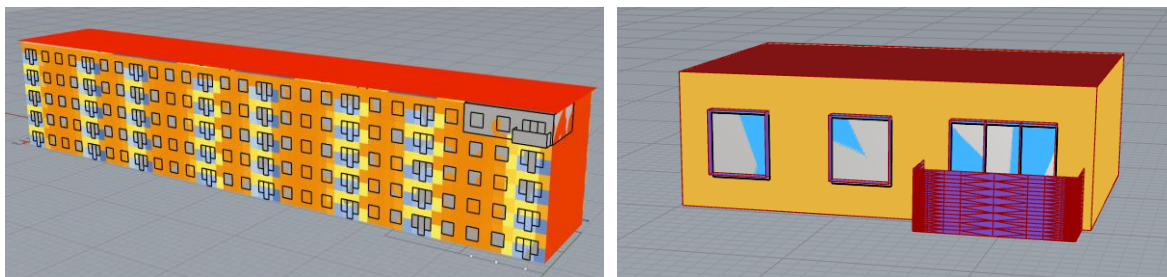


(b)

Joonis 8. (a) Tüüpkorterelamu lääne fassaad; ja (b) ida fassaad.

3.2 Ruumitemperatuuride kontrollarvutus

Päikesekiirguse analüüsi käigus määrati kõige kriitilisema korteri asukoht, kuhu langeb aasta jooksul kõige rohkem päikesekiirgust. Kõige kriitilisema korteri asukoht on visualiseeritud joonisel 9. Tegu on viienda korruse kõige lõunapoolsema korteriga, mille aknad on suunatud lääne ilmakaarde. Sellele korterile (edaspidi Korter 1) tehti ruumitemperatuuri kontrollarvutus, et näha kui suur on risk ülekuumenemisele.



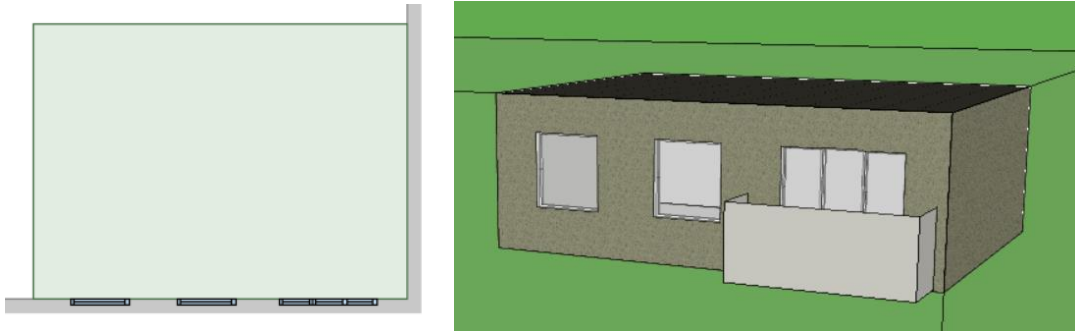
Joonis 9. Korter 1 vaade lääne ilmakaarest.

3.2.1 IDA ICE arvutustulemused

Arvutused teostatakse hoone tüüpilisele kasutusele, st vastavalt hoone kasutamise otstarbele, hoone ja tehnosüsteemide kasutusajale, seadeväärtustele ning vabasoojuskoormustele. Vajalikud väärtused on välja toodud metodika suvise ülekuumenemise IDA ICE parameetrite peatükis.

IDA ICE mudeli tulemused kolme erineva meetodiga:

- 1) *Arvutusmeetod*, kus terve korter on modelleeritud ühetsoonina ja aknad ei ole avatavad. Korter 1 3D mudel ja pealtvaade on visualiseeritud joonisel 10.



Joonis 10. IDA ICE Korter 1 mudel ja tema 1 tsoon.

Tabelis 5 on välja toodud maksimaalsed ja minimaalsed ruumitemperatuurid kolmes erinevas olukorras. Nii kõrgeim temperatuur kui ka madalaim temperatuur kriitilises korteris leiavad aset enne renoveerimist olukorras. See on selgitatav sellega, et sellisel juhul on akna g arv (0,55) kõige kõrgem, mis tähendab, et päikesekiirgusest tulenevat soojust jõuab rohkem ruumi. Ühtlasi on enne renoveerimist olukorras kõige kõrgemad välisseina ja katuse soojuslähivused, mistõttu toimub suur ruumitemperatuuride kõikumine. C – ja A – energiaklassi hoonetel on madala soojuslähivusega konstruktsioonielemendid ning ruumitemperatuuride kõikumine ei ole nii suur. Kõige suurem minimaalne ruumitemperatuur esineb A-energiaklassi olukorras, mis tuleneb sellest, et sellisel juhul on tegu kõige paremini soojustpidava konstruktsiooniga.

Tabel 5. Ühe tsooniga arvutusmeetodi max ja min ruumitemperatuurid.

	Max ruumitemperatuur, °C			Min ruumitemperatuur, °C		
	Enne renoveerimist	C-energiaklass	A-energiaklass	Enne renoveerimist	C-energiaklass	A-energiaklass
Korter 1	33,53	33,88	33,33	20,16	24,23	24,62

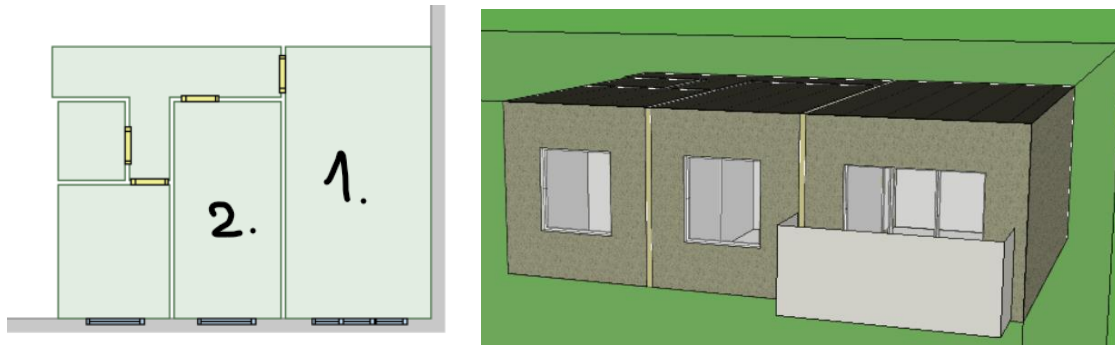
Tabelis 6 on välja toodud temperatuuriliig üle baastemperatuuri kolmes erinevas olukorras. Suvine ruumitemperatuuri ülekuumenemine toimub selle arvutusmeetodi puhul kõigil kolmel juhul. Kõige suurem arv kraadtunde üle 27°C esineb A-energiaklassi konstruktsioonielementidega korteri puhul, mis on seotud jälle välisseina ja katuse madala soojuslähivusega.

Tabel 6. Ühe tsooniga arvutusmeetodi temperatuuriliig üle baastemperatuuri.

Kirjeldus	Temperatuuriliig üle baastemperatuuri 27°C, °Ch		
	Enne renoveerimist	C-energiaklass	A-energiaklass
Korter 1	2108	3559	3883

- 2) *Korteripõhine arvutusmeetod.* Antud juhul modelleeritakse terve korter, sh kõik ruumid eraldi tsoonidena. Ruumide vahele lisatakse ukсед, mis on avatud simulatsiooni vältel (Opening: Always open). Korter 1 3D mudel ja korteripõhise arvutusmeetodi pealtvaade on visuliseeritud joonisel 11. Erisusena ruumipõhisest meetodist, jäävad aknad suletuks. Temperatuuri kontrollarvutus

tehake selle arvutusmeetodi puhul ruumidele 1 ja 2, mis on vastavalt elutuba ja magamistuba. [1]



Joonis 11. IDA ICE Korter 1 korteripõhise meetodi mudel.

Tabeli 7 kohaselt sarnanevad korteripõhise arvutusmeetodi tulemused suuremas osas esimese arvutusmeetodi omadega. Kõige suurem ruumitemperatuuride kõikumine toimub enne renoveerimist olukorras. Antud meetod erineb eelmisest selle poolest, et siin on modelleeritud ruumide vahele uksed, mis on pidevalt avatud ja analüüsitud on kahte ruumi eraldi. Ruumitemperatuuride erinevused kahe ruumi vahel on minimaalsed, kuid igal juhul on magamistuba ruumitemperatuurid kõrgemad. Seda saab selgitada sellega, et magamistuba on pindala poolest väiksem ruum.

Tabel 7. Korteripõhise arvutusmeetodi max ja min ruumitemperatuurid.

Kirjeldus	Max ruumitemperatuur, °C			Min ruumitemperatuur, °C		
	Enne renoveerimist	C-energiaklass	A-energiaklass	Enne renoveerimist	C-energiaklass	A-energiaklass
Korter 1 elutuba	33,08	33,77	32,46	20,88	24,25	24,42
Korter 1 magamistuba	34,90	34,09	33,04	20,90	24,26	24,63

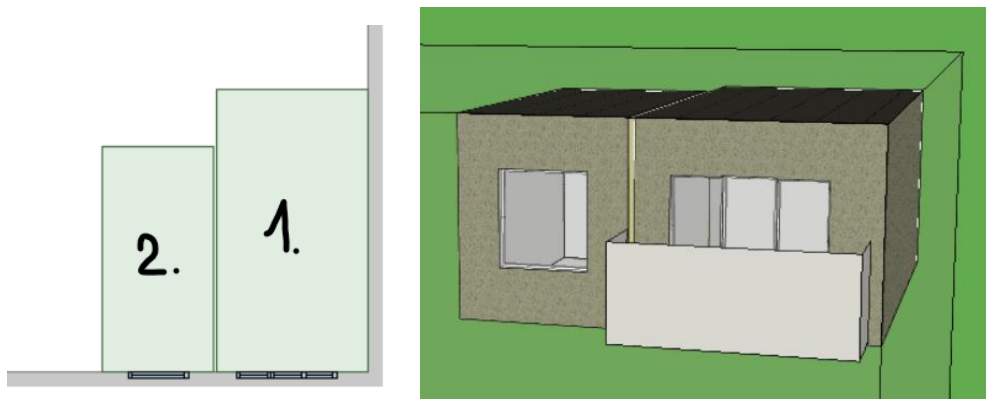
Tabel 8 kohaselt toimub suvine ruumitemperatuuri ülekuumenemine ka selle arvutusmeetodi puhul kõigil kolmel juhul ning kõige rohkem kraadtunde üle 27°C on samuti A-energiaklassi olukorras.

Tabel 8. Korteripõhise arvutusmeetodi temperatuuriliig üle baastemperatuuri.

Kirjeldus	Temperatuuriliig üle baastemperatuuri 27°C, °Ch		
	Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass
Korter 1 elutuba	1517	3329	3550
Korter 1 magamistuba	1740	3645	3868

Võrreldes arvutusmeetodit, kus on terve korter üks tsoon kinniste akendega ja korteripõhistmeetodit, siis saab teha järelduse, et kuigi viimase puhul on modelleeritud eraldi ruumid koos avatud ustega, siis ei oma nende olemasolu ja avatus suurt kaalu suvise ruumitemperatuuri ülekuumenemise arvutamisel.

3) *Ruumipõhine meetod*. Antud meetodi korral modelleeritakse ja simuleeritakse hoone eluruumidest kriitilised tüüpruumid selliselt, et igat ruumi käsitletakse ühe tsoonina ja avasid (uksi) tsoonide vahel ei arvestata. Akende avanemise puhul on määratud selline juhtimisalgoritm, mis tagab akna avanemise ruumitemperatuuril $> + 24 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ja sulgub $< 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ korral, et tagada välisõhu kaudu jahutus ning vältida temperatuuri langemine alla kütte seadeväärtuse $+21 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Korter 1 3D mudel ja ruumipõhise arvutusmeetodi pealtvaade on visualiseeritud joonisel 12. Temperatuuri kontrollarvutus tehakse selle arvutusmeetodi puhul ruumidele 1 ja 2, mis on vastavalt elutuba ja magamistuba. [1]



Joonis 12. IDA ICE Korter 1 ruumipõhise meetodi mudel.

Ruumipõhise arvutusmeetodi põhiline erinevus eelmistega seisneb selles, et selle meetodi puhul on aknad avatavad ning sellest tulenevalt erinevad selle meetodiga saadud tulemused eelmistest oluliselt. Esimene oluline erinevus tuleb välja vaadates ruumide maksimaalseid temperatuure, mis on näitatud tabelis 9. Ruumipõhise arvutusmeetodi puhul on ruumide maksimaalsed temperatuurid ca $1\text{-}3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ väiksemad võrreldes eelmiste meetoditega, mis viitab sellele, et akende avanemise võimalus aitab ruumis vähendada temperatuuri. Suvise ülekuumenemise arvutusjuhendis on öeldud, et arvutustes võib akna avatuseks simulatsioonis määrata 10° [1]. See võib aga osadel juhtudel olla liiga optimistlik lähenemine ning seetõttu on antud lõputöös simuleeritud ka olukord, kus on akna avatuseks määratud 6° . Kõige kõrgemad ja madalamd ruumitemperatuurid on ka selle arvutusmeetodi puhul enne renoveerimist olukorras.

Tabel 9. Ruumipõhise arvutusmeetodi max ja min ruumitemperatuurid.

Kirjeldus	Max ruumitemperatuur, °C			Min ruumitemperatuur, °C		
	Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass	Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass
Korter 1 elutuba (10° avatus)	31,00	28,35	27,66	20,98	20,99	21,48
Korter 1 magamistuba (10° avatus)	31,60	28,96	28,46	20,98	20,99	21,42
Korter 1 elutuba (6° avatus)	31,51	29,24	28,62	20,98	21,00	21,79
Korter 1 magamistuba (6° avatus)	32,17	30,14	29,49	20,98	21,00	21,73

Tabeli 10 kohaselt ei toimu ruumipõhise arvutusmeetodi puhul ülekuumenemist akende 10° avatuse korral kriitilise korteri elutoas ja magamistoas C -ja A - energiaklassi olukorras. Akende 6° avatuse korral ei toimu ülekuumenemist kriitilise korteri elutoas A - ja C - energiaklassi olukorras.

Tabel 10. Ruumipõhise arvutusmeetodi temperatuuriliig üle baastemperatuuri.

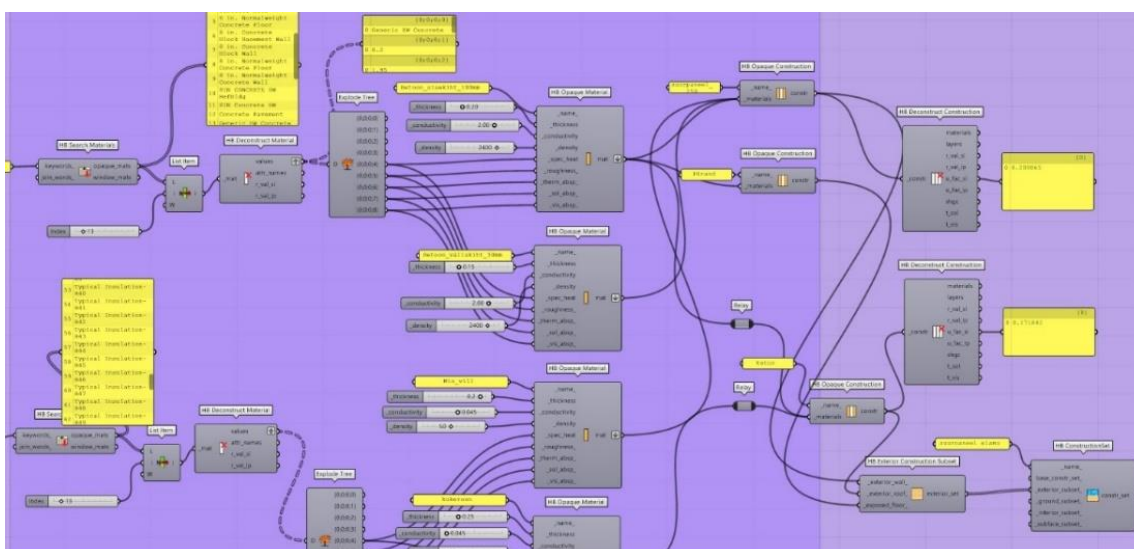
Kirjeldus	Temperatuuriliig üle baastemperatuuri 27°C, °Ch		
	Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass
Korter 1 elutuba (10° avatus)	333	42	10
Korter 1 magamistuba (10° avatus)	522	116	51
Korter 1 elutuba (6° avatus)	527	145	63
Korter 1 magamistuba (6° avatus)	807	296	159

Võrreldes ruumipõhise meetodiga saadud tulemusi eelmiste meetoditega saadud tulemustega, siis saab teha järelduse, et akende avamise võimalus mängib suurt rolli korteri ülekuumenemisel. Ruumide vaheliste uste täielik avatavus ei ole võrdväärne sellega, kui on olemas aknad, mis avanevad siis, kui ruumitemperatuur on üle 24°C. Juhul, kui tegu on korteri või mõne muu elamuga, kus on vähegi võimalik akende avamine, siis võiks eelistada ruumipõhist arvutusmeetodit.

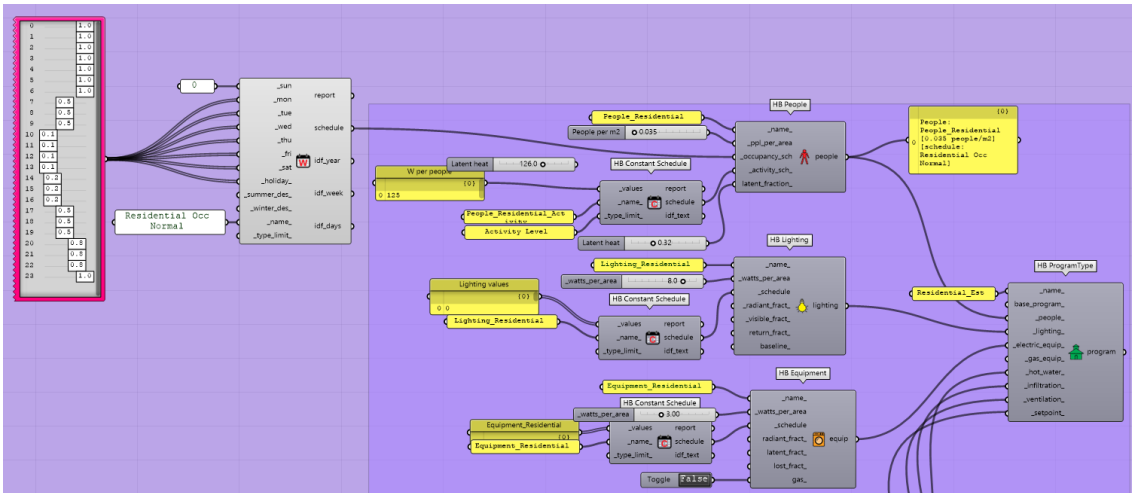
Ruumipõhise ja kahe eelmise arvutusmeetodi tulemused on vastuolus, sest ruumipõhise arvutusmeetodi kohaselt toimub kõige rohkem ülekuumenemist enne renoveerimist olukorras, aga korteripõhise ja ühe tsooniga meetodi puhul toimub kõige rohkem ülekuumenemist A-energiaklassi olukorras. Seda saab selgitada sellega, et A-energiaklassi konstruktsioonelemendid on küll kõige madalama soojusläbivusega, aga ühtlasi on selles olukorras kõige väiksem akna g-arv (0,45). A-energiaklassi konstruktsiooni madala soojusläbivuse tõttu on suurem tõenäosus, et ruumis saavutatakse temperatuur 24 °C (aknad avanevad selle arvutusmeetodi korra, siis kui ruumis on 24 °C), sest ruum hoiab hästi soojust ega lase sellel väljuda. Lisaks tuleb silmas pidada, et eesti kliimas ei pruugi suvekuudel olla alati väga kõrge temperatuur. A-energiaklassi konstruktsiooni soojus pääseb akna kaudu mõnel määral välja ning vastu võib ruumi jõuda madalama temperatuuriga õhk.

3.2.2 Grasshopperi arvutustulemused

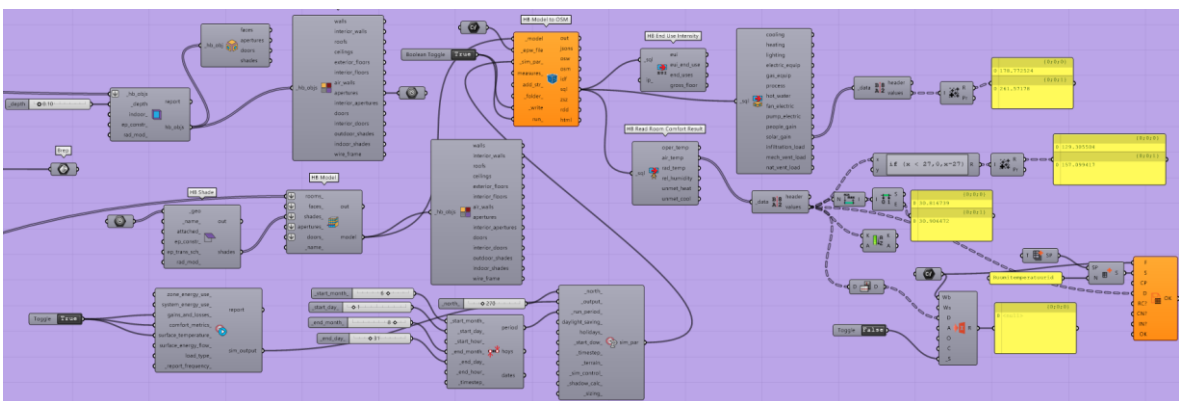
Grasshopperi päikesekiirguse ja ruumitemperatuuride arvutused põhinevad EnergyPlus simulatsioonitarkvaral. Grasshopperis toimub visuaalse programmeerimise abil erinevate käskude ühendamine järgmistesse, moodustades lõpuks ühe suure kimbu andmetest, mida on võimalik visualiseerida tarkvaras endas või excelis. Selleks, et Grasshopperis saadud tulemusi võrrelda IDA ICE omadega, on grasshopper kalibreeritud vastavalt IDA ICE'le. Grasshopperis on ruumitemperatuuri arvutamiseks vajalikud parameetrid määratud võimalikult detailselt, et need sarnaneksid IDA ICE'i omadega. Joonistel 13, 14 ja 15 on visualiseeritud milline näeb välja grasshopperi keskkond ja kuivõrd see erineb IDA ICE'st.



Joonis 13. Grasshopperis kokku pandud C-energiaklassi konstruktsioonielemendid. Vasakult paremale liikudes on alguses määratud materjali tüüp, seejärel materjali omadused ning lõpuks erinevad materjalid kokku pandud üheks tarindiks.



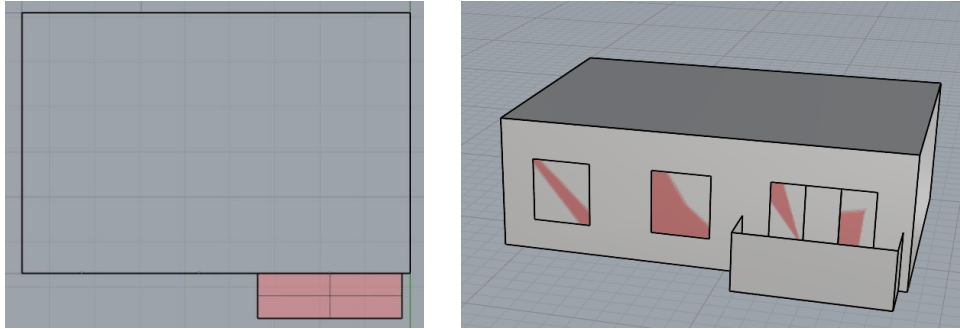
Joonis 14. Grasshopperis vabasoojuste määramine. Vasakult paremale liikudes on kõigepealt määratud vabasoojuste graafikud, seejärel arvuline väärtus ühe ruutmeetri kohta ning lõpuks vajalikud vabasoojuste ühendatud üheks suureks andmete kimbuks.



Joonis 15. Grasshopperi ruumitemperatuuri kontrollarvutus. Vasakult paremale liikudes on kõigepealt määratud vajalik geomeetria, seejärel simulatsiooni tüüp ja simulatsiooni jooksutamise periood ning lõpuks vajalike andmete kuvamiseks alamkäsud.

GRASSHOPPERI mudeli tulemused kolme erineva meetodiga:

- 1) *Arvutusmeetod*, kus terve korter on modelleeritud ühetsoonina ja aknad ei ole avatavad. Korterit 1 3D mudel ja pealtvaade on visualiseeritud joonisel 16.



Joonis 16. GRASSHOPPERI Korter 1 mudel ja tema üks tsoon.

Tabelist 11 on võimalik välja lugeda, et grasshopperis toimub samuti suurim temperatuuride kõikumine enne renoveerimist olukorras, kus on akendel kõige suuremad g arvud (0,55) ja kõige kõrgema soojuslähivusega konstruktsioonelemendid.

Tabel 11. Ühe tsooniga arvutusmeetodi max ja min ruumitemperatuurid.

Kirjeldus	Max ruumitemperatuur, °C			Min ruumitemperatuur, °C		
	Enne renoveerimist	C-energiaklass	A-energiaklass	Enne renoveerimist	C-energiaklass	A-energiaklass
Korter 1	39,90	37,29	36,79	20,15	24,20	24,60

Tabel 12 näitab, et suvine ruumitemperatuuri ülekuumenemine toimub antud arvutusmeetodi puhul Grasshopperis läbi viidud simulatsioonide kohaselt kõigil kolmel juhul, nagu ka IDA ICE's. Sarnaselt IDA ICE'ga saadud tulemustele on kõige suurema arvuga kraadtunde üle baasväärtuse A-energiaklassi olukorras ja kõige väiksema arvuga kraadtunde üle baasväärtuse enne renoveerimist olukorras.

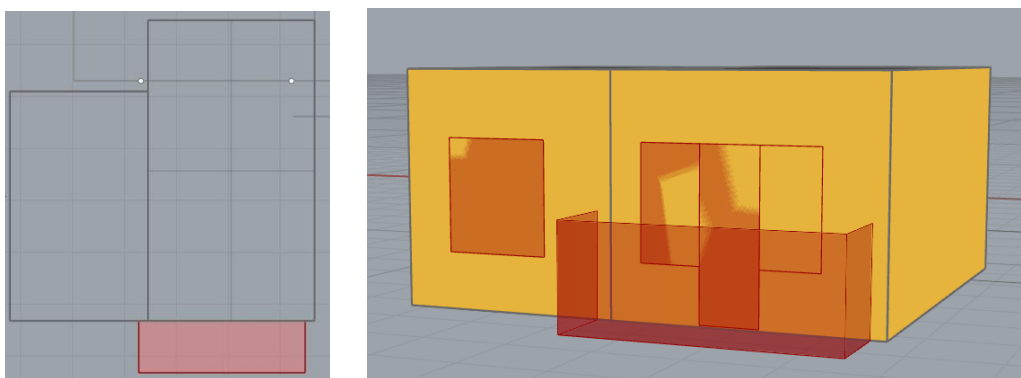
Tabel 12. Ühe tsooniga arvutusmeetodi temperatuuriliig üle baastemperatuuri.

Nr	Temperatuuriliig üle baastemperatuuri 27°C, °Ch		
	Enne renoveerimist	C-energiaklass	A-energiaklass
Korter 1	5291	6987	7146

- 2) *Korteripõhine arvutusmeetod.* Antud juhul modelleeritakse terve korter, sh kõik ruumid eraldi tsoonidena. Ruumide vahele lisatakse ukсед, mis on avatud simulatsiooni vältel (Opening: Always open). Erisusena ruumipõhisest meetodist, jäävad aknad suletuks. Temperatuuri kontrollarvutus tehakse selle arvutusmeetodi puhul ruumidele 1 ja 2, mis on vastavalt elutuba ja magamistuba.

Lähema uurimise käigus selgus, et Grasshopperis ei ole võimalik modelleerida ruumide vahele ukseid, mis oleksid pidevalt avatud. Äärmisel juhul oleks võimalik kirjutada Pythoni programmeerimis keskkonnas script, mis määraks ära uste avatuse graafiku ning sisse tuua see grasshopperisse. Antud lõputöös jääb see tegemata.

3) *Ruumipõhine meetod.* Antud meetodi korral modelleeritakse ja simuleeritakse hoone eluruumidest kriitilised tüüpruumid selliselt, et igat ruumi käsitletakse ühe tsoonina ja avasid (uksi) tsoonide vahel ei arvestata. Akende avanemise puhul on määratud selline juhtimisalgoritm, mis tagab akna avanemise ruumitemperatuuril $> + 24 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ja sulgub $< 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ korral, et tagada välisõhu kaudu jahutus ning vältida temperatuuri langemine alla kütte seadeväärtuse $+21 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Korter 1 3D mudel ja ruumipõhise arvutusmeetodi pealtvaade on visualiseeritud joonisel 17. Temperatuuri kontrollarvutus tehakse selle arvutusmeetodi puhul ruumidele 1 ja 2, mis on vastavalt elutuba ja magamistuba.



Joonis 17. GRASSHOPPERI Korter 1 ruumipõhise meetodi mudel. Punasega on märgitud rõdu ja aknad ning kollasega välisseina osa.

Grasshopperis ruumipõhise arvutusmeetodi maksimaalsed ja minimaalsed ruumitemperatuurid on välja toodud tabelis 13. Kõige rohkem kõigub ruumitemperatuur enne renoveerimist olukorras, kus maksimaalsed temperatuurid jäävad $34 \text{ }^{\circ}\text{C}$ juurde. Minimaalsed temperatuurid on kõigi kolme olukorra puhul ümardatult $21 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabel 13. Ruumipõhise arvutusmeetodi max ja min ruumitemperatuurid.

Kirjeldus	Max ruumitemperatuur, $^{\circ}\text{C}$			Min ruumitemperatuur, $^{\circ}\text{C}$		
	Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass	Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass
Korter 1 elutuba (10° avatus)	34,02	31,09	30,60	20,98	21,00	21,00
Korter 1 magamistuba (10° avatus)	34,08	31,17	30,62	20,98	21,00	21,00
Korter 1 elutuba (6° avatus)	34,32	31,22	30,65	20,98	21,00	21,00
Korter 1 magamistuba (6° avatus)	34,39	31,31	30,69	20,98	21,00	21,00

Tabeli 14 kohaselt on temperatuuriliig üle baasväärtuse $27 \text{ }^{\circ}\text{C}$ kõige suurem ruumipõhise arvutusmeetodi puhul enne renoveermist olukorras. Võrreldes veel antud tulemusi IDA ICE's ruumipõhise meetodiga saadud tulemustega, siis kõige vähem kraadtunde üle baasväärtuse esineb mõlemal korral A-energiaklassi olukorras.

Tabel 14. Ruumipõhise arvutusmeetodi temperatuuriliig üle baastemperatuuri.

Kirjeldus	Temperatuuriliig üle baastemperatuuri 27°C, °Ch		
	Enne renoveerimist	C-energiaklass	A-energiaklass
Korter 1 elutuba (10° avatus)	431	137	102
Korter 1 magamistuba (10° avatus)	522	164	120
Korter 1 elutuba (6° avatus)	527	162	117
Korter 1 magamistuba (6° avatus)	841	339	172

3.3 Ruumitemperatuuri kontrollarvutus tuleviku kliimafailiga

Viimaste aastakümnetega on Eesti suve keskmine temperatuur märgatavalt tõusnud. Kuumalained on muutunud aina sagedasemaks ja tõsisemaks ning sellega on vaja hoonete kavandamisel arvestada [5]. Antud lõputöös viiakse suvise ruumitemperatuuri kontrollarvutused läbi ka 2080 aasta EstonianTRY kliimafailiga. Antud peatükis tehakse vajalikud simulatsioonid läbi IDA ICE's ja grasshopperis kasutades ühe tsooniga meetodit ja ruumipõhist arvutusmeetodit. Mõlemas tarkvaras jäävad kahe erineva arvutusmeetodi tsoonide määratlused samaks ning ainus asi, mis mudeli puhul muutub, on kasutatav kliimafail.

3.3.1 IDA ICE arvustulemused

- 1) *Arvutusmeetod*, kus terve korter on modelleeritud ühetsoonina ja aknad ei ole avatavad.

Tabelis 15 on näidatud 2080 kliimafailiga tehtud simulatsioonide maksimaalsed ja minimaalsed ruumitemperatuurid. Kõige suurem ruumitemperatuuride kõikumine leiab aset enne renoveerimist olukorras, kus ruumi maksimaalne temperatuur on 37,2 °C ja minimaalne ruumitemperatuur on 22,4 °C. Üldiselt on 2080 kliimafailiga tehtud simulatsioonidest näha, et ruumide minimaalsed temperatuurid on igal juhul väga palju kõrgemad võrreldes 1990-2020 aasta kliimafailiga. See viitab väga tugevalt sellele, et tulevikus ei ole võimalik sellises hoones ära hoida ülekuumenemist ilma jahutusüsteemi või varjestuse kasutamist.

Tabel 15. Ühe tsooniga arvutusmeetodi max ja min ruumitemperatuurid.

	Max ruumitemperatuur, °C			Min ruumitemperatuur, °C		
	Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass	Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass
Korter 1	37,21	36,84	36,26	22,44	27,86	28,25

Tabelist 16 on näha, et 2080 aasta kliimafailiga läbi viidud simulatsioonide põhjal toimub ühe tsooniga arvutusmeetodi puhul kõige rohkem ülekuumenemist A-klassi konstruktsioonelementidega olukorras ja kõige vähem enne renoveeroverimist olukorras, nagu ka 1990-2020 kliimafaili puhul.

Tabel 16. Ühe tsooniga arvutusmeetodi temperatuuriliig üle baastemperatuuri.

Kirjeldus	Temperatuuriliig üle baastemperatuuri 27°C, °Ch		
	Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass
Korter 1	9206	14358	14985

2) *Ruumipõhine meetod.* Igat ruumi käsitletakse ühe tsoonina ja avasid (uksi) tsoonide vahel ei arvestata. Akende avanemise puhul on määratud selline juhtimisalgoritm, mis tagab akna avanemise ruumitemperatuuril $> + 24$ °C ja sulgub < 22 °C korral, et tagada välisõhu kaudu jahutus ning vältida temperatuuri langemine alla kütte seadeväärtuse $+21$ °C.

IDA ICE ruumipõhise arvutusmeetodi maksimaalsed ja minimaalsed ruumitemperatuurid on välja toodud tabelis 17. Kõige rohkem kõigub ruumitemperatuur enne renoveerimist olukorras, kus maksimaalsed temperatuurid jäävad 34-36 °C juurde. Minimaalsed temperatuurid on võrreldes 1990-2020 kliimafailiga saadud tulemustest kohati 0,5 – 1 °C võrra suuremad.

Tabel 17. Ruumipõhise arvutusmeetodi max ja min ruumitemperatuurid.

Kirjeldus	Max ruumitemperatuur, °C			Min ruumitemperatuur, °C		
	Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass	Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass
Korter 1 elutuba (10° avatus)	34,16	31,14	30,17	21,00	22,28	22,37
Korter 1 magamistuba (10° avatus)	35,17	32,22	31,17	21,18	22,31	22,39
Korter 1 elutuba (6° avatus)	34,61	32,05	31,10	21,00	22,45	22,56
Korter 1 magamistuba (6° avatus)	35,72	32,95	32,13	21,24	22,50	22,60

IDA ICE ruumipõhise arvutusmeetodi tulemused uue kliimafailiga näitavad samuti, et kõige rohkem ülekuumenemist toimub enne renoveerimist olukorras ning kõige vähem A-energiaklassi olukorras. Ruumipõhise arvutusmeetodiga saadud kraadtundide väärtused on näidatud tabelis 18.

Tabel 18. Ruumipõhise arvutusmeetodi temperatuuriliig üle baastemperatuuri.

Kirjeldus	Temperatuuriliig üle baastemperatuuri 27°C, °Ch		
	Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass
Korter 1 elutuba (10° avatus)	1704	895	608
Korter 1 magamistuba (10° avatus)	2237	1296	950
Korter 1 elutuba (6° avatus)	2344	1846	1484
Korter 1 magamistuba (6° avatus)	3084	2510	2096

3.3.2 Grasshopperi arvutustulemused

- 1) *Arvutusmeetod*, kus terve korter on modelleeritud ühetsoonina ja aknad ei ole avatavad.

Tabelis 19 on välja toodud 2080 a. kliimafailiga ühe tsooniga arvutusmeetodi ruumi maksimaalsed ja minimaalsed temperatuurid. Grasshopperis läbiviidud simulatsioonide põhjal on ruumi maksimaalsed temperatuurid 6 - 9 °C suuremad võrreldes IDA ICE omadega, kuid suurim temperatuuride kõikumine toimub ikkagi enne renoveerimist olukorras.

Tabel 19. Ühe tsooniga arvutusmeetodi max ja min ruumitemperatuurid.

	Max ruumitemperatuur, °C			Min ruumitemperatuur, °C		
	Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass	Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass
Korter 1	46,35	43,71	42,95	23,20	28,00	28,25

Tabelist 20 on näha, et 2080 aasta kliimafailiga grasshopperis läbi viidud simulatsioonide põhjal toimub ühe tsooniga arvutusmeetodi puhul kõige rohkem samuti ülekuumenemist A-klassi konstruktsioonelementidega olukorras ja kõige vähem enne renoveerimist olukorras.

Tabel 20. Ühe tsooniga arvutusmeetodi temperatuuriliig üle baastemperatuuri.

Kirjeldus	Temperatuuriliig üle baastemperatuuri 27°C, °Ch		
	Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass
Korter 1	13262	18324	18738

- 2) *Ruumipõhine meetod*. Igat ruumi käsitletakse ühe tsoonina ja avasid (uksi) tsoonide vahel ei arvestata. Akende avanemise puhul on määratud selline juhtimisalgoritm, mis tagab akna avanemise ruumitemperatuuril >+ 24 °C ja sulgub < 22 °C korral, et tagada välisõhu kaudu jahutus ning vältida temperatuuri langemine alla kütte seadeväärtuse +21 °C.

Tabelis 21 on välja toodud 2080 a. kliimafailiga ruumipõhise arvutusmeetodi ruumi maksimaalsed ja minimaalsed temperatuurid. Grasshopperis läbiviidud simulatsioonide põhjal on ruumi maksimaalsed temperatuurid 5 - 6 °C suuremad võrreldes IDA ICE omadega, kuid suurim temperatuuride kõikumine toimub ikkagi enne renoveerimist olukorras.

Tabel 21. Ruumipõhise arvutusmeetodi max ja min ruumitemperatuurid.

Kirjeldus	Max ruumitemperatuur, °C			Min ruumitemperatuur, °C		
	Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass	Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass
Korter 1 elutuba (10° avatus)	39,10	36,11	35,69	21,00	22,30	22,40
Korter 1 magamistuba (10° avatus)	39,70	36,44	35,98	21,00	22,30	22,40
Korter 1 elutuba (6° avatus)	39,58	36,37	35,92	21,00	22,50	22,60
Korter 1 magamistuba (6° avatus)	40,22	36,72	36,23	21,00	22,50	22,60

Grasshopperi ruumipõhise arvutusmeetodi tulemused uue kliimafailiga näitavad samuti, et kõige rohkem ülekuumenemist toimub enne renoveerimist olukorras ning kõige vähem A-energiaklassi olukorras, nagu ka 1990-2020 a. kliimafailiga. Ruumipõhise arvutusmeetodiga saadud kraadtundide väärtused on näidatud tabelis 22.

Tabel 22. Ruumipõhise arvutusmeetodi temperatuuriliig üle baastemperatuuri.

Kirjeldus	Temperatuuriliig üle baastemperatuuri 27°C, °Ch		
	Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass
Korter 1 elutuba (10° avatus)	2590	1575	1419
Korter 1 magamistuba (10° avatus)	3084	1843	1654
Korter 1 elutuba (6° avatus)	2991	1856	1620
Korter 1 magamistuba (6° avatus)	3580	2640	2119

3.4 IDA ICE ja Grasshopperi arvutustulemuste koodanalüüs

Suvised ruumitemperatuuri ülekuumenemise riski hinnatakse arvutades mitu tundi perioodil 1. juuni – 31. august ületab ruumitemperatuur baastemperatuuri 27°C. Alguses viidi ruumitemperatuuride kontrollarvutus läbi IDA ICE simulatsioonitarkvaras ning seal saadud tulemused olid referentsiks Grasshopperis saadud tulemustele.

Kahe erineva tarkvara tulemused on kooskõlas selle poolest, et millises olukorras toimub kõige rohkem või kõige vähem ülekuumenemist, kuid suurusjärgud on erinevad. Mõlema tarkvaraga saadud kraadtundide tulemused EstonianTRY kliimafailiga 1990-2020 on näidatud tabelis 23. Kõige rohkem erinevad kraadtundide suurjusjärgud ühe tsooniga meetodi korral, kus Grasshopperis saadud tulemused on ca 3000 °Ch võrra suuremad kõigil kolmel juhul. Ruumipõhise meetodi korral on grasshopperis saadud tulemused kohati samad võrreldes IDA ICE omadega, kuid mõnel juhul kuni 100 °Ch suuremad.

Tabel 23. Koondtabel IDA ICE'i ja Grasshopperi kraadtundidest üle baastemperatuuri ESTTRY 1990-2020 kliimafailiga.

1. Mudel, kus ei ole arvestatud siseseintega ja aknad pole avatavad

Kirjeldus	IDA ICE temperatuuriliig üle 27°C, °Ch			Grasshopper temperatuuriliig üle 27°C, °Ch		
	Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass	Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass
Korter 1	2108	3559	3883	5291	6987	7146

3. Ruumipõhine arvutusmeetod - avatavad aknad

Kirjeldus	IDA ICE temperatuuriliig üle 27°C, °Ch			Grasshopper temperatuuriliig üle 27°C, °Ch		
	Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass	Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass
Korter 1 elutuba (10° avatus)	333	42	10	431	137	102
Korter 1 magamistuba (10° avatus)	522	116	51	522	164	120
Korter 1 elutuba (6° avatus)	527	145	63	527	162	117
Korter 1 magamistuba (6° avatus)	807	296	159	841	339	172

Tabelis 24 on näidatud mõlema tarkvaraga saadud kraadtundide tulemused kasutades tuleviku kliimafaili. 2080 a. kliimafailiga läbiviidud simulatsioonid annavad suures pildis samasugused tulemused. Kahe erineva tarkvara tulemused on ka selle kliimafaili puhul kooskõlas selle poolest, et millises olukorras toimub kõige rohkem või kõige vähem ülekuumenemist. Ühe tsooniga arvutusmeetodi puhul on grasshopperis saadud tulemused ca 4000 °Ch suuremad, ruumpõhise meetodi korral on grasshopperis saadud tulemused mõningatel juhtudel kuni 900 °Ch suuremad.

Tabel 24. Koondtabel IDA ICE'i ja Grasshopperi kraadtundidest üle baastemperatuuri ESTTRY 2080 kliimafailiga.

1. Mudel, kus ei ole arvestatud siseseingtega ja aknad pole avatavad

Nr	2080 kliimafailiga IDA ICE temperatuuril ig üle 27°C, °Ch			Nr	2080 kliimafailiga GH temperatuuril ig üle 27°C, °Ch		
	Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass		Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass
Korter 1	9206	14358	14985	Korter 1	13262	18324	18738

3. Ruumpõhine arvutusmeetod - avatavad aknad

Kirjeldus	2080 kliimafailiga IDA ICE temperatuuril ig üle 27°C, °Ch			Kirjeldus	2080 kliimafailiga GH temperatuuril ig üle 27°C, °Ch		
	Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass		Enne reno.	C-energiaklass	A-energiaklass
Korter 1 elutuba (10° avatus)	1704	895	608	Korter 1 elutuba (10° avatus)	2590	1575	1419
Korter 1 magamistuba (10° avatus)	2237	1296	950	Korter 1 magamistuba (10° avatus)	3084	1843	1654
Korter 1 elutuba (6° avatus)	2344	1846	1484	Korter 1 elutuba (6° avatus)	2991	1856	1620
Korter 1 magamistuba (6° avatus)	3084	2510	2096	Korter 1 magamistuba (6° avatus)	3580	2640	2119

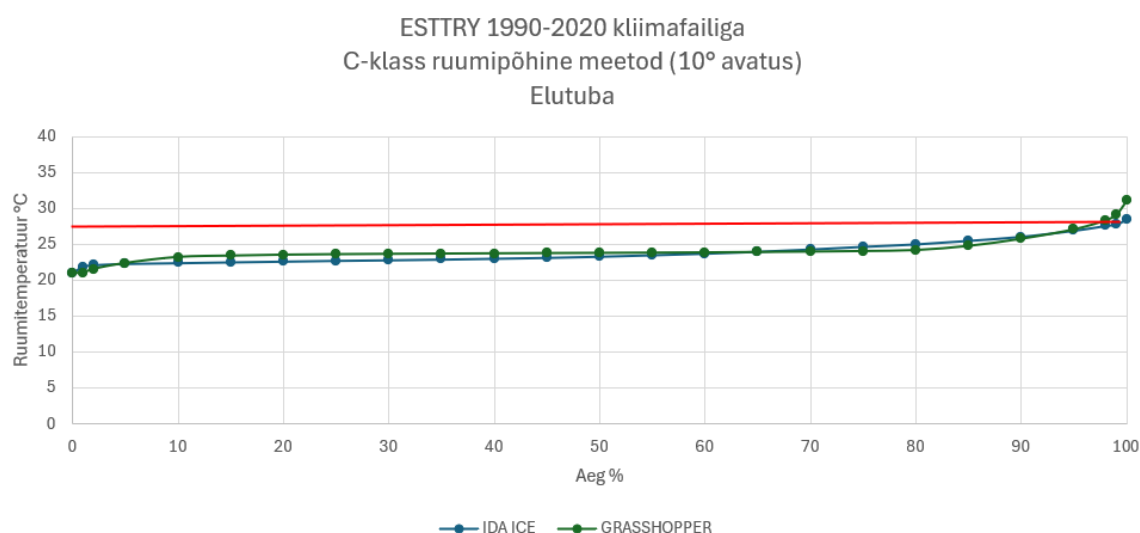
Ebakõlad kahe tarkvara vahel tulenevad mingi määral nende mõlema endi eripäradest, kuid suurimaks vaheks võib pidada ikkagi mitte piisavalt täpset programmeerimist grasshopperi tarkvaras. Olemuselt on tegu kahe väga erineva keskkonaga, kus arvutuskäik ei lähe alati kokku ning mingitel juhtudel on vaja teha üldistusi, mis võivad lõpptulemust mõjutada. Grasshopperis on teatud käskudel juba sisse eeldefineeritud vaikeväärtused, mida oleks võimalik muuta vaid väga detailse programmeerimisega ning mõningatel juhtudel on selle jaoks vaja eraldi Pythoni kood kirjutada ja see grasshopperisse sisse tuua.

Üks kõige suuremaid erinevuseid kahe tarkvara vahel on seotud nende energiabilansi arvutusega. Edasi tuuakse näide sellest, kuidas on arvutatud soojuskaod kahes erinevas tarkvaras ühe tsooniga arvutusmeetodiga C-energiaklassile vastavate konstruktsioonielementidega hoonetüübi puhul. Tabeli 25 pealt on võimalik välja lugeda, et suurim erinevus energiabilansis tuleneb inimestelt eraldatud soojusest ja päikesekiirguse mõjust. Grasshopperis on energiabilansile lisanud inimeste eraldatud soojus 248 kWh, IDA ICE 's aga 165 kWh. Päikesekiirguse ja akende konstruktsiooni mõju Grasshopperis on 695 kWh, kuid IDA ICE's 563 kWh. Eelmainitud erinevused võivad selgitada, miks grasshopperis on suurem maksimaalne ruumitemperatuur, mis on mõjutanud ka kraadtundide kogust üle baasväärtuse 27°C.

Tabel 25. Energiabilansi arvutuse näide Grasshopperis ja IDA ICE tarkvaras.

Energiabilanss (kWh)	IDA ICE	GRASSHOPPER
Päikesekiirgus	563	695
Seadmed	199	197
Valgustus	89	88
Inimesed	165	248
Infiltratsioon	-79	-97
Ventilatsioon	-698	-636
Välispiirded ja külmasillad	-240	-232

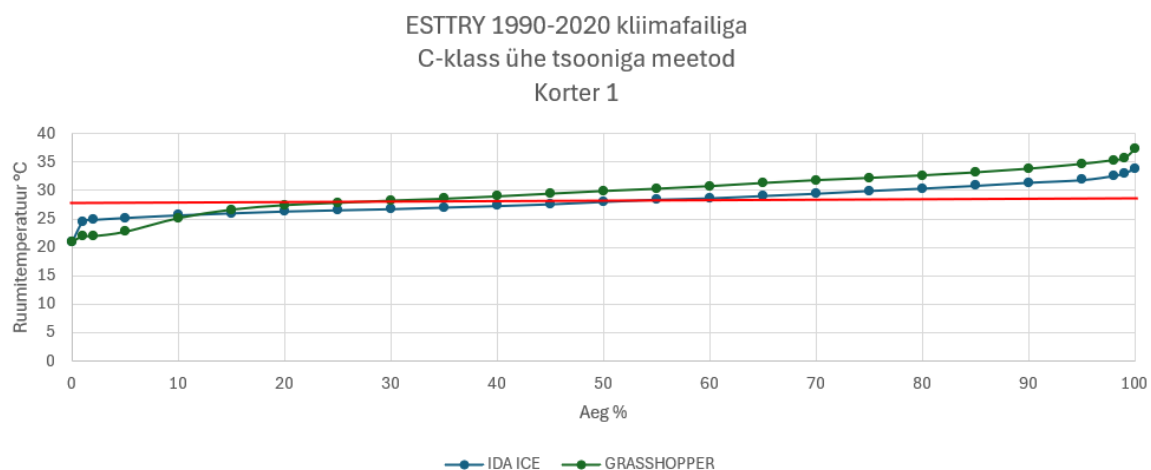
Graafikul 1 on visualiseeritud mõlema tarkvara ruumipõhise arvutusmeetodi elutoa kumulatiivsed ruumitemperatuurid C-energiaklassi olukorras. IDA ICE ja grasshopperi maksimaalsed ruumitemperatuurid on ruumipõhise meetodi korral, kus korteril on C-energiaklassi konstruktsioonelemendid ja akende avatuse tase on 10°, vastavalt 28,35 °C ja 31,09 °C. IDA ICE simulatsiooni põhjal oleks ruumitemperatuur üle baasväärtuse 27 °C ajavahemikul 1. juuni – 31. august 42 °Ch, aga grasshopperis läbi viidud simulatsiooni kohaselt oleks samas olukorras ruumitemperatuur üle baasväärtuse 137 °Ch.



Graafik 1. Kahe tarkvara ruumipõhise meetodi kumulatiivsed ruumitemperatuurid ESTTRY 1990-2020 kliimafailiga.

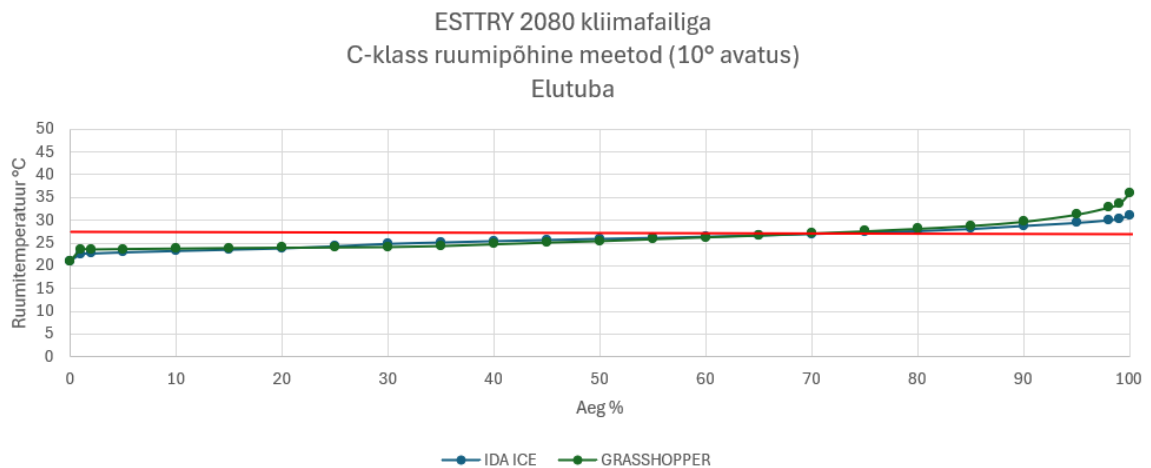
Graafikul 2 on visualiseeritud mõlema tarkvara ühe tsooniga arvutusmeetodi kumulatiivsed ruumitemperatuurid C-energiaklassi olukorras. IDA ICE ja grasshopperi maksimaalsed ruumitemperatuurid on ühe tsooniga meetodi korral, kus korteril on C-energiaklassi konstruktsioonitüübid ja aknad pole avatavad, vastavalt 33,88 °C ja 37,29 °C. IDA ICE simulatsiooni põhjal oleks ruumitemperatuur üle baasväärtuse 27 °C

ajavahemikul 1. juuni – 31. august 3559 °Ch, aga grasshopperis läbi viidud simulatsiooni kohaselt oleks samas olukorras ruumitemperatuur üle baasväärtuse 6987 °Ch.



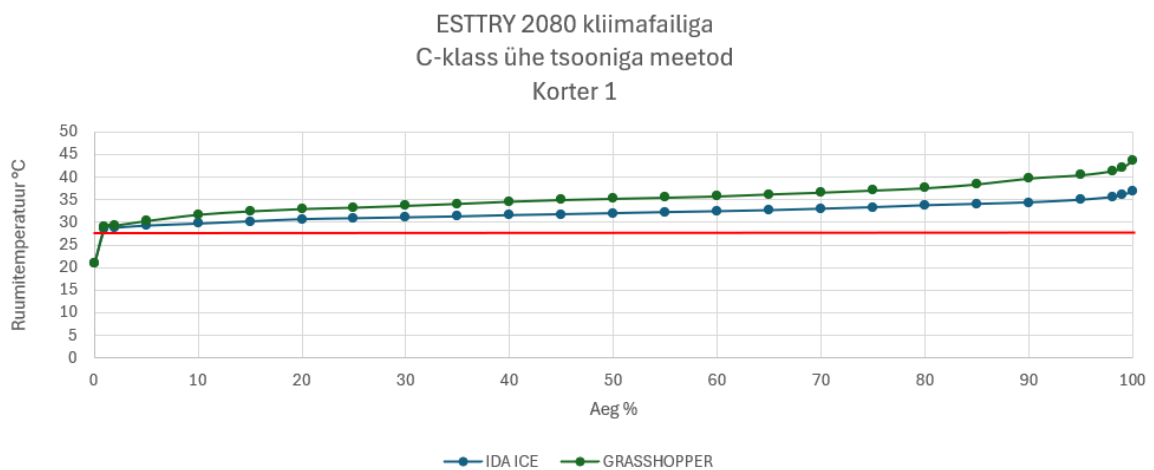
Graafik 2. Kahe tarkvara ühe tsooniga meetodi kumulatiivsed ruumitemperatuurid ESTTRY 1990-2020 kliimafailiga.

Graafikul 3 on visualiseeritud mõlema tarkvara ESTTRY 2080 a. kliimafaili ruumipõhise arvutusmeetodi elutoa kumulatiivsed ruumitemperatuurid C-energiaklassi olukorras. IDA ICE ja grasshopperi maksimaalsed ruumitemperatuurid on ruumipõhise meetodi korral, kus korteril on C-energiaklassi konstruktsioonitüübid ja aknad pole avatavad, vastavalt 31,14 °C ja 36,11 °C. IDA ICE simulatsiooni põhjal oleks ruumitemperatuur üle baasväärtuse 27 °C ajavahemikul 1. juuni – 31. august 895 °Ch, aga grasshopperis läbi viidud simulatsiooni kohaselt oleks samas olukorras ruumitemperatuur üle baasväärtuse 1575 °Ch.



Graafik 3. Kahe tarkvara ruumipõhise meetodi kumulatiivsed ruumitemperatuurid ESTTRY 2080 kliimafailiga.

Graafikul 4 on visualiseeritud mõlema tarkvara ESTTRY 2080 a. kliimafaili ühe tsooniga arvutusmeetodi kumulatiivsed ruumitemperatuurid C-energiaklassi olukorras. IDA ICE ja grasshopperi maksimaalsed ruumitemperatuurid on ühe tsooniga meetodi korral, kus korteril on C-energiaklassi konstruktsioonitüübid ja aknad pole avatavad, vastavalt 36,84 °C ja 43,71 °C. IDA ICE simulatsiooni põhjal oleks ruumitemperatuur üle baasväärtuse 27 °C ajavahemikul 1. juuni – 31. august 14358 °Ch, aga grasshopperis läbi viidud simulatsiooni kohaselt oleks samas olukorras ruumitemperatuur üle baasväärtuse 18324 °Ch.



Graafik 4. Kahe tarkvara ühe tsooniga meetodi kumulatiivsed ruumitemperatuurid ESTTRY 2080 kliimafailiga.

4 Arutelu, piirangud ja edasised uuringud

Korterelamu suvise ruumitemperatuuri kontrollarvutus viidi läbi kolmele erinevale olukorrale kasutades kolme erinevat arvutusmeetodit ning kahte erinevat kliimafaili. Kõigepealt viidi vajalikud arvutused läbi IDA ICE simulatsioonitarkvaras ja seejärel Grasshopperi visuaalse programmeerimise tarkvaras ning võrreldi saadud tulemusi omavahel. Mõlema tarkvaraga saadud tulemused olid kooskõlas selle poolest, et millises olukorras toimub kõige rohkem ülekuumenemist, kuid saadud kraadtundide suurjulgud oli Grasshopperis igal juhul suuremad. Peamine põhjus miks Grasshopperis saadud tulemused on suuremad võrreldes IDA ICE omadega tuleneb sellest, kuidas Grasshopper arvestab päikesekiirguse osakaalu ja inimestelt tulenevat vabasoojust. Mõlemas tarkvaras on määratud inimestele samasugused kohalviibimise graafikud ning aktiivsuste, kuid grasshopper arvestab inimestelt eraldatud soojust siiski suuremana kui IDA ICE.

Grasshopperi ja IDA ICE tarkvara kasutajaliidesed erinevad väga suurel määral ning mõlemal on kindlasti omad plussid ja miinused. Mõeldes eelkõige kasutusmugavuse peale, siis peaks eelise andma Grasshopperile, sest seal on erinevate parameetrite muutmine ja tulemuste kuvamine oluliselt mugavam ja kiirem. Grasshopperil on intuiitiivne kasutajaliides ning antud lõputöö käigus koostatud ruumitemperatuuri kontrollarvutuse skript on universaalne ning seda on võimalik kasutada ka teiste hoonete analüüsimisel, mis teeb selle tarkvara väga heaks alternatiiviks IDA ICE'le.

Grasshopperi visuaalse programmeerimise keskkond on potentsiaalselt kasulik tööriist millega läbi viia suvise ruumitemperatuuri kontrollarvutust ning veelgi täpsema programmeerimise juures oleks suure tõenäosusega võimalik kahe tarkvaraga saadud tulemused paremini ühtima saada. Rohkemate hoonetüüpide uurimisel ning simulatsioonide tegemisel oleks tulevikus ehk võimalik leida mingisugune koefitsent, millega Grasshopperis saadud tulemusi läbi korrutada, et saada IDA ICE simulatsioonitarkvaraga kooskõlas olevad tulemused.

Antud lõputöös oli peamiseks piiranguks grasshopperis korteripõhise arvutusmeetodi läbiviimise võimalus. Korteripõhise arvutusmeetodi puhul on vaja korteri mudel modelleerida selliselt, et seal oleksid aknad pidevalt suletud ning ruumide vahelised uksed kogu aeg avatud. Grasshopperis ei ole aga võimalik modelleerida ruumide vahele uksi, mis oleksid pidevalt avatud. Äärmisel juhul oleks võimalik kirjutada Pythoni programmeerimis keskkonnas skript, mis määraks ära uste avatuse graafiku ning see sisse tuua grasshopperisse. Antud lõputöös jäi see tegemata.

Arvutusliku ja parameetrilise modelleerimise rakendamise peamine probleem seisneb inseneride oskustes ja valmisolekus sellist tehnoloogiat kasutusele võtta. Antud lõputöös grasshopperiga läbiviidud simulatsioonid on heaks aluseks edaspidisetele uuringutele ning parameetrilise modelleerimise abil suvise ülekuumenemise arvutamise juurutamisele Eestis. Edasised uuringud ning artiklid võiksid olla seotud ebastandardsemate hoonetüüpidega, et paremini mõista grasshopperi eeliseid teiste tarkvarade ees. Lisaks oleks võimalik läbiviia ka selline uuring, kus suvise ülekuumenemise arvutused viiakse läbi samuti mõlema tarkvaraga ning hiljem monitooritakse valmishitatud hoonet ning selle ruumitemperatuure.

KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö peamiseks eesmärgiks oli arvutusliku kavandamise mitme-etapilise töövoore arendamine suvise ülekuumenemise kontrollarvutuseks. Selleks kaardistati ja rakendati ülekuumenemise ja arvutusliku kavandamise põhikontseptsioonid, protsessid ja meetodid ning viidi läbi päikesekiirguse analüüs ülekuumenemiseriskiga ruumide tuvastamiseks nende modelleerimisega ja simuleerimisega.

Tänapäeval on projekteerijatele saadaval suur hulk modelleerimistööriistu erineva keerukusastmega. Enamik projekteerimisotsuste tugi- ja simulatsioonitööriistu on aga väga piiratud modelleerimisvõimalustega. Parameetrilise modelleerimine seevastu võimaldab suuremat paindlikkust tegeleda ebastandardsete olukordadega. Parameetriline modelleerimine on meetod, mida kasutatakse paljudes disaini valdkondades nagu inseneriteadus, arhitektuur ja arvutigraafika. See meetod võimaldab disaini kergesti muuta, kohandades parameetreid. Parameetriline modelleerimine toetub matemaatilistele võrranditele, et määratleda seoseid erinevate disainielementide vahel, võimaldades inseneridel/projekteerijatel kiiresti muuta objektide mõõtmeid, kuju ja muid omadusi, lihtsalt muutes eelseadistatud muutujaid. See protsess teeb disainialternatiivide uurimise, lahenduste optimeerimise ja korduvate ülesannete automatiseerimise oluliselt tõhusamaks [22].

Parameetrilises skeemis suhtleb kujundaja parameetrilise modelleerimissüsteemiga (nagu Rhino/Grasshopper), kasutades visuaalseid kodeerimissümboleid. Disaini kujutise genereerib seejärel süsteemi Rhino 3D-modelleerimiskomponent. Grasshopperi süsteemi parameetriline võime võimaldab kujundust genereerida ja muuta lihtsalt parameetrite muutmise kaudu, selle asemel, et suuri koguseid koodi ümber kirjutada [25].

Eestis on enamlevinud modelleerimistarkvara IDA ICE, kuid see võib olla keeruline ja liigselt detailne projekti varajases staadiumis kasutamiseks. Antud lõputöös kasutati modelleerimise ja simuleerimise jaoks EnergyPlus'i, sest see on integreeritud Grasshopperi visuaalse programmeermise tarkvarasse. Kõigepealt määrati õigeks kõik vajalikud parameetrid ülekuumenemise arvutamiseks ja viidi vajalikud simulatsioonid läbi IDA ICE tarkvaras, mis said referentsiks grasshopperi simulatsioonidele. Grasshopper kalibreeriti selliselt, et kõik vajalikud andmed seal oleksid võimalikult sarnased IDA omadele.

Korterelamu suvise ruumitemperatuuri kontrollarvutus viidi läbi kolmele erinevale olukorrale kasutades kolme erinevat arvutusmeetodit ning kahte erinevat kliimafaili.

Mõlema tarkvaraga saadud tulemused olid kooskõlas selle poolest, et millises olukorras toimub kõige rohkem ülekuumenemist, kuid saadud kraadtundide suurjulgus oli Grasshopperis igal juhul suuremad. Peamine põhjus miks Grasshopperis saadud tulemused on suuremad võrreldes IDA ICE omadega tuleneb sellest, kuidas Grasshopper arvestab päikesekiirguse osakaalu ja inimestelt tulenevat vabasoojust.

Viimaste aastakümnetega on Eesti suve keskmine temperatuur märgatavalt tõusnud. Kuumalained on muutunud aina sagedasemaks ja tõsisemaks ning sellega on vaja hoonete kavandamisel arvestada [5]. Antud lõputöös viidi suvise ruumitemperatuuri kontrollarvutused läbi ka 2080 aasta EstonianTRY kliimafailiga. Eelmainitud kliimafailiga läbi viidud simulatsioonidest sai selgeks, et ruumide maksimaalsed ja minimaalsed temperatuurid on igal juhul palju kõrgemad võrreldes 1990-2020 aasta kliimafaili simulatsioonidega. Sellised tulemused tõestavad, et kliimamuutusega on vaja hoonete kavandamisel arvestada ning ruumitemperatuuri kontrollarvutuse tegemiseks oleks väga kasulik leida alternatiivseid tarkvarasi.

Viimaste aastate jooksul on parameetrilise disaini tööriistad ja meetodid hakanud mõjutama seda, kuidas disaini õpetatakse ja praktiseeritakse. Samuti on skriptimine ja tööriistade arendamine muutumas üha olulisemaks oskuseks nii teaduses, hariduses kui ka igapäevases praktikas [25]. Antud lõputöö üks eesmärke oli tõestada, et on võimalik läbi viia suvise ruumitemperatuuri ülekuumenemise arvutust kasutades parameetrist modelleerimist ning läbi viidud simulatsioonide põhjal sai kindlaks, et grasshopperis loodud töövoog töötab ning tulevikus veelgi rohkemate uuringute korral võib osutada väga heaks alternatiiviks IDE ICE'le varajases projekteerimise faasis simulatsioonide tegemiseks.

SUMMARY

The main objective of this thesis was to develop a multi-step workflow for computational design to perform control calculations for summer overheating. For this purpose, the key concepts, processes, and methods of overheating and computational design were mapped and applied, and a solar radiation analysis was conducted to identify rooms at risk of overheating through their modeling and simulation.

Nowadays, designers have access to a wide range of modeling tools with varying degrees of complexity. However, most decision support and simulation tools for design are very limited in their modeling capabilities. Parametric modeling, on the other hand, allows for greater flexibility in dealing with non-standard situations. Parametric modeling is a method used in many design fields such as engineering, architecture, and computer graphics. This method allows for easy modification of the design by adjusting parameters. Parametric modeling relies on mathematical equations to define relationships between different design elements, enabling engineers/designers to quickly change the dimensions, shape, and other properties of objects simply by altering predefined variables. This process makes exploring design alternatives, optimizing solutions, and automating repetitive tasks significantly more efficient [22].

In parametric schema the designer interacts with the parametric modeling system (such as Rhino/Grasshopper) employing visual coding symbols. The image of the design is then generated by the Rhino 3D modeling component of the system. The parametric capability of the Grasshopper system enables generation and modification of the design simply by changing parameters rather than the need to re-write substantial amounts of code [25].

In Estonia, the most commonly used modeling software is IDA ICE, but it can be complex and overly detailed for use in the early stages of a project. In this thesis, EnergyPlus was used for modeling and simulation because it is integrated with Grasshopper's visual programming software. First, all necessary parameters for calculating overheating were correctly set, and the required simulations were conducted in IDA ICE software, which served as a reference for the Grasshopper simulations. Grasshopper was calibrated to ensure that all necessary data there would be as similar as possible to those in IDA ICE.

The control calculation of summer room temperature for an apartment building was conducted for three different situations using three different calculation methods and two different climate files. The results obtained from both software were consistent in

terms of which situation had the most overheating, but the magnitude of degree-hours obtained in Grasshopper was greater in all cases. The main reason why the results obtained in Grasshopper were higher compared to IDA ICE is due to how Grasshopper accounts for the proportion of solar radiation and the internal heat gains from people.

In recent decades, the average summer temperature in Estonia has risen significantly. Heatwaves have become increasingly frequent and severe, and this needs to be considered in building design [5]. In this thesis, the summer room temperature control calculations were also carried out using the 2080 EstonianTRY climate file. From the simulations conducted with the aforementioned climate file, it became clear that the maximum and minimum room temperatures are considerably higher in any case compared to the simulations with the 1990-2020 climate file. These results prove that climate change must be taken into account in building design, and it would be very useful to find alternative software for room temperature control calculations.

In recent years, parametric design tools and methods have begun to influence how design is taught and practiced. Additionally, scripting and tool development are becoming increasingly important skills in science, education, and everyday practice [25]. One of the objectives of this thesis was to demonstrate that it is possible to perform summer room temperature overheating calculations using parametric modeling. Based on the conducted simulations, it was established that the workflow created in Grasshopper works, and with further studies in the future, it may prove to be an excellent alternative to IDA ICE for conducting simulations in the early design phase.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] SA Kredex ja Euroopa Liidu Ühtekuuluvusfond, „LIGINULLENERGIA ELUHOONED SUVISE RUUMITEMPERATUURI KONTROLLARVUTUSE JUHEND“.
- [2] R. Simson, J. Kurnitski, ja H. Voll, „Overheating Prevention and Daylighting in Buildings without Mechanical Cooling“, dets 2019, Vaadatud: 25. veebruar 2024. [Online]. Available at: <https://digikogu.taltech.ee/et/item/1bbdb4ba-33ef-4596-a0bd-dcb6653bc81a>
- [3] „Computational engineering“, *Wikipedia*. 21. detsember 2023. Vaadatud: 20. märts 2024. [Online]. Available at: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Computational_engineering&oldid=1191135195
- [4] N. Queiroz, F. S. Westphal, ja F. O. Ruttkay Pereira, „A performance-based design validation study on EnergyPlus for daylighting analysis“, *Build. Environ.*, kd 183, lk 107088, okt 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107088.
- [5] Karl, „Ülekuumenemine ja selle kitsaskohtade lahendused“. Vaadatud: 25. veebruar 2024. [Online]. Available at: <https://o3.ee/ulekuumenemine/>
- [6] „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded–Riigi Teataja“. Vaadatud: 25. veebruar 2024. [Online]. Available at: <https://www.riigiteataja.ee/akt/105072023309?leiaKehtiv>
- [7] K. J. Lomas *et al.*, „Dwelling and household characteristics’ influence on reported and measured summertime overheating: A glimpse of a mild climate in the 2050’s“, *Build. Environ.*, kd 201, lk 107986, aug 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107986.
- [8] „Overheating in residential buildings: Challenges and opportunities“. Vaadatud: 20. märts 2024. [Online]. Available at: <https://journals.sagepub.com/doi/epub/10.1177/1420326X19871717>
- [9] S. Attia *et al.*, „Overheating calculation methods, criteria, and indicators in European regulation for residential buildings“, *Energy Build.*, kd 292, lk 113170, aug 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113170.
- [10] L. A. Bugenings ja A. Kamari, „Overheating in existing and renovated Danish single- and multi-family houses“, *J. Build. Eng.*, kd 57, lk 104835, okt 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2022.104835.
- [11] „Hoone energiatõhususe arvutamise metoodika–Riigi Teataja“. Vaadatud: 20. märts 2024. [Online]. Available at: <https://www.riigiteataja.ee/akt/107072020012?leiaKehtiv>
- [12] Enno Abel, Hendrik Voll, ja Teet Tark, *Hoonete energiatarve ja sisekliima*, kd 1. OÜ Presshouse, 2014.

- [13] M. Magni, F. Ochs, S. de Vries, A. Maccarini, ja F. Sigg, „Detailed cross comparison of building energy simulation tools results using a reference office building as a case study“, *Energy Build.*, kd 250, lk 111260, nov 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111260.
- [14] S. Elhadad ja Z. Orban, „A Sensitivity Analysis for Thermal Performance of Building Envelope Design Parameters“, *Sustainability*, kd 13, nr 24, Art. nr 24, jaan 2021, doi: 10.3390/su132414018.
- [15] F. Del Ama Gonzalo, B. Moreno Santamaría, ja M. J. Montero Burgos, „Assessment of Building Energy Simulation Tools to Predict Heating and Cooling Energy Consumption at Early Design Stages“, *Sustainability*, kd 15, nr 3, Art. nr 3, jaan 2023, doi: 10.3390/su15031920.
- [16] J. S. Carson, „Introduction to modeling and simulation“, *Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2005.*, dets 2005, lk 8 pp.-. doi: 10.1109/WSC.2005.1574235.
- [17] A. Vadiée, A. Dodoo, ja L. Gustavsson, „A Comparison Between Four Dynamic Energy Modeling Tools for Simulation of Space Heating Demand of Buildings“, *Cold Climate HVAC 2018*, D. Johansson, H. Bagge, ja Å. Wahlström, Toim, Springer Proceedings in Energy. , Cham: Springer International Publishing, 2019, lk 701–711. doi: 10.1007/978-3-030-00662-4_59.
- [18] A. Al Ka’bi, „Comparison of energy simulation applications used in green building“, *Ann. Telecommun.*, kd 75, juuni 2020, doi: 10.1007/s12243-020-00771-6.
- [19] F. R. d’Ambrosio Alfano, B. W. Olesen, D. Pepe, ja B. I. Palella, „Working with Different Building Energy Performance Tools: From Input Data to Energy and Indoor Temperature Predictions“, *Energies*, kd 16, nr 2, Art. nr 2, jaan 2023, doi: 10.3390/en16020743.
- [20] O. Buchin, B. Jänicke, F. Meier, D. Scherer, ja F. Ziegler, „The role of building models in the evaluation of heat-related risks“, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, kd 16, nr 4, lk 963–976, apr 2016, doi: 10.5194/nhess-16-963-2016.
- [21] „Energyplus Simulation - an overview | ScienceDirect Topics“. Vaadatud: 21. mai 2024. [Online]. Available at: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/energyplus-simulation>
- [22] C. R. Barrios Hernandez, „Thinking parametric design: introducing parametric Gaudi“, *Des. Stud.*, kd 27, nr 3, lk 309–324, mai 2006, doi: 10.1016/j.destud.2005.11.006.
- [23] M. DeKay ja G. Brown, *SUN, WIND & LIGHT: Architectural Design Strategies, 2nd edition*. 2001.

- [24] M. Gadelhak, „A Computational Framework for the Optimization of the Environmental Performance of Facades in Early Design Stages“, Technische Universität München, 2019. Vaadatud: 25. veebruar 2024. [Online]. Available at: <https://mediatum.ub.tum.de/1481164>
- [25] R. Oxman, „Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking“, *Des. Stud.*, kd 52, lk 4–39, sept 2017, doi: 10.1016/j.destud.2017.06.001.
- [26] J. H. Lee ja M. J. Ostwald, „Creative Decision-Making Processes in Parametric Design“, *Buildings*, kd 10, nr 12, Art. nr 12, dets 2020, doi: 10.3390/buildings10120242.
- [27] M. Sadeghipour Roudsari, M. Pak, ja A. Viola, „Ladybug: A Parametric Environmental Plugin For Grasshopper To Help Designers Create An Environmentally-conscious Design“, esitatud 2017 Building Simulation Conference, aug 2013. doi: 10.26868/25222708.2013.2499.
- [28] N. H. Sova, „PROJEKTEERIMISPROTSESSI EFEKTIIVSUSE TÕSTMINE PARAMEETRILISE MODELLEERIMISE ABIL“.
- [29] J. de S. Freitas, J. Cronemberger, R. M. Soares, ja C. N. D. Amorim, „Modeling and assessing BIPV envelopes using parametric *Rhinoceros* plugins *Grasshopper* and *Ladybug*“, *Renew. Energy*, kd 160, lk 1468–1479, nov 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.05.137.
- [30] „Liginullenergia_eluhooded_Vaikemaja_juhend.pdf“. Vaadatud: 25. märts 2024. [Online]. Available at: https://kredex.ee/sites/default/files/2019-03/Liginullenergia_eluhooded_Vaikemaja_juhend.pdf