



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

TARGA KODU LAHENDUSE ENERGIATÕHUSUS KORTERELAMUS

ENERGY EFFICIENCY OF SMART HOME SOLUTION IN APARTMENT BUILDING

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Helina Niit

Üliõpilaskood: 177496EAKI

Juhendaja: Jarek Kurnitski, professor

Kaasjuhendaja: Raimo Simson, vanemteadur

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.

19. detsember 2024

Autor: Helina Niit

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

19. detsember 2024

Juhendajad: Jarek Kurnitski

/ allkirjastatud digitaalselt /

Raimo Simson

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

".....".....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Helina Niit

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Targa kodu lahenduse energiatõhusus korterelamus“

mille juhendajad on Jarek Kurnitski ja Raimo Simson,

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.

19. detsember 2024

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 loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Helina Niit, 177496EAKI
Õppekava, peeriala: EAKI02/17 – Hoonete sisekliima ja veetehnika
Juhendajad: professor, Jarek Kurnitski, jarek.kurnitski@taltech.ee
vanemteadur, Raimo Simson, raimo.simson@taltech.ee

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Targa kodu lahenduse energiatõhusus korterelamus
(inglise keeles) Energy efficiency of smart home solution in apartment building

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Analüüsida väljaehitatud targa kodu lahendusega korteritest kogutud andmete põhjal tehnosüsteemide toimimist ning seadeväärtuste eelistusi.
2. Hinnata simulatsioonidega hoone kavandamisel ja korterite kasutamisel tehtavate valikute mõju korterite energiatarbimisele ning sisekliimale.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Täpsustatud lähteülesanne, lõputöö struktuur ja metoodika lühikirjeldus	27.09.2024
2.	Teoreetiline osa, metoodika kirjeldus, põhilised tulemused	17.11.2024
3.	Lõputöö lõplik vormistamine ja esitamine	19.12.2024

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: 19. detsember 2024. a

Üliõpilane: Helina Niit 19. detsember 2024. a
/allkirjastatud digitaalselt/
Juhendaja: Jarek Kurnitski 19. detsember 2024. a
/allkirjastatud digitaalselt/
Juhendaja: Raimo Simson 19. detsember 2024. a
/allkirjastatud digitaalselt/

SISUKORD

EESSÕNA	6
Lühendite ja tähiste loetelu	7
SISSEJUHATUS	8
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	10
2. TEOREETILISED ALUSED	13
2.1 Eluruumide ventilatsioon	13
2.2 Eluruumide küte	14
2.3 Sisekliima nõuded	15
2.4 Süsteemide juhtimine	18
2.5 Energiatõhususe hindamine	20
3. METOODIKA	24
3.1 Ülevaade korteritest ja kogutud andmetest	24
3.2 Simulatsioonimudel	28
4. TULEMUSED JA ANALÜÜS	35
4.1 Korterite andmete analüüs	35
4.2 Simulatsioonide tulemused	44
5. JÄRELDUSED	62
KOKKUVÕTE	64
SUMMARY	66
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	68

EESSÕNA

Uuemad korterelamud varustatakse targa kodu lahendusega, mis võimaldab korteri elanikel määrata sisekliima parameetreid vastavalt isiklikele eelistustele ja enesetundele. Lisaks on sellisel automaatikasüsteemil potentsiaal vähendada korterite energiatarbimist. Käesolev magistritöö tugineb väljaehitatud targa kodu lahendusega 2-toalisest ja 4-toalisest korterist kogutud andmetele, mille alusel analüüsiti korterite tehnosüsteemide toimimist ning elanike seadeväärtuste eelistusi. Olemasolevate korterite põhjal koostati simulatsioonimudelid. Simulatsioonidega hinnati hoone kavandamisel ja korterite elanike tehtavate valikute mõju energiatarbimisele ning sisekliimale.

Autor tänab professor Jarek Kurnitskit konsultatsioonide ja juhendamise eest, vanemteadurit Raimo Simsoni töö valmimisele kaasa aitamise eest ning Siim Vipsi ja Jaanus Lepikut Bisly OÜ-st andmete jagamise eest.

Magistritöö võtmesõnad: targa kodu lahendus, korterelamu, ventilatsiooni nõudluspõhine juhtimine, energiatõhusus, magistritöö.

Lühendite ja tähiste loetelu

CO₂ – süsinikdioksiid ehk süsihappegaas

IDA ICE –simulatsioonitarkvara (ingl k *IDA Indoor Climate and Energy*)

ON/OFF-juhtimine – sisse- ja väljalülitamisega juhtimine

PI-juhtimine – proportsionaalne ja integraalne juhtimine

PID-juhtimine – proportsionaalne, integraalne ja diferentsiaalne juhtimine

RH – suhteline niiskus, % (ingl k *relative humidity*)

SFP - ventilatsioonisüsteemi elektri erivõimsus, kW/(m³/s) (ingl k *specific fan power*)

SISSEJUHATUS

Korterelamud varustatakse üha enam targa kodu lahendusega, mis võimaldab korteri elanikel määrata sisekliima parameetreid vastavalt isiklikele eelistustele ja enesetundele. Targa kodu lahendusega süsteem võimaldab juhtida ventilatsioonisüsteemi vastavalt vajadusele, omades seega potentsiaali korterite energiatarbimise vähendamisel. Eluhoonete ventilatsioonisüsteemi energiatarbimise vähenemist nõudluspõhisel juhtimisel on tõendanud mitmed uurimused [1][2][3][4][5]. Kuigi antud teemat on laialdaselt uuritud [6], on elamutes nõudluspõhise juhtimisega ventilatsioonisüsteemi energiatarbimine mõjutatud paljudest tingimustest. Tingimuste rohkuse, nende erisuse ja esitama jätmise tõttu, on probleemne olemasolevate uurimuste põhjal üheselt määratleda, kuidas mõjutab korteripõhise ventilatsiooniseadme nõudluspõhine juhtimine korterite energiatarbimist.

Antud töö eesmärk on hinnata ventilatsioonisüsteemi nõudluspõhise juhtimise võimalusega korterites hoone kavandamisel ja korterite kasutamisel tehtavate valikute mõju korterite energiatarbimisele ning sisekliimale. Tehtavatest valikutest käsitletakse ventilatsiooni- ja küttesüsteemiga seonduvaid valikuid ning nende koosmõju. Töös analüüsitakse esmalt ühest 2-toalisest ja ühest 4-toalisest korterist kogutud ventilatsiooni- ja küttesüsteemi andmeid. Tegemist on uuema korterelamuga, kus korterites on kasutusel korteripõhine ventilatsiooniseade ja põrandküte ning kus korteri elanikel on võimalik juhtimispaneelilt määrata sisekliima parameetreid. Ventilatsiooniseadmeid juhitakse tsentraalselt väljatõmbekanalisis paiknevate süsihappegaasi (CO₂) ja suhtelise niiskuse (RH) andurite järgi. Korteri mõõtmisandmete põhjal analüüsitakse korterites kasutatavate süsteemide toimimist ning elanike sisekliima parameetrite seadeväärtuste eelistusi.

2-toalisele ja 4-toalisele korterile koostatakse mitme tsooniga IDA-ICE mudelid. Simulatsioonimudeli koostamisel lähtutakse enamasti hoone ehitusprojektist, korteritest kogutud andmetest ning majandus- ja taristuministri määrusest nr. 58 „Hoone energiatarbimise arvutamise meetodika“. Mudelitele tehakse simulatsioonid, mille tulemusena hinnatakse hoone kavandamisel ja korteri elaniku tehtud valikute mõju energiatarbimisele ja sisekliimale.

Töös käsitletakse järgmisi hoone kavandamisel tehtavaid valikuid ja hoone kasutajate määratud seadeväärtuste valikuid:

- Ventilatsioonisüsteemi juhtimisloogika
- CO₂ andurite asukoht

- CO₂ taseme seadeväärtus
- Ventilatsiooniseadme soojustagasi tüüp
- Sissepuhketemperatuuri seadeväärtus
- Põrandküttesüsteemi juhtimisloogika
- Põrandküttesüsteemi tüüp

Antud töö tulemuste tõlgendamisel tuleb arvestada järgnevate limitatsioonide ja lihtsustustega:

- Analüüsitava korterite valim on väike ning vaadeldavate korterite andmete analüüsimisel tuginetakse ainult kogutud andmetele ning ehitusprojektis esitatud informatsioonile. Töös puudub ülevaade elanike arvust, ruumidest toimuvatest tegevustest, akende avamisest, filtrite mustumisest ja muudest tehnosüsteemide tööd mõjutavatest teguritest.
- Simulatsioonimudelites rakendatava inimeste kohalolu kirjeldavast kasutusprofiilist teistsugust profiili kasutades võivad tulemused suuresti erineda.
- Töös ei käsitleta köögikubu kasutamist ja juhtimist.

Käesolev magistritöö koosneb kuuest peatükist. Esimeses peatükis esitatakse teemaga seotud kirjanduse ülevaade. Teises peatükis käsitletakse töö teoreetilisi aluseid. Kolmandas peatükis antakse ülevaade hoonetest ja lähteandmetest ning kirjeldatakse meetodikat. Neljandas peatükis tuuakse välja töö tulemused ning esitatakse tulemustel põhinev analüüs. Viiendas peatükis esitatakse järeldused.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Hoonete energiatarbimine moodustab Euroopas kogu energiatarbimisest ligikaudu 40%, millest 68% tarbivad eluhooned ning 32% mitteiluhooned [7]. Hoonete energiatarbimise vähendamiseks on Euroopa Parlament ja Nõukogu kehtestanud direktiivi 2010/31/EL, mille eesmärk edendada liidu piires hoonete energiatõhusust. Direktiivi 2010/31/EL on muudetud direktiiviga (EL) 2018/844, milles on pööratud tähelepanu hoonetes automatiseerimis- ja juhtimissüsteemide kasutamisele energiatarbimise vähendamiseks. [8] Hoone energiatõhususe ja sisekliima tagamisel on automaatikal oluline osa, võimaldades tuvastada ja vähendada hoone energiakulusid, optimeerida energiakasutust ning rakendada asjakohaseid juhtimisstrateegiaid [7].

Ventilatsiooniseadmete elektritarbimine moodustab enam kui 2% Euroopa Liidu kogu elektritarbimisest [9], mistõttu on seadmete energiatarbimise vähendamine potentsiaalne võimalus kogu energiatarbimise vähendamiseks. Üks meetod ventilatsioonisüsteemi energiatarbimise vähendamiseks on selle nõudluspõhine juhtimine. Meetod kujutab endast ventilatsioonisüsteemi õhuvooluhulga reguleerimist vastavalt tegelikule vajadusele. Vooluhulka on võimalik vähendada seni, kuni on tagatud hoone kasutajale nõuetekohane õhukvaliteet ning välditud kahjustuste tekitamine hoonetele. [10] Inimeste tekitatud saasteainete kontsentratsiooni tuvastamiseks ja hõivatus taseme hindamiseks on sobiv indikaator süsihappegaasi (CO₂) tase [11]. Hoone kahjustuste vältimiseks ehk hallituse ja kondenseerumise ära hoidmiseks on samuti oluline juhtida vooluhulka vastavalt niiskustasemele [7].

Nõutud tasemete tagamiseks kõikides ruumides tuleb paigaldada vastavad andurid sobivatesse asukohtadesse. CO₂ andurid on soovitatav paigaldada ruumidesse, kus inimesed viibivad. Anduri paigaldamisel mitut ruumi teenindavasse õhukanalisse, võib andur anda ebatäpse tulemuse mõne ruumi tegeliku taseme kohta näidates pigem teenindavate ruumide keskmist taset. [11] Näiteks on täheldatud ruumides anduri näidust kõrgemat CO₂ taset, kui viibitavates ruumidest toimub väljatõmme siirdeõhuna läbi suletud ukse all oleva ava [12]. Õhukvaliteedi tagamine võib olla eriti probleemne öösel, kui elanikud ei reguleeri ruumi õhuvahetust, mistõttu võib CO₂ tase soovitust palju kõrgemale tõusta [13], mõjudes negatiivselt elanike unekvaliteedile ning enesetundele järgmisel päeval [14]. Sellegipoolest on anduri paigaldamine väljatõmbekanalisse tihti eelistatud variant madalama hinna tõttu [15]. Antud töös arvestatakse seega simulatsioonidega energiatarbimise hindamisel CO₂ anduri paigutuse ning uste avatuse ja suletuse mõjuga sisekliimale.

Ventilatsiooni nõudluspõhise juhtimise mõju elamute energiatarbimisele on laialdaselt uuritud. G. Guyot, M. H. Sherman ja I. S. Walker koostasid 38 elamu ventilatsioonisüsteemi nõudluspõhise juhtimise uurimuste ülevaate, millest mõned uurimused jõudsid järelduseni, et nõudluspõhise juhtimisega on võimalik saavutada kuni 60%-ine energiasääst, samas mõni uurimus näitas ka 26%-ilist energiatarbimise tõusu. Ülevaates toodi välja, et uurimuste võrdlemine on keeruline käsitlevate juhtimisstrateegiatega, sisekliima näitajate ja standardite erisuse, ebapiisavate andmete ning tingimuste esitamise tõttu. [6] Kuigi elamute ventilatsioonisüsteemi nõudluspõhist juhtimist on laialdaselt uuritud, on probleemne tulenevalt uurimustest rakendatavate tingimuste erisuste ja nende esitama jätmise tõttu leitud tulemusi käesoleva töö kontekstis rakendada.

Antud töö suhtes leiduvad mõned asjakohasemad mõõtmistel põhinevad uurimused. Luksemburgi Ülikoolis uurimuses analüüsiti elamu ventilatsiooniseadme nõudluspõhise juhtimise mõõtmistulemusi kütteperioodil. Elamut kasutasid kaks inimest, ventilatsiooniseade oli varustatud soojustagastiga ja kolmeastmelise kiiruse reguleerimise võimalusega. Seadet juhti tsentraalselt CO₂ anduriga väljatõmbel ehk mõne ruumi lubatust kõrgemat CO₂ taset ei mõõdetud ega tuvastatud. Uurimuse tulemusena leiti, et tsentraalse nõudluspõhise juhtimisega CO₂ taseme järgi väljatõmbel on võimalik vähendada kogu hoone aastast energiatarbimist 50%. [1] T. R. Nielsen ja C. Drivsholm uurisid Taanis asuva elamu ventilatsioonisüsteemi nõudluspõhise juhtimise mõju sisekliimale ja energiatarbimisele. Nõudluspõhine juhtimine toimus vastavalt CO₂ ja niiskussisalduse näitajatele õhuvõtus ja heitõhus. Ventilatsioonisüsteem töötas kahel kiirusel, tagades elamus õhuvooluhulga kas 0,35 l/sm² või 0,10 l/sm². Elamut kasutasid kaks täiskasvanut ja kaks last. Süsteemi testiti mitmete piirväärtustega ning leiti, et parimaid tulemusi andis ventilaatori lülitamise suuremale kiirusele, kui CO₂ näitajate vahe oli 150 ppm ja niiskussisalduse näitajate vahe 2 g/kg. Nende piirväärtuste korral töötas ventilatsioonisüsteem madalamal tootlikkusel 37% ajast, vähendades ventilaatorite elektritarbimist 35%. [5]

Lisaks on elamute ventilatsiooni nõudluspõhise juhtimise mõju energiatarbimisele hinnatud simulatsioonidega. S. Calliou et al. uurisid 4-toalise elamu simulatsioonimudeli põhjal andurite paigutuse ja erinevate juhtimisviiside mõju ventilatsiooni energiatarbimisele. Nõudluspõhise juhtimisega ventilatsioonisüsteemi energiatarbimist võrreldi sellega samaväärse sisekliima tagava nõudluspõhise juhtimiseta ventilatsiooni energiatarbimisega. Nende kahe energiatarbimise suhte põhjal määrati süsteemide energiatõhusust kirjeldavad koefitsiendid. [16] Energiatõhususe arvutamiseks kasutatavad koefitsiendid on esitatud Belgia ministri määruses [17]. Määruse kohaselt

on tsentraalse juhtimisega sissepuhke-väljatõmbe süsteemi koefitsient 0,87, kui süsteemil on vähemalt üks CO₂ anduriga väljatõmbel ning niiskustaseme mõõtmine märgruumides, ja koefitsiendiks 0,82, kui süsteemil on vähemalt üks CO₂ andur igas kuivruumis ning niiskustaseme mõõtmine märgruumides. [17] S. Calliou et al. [16] läbi viidud uurimuses määratud tingimused erinevad magistritöös uuritavast kontekstist ning on jäetud osaliselt kirjeldamata, mistõttu ei ole need sobilikud energiatarbimise hindamisel aluseks võtmisel.

Käesolevas töös käsitletakse lisaks põrandküttesüsteemi lahenduste ja juhtimisviiside mõju energiatarbimisele nõudluspõhise juhtimisega ventilatsioonisüsteemiga korterites. Põrandküttesüsteem on juhtimise mõttes aeglase reageerimisega, nõudes soojusliku mugavuse ja energiatõhususe tagamiseks täpset juhtimist [7]. K.-V. Võsa, A. Ferrantelli ja J. Kurnitski tehtud uurimuses analüüsiti PI ja ON/OFF juhtimisega küttesüsteemide energiatarbimist. Uurimusest selgus, et erinevad küttesüsteemid ja nende juhtimisviisid mõjutavad operatiivset temperatuuri erinevalt ning parima tulemuse võimaldab saavutada põrandkütte PI juhtimine. [18] T. M. Kull, M. Thalfeldt ja J. Kurnitski viisid läbi uurimuse, milles analüüsiti PI-kontrolleri parameetrite mõju põrandkütte juhtimisele. Selle uurimuse tulemused näitasid, et optimeeritud parameetritega PI-kontrolleriga on võimalik tagada ideaalilähedane juhtimine. [19]

2. TEOREETILISED ALUSED

Inimesed veedavad suure osa ajast eluruumides, mistõttu on oluline tagada elamute ruumides nõuetekohane sisekliima. Sisekliima tagamiseks on elamud varustatud vastavate kütte- ja ventilatsioonisüsteemidega, mille lahenduste valik ja juhtimine avaldavad mõju hoone energiatarbimisele. Järgnevas teoreetilises osas on esitatud ülevaade eluruumides kasutatavatest ventilatsioonisüsteemi ja küttesüsteemi lahendustest, sisekliima nõuetest soojuslikule mugavusele ja õhukvaliteedile, süsteemide juhtimisest ning energiatarbimise hindamise arvutuste alustest.

2.1 Eluruumide ventilatsioon

Uuemad korterelamud varustatakse mehaanilise ventilatsioonisüsteemiga, mille ülesanne on tagada hoone kasutajate sekkumiseta vajalik õhuvahetus. Mehaaniline ventilatsioonisüsteem on energiatõhususe saavutamisel oluline komponent, võimaldades ehitada hoone soojuskadude vähendamiseks õhutihedalt. Kuigi ventilatsioonisüsteem tarbib omakorda energiat, on võimalik süsteemi soojustarbimist optimeerida soojustagastuse kasutamise abil. Külmas kliimas on ventilatsiooni soojustagastuse mõju kriitiline ning üldiselt on liginullenergiahoonete ehitamine võimalik vaid soojatagastusega ventilatsioonisüsteemi kasutamisel. [10]

Eluhoonetes on ventilatsiooniseadmed varustatud kas rootorsoojustagasti või vastuvoolse plaatsoojustagastiga. Plaatsoojustagastis liiguvad sissepuhke ja väljatõmbeõhk läbi erisektsioonide. Selline lahendus väldib saastunud väljatõmbeõhu jõudmise tagasi sissepuhkeõhku, kuid sealjuures on takistatud ka niiskusetagastus, tehes plaatsoojustagasti tundlikumaks jäätumise suhtes. Rootorsoojustagastis soojendab väljatõmbeõhk pöörleva soojusvaheti abil külma sissepuhkeõhu. Rootorsoojustagastites toimuv niiskusetagastus aitab vältida jäätumist, kuid erinevalt plaatsoojustagastist võib rootorsoojustagasti kasutamisel rohkem saastunud väljatõmbeõhku jõuda tagasi sissepuhkeõhku. Eluhoonetes kasutatakse tsentraalsetes ehk mitut korterit teenindavates süsteemides üldiselt puhta sissepuhkeõhu tagamiseks plaatsoojustagastit. Korteri põhistes süsteemides ei ole lõhnade ja saasteainete levik tagasi sissepuhkeõhku nii probleemne ning rootorsoojustagastite kasutamine võib olla eelistatud. [10]

Soojustagasti kasutab väljatõmbeõhust saadavat soojust sissepuhkeõhu soojendamiseks, mis aitab vähendada küttekalorifeeri koormust ning seeläbi ka kogu ventilatsioonisüsteemi energiatarbimist [10]. Lisaks tarbivad energiat ventilatsiooniseadme ventilaatorid, mille ülesanne on tagada vajalik õhuvahetus. Ventilaatorite valik sõltub eelkõige õhuvooluhulkadest ja rõhutõusust. Vajalik õhuvooluhulk määratakse teenindavate ruumide õhuvooluhulkate liitmisel. Ventilaatorite rõhutõus tuleneb õhukanalites, lõppelementides, mürasummutites, reguleer- ja tuleohutusarmatuuris ning õhuvõtu ja heitõhu elementides tekkivast rõhukaost. Rõhukao tekitavad süsteemis veel õhuvõtul ja väljatõmbel õhupuhastamiseks kasutatavad filtrid. Määrduvad filtritest tulenevat suurenenud ventilatsioonisüsteemi elektritarbimist tuleb arvestada süsteemi energiatarbimise arvutamisel. [20]

Ventilaatsioonisüsteemi energiatarbimist on samuti võimalik vähendada nõudluspõhise juhtimisega. Nõudluspõhine juhtimisel kohandatakse ventilatsioonisüsteemi õhuvooluhulka vastavalt tegelikule vajadusele. Vooluhulka on võimalik vähendada seni, kuni on tagatud hoone kasutajale nõuetekohane õhukvaliteet ning välditud kahjustuste tekitamine hoonele. [10] Nõudluspõhise juhtimisega ventilatsioonisüsteemi energiatarbimist määravad mitmed tegurid: ruumide kasutusprofiil, õhuvooluhulga piirväärtused, sisekliima parameetrid, sissepuhke temperatuur, süsteemi ülesehitus ja juhtimisstrateegiad [15].

2.2 Eluruumide küte

Põrandküttesüsteemiga toimub ruumide kütmine ruumi õhust kõrgema temperatuuriga põrandapinna abil. Veega põrandküttesüsteemis paiknevad põranda konstruktsioonis põrandküttetorud. Torudes on soojuskandajaks üldjuhul maksimaalselt 40°C kuni 45°C pealevoolutemperatuuriga vesi. [20] Veega põrandküttesüsteemide kasutamine on uuemates hoonetes laialt levinud lahendus. Antud süsteemil on palju eeliseid:

- puuduvad nähtavad küttekehad, mistõttu on võimalik paremini planeerida ruumi kasutust;
- suurele pinnale jaotunud küttekoormus võimaldab kasutada madalat soojuskandja temperatuuri, mis tõstab soojuspumpade efektiivsust;
- ruumides väheneb vertikaalsuunaline temperatuurigradient ning seega tagatakse paremini soojuslik mugavus;

- väheneb süsteemi soojatarbimine võrreldes radiaatorküttesüsteemiga, kuna ümbritsevate tarindite kaalutud keskmine pinnatemperatuur väheneb, mis võimaldab hoida 1-2 °C madalamat õhutemperatuuri;
- süsteem tekitab vähem müra. [21]

Lisaks on võimalik pörandküte lahendada elektriga, mille korral paiknevad torustiku asemel pörandas elektrikaablid. [20] Elektriga pörandkütte on võrreldes veega pörandküttega aga oluliselt suurema primaarenergia tarbimisega [22].

2.3 Sisekliima nõuded

Eluhoonete õhukvaliteet sõltub mitmetest parameetritest ja saasteallikatest nagu seda on elanike arv ja ruumide hõivatus, saasteained tegevustest, ehitusmaterjalidest, puhastusvahenditest jne. Eluhoonetes tuleb ventilatsioonil eraldada ka ruumidest liigset niiskust, et vältida hallituse ja kondenseerumise teket ning nendest tulenevaid kahjustusi hoonele ja elanike tervisele. [7] Direktiivi 2010/31/EL kohaselt tuleb energiatõhususe hindamisel arvestada nõutud sisekliima tagamisega. [8] Sisekliima hindamisel on oluline määratleda õhukvaliteedi ja soojusliku mugavuse parameetreid, kuna need mõjutavad suuresti energiatarbimist. [23]

Hoone sisekliima parameetrite piirväärtuste määramisel lähtutakse standardist EVS-EN 16798-1:2019+NA2019. See standard kirjeldab, kuidas saab kehtestada ja kasutada projekteerimise kriteeriumeid süsteemide dimensioneerimiseks, ning defineerib, kuidas kehtestada ja määratleda põhilisi parameetreid hoone energiaarvutusteks ning sisekeskkonna hindamisteks. Standardi kohaselt eristatakse sisekeskkonna kvaliteedi puhul nelja kategooriat: kategooria 1 – kõrge tase, kategooria 2 – keskmine tase, kategooria 3 – tagasihoidlik tase ning kategooria 4 – madal tase. Uutes eluhoonetes on sobilik tagada sisekeskkonna kvaliteedi kategooria 2. [24]

2.3.1 Sisekliima nõuded küttesüsteemile

Standardi EVS-EN 16798-1:2019+NA2019 järgsed ruumide õhutemperatuuride väärtused energiaarvutuste jaoks on kirjeldatud tabelis 2.1. Eluruumides vastab sisekeskkonna kategooriale 2 kütteperioodil siseõhu temperatuur 20°C kuni 25°C ning jahutusperioodil 23°C kuni 26°C. Kütte- ja jahutusperioodi vahel on lubatud kasutada

korrigeeritud ülemisi ja alumisi temperatuuri piirväärtuseid, mis jäävad kütte- ja jahutusperioodi piirväärtuste vahele. [24]

Tabel 2.1 Temperatuurivahemikud tunnipõhisele jahutuse ja kütte energiaarvutusele [24]

Hoone või ruumi tüüp	Kategooria	Temperatuurivahemik kütteperioodiks, °C Riietus umbes 1,0 clo	Temperatuurivahemik jahutusperioodiks, °C Riietus umbes 1,0 clo
Eluhooned, eluruumid (magamistoad, köögid, elutoad jne) Istuv aktiivsus ~ 1,2 met	I	21,0 kuni 25,0	23,5 kuni 25,5
	II	20,0 kuni 25,0	23,0 kuni 26,0
	III	18,0 kuni 25,0	22,0 kuni 27,0
	IV	17,0 kuni 25,0	21,0 kuni 28,0

2.3.2 Sisekliima nõuded ventilatsioonisüsteemile

Mehaanilistes ventilatsioonisüsteemides määratakse kõikidele ruumidele eraldi sissepuhke ja väljatõmbe vooluhulgad. Vooluhulkade määramine on kohati ebamäärane, kuna projekteerimisetapis pole kindlalt teada, mitu inimest elamut ja ruume kasutama hakkavad. Minimaalsed sissepuhke ja väljatõmbe vooluhulgad sõltuvad osaliselt ruumide ja elamu suurusest, väiksemates ruumides on kasutajaid tõenäoliselt vähem vajades seetõttu ka väiksemaid õhuvooluhulkasid. [10]

Elamutes tuleb tagada sissepuhe magamistubadesse ja elutuppa ning väljatõmme köögist, vannitoast ja WC-dest, et eemaldada saasteaineid ja niiskust. Sissepuhke ja väljatõmbega ruumide vahel peab sealjuures toimuma siirdeõhu liikumine. Minimaalsed õhuvooluhulgad sissepuhkele ja väljatõmbele on toodud tabelis 2.2. Tabelis 2.2 esitatud väärtused eeldavad, et toimub õhu täielik segunemine ehk kontsentratsioonid hõivatud tsoonis ja väljatõmbel mõõdetuna on võrdsed. [10]

Tabel 2.2 Minimaalsed õhuvooluhulgad elamutes [10]

	Sissepuhe, l/s	Väljatõmme, l/s
Elutoad >15 m²	8+0,27 l/(s·m ²)	
Magamistoad >15 m²	14	
Elutoad ja magamistoad 11 - 15 m²	12	
Magamistoad <11 m²	8	
WC		10
Vannituba		15
Vannituba ühetoalises korteris		10
Majapidamisruum		8

Garderoob ja hoiuruum		6
Köök		8
Köök ühetoalises korteris		6
Kohtäratõmme pliidikubust		25
Summaarne ventilatsioon elamus		0,42 l/(s·m ²)
Korterelamu trepikoda		0,5 1/h

Tabelis 2.2 toodud õhuvooluhulk kogu elamu kohta 0,42 l/(s·m²) vastab õhuvahetus kordarvule 0,6 1/h, kui laekõrgus on 2,52 m. Vastavalt ruumiplaneeringule võib sissepuhe elutuppa toimuda ka magamistoast siirdeõhuna, kuid minimaalne sissepuhe elutuppa peab olema vähemalt 12 l/s. Väljaarvutatud summaarsete sissepuhke ja väljatõmbe vooluhulkade erinevuse korral tõstetakse väiksemat vooluhulka, kuni see on võrdne suurema vooluhulgaga. Antud õhuvooluhulkade puhul on eeldatud, et süsteem töötab konstantselt ruumide hõivatuse ajal. Kui ruumid pole hõivatud, tuleb materjalidest eralduvate saasteainete eemaldamiseks tagada õhuvooluhulk kogu korteris vähemalt 0,1 l/(s·m²), kui puuduvad täpsemad andmed. [10]

Ventilatsioonisüsteemi nõudluspõhise juhtimise korral dimensioneeritakse süsteem vastavalt tabelis 2.2 toodud väärtustele. Nõudluspõhisel juhtimisel kasutatakse CO₂ mõõdetud väärtusi inimhõive tuvastamiseks. Standardi EVS-EN 16798-1:2019+NA2019 kohaselt on CO₂ piirväärtus sisekeskkonna kategooria 2 tagamiseks elutubades 800 ppm-i ning magamistubades 550 ppm-i üle välise kontsentratsiooni. [24] CO₂ piirväärtused sisekeskkonna kategooriate kohta on esitatud tabelis 2.3.

Tabel 2.3 Arvutuslikud CO₂ kontsentratsioonid hõivatud elu- ja magamistubades [24]

Kategooria	Arvutuslik ΔCO₂ kontsentratsioon elutubade jaoks (PPM üle välise kontsentratsiooni)	Arvutuslik ΔCO₂ kontsentratsioon magamistubade jaoks (PPM üle välise kontsentratsiooni)
I	550	380
II	800	550
III	1350	950
IV	1350	950

Eluhoonetes tuleb ventilatsioonil eraldada ruumidest liigset niiskust vältimaks pikaajase suhtelise niiskuse tagajärjel tekkivaid kahjustusi hoonele ja seeläbi ka elanike

tervisele. [7] Sisekeskkonna kategooria 2 tagamiseks tuleb suhtelist õhuniiskust standardi kohaselt hoida alla 60%-i, väärtused sisekeskkonna kategooriate kohta on toodud tabelis 2.4. [24]

Tabel 2.4 Soovituslikud arvutuslikud suhtelise niiskuse tasemed õhu kuivatamiseks hõivatud ruumides [24]

Hoone/ruumi tüüp	Kategooria	Arvutuslik suhteline niiskus õhu kuivatamiseks, %
Ruumid, kus niiskuse kriteerium on määratud inimeste hõive järgi	I	50
	II	60
	III	70

2.4 Süsteemide juhtimine

Nõudluspõhise juhtimisega ventilatsioonisüsteemis kohandatakse õhuvooluhulka pidevalt vastavalt ruumide tegelikule vajadusele. Võrreldes konstantse juhtimisega on võimalik nõudluspõhise juhtimisega vähendada süsteemi energiatarbimist, mis tuleneb väiksemast ventilaatori energiatarbimisest, sissepuhkeõhu kütmis- ja jahutamisevajadusest ning ka ruumide vähenenud küttekoormusest. Nõudluspõhise juhtimise korral on oluline defineerida, milline on nõudluse kontrollimiseks sobivaim näitaja, millised on nõuded anduritele ja nende paigutusele ning määrata sobiv juhtimisloogika. [15]

2.4.1 Parameetrite valik

Korteripõhiste ventilatsiooniseadmete nõudluspõhisel juhtimisel sobib nõudlust määravate parameetritena kasutada CO₂ ja RH tasemeid. CO₂ taset kasutatakse inimeste ja nende tegevusest tulenevate saasteainete hindamiseks. Kuigi CO₂ tase ise ei mõjuta inimeste õhukvaliteedi tajumist, on see sobiv indikaator teiste kaebusi põhjustavate saasteainete tasemete hindamiseks, mille tasemete muutused on proportsionaalsed CO₂ taseme muutustega. Muudest allikates kui inimestest tulenevate saasteainete tasemete määramiseks on võimalik mõõta lenduvaid orgaanilisi osakesi (VOC). Inimeste tervist ja mugavust mõjutavaid VOC-e on aga keeruline õhus tuvastada ning paljude VOC-ide ja nende kombinatsioonide mõju kohta inimestele on madala

kontsentratsiooni juures vähe teada. [15] Seega antud töös VOC tasemeid nõudluspõhisel juhtimisel ei käsitleta. Kõrge niiskustasemega ruumides on võimalik määrata RH nõudlust kirjeldavaks parameetrik [15], et vältida liigsest niiskusest tulenevaid kahjustusi hoonele ja seeläbi ka elanike tervisele [7]. Suhtelise niiskuse taset ei ole soovitatav kasutada ainsa parameetrina süsteemi juhtimiseks, kuna see ei tuvasta korrektselt ruumide hõivatust [15][16]. CO₂ ja RH tasemete piirmäärad on esitatud peatükis 2.3.

2.4.2 Andurid ja nende paigutus

Õhukvaliteeti mõõtvad andurid peavad andma kiire, stabiilse ja usaldusväärse väljundi kogu nende eluea jooksul, vastasel juhul võib toimuda ruumide ala- või üleventileerimine, mille tagajärjeks on halb sisekliima või liigne energiakulu. Nõutud tasemete tagamiseks kõikides ruumides tuleb andurid paigaldada sobivatesse asukohtadesse. Andurid on võimalik paigaldada ruumidesse või väljatõmbekanalisse. Väljatõmbele anduri paigaldamine on sageli eelistatud variant madalama hinna tõttu, kuid see on soovituslik siis, kui süsteem teenindab ühte tsooni. [15] Anduri paigaldamine väljatõmbele ei ole kõige sobilikum, kui viibitavatest ruumidest toimub väljatõmme siirdeõhuna läbi suletud ukse all oleva ava, sellise lahenduse puhul on tähendatud ruumides seadme väljatõmbel paikneva anduri näidust kõrgemat CO₂ taset [12]. Õhukvaliteedi tagamine eluhoonetes võib olla eriti probleemne öösel, kui elanikud ei reguleeri ruumi õhuvahetust, mistõttu võib CO₂ tase soovitusel palju kõrgemale tõusta [13], mõjudes negatiivselt elanike unekvaliteedile ning enesetundele järgmisel päeval [14]. Anduri paigaldamisel mitut ruumi teenindavasse õhukanalisse, võib andur anda ebatäpse tulemuse mõne ruumi tegeliku taseme kohta näidates pigem teenindavate ruumide keskmist taset. [11]

2.4.3 Süsteemide juhtimisloogika

Ventilatsioonisüsteemi nõudluspõhisel juhtimisel kasutatakse ventilatsioonisüsteemide reguleerimiseks sageli kas proportsionaalset juhtimist (P), proportsionaalset ja integraalset juhtimist (PI) või proportsionaalset, integraalset ja diferentsiaalset juhtimist (PID). Proportsionaalset juhtimist on soovitatav kasutada mitmesuguste kasutusprofiilide puhul. PI ja PID juhtimist tuleks eelistada ruumides, kus kontsentratsioonide tasemed muutuvad suuresti lühikese aja jooksul. PI ja PID juhtimine võimaldavad suurendada sissepuhke õhuvoolhulka kiiresti, tagades sellega

väiksema viivitusaja. PI juhtimise asemel PID juhtimise kasutamine ei paranda oluliselt ventilatsioonsüsteemi juhtimise tulemusi. [25]

Põrandküttesüsteemides reguleeritakse põrandkütte voolhulka enamasti vastavalt ruumitemperatuurile, vannitubades võib olla eelistatud põrandatemperatuuri järgi juhtimine. Temperatuuri mõõdetakse vastavate anduritega. Põrandküttesüsteem on juhtimise mõttes aeglase reageerimisega, nõudes seega soojusliku mugavuse ja energiatõhususe tagamiseks täpset juhtimist [7]. Praktikas kasutatakse sageli põrandkütte juhtimiseks ON/OFF kontrollereid. Selline juhtimine võib tekitada suure õhutemperatuuri kõikumise, mispärast võivad ruumi kasutajad tõsta soovitud sisetemperatuuri saavutamiseks seadetemperatuuri. Optimeeritud parameetritega PI juhtimisega on aga võimalik saavutada tulemusi, mis on lähedased ideaalsele juhtimisele. [19]

2.5 Energiatõhususe hindamine

Ruumide ja hoone energiatarbimist hinnatakse simulatsiooniprogrammide abil. Energiatarbimise hindamine on keerukas protsess, mis nõuab nii tarindite soojust salvestavate omadustega kui ka nende mõjuga vabasoojuste suurusele arvestamist. Protsessi lihtsustamiseks on välja arendatud mitmeid programme, mille abil saab arvutada energiatarbimist, kütte- ja jahutuskooormusi ning sisekliimat. [26] Antud töös kasutatakse ruumide ja hoone energiatarbimise ning sisekliima analüüsimiseks simulatsiooniprogrammi IDA ICE 4.8.

2.5.1 Väliskliima ja sisekliima

Hoone energiatarbimist mõjutab oluliselt väliskliima. Aastase energiatarbimise hindamiseks teostatakse arvutused Eesti energiaarvutuse baasaastaga ehk nn Estonian TRY-ga. Baasaasta kirjeldab tüüpilist väliskliimat Eestis, sisaldades ühetunnise intervalliga andmeid temperatuuri, suhtelise niiskuse, tuule kiiruse ja suuna, päikese normaalsuunalise otsekiirguse ja hajuskiirguse andmeid. Baasaastat kasutatakse Eestis energiatõhususe miinimumnõuete ja suvise ruumiõhutemperatuuri kontrollimise arvutamiseks. [26] Antud töös kasutatakse perioodi 1990-2020 kliimaandmete põhjal koostatud baasaastat. Ruumide sisekliima seadeväärtuste määramisel arvestatakse

väljaehitatud hoonetest kogutud mõõtmisandmetega ning sisekliimale kehtivate nõuetega, mis on esitatud peatükis 2.3.

2.5.2 Kasutusprofiilid ja vabasoojused

Energiatõhususe arvutusmudelites on lubatud kombineerida sarnase kasutusega ruumid üheks tsooniks ning vabasoojustega arvestamisel tuleb kasutada võimalikult tõelähedasi andmeid. [20] Majandus- ja taristuministri määruses nr. 58 „Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika“ on kirjeldatud elamu detailsed kasutusprofiilid, kus valguse, seadmete ja inimeste kasutusaste on antud tundide kohta. Valgustuse ja seadmete soojuseraldused on määruse nr.58 järgselt vastavalt 8 W/m^2 ja 3 W/m^2 . [27] Töös sobiva CO₂ anduri asukoha analüüsimiseks tuleb iga ruum kujutada eraldi tsoonina ning määrata eraldi ruumide kaupa inimeste kasutusprofiilid. Elamu ruumide kohta puuduvad standardsed kasutusprofiilid, seega lähtutakse inimeste kohalolu kirjeldamiseks S. Wolf et al. [28] Taani ajakasutuse uuringu põhjal koostatud profiilidest. Inimestest tulenevate kogusoojuseraldustega ja CO₂ eraldusega arvestamiseks määratakse enamuses ruumides vastavalt määrusele nr. 58 [27] soojuseraldusühikuks 1,2 met, erandina määratakse magamistubades määrusele mittevastav soojuseraldusühik 0,9 met.

2.5.3 Soojuskaod välispiiretest

Hoone välispiirete summaarne soojuskadu sõltub piirdetarindite soojuslähivustest, piirdetarindite liitekohtade joonsoojuslähivustest, lokaalsete soojustuse katkestustest, lähiviikude punktsoojuslähivustest ning õhuleketest tulenevatest soojuskadudest. Ehitusprojektides arvutatakse hoonete piirdetarindite soojuslähivused U_i ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$) vastavalt standarditele EVS 908-1 ja EVS-EN ISO 6946. Soojuslähivuste arvutamisel tuleb arvestada piirdetarindi iga kihi soojustakistusega, kihtide ja pindade summeerimisel tekkiva kogu soojustakistusega ning konstruktsioonide iseärasustest tekkivate parandusteguritega. Liitekohtade joonsoojuslähivused Ψ_j (W/m) on võimalik arvutada standardites EVS EN ISO 10211, EVS-EN ISO 10077-2 ja ISO 15099 toodud arvutusmeetodite abil. Tüüpitarindite ja tüüpsõlmede projekteerimisel on lubatud kasutada näiteks liginullenergiahoonete joonsoojuslähivuste kataloogis toodud väärtuseid. Avatäidete soojuslähivus sõltub klaasiosa ja raamiosa soojuslähivusest ning nende prongsentuaalsest jaotusest, mis võib suuresti varieeruda. Akende summaarne soojuslähivus on leitav valemiga (2.1). [20]

$$U_a = \frac{U_k \cdot A_k + U_r \cdot A_r + \Psi_k \cdot l_k}{A_k + A_r} \quad (2.1)$$

- kus U_a – akna soojusläbivus, W/(m²·K);
 U_k – klaasiosa soojusläbivus, W/(m²·K);
 A_k – klaasiosa pindala, m²;
 U_r – lengi- ja raamiosa soojusläbivus, W/(m²·K);
 A_r – lengi- ja raamiosa pindala, m²;
 Ψ_k – klaasiserva (aknalengi perimeetril) joonkülmasilla soojusläbivus, W/(m·K);
 l_k – klaasiserva perimeetri pikkus, m.

Õhu infiltratsiooni mõjutavad paljud tegurid, nagu seda on hoonepiirete õhupidavus, lekkekohtade paiknemine, õhurõhkude erinevus kahel pool piiret, kasutatavate materjalide omadused ja kliimatingimused. Hoone õhupidavust iseloomustatakse õhulekkearvuga q_{E50} (m³/(h·m²)), mis näitab kui suur õhuvoolum (m³/h) läbib 1m² suuruse pindalaga piiret, kui kahel pool piiret on teatud õhurõhkude erinevus. Valmis hoonel mõõdetakse kogu hoone õhuleket ning seda väljendatakse keskmise õhulekkena. [20] Aasta keskmine infiltratsiooni õhuvoolum V_{inf} (l/s) on võimalik arvutada valemiga (2.2) [27]:

$$V_{inf} = \frac{q_{E50} \cdot A_{välispiirded}}{3,6 \cdot x} \quad (2.2)$$

- kus V_{inf} – infiltratsiooni õhuvoolum (l/s);
 q_{E50} – õhulekkearv, m³/(h·m²);
 $A_{välispiirded}$ – välispiirde sisepindala, m²;
 x – hoone kõrgust arvestav kordaja.

2.5.4 Ventilatsioonisüsteem

Korterites tagatakse õhuvahetus soojustagastiga mehaanilise ventilatsioonisüsteemiga. Korteripõhistes ventilatsiooniseadmetes kasutatakse nii rootor- kui plaatsoojustagastit. Ventilatsiooni soojustagastuse tõhusust saab iseloomustada temperatuuri suhtarvuga, mis on leitakse valemiga 2.3. [20]

$$\eta_t^{st} = \frac{t_{pt}^{sp} - t_{et}^{sp}}{t_{et}^{vt} - t_{et}^{sp}} \quad (2.3)$$

- kus η_t^{st} – soojustagasti temperatuuri suhtarv, -;
- t_{pt}^{sp} – sissepuhkeõhu temperatuur pärast tagastit, °C;
- t_{et}^{sp} – sissepuhkeõhu temperatuur enne tagastit, °C;
- t_{et}^{vt} – sissepuhkeõhu temperatuur enne tagastit, °C.

Ventilatsioonisüsteemi energiatarbimise arvutustes tuleb arvestada soojustagasti jäätumise vältimisele kuluva energiatarbimisega. Energiasimulatsioonides jäätumise vältimisega arvestamiseks piiratakse heitõhu minimaalset temperatuuri. Täpsemate andmete puudumisel sobib heitõhu miinimumtemperatuuriks määrata:

- +5 °C-i plaatsoojusvaheti korral;
- 0 °C-i rootorsoojusvaheti või niiskustagastusega plaatsoojusvaheti korral. [20]

Pärast soojustagastit toimub vajadusel sissepuhkeõhu soojendamine järelküttekalorifeeriga [20]. Vaadeldavates korteripõhistes ventilatsioonisüsteemides kasutatakse elektrilisi kalorifeere, mis soojendavad sissepuhkeõhu vastavalt seadeväärtusele. Määruse nr. 58 järgselt on püsiva sissepuhketemperatuuriga süsteemis sissepuhketemperatuur üldjuhul 18 °C [27].

Korteripõhised ventilatsiooniseadmed on varustatud nii sissepuhke kui väljatõmbe poolel ventilaatoriga, mis tarbivad elektrit. Ventilatsioonisüsteemi elektritarbimise efektiivsust kirjeldab ventilatsioonisüsteemi elektri erivõimsus ehk SFP (*specific fan power*). SFP arvutatakse valemiga 2.5. [20]

$$SFP = \frac{P_{vent,SP} + P_{vent,VT}}{L} \quad (2.4)$$

- kus SFP – ventilatsioonisüsteemi elektri erivõimsus, kW/(m³/s);
- $P_{vent,SP}$ – sissepuhkeventilaatori arvutuslik elektrivõimsus, kW;
- $P_{vent,VT}$ – väljatõmbeventilaatori arvutuslik elektrivõimsus, kW;
- L – arvutuslik õhuvooluhulk (sissepuhke ja väljatõmbe õhuvooluhulkade erinevuse korral arvestatakse suurimaga), m³/s.

Ventilatsioonisüsteemi SFP väärtust määravad dimensioneeritud õhuvooluhulk ja rõhutõus ventilaatorites. Energiaarvutustes arvestatakse SFP sissepuhkel ja väljatõmbel keskmiselt mustunud filtritega, mille rõhukadu on hinnanguliselt 50 Pa [20].

3. METOODIKA

Antud peatükis esitatakse ülevaade korterite andmete analüüsi ja energiatarbimise hindamise alustest. Korterite andmete analüüs põhineb korteritest kogutud andmetele. Esimeses alapeatükis on toodud ülevaade väljaehitatud korteritest ning neist kogutud kütte- ja ventilatsioonisüsteemide parameetrite andmepunktidest. Energiatarbimise hindamisel analüüsitakse simulatsioonidega hoone kavandamisel ja elanike tehtavate valikute mõju energiatarbimisele ja sisekliimale. Teises alapeatükis esitatakse analüüsitavad valikud ning simulatsioonimudeli aluseks olevad lähteandmed.

3.1 Ülevaade korteritest ja kogutud andmetest

Töös analüüsitakse väljaehitatud korteritest kogutud mõõtmisandmeid. Korterite kütmine toimub enamuses ruumides veega põrandküttega, vannitubades ja duširuumides kasutatakse elektrilist põrandkütet. Ventilatsioonisüsteem on lahendatud korteripõhise ventilatsiooniseadmega, mis on varustatud plaatsoojustagastiga ning elektrilise järelküttekalorifeeriga. Sisepuhe toimub elutuppa ja magamistubadesse ning väljatõmme vastavalt korteri plaanile vannitubadest, WC-st, köögist, majapidamisruumist, garderoobist ja esikust. Seadmeid juhitakse korterites nõudluspõhiselt väljatõmbekanalisis paiknevate CO₂ ja RH andurite järgi.

Korterite elanikel on võimalik reguleerida sisekliima seadesuurusi korteris asuvalt hooneautomaatika juhtimispaneelilt. Paneelilt saab määrata elutoa ja magamistubade õhutemperatuure ning soovi korral elutoa, magamistubade ja vannituba/WC põrandatemperatuure. Ventilatsioonisüsteemi juhtimist mõjutavatest parameetritest on võimalik paneelilt määrata ventilatsiooni sissepuhke temperatuuri, CO₂ ja RH taset. Seadistustäpsuse ja vahemiku väärtused on toodud tabelis 3.1.

Tabel 3.1 Korterite juhtimispaneelilt seadistatavad väärtused

Küte (seadistustäpsus / vahemik)		
	Õhutemperatuur	Põrandatemperatuur
Elutuba	0,5°C / 18°C kuni 27°C	0,5°C / 18°C kuni 27°C *
Magamistuba	0,5°C / 18°C kuni 27°C	0,5°C / 18°C kuni 27°C *
Vannituba/WC	-	0,5°C / 18°C kuni 34°C *

Ventilatsioon (seadistustäpsus / vahemik)	
Sissepuhke temperatuur	1 °C / 16°C kuni 25°C
CO ₂ tase	50ppm / 500ppm – 1000ppm
RH tase	1% / 30% – 70%
* valikuline	

3.1.1 2-toaline korter

2-toalise korteri pindala on 59 m² ning see koosneb elutuba/köögist, magamistoast, vannitoast ja esikust. Joonisel 3.1 on näidatud korterite ruumide paigutus.



Joonis 3.1 2-toalise korteri plaan

Ventilatsioonisüsteemi ehitusprojekti järgsed õhuvooluhulgad on toodud tabelis 3.2.

Tabel 3.2 2-toalise korteri ehitusprojekti järgsed õhuvooluhulgad

	Sissepuhe, l/s	Väljatõmme, l/s
Elutuba/köök	14	13
Vannituba		15
Magamistuba 1	14	
Kokku	28	28

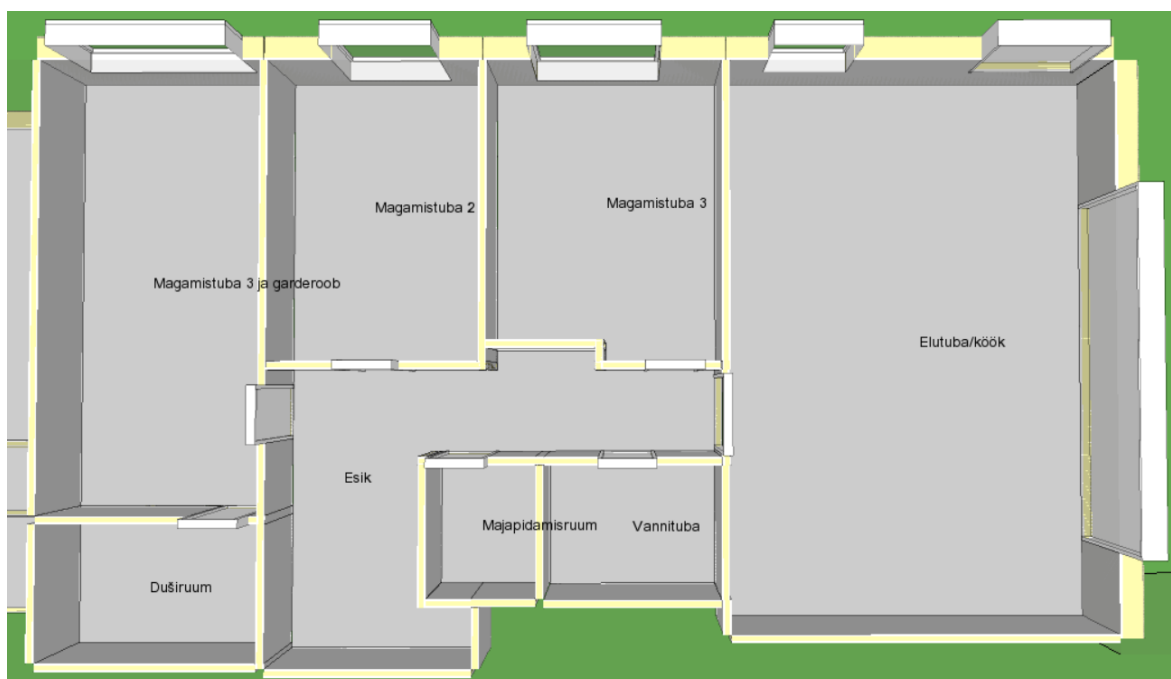
Ehitusprojekti järgsed ruumide siseõhu temperatuurid ja küttekoormused on näidatud tabelis 3.3. Projekti järgselt on arvutuslik välisõhutemperatuur -22°C.

Tabel 3.3 2-toalise korteri ehitusprojekti järgsed siseõhutemperatuurid ja küttekoormused

	Siseõhu temperatuur, °C	Küttekoormus, W
Elutuba/köök	22	1090
Magamistuba	22	590
Vannituba	22	820*
* elektrilise mugavuspõrandkütte võimsus		

3.1.2 4-toaline korter

4-toalise korteri pindala on 114 m² ning see koosneb elutuba/köögist, kolmest magamistoad, garderoobist, kahest vannitoad, majapidamisruumist ja esikust. Joonisel 3.2 on näidatud korterite ruumide paigutus.



Joonis 3.2 4-toalise korteri plaan

Ventilatsioonisüsteemi ehitusprojekti järgsed õhuvooluhulgad on toodud tabelis 3.4.

Tabel 3.4 4-toalise korteri ehitusprojekti järgsed õhuvooluhulgad

	Sissepuhe, l/s	Väljatõmme, l/s
Elutuba/köök	25	8
Vannituba		15
Majapidamisruum		5
Esik		5
Magamistuba 1	7	
Magamistuba 2	7	
Magamistuba 3	14	
Garderoob		5
Duširuum		15
Kokku	53	53

Ehitusprojekti järgsed ruumide siseõhu temperatuurid ja küttekoormused on esitatud tabelis 3.5. Projekti järgselt on arvutuslik välisõhutemperatuur -22°C.

Tabel 3.5 4-toalise korteri ehitusprojekti järgsed siseõhutemperatuurid ja küttekoormused

	Siseõhu temperatuur, °C	Küttekoormus, W
Elutuba/köök	22	1220
Magamistuba 1	22	290
Magamistuba 2	22	260
Magamistuba 3	22	430
Vannituba	22	615*
Duširuum	22	820*
* elektrilise mugavuspõrandkütte võimsus		

3.1.3 Kogutud andmed

Korteritest kogutud andmed hõlmavad kütte- ja ventilatsioonisüsteemide parameetrite andmeid. Andmed on kogutud 15-minutilise mõõtmisammuga perioodil 23.2.2024 – 21.3.2024. Parameetrid koos mõõtesammu ja ühikuga on esitatud tabelis 3.6.

Tabel 3.6 Korterite kütte- ja ventilatsioonisüsteemi andmed mõõtesammu ja ühikuga

Küttesüsteem		
	Õhutemperatuur	Põrandatemperatuur
Elutuba/köök	0,1 °C või 0,5 °C	0,1 °C või 0,5 °C
Magamistuba	0,1 °C või 0,5 °C	0,1 °C või 0,5 °C
Vannituba/WC	-	0,5 °C
Ventilatsioonisüsteem		
Sissepuhke temperatuur	1 °C	
Õhuvõtu temperatuur	1 °C	

Väljatõmbe temperatuur	1 °C
CO ₂ tase	1 ppm
RH tase	1%
CO ₂ tase seadesuurus	50 ppm
RH tase seadesuurus	1%
Ventilaatori kiirus	1%

Andmete kohaselt on 2-toalises korteris ventilaatori minimaalne kiirus 9% ning maksimaalne 43%, 4-toalise korteris on kiirused vastavalt 22% ja 65%. Seadme sissepuhke ja väljatõmbe ventilaatorid töötavad samal kiirusel. Ehitusprojektis ei ole täpsustatud, millise õhuvooluhulga antud kiirused tagavad ning millele tuginedes antud kiirused on seadistatud. Kogutud andmetest puuduvad samuti andmed ruumide temperatuuride ja sissepuhkeõhu temperatuuri seadeväärtuste kohta ning neid saab tuletada vaid mõõdetud väärtuste põhjal. Lisaks pole võimalik kogutud andmete põhjal hinnata soojustagasti tööd.

3.2 Simulatsioonimudel

2-toalisele ja 4-toalisele korterile koostatakse mitme tsooniga IDA-ICE (4.8) mudelid. Simulatsioonimudeli koostamisel lähtutakse enamasti hoone ehitusprojektist, korteritest kogutud andmetest ning majandus- ja taristuministri määrusest nr. 58 „Hoone energiatõhususe arvutamise metoodika“. Simulatsioonide tulemusena hinnatakse hoone kavandamisel ja korteri elaniku tehtud valikute mõju energiatarbimisele ja sisekliimale.

Töös võrreldakse järgmiste hoone kavandamisel tehtavate valikute ja hoone kasutajate määratud seadeväärtuste valikute mõju korteri energiatarbimisele ja sisekliimale:

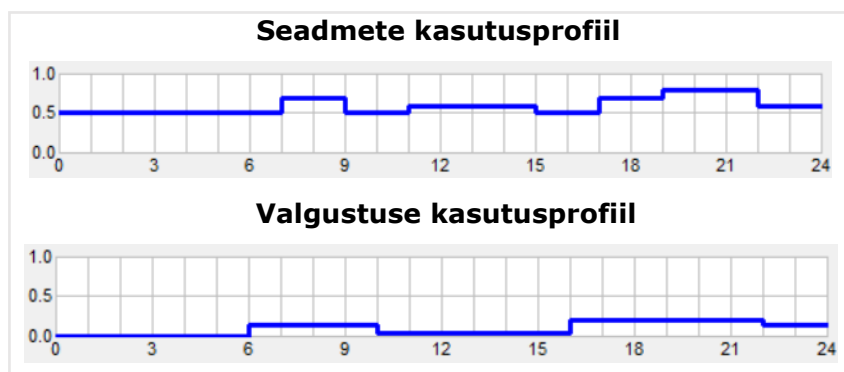
- Ventilatsioonisüsteemi juhtimisloogika – konstantne, lineaarne, proportsionaalne ja PI juhtimine
- CO₂ andurite asukoht – üks andur väljatõmbekanalisis ja eraldi andurid ruumides
- CO₂ taseme seadeväärtus – 500, 600, 700, 800, 900 ppm-i
- Ventilatsiooniseadme soojustagasti tüüp – rootorisoojustagasti ja plaatsoojustagasti
- Sissepuhketemperatuuri seadeväärtus – 16°C, 18°C ja 20°C
- Põrandküttesüsteemi juhtimisloogika – ON/OFF-juhtimine ja PI-juhtimine
- Põrandküttesüsteemi tüüp – veega põrandküte kõikides ruumides ja veega põrandküte eluruumides ning elektriga põrandküte mägiruumides

3.3.1 Väliskliima ja sisekliima

Energiatarbimise hindamisel väliskliima tingimistega arvestamiseks kasutatakse perioodi 1990-2020 kliimaandmete põhjal koostatud baasaastat ehk nn Estonian TRY-d. Simulatsioonides määratakse vaikumisi ruumide temperatuuri seadeväärtuseks kõikides ruumides 22°C. Ventilatsioonisüsteemi õhuvooluhulgad vastavad süsteemi konstantsel juhtimisel ehitusprojektis esitatud väärtustele ning on esitatud tabelites 3.1 ja 3.3. Süsteemi nõudluspõhise juhtimise korral CO₂ ja RH taseme järgi tuleb siskliima kategooria 2 saavutamiseks süsteemil tagada magamistubades 550 ppm-i ning elutoas 800 ppm-i üle välise kontsentratsiooni [24]. Väliseks kontsentratsiooniks arvestatakse 400 ppm-i. Simulatsioonides määratakse lihtsustatult vastavalt standardile EVS-EN 16798-1:2019+NA2019 [24] ventilatsioonisüsteemi minimaalseks õhuvooluhulgaks 0,1 l/(s·m²) ning maksimaalseks õhuvooluhulgaks projekteeritud õhuvooluhulk.

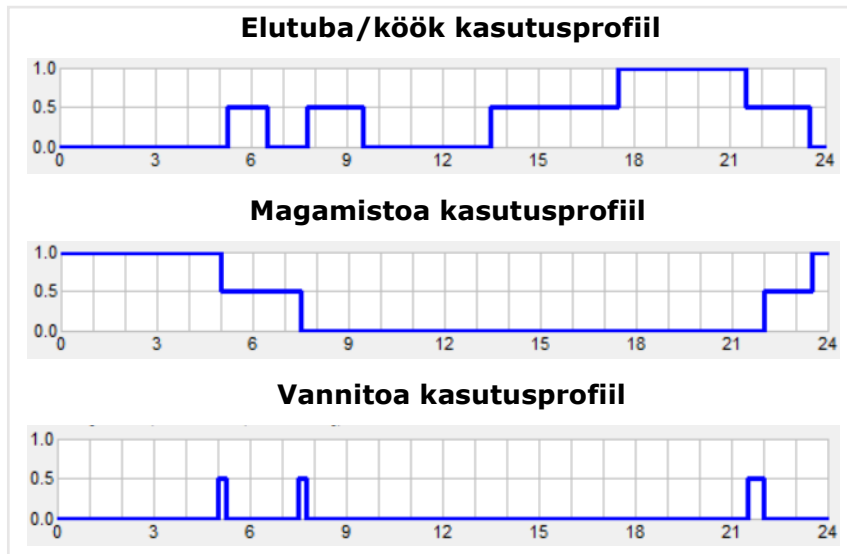
3.3.2 Kasutusprofiilid ja vabasoojused

Seadmetest ja valgustusest tulenevate vabasoojuste määramisel kasutatakse täpsemate andmete puudumisel määruses nr. 58 [27] kirjeldatud elamu detailseid kasutusprofiile ning korterelamu soojuseraldusi. Valgustuse ja seadmete kasutusprofiilid on toodud joonisel 3.3 ning soojuseraldused on vastavalt 8 W/m² ja 3 W/m².

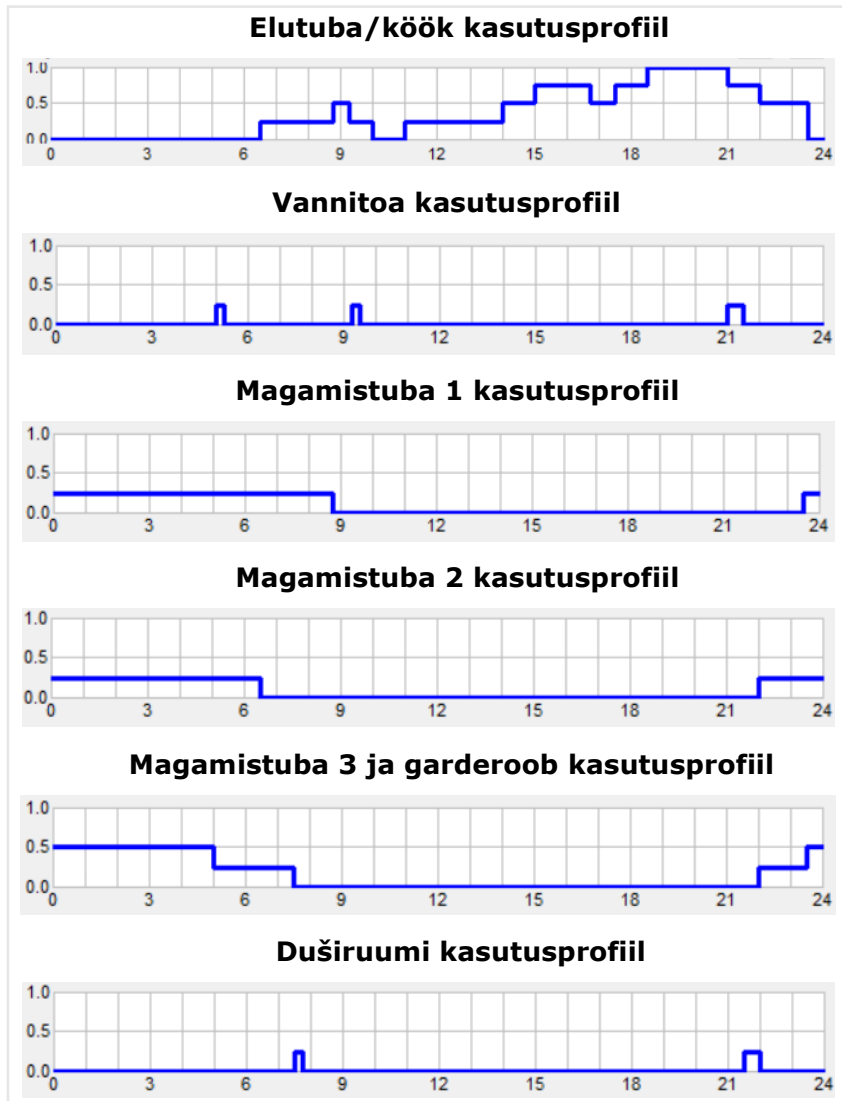


Joonis 3.3 Seadmete ja valgustuse kasutusprofiilid

Ruumides inimeste kohalolu kirjeldamisel lähtutakse S. Wolf et al. [28] läbi viidud uurimuses koostatud kasutusprofiilidest ruumide kaupa. Inimestest tulenevate kogusoojuseraldustega ja CO₂ eraldusega arvestamiseks määratakse enamuses ruumides soojuseraldusühikuks 1,2 met ning erandina magamistubades 0,9 met. 2-toalises korteris on arvestatud inimeste arvuks kaks inimest ning 4-toalises neli inimest. 2-toalise korteri kasutusprofiilid ruumide kaupa on esitatud joonisel 3.4 ning 4-toalise korteri kasutusprofiilid ruumide kaupa joonisel 3.5.



Joonis 3.4 2-toalise korteri kasutusprofiilid



Joonis 3.5 4-toalise korteri kasutusprofiilid

3.3.3 Soojuskaod välispiiretest

Avatäidetest, välispiiretest, piirdetarindite liitekohtadest ja soojustuse katkestusest ning infiltratsioonist tulenevate soojuskadude arvutamiseks määratakse simulatsioonimudelile lähteandmed. Piirdetarindite soojusläbivused U_i ($W/m^2 \cdot K$) arvestatakse vastavalt ehitusprojekti esitatud andmetele, mille järgselt on välisseina soojusläbivus $0,18 W/(m^2 \cdot K)$ ning akende soojusläbivus ligikaudu $0,90 W/(m^2 \cdot K)$. Välisseina puhul on tegemist termoroovidega kergkarkasseinaga.

Akende soojusläbivused arvutatakse eraldi läbi, tulenevalt akende raami- ja lengiosa protsentuaalsest osakaalu ning seega kogusoojusläbivuse varieeruvusest. Täpsemate andmete puudumisel arvestatakse 3-kordse paketi puitalumiiniumaknal lengi paksuseks 100mm, klaasi soojusläbivuseks $0,6 W/(m^2 \cdot K)$, raami soojusläbivuseks vastavalt määrusele nr. 58 [27] $1,7 W/(m^2 \cdot K)$ ning klaasiserva joonkülmasillaks $0,06 W/(m^2 \cdot K)$. Akende päikseseläbivutegur on ehitusprojekti järgi 0,3. Akende summaarne soojusläbivus arvutatakse vastavalt peatükis 2.5 toodud valemile 2.1. 2-toalise ja 4-toalise korteri akende soojusläbivused on esitatud vastavalt tabelites 3.7 ja 3.8.

Tabel 3.7 2-toalise korteri akende summaarsed soojusläbivused

Ruum	Laius, m	Kõrgus, m	$U_i, W/(m^2 \cdot K)$
Elutuba/köök	1,5	2,0	0,97
	1,5	2,0	0,97
	0,9	2,3	1,08
	1,2	2,0	1,02
Magamistuba	2,4	1,5	0,94

Tabel 3.8 4-toalise korteri akende summaarsed soojusläbivused

Ruum	Laius, m	Kõrgus, m	$U_i, W/(m^2 \cdot K)$
Elutuba/köök	5,0	2,3	0,85
	1,5	1,5	1,01
	1,2	1,5	1,06
Magamistuba 1	1,8	2,0	0,93
Magamistuba 2	1,5	2,0	0,97
Magamistuba 3	2,4	1,5	0,94

Liitekohtadest tulenevad joonsoojusläbivused Ψ_j (W/m) arvestatakse mudelis vastavalt tabelile 3.9.

Tabel 3.9 Hoone liitekohtade joonsoojusläbivused

Liitekoht	Ψ_{kr} W/(m·K)
Välisseina välisnurk	0,05
Välisseina sisenuk	-0,05
Akna seinakinnitus	0,06

Õhu infiltratsioonist tulenevate soojuskadudega arvestamiseks tuleb määrata simulatsioonimudelile õhulekkearv. Täpsemate andmete puudumisel määratakse õhulekkearvuks $1,5 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$, mida kasutatakse määruse nr 58 [27] kohaselt energiatõhususarvutustes, kui hoone ehitamisel kavandatakse viia läbi õhulekkearvu mõõtmise. Simulatsiooniprogrammile korrektse väärtuse sisestamiseks lähtutakse peatükis 2.5 toodud aasta keskmise infiltratsiooni õhuvooluhulga valemist 2.2. Võrrandi mõlemad pooled jagatakse välispiirete pindalaga $A_{\text{välispiirded}}$ läbi, ning leitakse simulatsioonimudelile kohane õhulekkearv $l/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$, mis arvestab hoone kõrguse mõjuga. Hoone kõrgust arvestavaks kordajaks x võetakse määruse kohaselt 15, kuna tegemist on viiekorruselise hoonega [27]. Järgnevalt on esitatud arvutuskäik:

$$V_{\text{inf}} = \frac{q_{E50} \cdot A_{\text{välispiirded}}}{3,6 \cdot x} \rightarrow \frac{V_{\text{inf}}}{A_{\text{välispiirded}}} = \frac{q_{E50}}{3,6 \cdot x} = \frac{1,5 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)}{3,6 \cdot 15} = 0,0278 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$$

3.3.4 Küttesüsteem

Põrandküttesüsteemi küttekoormused määratakse vastavalt ehitusprojektis esitatud väärtustele. Korterite küttekoormused on toodud tabelites 3.2 ja 3.4. Põrandküttesüsteemi temperatuurigraafiku määramisel lähtutakse ehitusprojektis esitatud andmetest, mille kohaselt on süsteemi pealevoolu temperatuur $35 \text{ }^\circ\text{C}$ ja tagasivoolu temperatuur $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

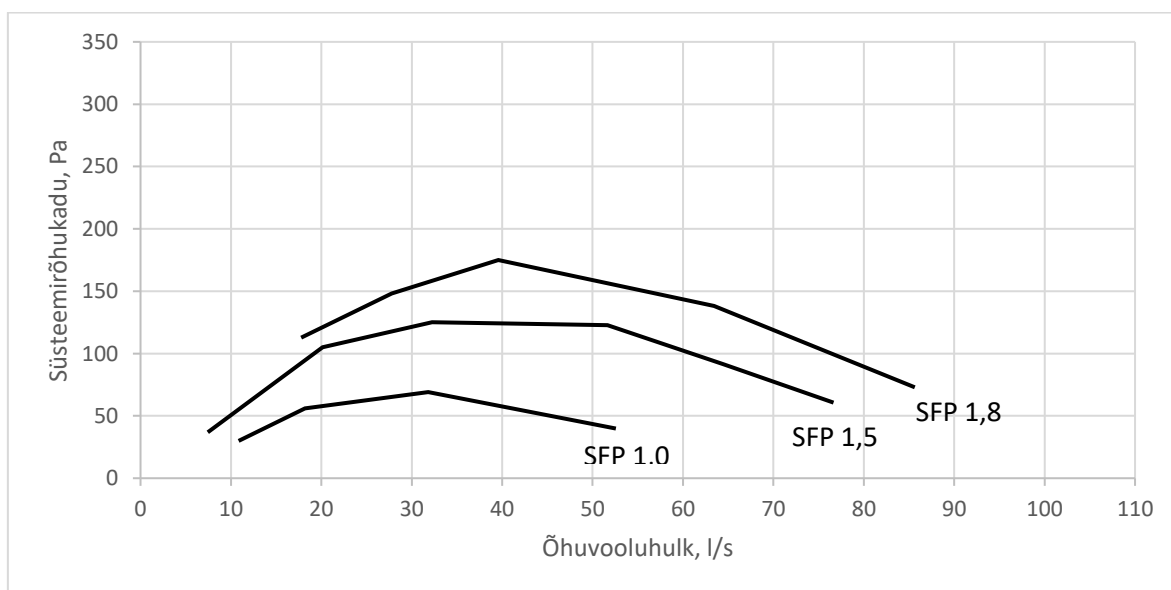
Töös võrreldakse kahte küttesüsteemi lahendust: veega põrandküte kõikides ruumides ja veega põrandküte eluruumides ning elektriga põrandküte vannitubades. Põrandküttesüsteemi juhtimisel vaadeldakse PI ja ON/OFF juhtimist. ON/OFF juhtimist analüüsitakse surnud tsoonidega (*deadband*) $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ning $\pm 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Ruumides on vaikumisi tagatud õhutemperatuur $22 \text{ }^\circ\text{C}$. Lisaks analüüsitakse olukorda, kus eluruumides tagatakse õhutemperatuur $22 \text{ }^\circ\text{C}$ ning vannitubades õhutemperatuur $24 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.3.5 Ventilatsioonisüsteem

Ventilatsiooniseadme soojustagastuse efektiivsust iseloomustav temperatuuri suhtarv leitakse vastavalt projekteeritud õhuvooluhulgale ja arvatud rõhukaole. Temperatuuri suhtarv vastab väljaehitatud korterites kasutatava seadme tehnilistele näitajatele. Soojustagasti jäätumise vältimisele kuluva energiatarbimisega arvestamiseks määratakse heitõhu miinimumtemperatuuriks:

- +5 °C-i plaatsoojusvaheti korral;
- 0 °C-i rootorsoojusvaheti korral [20].

Korteripõhised ventilatsiooniseadmed on varustatud elektrilise järelküttekalorifeeriga võimsusega 1500W. Vaikimisi määratakse simulatsioonides sissepuhke temperatuuri seadeväärtuseks 18 °C, kuid lisaks analüüsitakse energiatarbimist sissepuhke temperatuuri seadeväärtusel 16 °C ja 20 °C. Ventilatsioonisüsteemi elektri erivõimsused (SFP) vastavad mudelis projekteeritud õhuvooluhulga ja arvatud rõhukao järgi leitud väärtustele. Korterites kasutatavate seadmete Vallox 101 MV SFP graafikud on kujutatud joonisel 3.6.



Joonis 3.6 Vallox 101 MV SFP väärtused [29]

Ventilatsioonisüsteemi juhtimisloogikatest võrreldakse konstantselt töötavat süsteemi ning lineaarse, proportsionaalse ja PI juhtimisega süsteemi. Lineaarse ning proportsionaalse juhtimise alaks määratakse 50 ppm-i. PI kontrolleri võimendusteguriks määratakse 0,02 ning integreerimisajaks 2000 s. Süsteemi juhtimisel analüüsitakse samuti CO₂ anduri paigutust ning CO₂ taseme seadeväärtuseid avatud ja suletud ustega. CO₂ anduri paigutustest vaadeldakse väljatõmbel paikneva ning ruumides paiknevate

andurite järgi juhtimist. Õhukvaliteedi tagava CO₂ seadeväärtuse leidmisel analüüsitakse juhtimist CO₂ seadeväärtustel 500, 600, 700, 800 ja 900 ppm-i.

Töös käsitletakse nii avatud kui suletud uste mõju õhukvaliteedile. Uste suletusel vaadeldakse olukorda, kus inimeste ruumis viibimisel magamistubade ukсед on suletud. Ukse aluse ava kõrguseks arvestatakse 15 mm.

3.3.6 Primaarenergia tarbimine

Hoone kavandamisel ja korterite elanike tehtavate valikute energiatarbimise mõju hindamisel analüüsitakse lisaks nende mõju kütte- ja ventilatsioonisüsteemi primaarenergia tarbimisele. Selleks arvestatakse määruses nr 63 [30] esitatud energiakandjate kaalumisteguritega. Primaarenergia tarbimise määramisel kasutatakse veega põrandkütte energiatarbimisel kaugkütte kaalumistegurit 0,9 ja tõhusa kaugkütte kaalumistegurit 0,65. Elektrilise põrandkütte, sissepuhkeõhu soojendamise ja ventilaatorite energiatarbimisel kasutatakse elektrile vastavat kaalumistegurit 2,0. [30] Põrandkütte soojuse jaotamise ja väljastamise kasutegur on vastavalt määrusele nr 58 [27] 1,0. Veeküttesüsteemi ringlupumba elektritarbimisega ei arvestata.

4. TULEMUSED JA ANALÜÜS

Antud peatükis esitatakse tulemused ja nende analüüs. Esimeses alapeatükis analüüsitakse väljaehitatud korteritest kogutud andmete põhjal süsteemide toimimist ning elanike seadeväärtuste eelistusi. Lisaks hinnatakse kogutud andmete rakendamise võimalust korterite simulatsioonimudelites. Teises alapeatükis esitatakse simulatsioonide tulemused ning analüüsitakse hoone kavandamisel ja korteri elanike tehtavate valikute mõju korterite energiatarbimisele ja sisekliimale.

4.1 Korterite andmete analüüs

Väljaehitatud korterites analüüsiti perioodil 23.2.2024 – 21.3.2024 kogutud andmeid, loetelu olemasolevatest andmetest on toodud tabelis 3.6. Ehitusprojekti on esitatud vähe teavet süsteemide juhtimise kohta, seega on analüüsi aluseks peamiselt korteritest kogutud andmed. Järgnevas alapeatükides on esitatud eraldi ventilatsioonisüsteemi ning küttesüsteemi andmete analüüs.

4.1.1 Ventilatsioonisüsteemi andmete analüüs

Ehitusprojekti dokumentatsiooni ning kogutud andmete alusel toimub süsteemi juhtimine vastavalt korterielanike määratud seadeväärtustele. Korterite juhtimispaneelilt määratavate seadeväärtuste vahemik (vt tabel 3.1) on lai, mistõttu võivad elanike otsused oluliselt mõjutada ventilatsioonisüsteemi energiatarbimist. Juhtimispaneelilt pakutavad valikud on kohati ebapraktilised, näiteks võimaldades määrata suhtelise niiskuse seadeväärtuseks vaid 30%. Süsteemi juhtimise kohta puudub teave, kas ja millises ulatuses arvestatakse juhtimisel määratud seadeväärtustega.

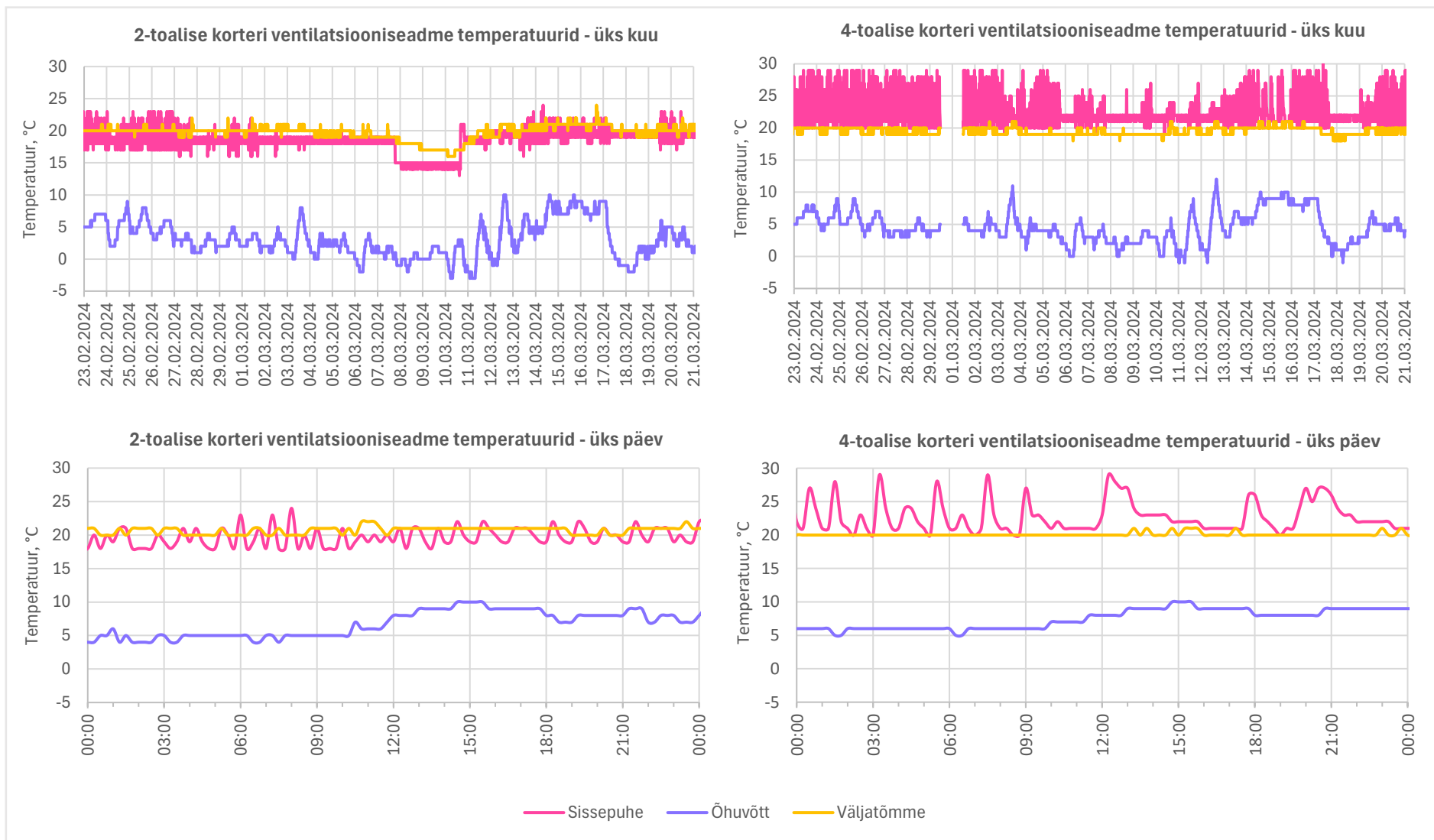
Korterite ventilatsiooniseadmete kohta on olemas andmed sissepuhke, õhuvõtu ja väljatõmbe temperatuuride kohta, temperatuurigraafikud on esitatud joonisel 4.1. Kogutud andmete põhjal pole võimalik hinnata soojustagasti efektiivsust ega järelküttekalorifeeri toimimist. Graafikute järgselt on 2-toalises korteris sissepuhketemperatuuri seadeväärtus ligikaudu 19°C ning 4-toalises korteris ligikaudu 21°C. Sissepuhke temperatuurid varieeruvad päevas märkimisväärselt: 2-toalises

korteris maksimaalselt 6°C vahemikus 17°C kuni 23°C ning 4-toalises korteris maksimaalselt 9°C vahemikus 20°C kuni 29°C. Sisepuhke temperatuuri varieerumine 2-toalises ja 4-toalises korteris osaliselt kattub ning varieerumine on suurem kõrgema välisõhu temperatuuri juures. Selline kõikumine võib olla seotud järelküttekalorifeeri sisse- ja väljalülitumisega.

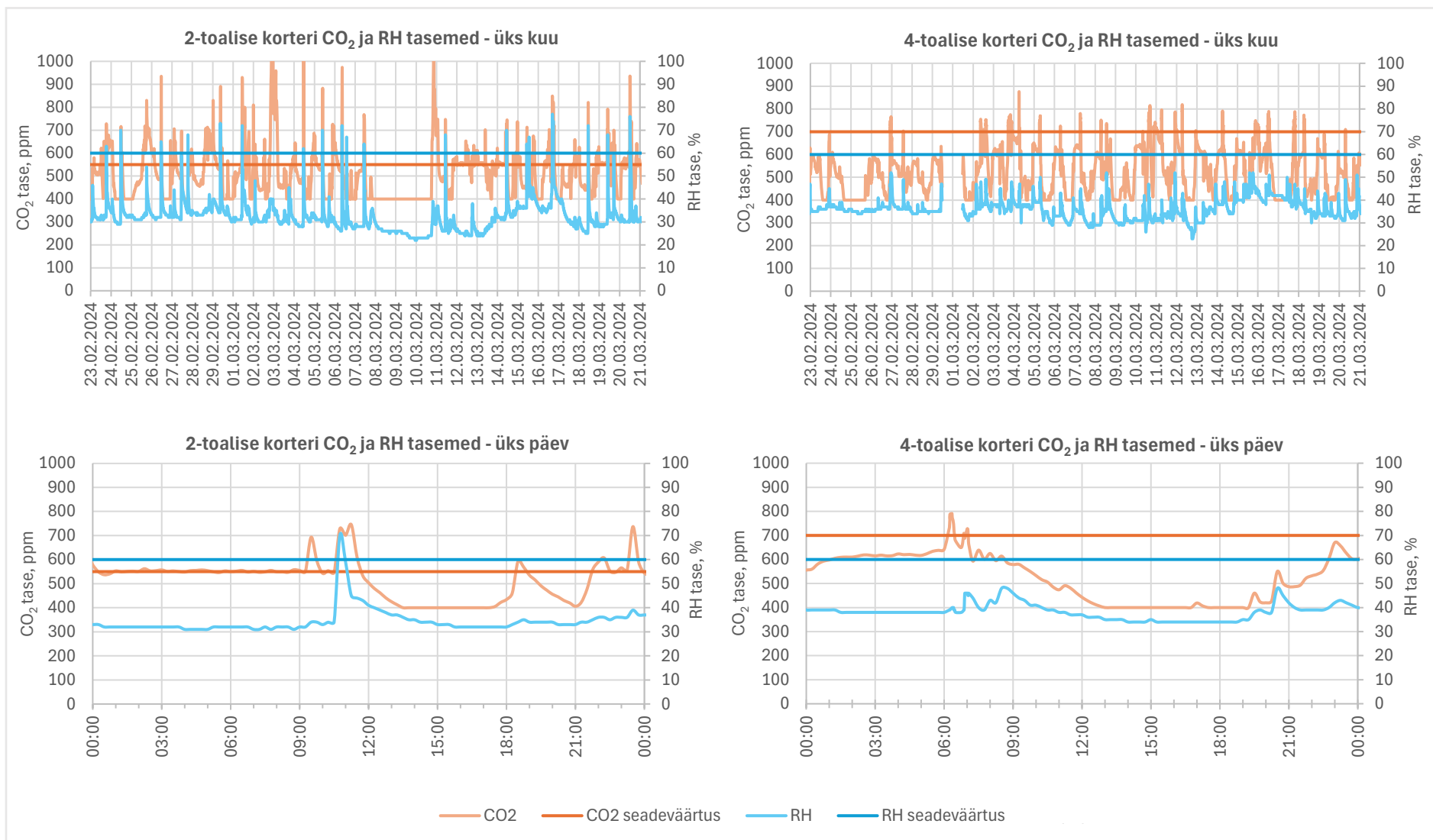
Joonisel 4.2 on esitatud korterite süsihappegaasi (CO₂) ja suhtelise niiskuse (RH) tasemed mõõdetuna väljatõmbelt. Standardis EVS-EN 16798-1:2019+NA:2019 [24] vastab sisekeskkonna kategooriale 2 arvutuslik CO₂ kontsentratsioon 950 ppm-i, millega võrreldes on korterite seadeväärtused suhteliselt madalad: 2-toalises 550 ppm-i ning 4-toalises 700 ppm-i. Mõlemas korteris on RH seadeväärtus 60%. 2-toalises korteris toimub nõudluspõhine juhtimine CO₂ ja RH taseme järgi, 4-toalises korteris RH tase seadeväärtust ei ületa ning nõudluspõhine juhtimine toimub ainult CO₂ taseme järgi. 2-toalises korteris kattuvad RH seadeväärtust ületavad tasemed üldjuhul kõrgemate CO₂ tasemetega, vaid kolmel korral kuus ületab RH tase seadeväärtust madala CO₂ taseme juures ehk antud ajaperioodil RH tase korterite energiatarbimist oluliselt ei määra.

Joonisel 4.3 on kujutatud 4-toalise korteri ventilaatorite kiiruse muutumine. Ventilaatorid töötavad 4-toalises korteris suurema osa ajast madalaimal kiirusel. 2-toalises korteris ületavad CO₂ ja RH tasemed võrreldes 4-toalise korteriga rohkem seadeväärtusi ehk ventilaatorid töötavad vähem aega madalamal kiirusel. Ventilaatorite kiirust reguleeritakse astmeliselt ning enamasti 5%-i kaupa, vastavalt CO₂ või RH seadeväärtusele, mõõdetud tasemele ning selle muutumisele. Kogutud andmete põhjal võib järeldada, et süsteemi juhtimiseks ei rakendata proportsionaalset juhtimist, kuid tõenäoliselt võidakse kasutada kas PI või PID juhtimist.

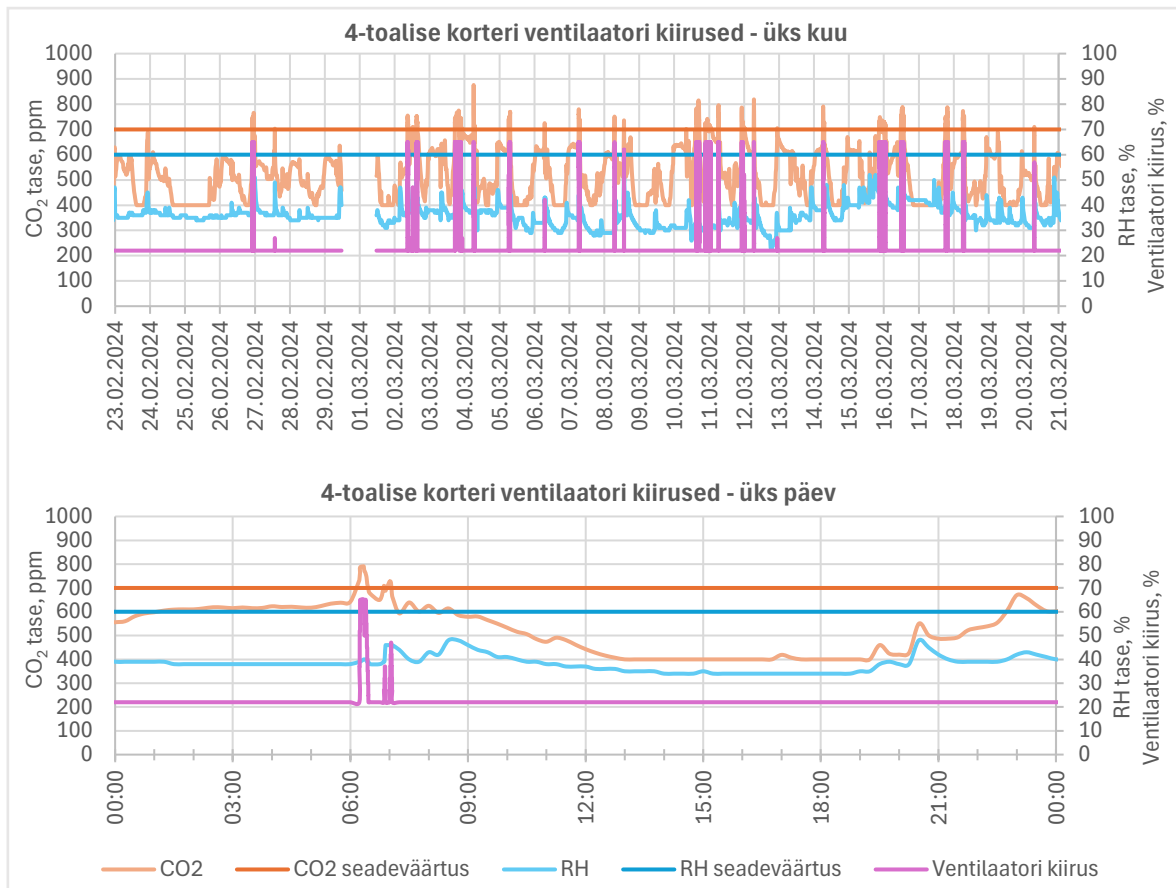
Töös arvatud rõhukao ja õhuvooluhulkade kohaselt on ventilatsiooniseadme SFP keskimiselt mustunud filtritega 2-toalises korteris 1,4 kW/(m³/s) ning 4-toalises korteris 1,6 kW/(m³/s). Soojustagasti temperatuuri suhtarv on mõlema korteri ventilatsiooniseadmel 0,8.



Joonis 4.1 Ventilatsiooniseadmete temperatuurid



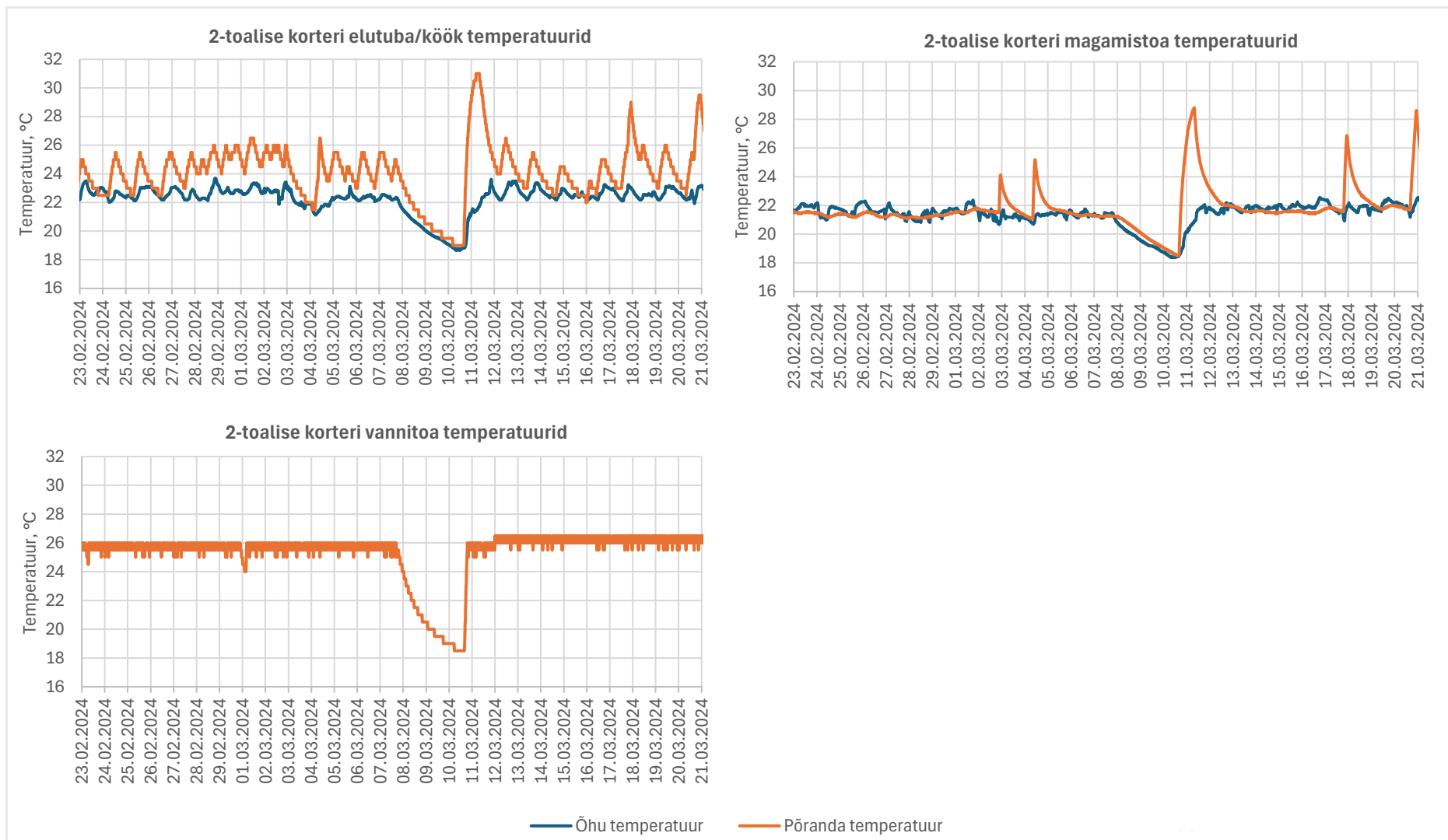
Joonis 4.2 Korterite CO₂ ja RH tasemed



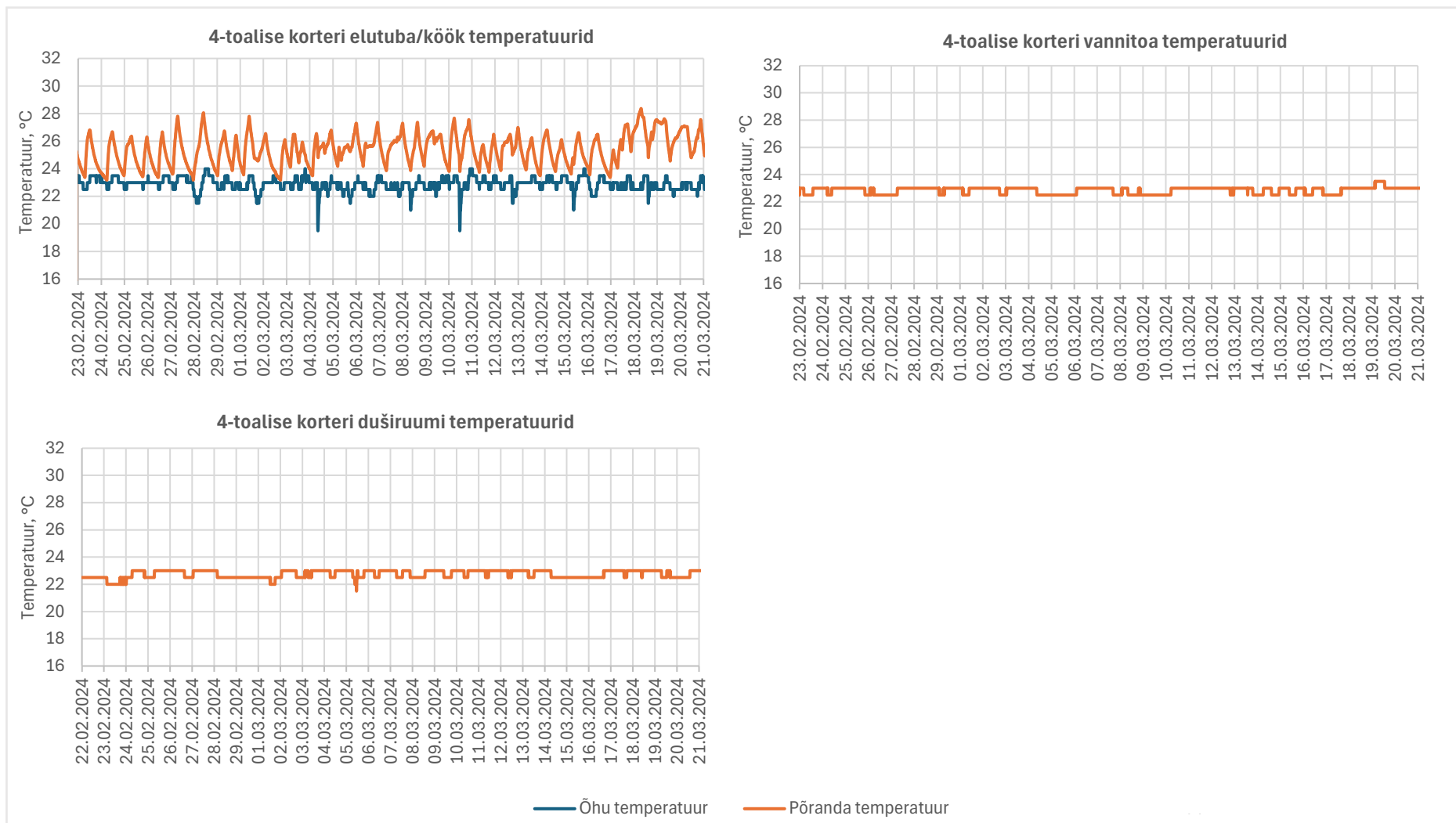
Joonis 4.3 4-toalise korteri ventilaatori kiirused

4.1.2 Küttesüsteemi andmete analüüs

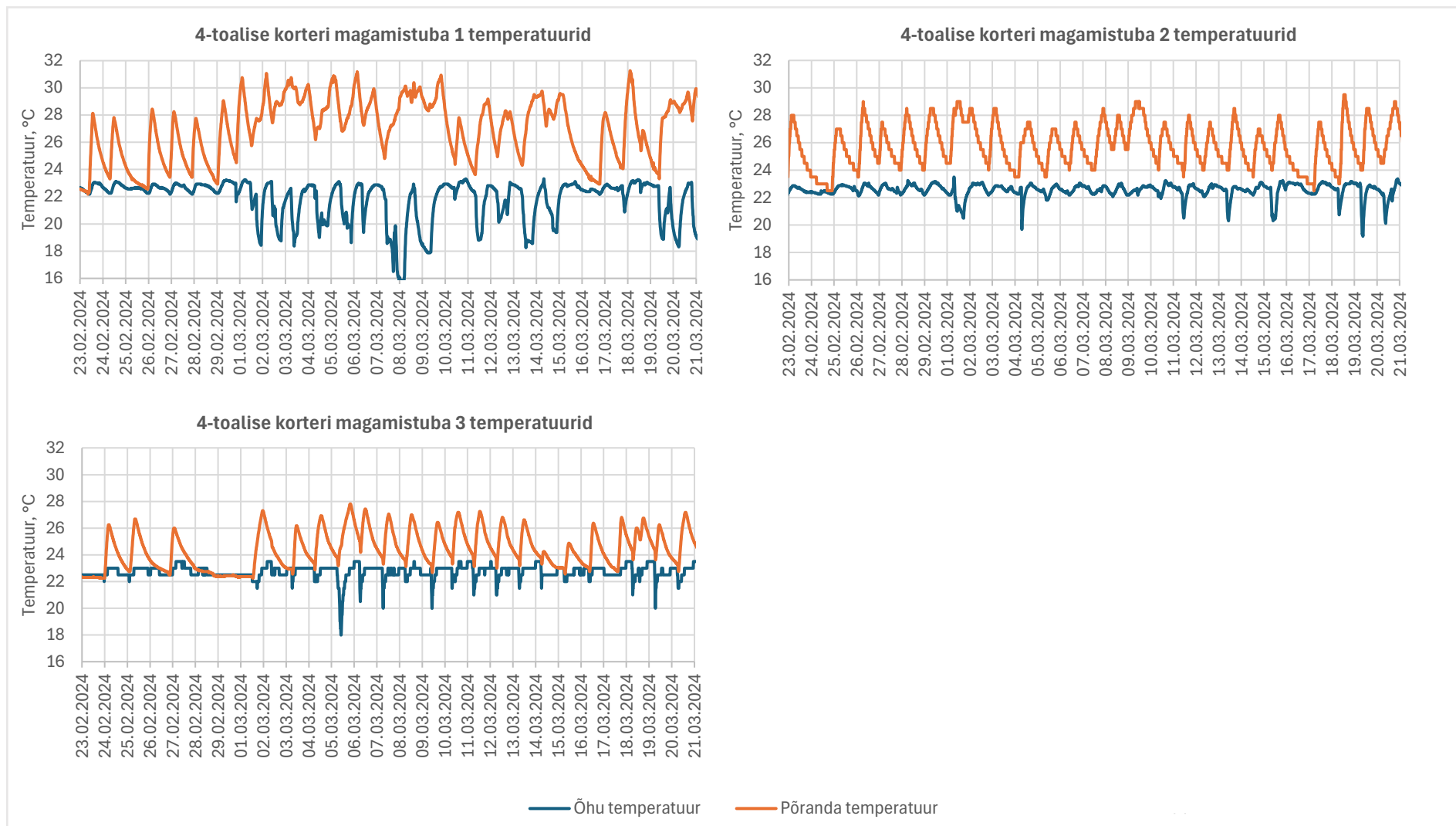
Väljaehitatud korterite temperatuuride graafikud ruumide kaupa on näidatud joonistel 4.4, 4.5 ja 4.6, mille kohaselt juhitakse eluruumides temperatuuri õhu temperatuuri seadeväärtuse järgi ning vannitubades põranda temperatuuri seadeväärtuse järgi. Õhu temperatuur varieerub eluruumides ligikaudu $\pm 0,75^{\circ}\text{C}$ ning tagatud minimaalne õhu temperatuur on ligikaudu 22°C . 4-toalises korteris on osades ruumides märgata madalamaid temperatuure, mis võib tuleneda akende avamisest. Ruumi temperatuuride graafikutest võib eeldada, et veega pörandkütet juhitakse kas ON/OFF kontrolloriga või ebasobilike parameetritega PI kontrolloriga. Elektrilise pörandküttega vannitubades varieerub põranda temperatuur ligikaudu $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ning tagatud minimaalne põranda temperatuur on 2-toalises korteris ligikaudu 25°C ja 4-toalises korteris 22°C .



Joonis 4.4 2-toalise korteri ruumide õhu ja põranda temperatuurid



Joonis 4.5 4-toalise korteri ruumide õhu ja põranda temperatuurid



Joonis 4.6 4-toalise korteri ruumide õhu ja põranda temperatuurid

4.1.3 Analüüsitud andmete rakendamine simulatsioonides

Simulatsioonimudelite koostamisel on võimalik lähtuda kogutud andmetest vaid osaliselt, täpsemalt kalibreeritud mudeli koostamine nõuab rohkemate andmete kogumist. Analüüsitud andmete põhjal võib teha mõningaid järeldusi, mida simulatsioonides arvestada. Korterite elanikud võivad eelistada väljatõmbelt juhitud nõudluspõhise juhtimisega ventilatsioonisüsteemi kasutamisel standardi EVS-EN 16798-1:2019+NA:2019 järgsetest väärtustest madalamaid CO₂ taseme seadeväärtuseid ning 18°C-ist kõrgemat sissepuhke temperatuuri. Korterite juhtimispaneel annab korteri elanikele seadeväärtuste osas laia valiku ning pole teada kui teadlikud on korteri elanikud parameetrite määramisel.

Inimeste kasutusprofiilide määramisel simulatsioonides ei lähtuta korteritest kogutud andmetest. Inimeste kasutusprofiili kalibreerimiseks puudub teave elanike arvu, akende avamise, ventilatsiooniseadme filtrite takistuse ning süsteemi poolt tagatud minimaalsete ja maksimaalsete õhuvooluhulkade kohta. CO₂ tase on korterites mõõdetud väljatõmbel, mille põhjal on võimalik koostada ligikaudne kasutusprofiili terve korteri ning mitte üksikute ruumide kohta. Analüüsitud ajaperioodil toimus mõlemas korteris kas terve aeg või suurema osa ajast nõudluspõhine juhtimine CO₂ taseme järgi. Andmed olid kogutud kütteperioodil ning seega pole teada, kuidas toimub ventilatsioonisüsteemi nõudluspõhine juhtimine kõrgema välisõhu temperatuuri ja RH taseme korral, mistõttu analüüsitakse töös simulatsioonidega ventilatsioonisüsteemi nõudluspõhist juhtimist üksnes CO₂ taseme põhjal.

Korterites on nõudluspõhise juhtimisega ventilatsioonisüsteemile määratud minimaalsed ja maksimaalsed ventilaatori kiirused. Ehitusprojektist ei selgu, mille alusel need on määratud, ning tulenevalt vastuolust korterite ventilatsioonisüsteemi mõõdistusprotokolliga ning ventilatsiooniseadme tootja esitatud tehniliste andmete vahel ei analüüsita töös põhjalikumalt väljaehitatud korterite õhuvooluhulga piirväärtusi. Simulatsioonides arvestatakse lihtsustatult maksimaalne õhuvooluhulk vastavalt projekteeritud väärtusele ning minimaalne vooluhulk vastavalt standardile EVS-EN 16798-1:2019+NA:2019 [24] $0,1 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$.

Lisaks puudub küttesüsteemi täpsemaks kalibreerimiseks teave välistingimuste kohta antud ajaperioodil. Kogutud andmete põhjal võib järeldada, et ruumides on eelistatud enamasti minimaalne õhutemperatuur 22°C, veega põrandküttega ruumides varieerub õhutemperatuur ligikaudu $\pm 0,75^\circ\text{C}$ ning elektriga põrandküttega ruumides $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

4.2 Simulatsioonide tulemused

Väljaehitatud 2-toalise ja 4-toalise korteri põhjal koostati simulatsioonimudelid, millega hinnati järgnevate valikute mõju korterite energiatarbimisele ja sisekliimale:

- Ventilatsioonisüsteemi juhtimisloogika
- CO₂ andurite asukoht
- CO₂ taseme seadeväärtus
- Ventilatsiooniseadme soojustagasi tüüp
- Sissepuhketemperatuuri seadeväärtus
- Põrandküttesüsteemi juhtimisloogika
- Põrandküttesüsteemi tüüp

Lisaks hinnati lahenduste mõju primaarenergia tarbimisele, kasutades veega põrandkütte energiatarbimisel kaugkütte ja tõhusa kaugkütte kaalumistegureid ning elektrilise põrandkütte, sissepuhkeõhu soojendamise ja ventilaatorite energiatarbimisel elektrile vastavat kaalumistegurit.

4.2.1 Ventilatsioonisüsteemi juhtimisloogika

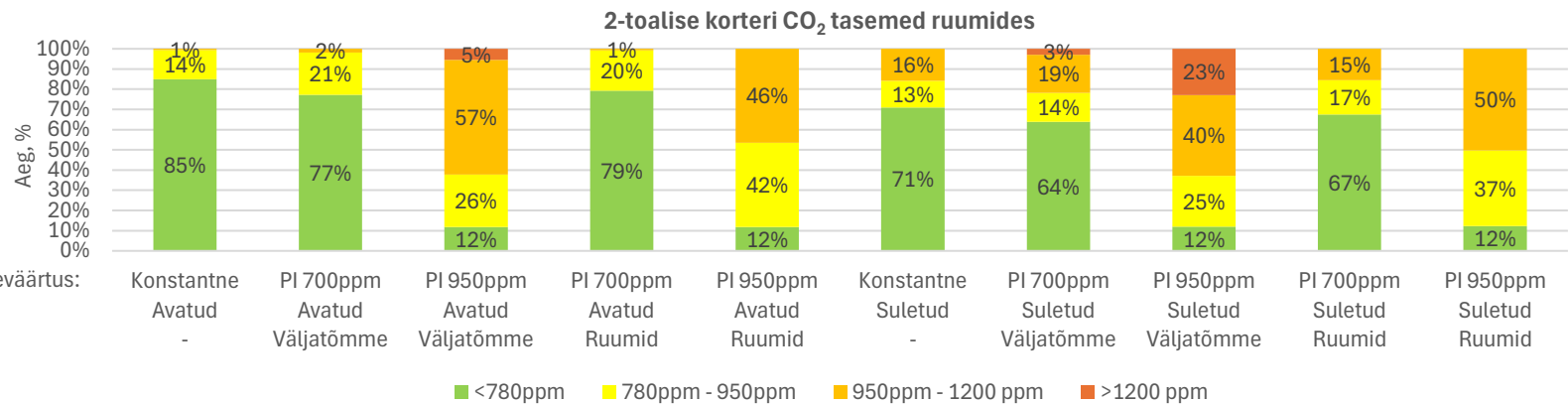
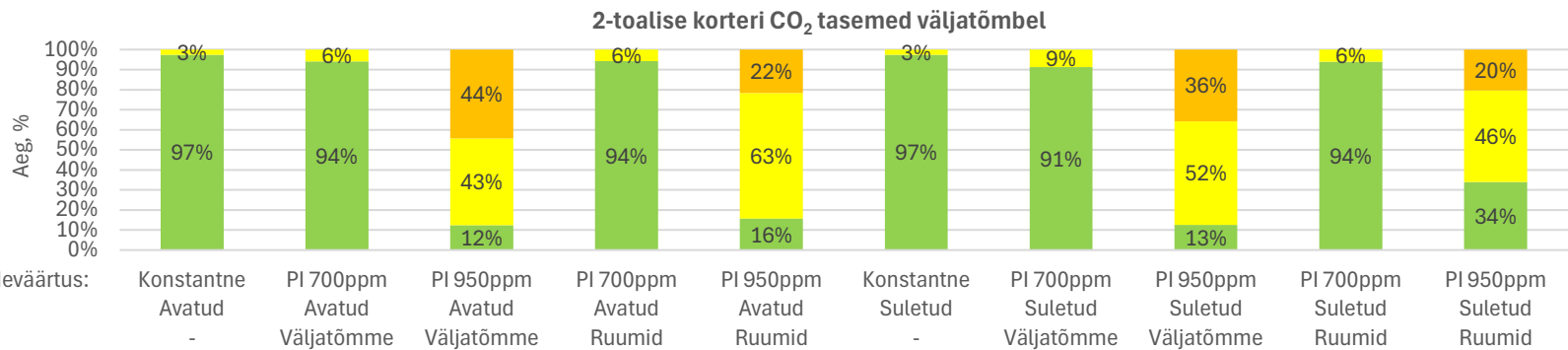
Ventilatsioonisüsteemi juhtimisloogikatest võrreldi konstantselt töötava süsteemi ning lineaarse, proportsionaalse ja PI juhtimisega süsteemi tagatavat õhukvaliteeti. Nõudluspõhist juhtimist analüüsiti kahe erineva seadeväärtuse juures: 700 ppm-i ja 950 ppm-i. Seadeväärtus 700 ppm-i vastab väljaehitatud korteris määratud tasemele ning 950 ppm-i sisekeskkonna kategooriale 2 tagavale CO₂ kontsentratsiooni piirväärtusele magamistubades [24]. Ventilatsioonisüsteeme juhiti CO₂ anduri järgi väljatõmbel ning arvestati avatud ustega. Joonisel 4.7 on toodud erinevate juhtimisloogikate rakendamisel tagatav õhukvaliteet eraldi mõõdetuna väljatõmbelt ning ruumides. Juhtimisloogikatest tagavad CO₂ taseme seadeväärtuse paremini proportsionaalse ja PI juhtimisega süsteemid, töötades uuritud seadeväärtuste juures võrdväärselt.

4.2.2 CO₂ andurite asukoht

CO₂ andurite paigutusel võrreldi väljatõmbel paikneva CO₂ anduriga ning ruumides paiknevate CO₂ anduritega juhitud ventilatsioonisüsteemide tagatavat õhukvaliteeti. Lisaks andurite paigutusele analüüsiti magamistubade uste avatuse ning suletuse mõju. Joonise 4.8 ja 4.9 kohaselt tagatakse soovitud õhukvaliteet palju paremini ruumidesse paigutatud CO₂ andurite järgi juhtimisel. Ruumidesse paigutatud CO₂ anduritega tagatakse ka uste suletuse korral võrreldes konstantselt töötava süsteemiga sarnane maksimaalne CO₂ tase magamistubades. Väljatõmbel paikneva CO₂ anduri järgi juhtimisel võib simulatsioonide tulemuse kohaselt CO₂ tase tõusta seadeväärtuse 950 ppm-i korral ning avatud ustega 1709 ppm-ini ja suletud ustega 2072 ppm-ini.

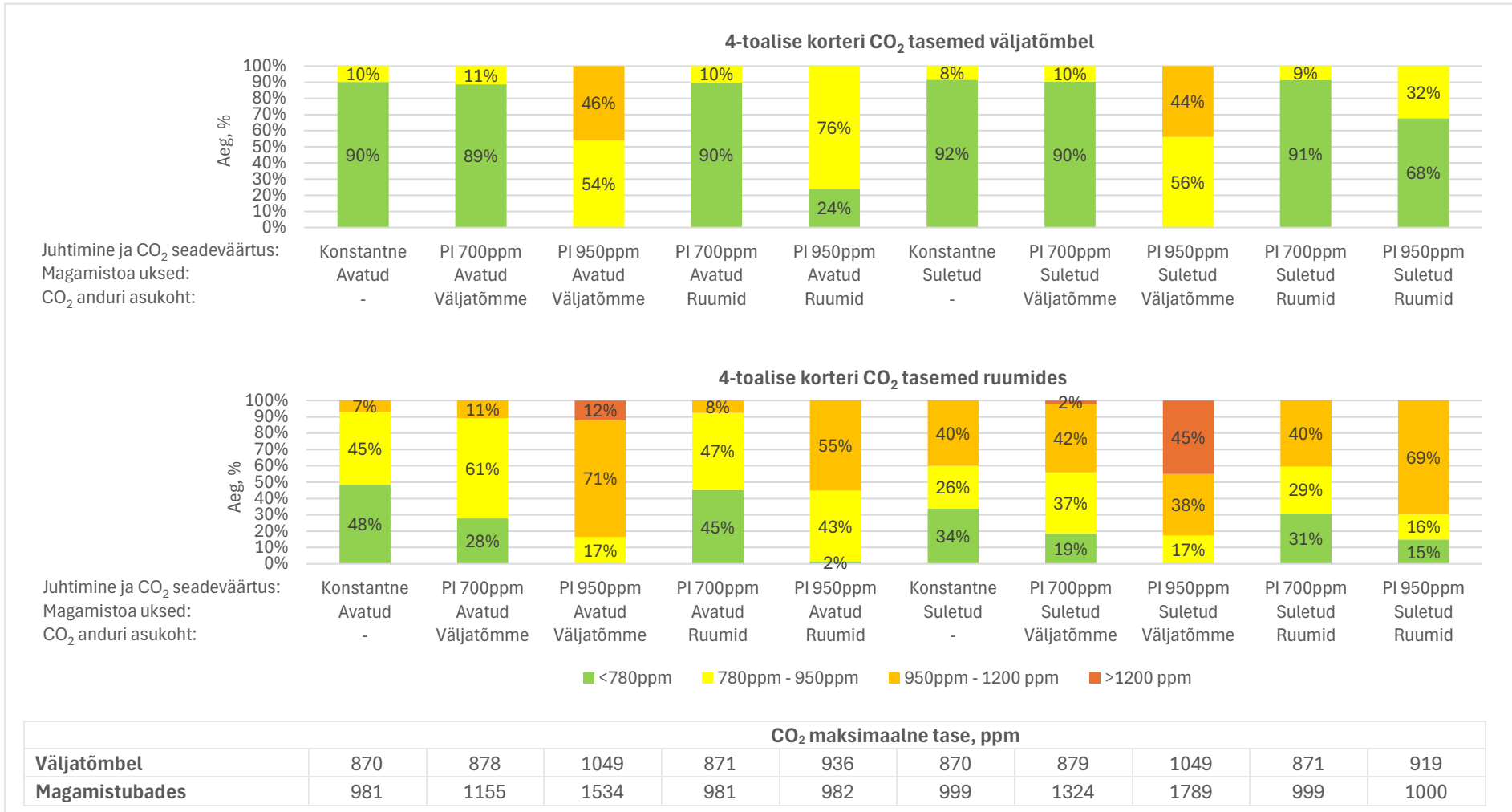


Joonis 4.7 Korterite ventilatsioonüsteemi juhtimisloogikate võrdlus



	CO ₂ maksimaalne tase, ppm									
Väljatõmbel	884	875	1051	876	1019	874	873	1061	876	1015
Magamistoaos	982	1133	1709	1000	1000	1001	1409	2072	1001	1002

Joonis 4.8 2-toalise korteri ventilatsioonisüsteemi CO₂ anduri paigutuse võrdlus



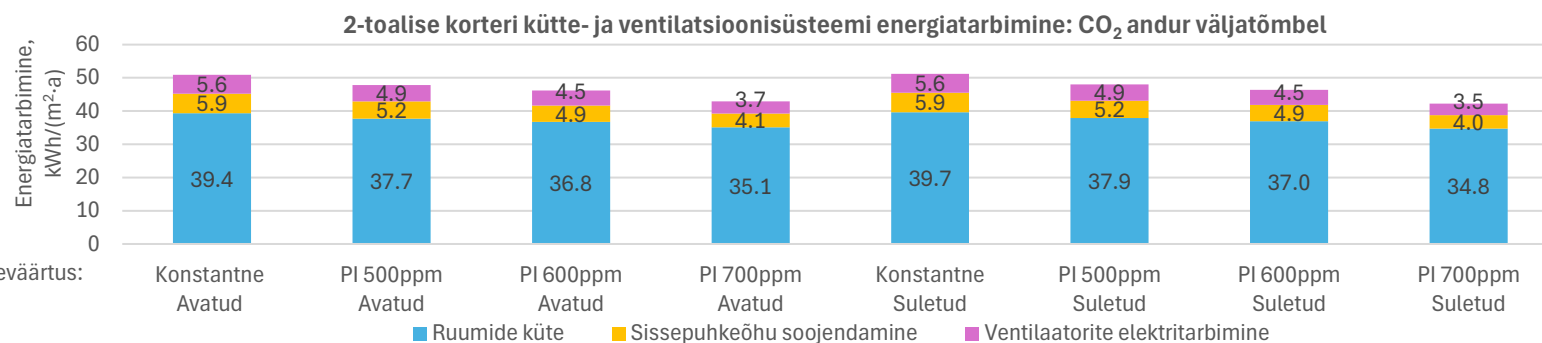
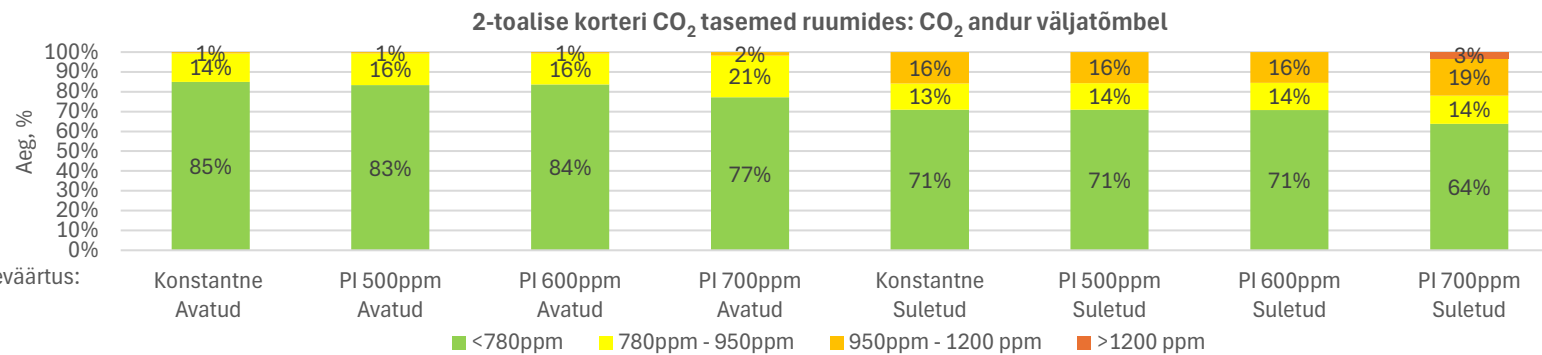
Joonis 4.9 4-toalise korteri ventilatsioonisüsteemi CO₂ anduri paigutuse võrdlus

4.2.3 CO₂ taseme seadeväärtus

CO₂ seadeväärtuste võrdlemisel analüüsiti erinevate CO₂ seadeväärtuste mõju õhukvaliteedile ja energiatarbimisele. CO₂ seadeväärtusi uuriti eraldi väljatõmbel paikneva CO₂ anduri ning ruumides paiknevate CO₂ andurite järgi juhtimisel. Väljatõmbel paikneva CO₂ anduriga juhtimisel on esitatud tulemused seadeväärtustel 500, 600 ja 700 ppm-i ning ruumides paikneva CO₂ anduriga juhtimisel seadeväärtustel 700, 800 ja 900 ppm-i. Simulatsioonimudel is määrati ventilatsioonisüsteemi sissepuhkeõhu temperatuuriks 18°C, soojustagasti tüübiks plaatsoojustagasti ning ruumide minimaalseks õhutemperatuuriks 22°C. Tulemused on toodud joonistel 4.10, 4.11, 4.12 ja 4.13.

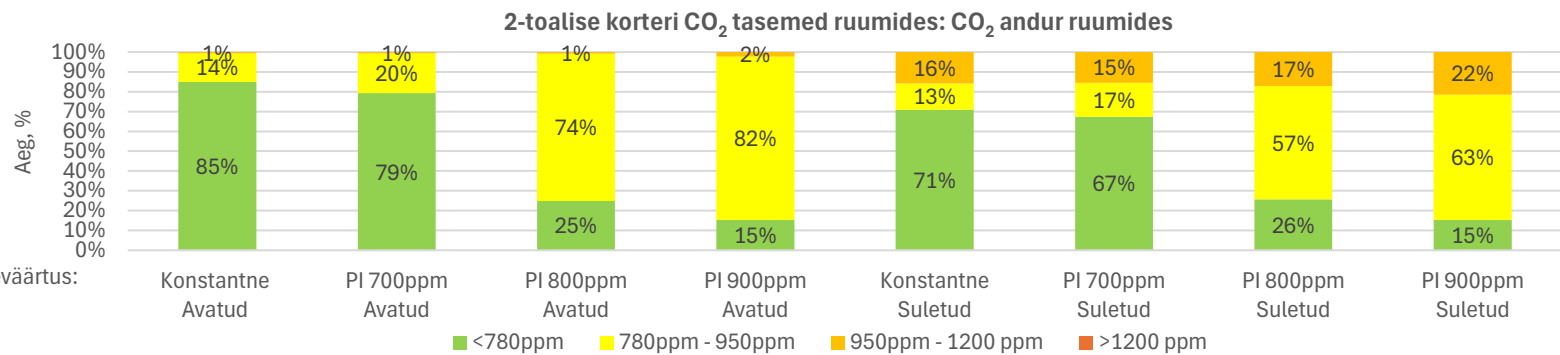
Väljatõmbel paikneva CO₂ anduriga juhtimisel on jooniste 4.10 ja 4.12 kohaselt sobiv seadeväärtus 600 ppm-i, mille puhul on magamistubades CO₂ maksimaalne tase ligikaudu 1000 ppm-i. Teistes ruumides jääb CO₂ kontsentratsioon alla 1200 ppm-i. Seadeväärtuse 700 ppm-i korral tõuseb märgatavalt nii 2-toalises kui ka 4-toalises korteris magamistubades maksimaalne CO₂ tase. CO₂ taseme seadeväärtuse 600 ppm-i ning avatud uste korral väheneb 2-toalises korteris võrreldes konstantselt juhitud süsteemiga energiatarbimine ruumide kütmisele 7%, sissepuhkeõhu soojendamisele 17% ning ventilaatorite elektritarbimisele 20%. 4-toalises korteris väheneb energiatarbimine ruumide kütmisele 6%, sissepuhkeõhu soojendamisele 14% ja ventilaatorite elektritarbimisele 16%. Suletud ukse energiatarbimist antud juhul tulemusi oluliselt ei mõjuta.

Ruumides paiknevate CO₂ anduritega juhtimisel on jooniste 4.11 ja 4.13 kohaselt sobiv seadeväärtus 900 ppm-i, mille puhul on magamistubades CO₂ maksimaalne tase ligikaudu 1000 ppm-i. Teistes ruumides jääb CO₂ kontsentratsioon alla 1200 ppm-i. CO₂ taseme seadeväärtuse 900 ppm-i ning avatud uste korral on väheneb 2-toalises korteris võrreldes konstantselt juhitud süsteemiga energiatarbimine ruumide kütmisele 19%, sissepuhkeõhu soojendamisele 55% ning ventilaatorite elektritarbimisele 63%. 4-toalises korteris väheneb energiatarbimine ruumide kütmisele 16%, sissepuhkeõhu soojendamisele 40% ja ventilaatorite elektritarbimisele 43%. Ruumides paiknevate CO₂ anduritega juhtimisel suletud ustega süsteemi energiatarbimine mõnevõrra suureneb. Seadeväärtuse 900 ppm-i ning suletud uste korral väheneb 2-toalises korteris võrreldes konstantselt juhitud süsteemiga energiatarbimine ruumide kütmisele 17%, sissepuhkeõhu soojendamisele 46% ning ventilaatorite elektritarbimisele 54%. 4-toalises korteris väheneb energiatarbimine ruumide kütmisele 11%, sissepuhkeõhu soojendamisele 26% ja ventilaatorite elektritarbimisele 29%.

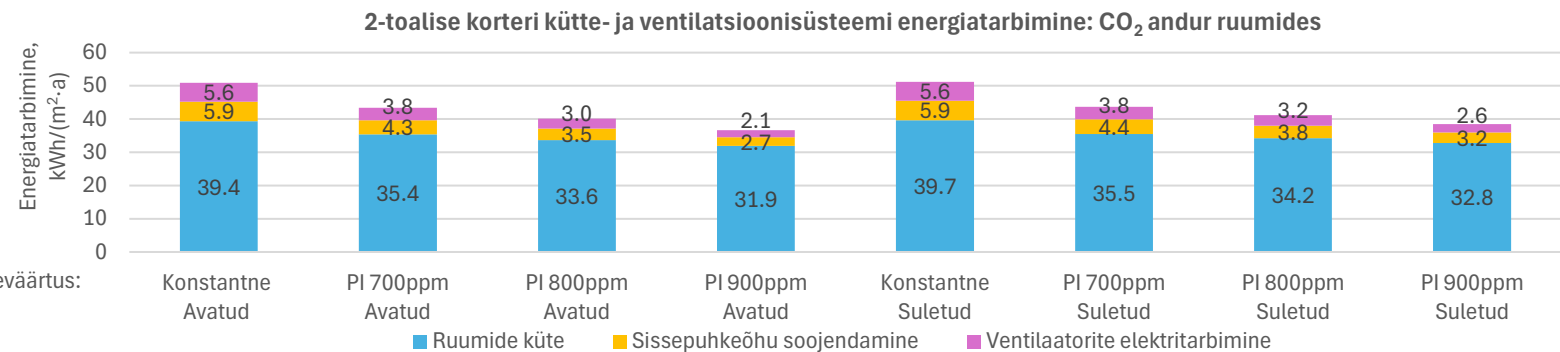


Energia- ja kütetarbimine võrreldes konstantselt töötava süsteemiga								
Ruumide küte	0%	-4%	-7%	-11%	0%	-4%	-7%	-12%
Sissepuhkeõhu soojendamine	0%	-12%	-17%	-30%	0%	-11%	-17%	-33%
Ventilatorite elektritarbimine	0%	-13%	-20%	-35%	0%	-13%	-19%	-37%
CO ₂ maksimaalne tase, ppm								
Väljatõmbel	884	880	876	875	874	873	872	873
Magamistoas	982	987	998	1133	1001	1001	1000	1409

Joonis 4.10 2-toalise korteri ventilatsioonisüsteemi CO₂ seadeväärtuse võrdlus süsteemi juhtimisel väljatõmbel paikneva anduriga



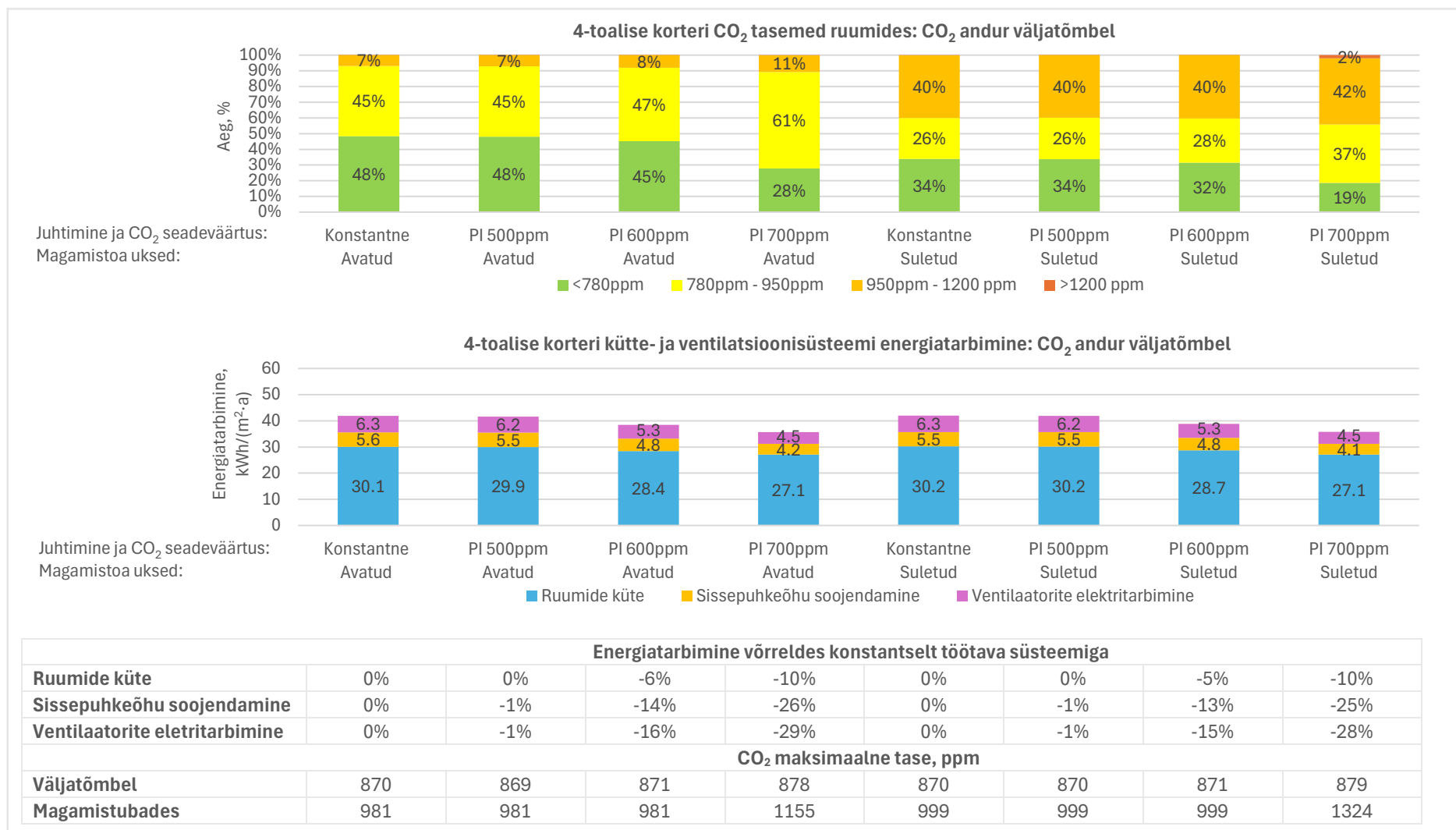
Juhtimine ja CO₂ seadeväärtus:
Magamistoa ukсед:



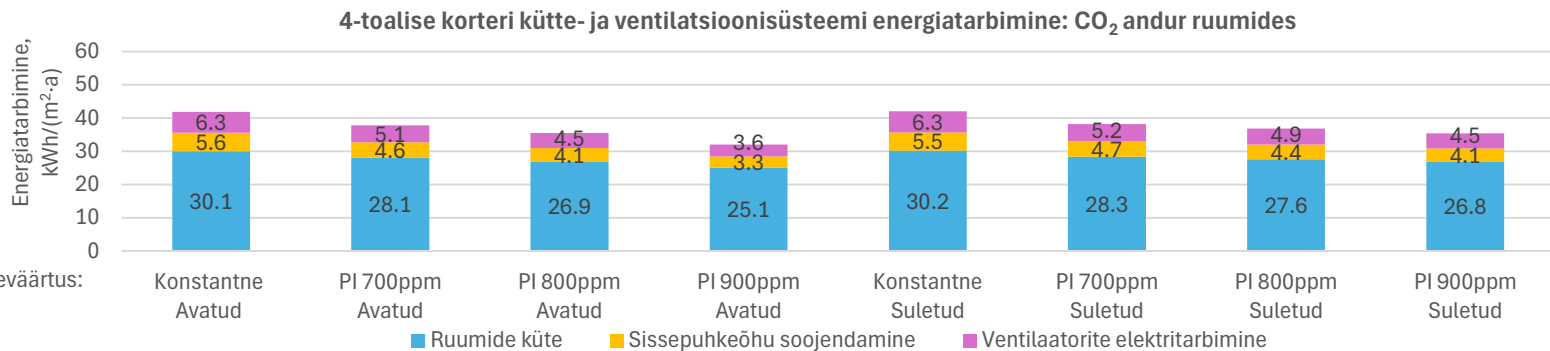
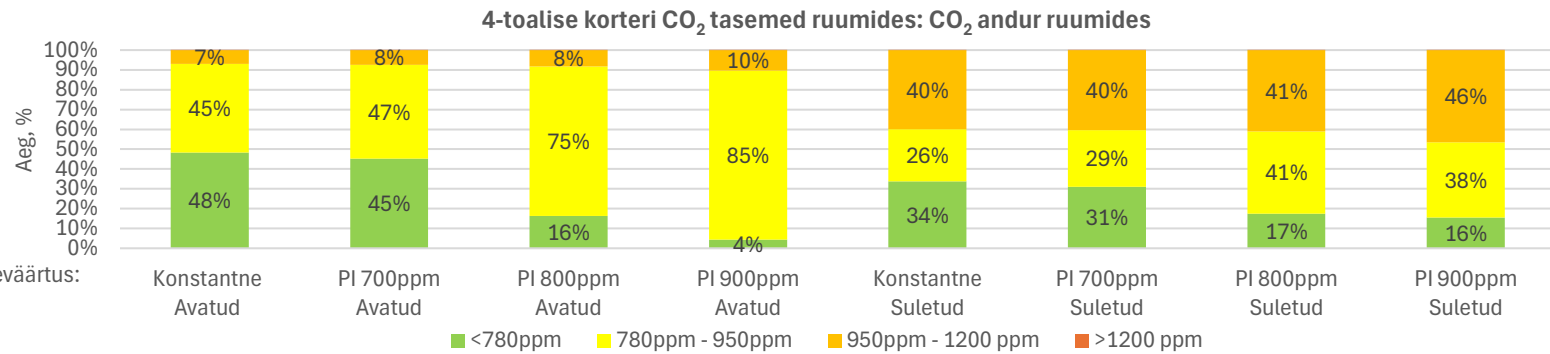
Juhtimine ja CO₂ seadeväärtus:
Magamistoa ukсед:

Energiatarbimine võrreldes konstantselt töötava süsteemiga								
Ruumide küte	0%	-10%	-15%	-19%	0%	-10%	-14%	-17%
Sissepuhkeõhu soojendamine	0%	-27%	-40%	-55%	0%	-26%	-36%	-46%
Ventilatorite elektritarbimine	0%	-33%	-47%	-63%	0%	-32%	-43%	-54%
CO ₂ maksimaalne tase, ppm								
Väljatõmbel	884	876	889	975	874	876	884	973
Magamistoa	982	1000	998	1001	1001	1001	1001	1002

Joonis 4.11 2-toalise korteri ventilatsioonisüsteemi CO₂ seadeväärtuse võrdlus süsteemi juhtimisel ruumides paiknevate anduritega



Joonis 4.12 4-toalise korteri ventilatsioonisüsteemi CO₂ seadeväärtuse võrdlus süsteemi juhtimisel väljatõmbel paikneva anduriga



Energiaarbitimine võrreldes konstantselt töötava süsteemiga								
Ruumide küte	0%	-7%	-11%	-16%	0%	-6%	-8%	-11%
Sissepuhkeõhu soojendamine	0%	-17%	-27%	-40%	0%	-16%	-21%	-26%
Ventilatorite elektritarbitimine	0%	-18%	-28%	-43%	0%	-17%	-23%	-29%
CO ₂ maksimaalne tase, ppm								
Väljatõmbel	870	871	870	892	870	871	871	874
Magamistubades	981	981	983	981	999	999	999	999

Joonis 4.13 4-toalise korteri ventilatsioonisüsteemi CO₂ seadeväärtuse võrdlus süsteemi juhtimisel ruumides paiknevate anduritega

Ventilatsioonisüsteemi nõudluspõhise juhtimise mõju primaarenergia tarbimisele hinnati süsteemi konstantsel juhtimisel, väljatõmbel paikneva CO₂ anduriga juhtimisel seadeväärtuse 600 ppm-i korral ning ruumides paiknevate CO₂ anduritega juhtimisel seadeväärtuse 900 ppm-i korral. Süsteemide primaarenergia tarbimine on esitatud tabelis 4.1 Tulemuste järgselt on võimalik ruumides paiknevate CO₂ andurite kasutamisel oluliselt vähendada primaarenergia tarbimist. Suletud magamistubade ustega arvestamisel vähenes 2-toalises korteris primaarenergia tarbimine kaugkütte korral 17,7 kWh/(m²·a) ning tõhusa kaugkütte korral 16,0 kWh/(m²·a). 4-toalises korteris vähenes primaarenergiatarbimine vastavalt 8,7 kWh/(m²·a) ja 9,6 kWh/(m²·a).

Antud tulemuste tõlgendamisel tuleb arvestada, et simulatsioonidega hinnati energiatarbimist ventilatsioonisüsteemi CO₂ taseme järgi juhtimisel. Suhtelise niiskuse taseme järgi juhtimisega arvestamisel võib nõudluspõhise juhtimise mõju primaarenergia tarbimisele olla väiksem.

Tabel 4.1 Ventilatsiooni nõudluspõhise juhtimise mõju süsteemide primaarenergia tarbimisele

Ventilatsioonisüsteem						
Juhtimisloogika	Konstantne	PI	PI	Konstantne	PI	PI
CO₂ anduri asukoht	-	Väljatõmme	Ruumid	-	Väljatõmme	Ruumid
CO₂ seadeväärtus, ppm	-	600	900	-	600	900
Uksed	Avatud			Suletud		
2-toalise korteri kütte- ja ventilatsioonisüsteemi primaarenergiatarbimine, kWh/(m²·a)						
Tõhus kaugküte	48,6	42,7	30,3	48,8	42,9	32,8
Kaugküte	58,5	51,9	38,2	58,7	52,1	41,0
2-toalise korteri kütte- ja ventilatsioonisüsteemi primaarenergiatarbimine võrreldes konstantselt töötava süsteemiga, kWh/(m²·a)						
Tõhus kaugküte	0	-6,0	-18,4	0	-6,0	-16,0
Kaugküte	0	-6,0	-20,3	0	-6,6	-17,7
4-toalise korteri kütte- ja ventilatsioonisüsteemi primaarenergiatarbimine, kWh/(m²·a)						
Tõhus kaugküte	43,2	38,7	30,1	43,2	39,0	30,1
Kaugküte	50,8	45,8	36,4	50,8	46,2	36,4
4-toalise korteri kütte- ja ventilatsioonisüsteemi primaarenergiatarbimine võrreldes konstantselt töötava süsteemiga, kWh/(m²·a)						
Tõhus kaugküte	0	-4,6	-13,1	0	-4,3	-8,7
Kaugküte	0	-5,0	-14,4	0	-4,6	-9,6
* süsteemide primaarenergiatarbimisel pole arvestatud veeküttesüsteemi ringluspumba elektritarbimisega						

4.2.4 Ventilatsiooniseadme soojustagasti tüüp

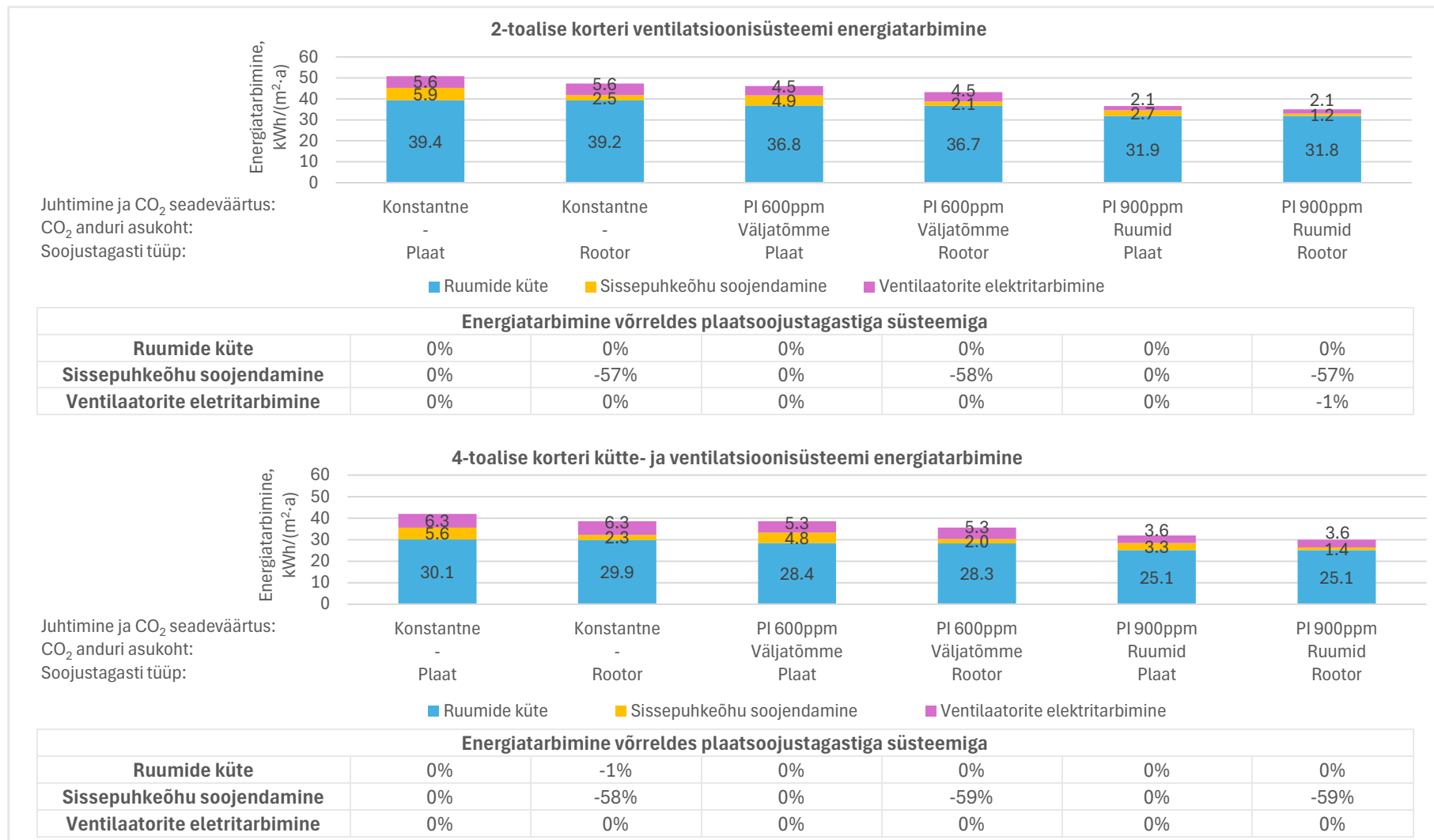
Ventilatsiooniseadme soojustagasti tüübi võrdlemisel analüüsiti plaatsoojustagasti ja rootorsoojustagasti kasutamist, tulemused on esitatud joonisel 4.14. Mõlemal juhul määrati soojustagasti temperatuuri suhtarvuks 0,8. Kõikide juhtimisviiside korral vähenes rootorsoojustagasti kasutamisel energiatarbimine sissepuhkeõhu soojendamisele ligikaudu 58%. Kuigi sissepuhkeõhu soojendamine moodustab joonisel 4.14 väikse osa kogu energiatarbimisest, tuleb arvestada, et korteripõhised ventilatsiooniseadmed on tavapäraselt varustatud elektrikalorifeeriga.

Ventilatsiooniseadme soojustagasti valiku mõju kütte- ja ventilatsioonisüsteemide primaarenergia tarbimisele on näidatud tabelis 4.2. Tulemuste järgselt on soojustagasti valikul arvestatav mõju primaarenergia tarbimisele ning sõltub ventilatsioonisüsteemi juhtimisviisist. Soojustagasti valik on määravam konstantselt töötava ja väljatõmbel paikneva CO₂ anduriga juhitud ventilatsioonisüsteemi korral, vähendades korterite primaarenergia tarbimist vastavalt 6,7 kWh/(m²·a) ja 5,7 kWh/(m²·a). Väljatõmbel paikneva CO₂ anduriga juhitud ventilatsioonisüsteemi korral vähenes primaarenergia tarbimine 2-toalises korteris 3,1 kWh/(m²·a) ja 4-toalises korteris 4,0 kWh/(m²·a).

Tabel 4.2 Soojustagasti tüübi mõju süsteemide primaarenergia tarbimisele

Ventilatsioonisüsteem						
Juhtimisloogika	Konstantne	Konstantne	PI	PI	PI	PI
CO ₂ anduri asukoht	-	-	Väljatõmme	Väljatõmme	Ruumid	Ruumid
CO ₂ seadeväärtus, ppm	-	-	600	600	900	900
Soojustagasti tüüp	Plaat	Rootor	Plaat	Rootor	Plaat	Rootor
2-toalise korteri kütte- ja ventilatsioonisüsteemi primaarenergiatarbimine, kWh/(m²·a)						
Tõhus kaugküte	48,6	41,8	42,7	37,0	30,3	27,2
Kaugküte	58,5	51,6	51,9	46,2	38,2	35,1
2-toalise korteri kütte- ja ventilatsioonisüsteemi primaarenergiatarbimine võrreldes plaatsoojustagastiga süsteemiga, kWh/(m²·a)						
Tõhus kaugküte	0	-6,8	0	-5,7	0	-3,1
Kaugküte	0	-6,9	0	-5,7	0	-3,1
4-toalise korteri kütte- ja ventilatsioonisüsteemi primaarenergiatarbimine, kWh/(m²·a)						
Tõhus kaugküte	43,2	36,7	38,7	33,0	30,1	26,1
Kaugküte	50,8	44,1	45,8	44,0	36,4	32,4
4-toalise korteri kütte- ja ventilatsioonisüsteemi primaarenergiatarbimine võrreldes plaatsoojustagastiga süsteemiga, kWh/(m²·a)						
Tõhus kaugküte	0	-6,6	0	-5,7	0	-4,0
Kaugküte	0	-6,6	0	-5,7	0	-4,0

* süsteemide primaarenergiatarbimisel pole arvestatud veeküttesüsteemi ringluspumba elektritarbimisega



Joonis 4.14 Korteri ventilatsioonisüsteemi soojustagasti tüüpide võrdlus

4.2.5 Sissepuhketemperatuuri seadeväärtus

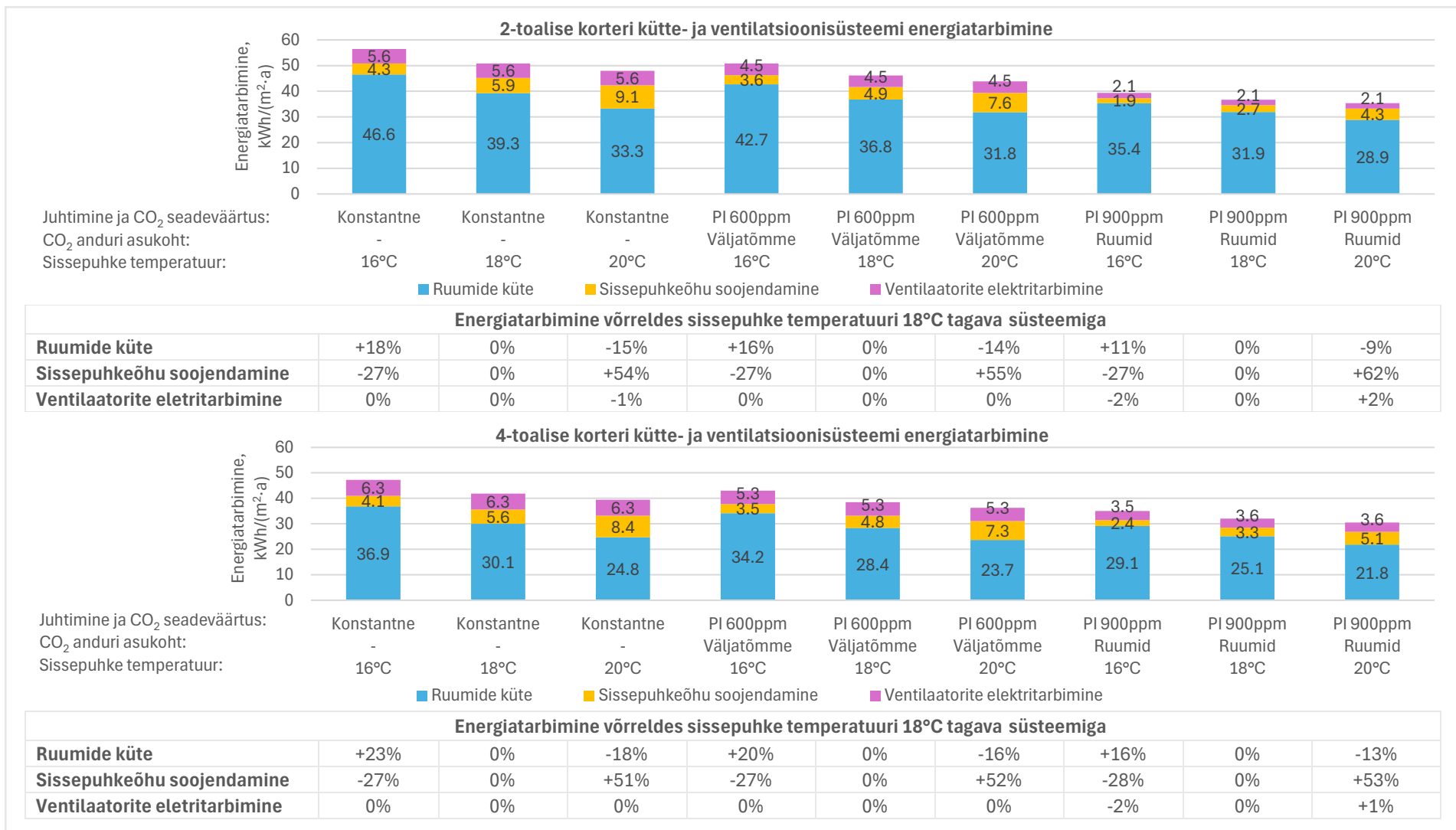
Sissepuhketemperatuuri seadeväärtuse võrdlemisel analüüsiti seadeväärtuste 16 °C, 18 °C ja 20 °C mõju energiatarbimisele, tulemused on toodud joonisel 4.15. Ruumides tagati minimaalne õhutemperatuur 22 °C. Sissepuhketemperatuuri seadeväärtusel 16 °C vähenes võrreldes seadeväärtusega 18 °C sissepuhkeõhu soojendamise energiatarbimine ligikaudu 27% ning suurenes ruumide kütte energiatarbimine vastavalt korterile ja juhtimisviisile 11 kuni 22%. Sissepuhketemperatuuri seadeväärtusel 20 °C suureneb vastupidiselt sissepuhkeõhu soojendamise energiatarbimine üle 50% ning väheneb ruumide kütte energiatarbimine 9 kuni 18%.

Sissepuhketemperatuuri seadeväärtuse mõju korteri primaarenergia tarbimisele on näitatud tabelis 4.3, mille järgselt on optimaalne sissepuhketemperatuur korterites 18 °C. Seadeväärtuse 16 °C või 20 °C kasutamisel oli primaarenergia tarbimine kõrgem nii tõhusa kaugkütte kui ka kaugkütte korral mõlemas korteris.

Tabel 4.3 Sissepuhketemperatuuri seadeväärtuse mõju süsteemide primaarenergia tarbimisele

Ventilatsioonisüsteem									
Juhtimisloogika	Konstantne			PI			PI		
CO ₂ anduri asukoht	-			Väljatõmme			Ruumid		
CO ₂ seadeväärtus, ppm	-			600			900		
Sissepuhkeõhu temperatuur, °C	16	18	20	16	18	20	16	18	20
2-toalise korteri kütte- ja ventilatsioonisüsteemi primaarenergiatarbimine, kWh/(m²·a)									
Tõhus kaugküte	50,1	48,6	51,0	43,9	42,7	44,8	31,0	30,3	31,7
Kaugküte	61,8	58,4	59,3	54,6	51,9	52,7	39,8	38,2	38,9
2-toalise korteri kütte- ja ventilatsioonisüsteemi primaarnergiatarbimine võrreldes sissepuhke temperatuuri 18°C tagava süsteemiga, kWh/(m²·a)									
Tõhus kaugküte	+1,5	0	+2,3	+1,2	0	+2,1	+0,7	0	+1,4
Kaugküte	+3,3	0	+0,8	+2,7	0	+0,9	+1,6	0	+0,7
4-toalise korteri kütte- ja ventilatsioonisüsteemi primaarenergiatarbimine, kWh/(m²·a)									
Tõhus kaugküte	44,7	43,2	45,4	39,9	38,7	40,6	30,7	30,1	31,5
Kaugküte	54,0	50,8	51,6	48,4	45,8	46,6	38,0	36,4	37,0
4-toalise korteri kütte- ja ventilatsioonisüsteemi primaarnergiatarbimine võrreldes sissepuhke temperatuuri 18°C tagava süsteemiga, kWh/(m²·a)									
Tõhus kaugküte	+1,5	0	+2,2	+1,2	0	+2,0	+0,6	0	+1,4
Kaugküte	+3,2	0	+0,9	+2,6	0	+0,8	+1,6	0	+0,6

* süsteemide primaarenergiatarbimisel pole arvestatud veeküttesüsteemi ringluspumba elektritarbimisega



Joonis 4.15 Korterite ventilatsioonisüsteemi sissepuhketemperatuuri seadeväärtuse võrdlus

4.2.6 Põrandküttesüsteemi juhtimisloogika

Põrandküttesüsteemi juhtimisloogikate võrdlemisel analüüsiti ON/OFF ja PI juhtimise mõju energiatarbimisele. ON/OFF juhtimist analüüsiti surnud tsoonidega (*deadband*) $\pm 0,5$ °C ning $\pm 1,0$ °C. Juhtimisloogikate analüüsimisel määrati minimaalseks õhutemperatuuriks ruumides 22 °C ning vajadusel suurendati 22 °C tagamiseks ruumide temperatuuri seadeväärtust. Joonisel 4.16 on esitatud simulatsioonide tulemused. Kuigi täpsema juhtimisega oli võimalik määrata madalam temperatuuri seadeväärtus ning sellega vähenes energiatarbimine ruumide küttele, siis suurenes täpsema juhtimise korral elektritarbimine sissepuhkeõhu soojendamisele.

Põrandküttesüsteemi juhtimisloogikate mõju korterite primaarenergia tarbimisele on toodud tabelis 4.4, mille järgselt sõltub primaarenergia tarbimise vähenemine ventilatsioonisüsteemi juhtimisest. Täpsema juhtimisloogika kasutamisel on suuremad muutused primaarenergiatarbimises ventilatsioonisüsteemi konstantsel töötamisel või väljatõmbel paikneva CO₂ anduri järgi ventilatsioonisüsteemi juhtimisel.

Tabel 4.4 Põrandküttesüsteemi juhtimisloogikate mõju süsteemide primaarenergia tarbimisele

Ventilatsioonisüsteem									
Juhtimisloogika	Konstantne			PI			PI		
CO ₂ anduri asukoht	-			Väljatõmme			Ruumid		
CO ₂ seadeväärtus, ppm	-			600			900		
Küttesüsteem									
Juhtimisloogika	ON/OFF	ON/OFF	PI	ON/OFF	ON/OFF	PI	ON/OFF	ON/OFF	PI
Surnud tsoon, °C	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$	-	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$	-	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$	-
2-toalise korteri kütte- ja ventilatsioonisüsteemi primaarenergiatarbimine, kWh/(m ² ·a)									
Tõhus kaugküte	49,4	48,5	47,9	43,5	42,6	42,1	30,5	30,2	30,0
Kaugküte	59,7	58,3	57,1	53,2	51,8	50,8	38,6	38,2	37,6
2-toalise korteri kütte- ja ventilatsioonisüsteemi primaarenergiatarbimine võrreldes ON/OFF juhtimise ja surnud tsooniga ± 1 °C küttesüsteemiga, kWh/(m ² ·a)									
Tõhus kaugküte	0	-0,8	-1,5	0	-0,8	-1,4	0	-0,2	-0,5
Kaugküte	0	-1,4	-2,6	0	-1,3	-2,3	0	-0,5	-1,0
4-toalise korteri kütte- ja ventilatsioonisüsteemi primaarenergiatarbimine, kWh/(m ² ·a)									
Tõhus kaugküte	43,8	43,3	42,9	39,1	38,6	38,1	30,0	30,5	30,6
Kaugküte	51,7	50,8	50,0	46,5	45,7	44,8	36,5	36,8	36,7
4-toalise korteri kütte- ja ventilatsioonisüsteemi primaarenergiatarbimine võrreldes ON/OFF juhtimise ja surnud tsooniga ± 1 °C küttesüsteemiga, kWh/(m ² ·a)									
Tõhus kaugküte	0	-0,5	-1,0	0	-0,5	-1,0	0	+0,5	+0,6
Kaugküte	0	-1,0	-1,8	0	-0,8	-1,7	0	+0,3	+0,2
* süsteemide primaarenergiatarbimisel pole arvestatud veeküttesüsteemi ringluspumba elektritarbimisega									



Joonis 4.16 Korteri põrandküttesüsteemi juhtimisloogikate võrdlus

4.2.7 Põrandküttesüsteemi tüüp

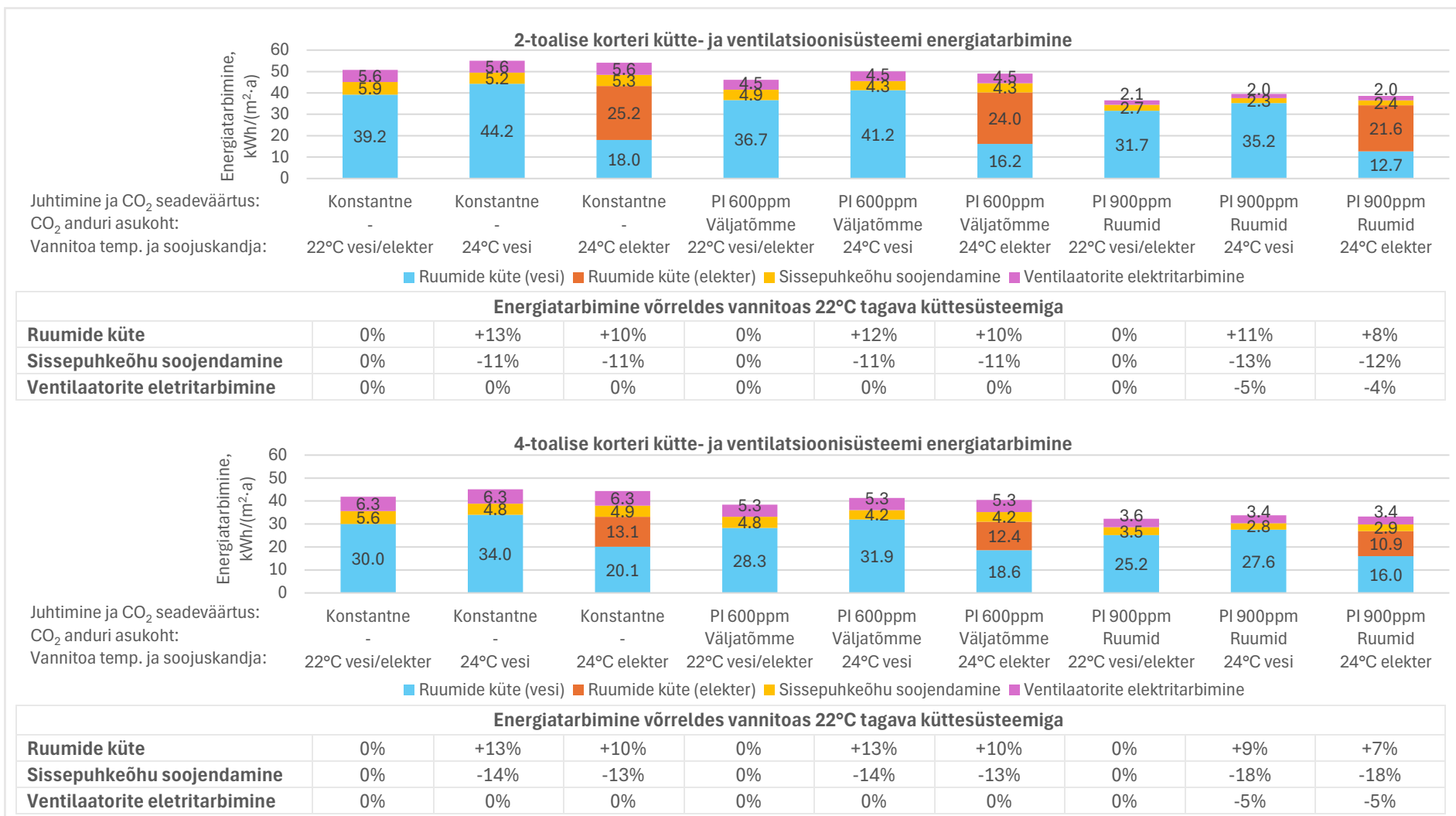
Põrandküttesüsteemi tüübi võrdlemisel analüüsiti kahte küttesüsteemi lahendust: veega põrandküte kõikides ruumides ja veega põrandküte eluruumides ning elektriga põrandküte vannitubades. Küttesüsteemide energiatarbimist hinnatakse olukorras, kus kõikides ruumides on tagatud õhutemperatuur 22 °C, ning olukorras, kus eluruumides on tagatud õhutemperatuur 22 °C ning vannitubades 24 °C. Põrandküte juhtimine toimub ON/OFF kontrolliga surnud tsooniga (*deadband*) $\pm 0,5$ °C. Simulatsioonide tulemused on esitatud joonisel 4.17. Vannitoas 22 °C tagamisel toimub kütmine külgnevate ruumidega, kuna vaadeldavatel vannitubadel puuduvad välispiirded. Sellisel juhul ei määra küttelehendus vannitubades primaarenergia tarbimist. Olukord on oluliselt erinev vannitoas teistest ruumidest kõrgema temperatuuri tagamisel, kus vannitoa põrandküttega köetakse külgnevaid madalama seadeväärtusega ruume.

Põrandküttelehenduste ja vannitubades tagatavate temperatuuride mõju primaarenergia tarbimisele on esitatud tabelis 4.5, mille kohaselt vannitubades teistest ruumidest kõrgema temperatuuri ning elektrilise põrandküte kasutamisel tõuseb primaarenergia tarbimine oluliselt.

Tabel 4.5 Põrandküttesüsteemi tüübi mõju süsteemide primaarenergia tarbimisele

Ventilatsioonisüsteem									
Juhtimisloogika	Konstantne			PI			PI		
CO ₂ anduri asukoht	-			Väljatõmme			Ruumid		
CO ₂ seadeväärtus, ppm	-			600			900		
Küttesüsteem									
Vannitoa temperatuur, °C	22	24	24	22	24	24	22	24	24
Soojusandja	vesi/ elekter	vesi	elekter	vesi/ elekter	vesi	elekter	vesi/ elekter	vesi	elekter
2-toalise korteri kütte- ja ventilatsioonisüsteemi primaarenergiatarbimine, kWh/(m ² -a)									
Tõhus kaugküte	48,5	50,5	83,9	42,6	44,5	76,2	30,2	31,6	60,2
Kaugküte	58,3	61,5	88,4	51,8	54,8	80,3	38,2	40,4	63,3
2-toalise korteri kütte- ja ventilatsioonisüsteemi primaarenergiatarbimine võrreldes vannitoas 22°C tagava küttesüsteemiga, kWh/(m ² -a)									
Tõhus kaugküte	0	+3,2	+35,3	0	+3,0	+33,6	0	+2,2	+29,9
Kaugküte	0	+3,2	+30,0	0	+3,0	+28,5	0	+2,2	+25,2
4-toalise korteri kütte- ja ventilatsioonisüsteemi primaarenergiatarbimine, kWh/(m ² -a)									
Tõhus kaugküte	43,3	44,3	61,5	38,6	39,6	55,9	30,5	30,4	44,8
Kaugküte	50,8	52,8	66,5	45,7	47,6	60,5	36,8	37,3	48,8
4-toalise korteri kütte- ja ventilatsioonisüsteemi primaarenergiatarbimine võrreldes vannitoas 22°C tagava küttesüsteemiga, kWh/(m ² -a)									
Tõhus kaugküte	0	+2,0	+18,2	0	+1,9	+17,3	0	+0,5	+14,3
Kaugküte	0	+2,0	+15,7	0	+1,9	+14,8	0	+0,5	+12,0

* süsteemide primaarenergiatarbimisel pole arvestatud veeküttesüsteemi ringluspumba elektritarbimisega



Joonis 4.17 Korterite põrandküttesüsteemi tüübi võrdlus

5. JÄRELDUSED

Targa kodu lahendusega korterite andmete analüüsist selgus, et juhtimispaneel pakub elanikele laia valikut seadeväärtusi, võimaldades neil määrata sisekliima parameetreid vastavalt isiklikele eelistustele ja enesetundele. Seadeväärtuste ulatuslik valik võimaldab seejuures valida ka kohati ebamõistlikke väärtuseid ruumide suhtelise niiskusele ning sissepuhke temperatuurile. Sellises olukorras võivad elanike mitteteadlikult tehtud ebasoodsad valikud suurendada korteri energiatarbimist ja kulusid. Energiatarbimise vähendamiseks tuleks piirata sissepuhke temperatuuri ja suhtelise niiskuse tasemete valikuid või informeerida juhtimispaneeli kasutajaid tehtavate otsuste mõjust energiatarbimisele ning anda soovitusi.

Korteritest kogutud andmete põhjal vajab põhjalikumat analüüsi ventilatsiooniseadmete järelküttekalorifeeri juhtimine ning suhtelise niiskuse (RH) taseme arvestamine nõudluspõhisel juhtimisel. Analüüsitud andmete kohaselt toimub ruumides märkimisväärne sissepuhketemperatuuri kõikumine, mis tõenäoliselt tuleneb järelküttekalorifeeri sisse- ja väljalülitumisest. Uuritud ajaperioodil toimus korterites nõudluspõhine juhtimine enamasti vaid süsihappegaasi (CO₂) taseme alusel, mistõttu puudub teave, kuidas automaatika arvestab väljaehitatud korterites suhtelise niiskuse seadeväärtustega.

Hoone kavandamisel tehtavatel valikutel ja elanike määratud sisekliima parameetrite seadeväärtuste valikutel on oluline mõju korterite energiatarbimisele. Alljärgnevalt esitatakse magistritöö raames läbiviidud simulatsioonide põhjal tehtud järeldused hoone kavandamisel ja korteri elanike tehtavate valikute kohta.

Hoone kavandamisel tehtavad valikud:

- Ventilatsioonisüsteemi juhtimisloogika: Energiatarbimise vähendamiseks on soovitatav kasutada nõudluspõhist juhtimist. CO₂ seadeväärtuse tagamiseks on tuleks eelistada proportsionaalset (P) või proportsionaal-integraalset (PI) juhtimist, antud juhtimisloogikate toimivus on simulatsioonide põhjal korterites sarnane.
- CO₂ andurite paigutus: Energiatõhususe ja õhukvaliteedi tagamiseks on soovitatav paigaldada CO₂ andurid eraldi eluruumidesse. Selline lahendus tagab tõhusalt õhukvaliteedi ruumides ka suletud uste korral ning vähendab oluliselt korteri energiatarbimist võrreldes samaväärse sisekliima tagava süsteemiga, kus CO₂ andur asub ainult väljatõmbel.

- Soojustagasti tüüp: Korteripõhistes ventilatsiooniseadmetes on soovitatav kasutada rootorsoojustagastit, mis vähendab märkimisväärselt järelküttekalorifeeri elektritarbimist.
- Põrandküttesüsteemi juhtimisloogika: Küttesüsteemi täpseks juhtimiseks ja energiatarbimise vähendamiseks tuleks eelistada optimeeritud parameetritega PI-kontrollerit, mis aitab vältida ruumi temperatuuri seadeväärtuse tõstmist ja sellega kaasnevat potentsiaalselt suuremat energiatarbimist.
- Põrandküttesüsteemi tüüp: Ruumide kütmisel tasub kasutada kõikides ruumides veega põrandkütet. Korterites, kus vannitubades kasutatakse elektrilist põrandakütet, põhjustab elanike poolt määratud kõrge temperatuur märgatavalt suuremat primaarenergia tarbimist.

Korteri elanike määratavate seadeväärtuste valikud:

- CO₂ seadeväärtus: Magamistubades õhukvaliteedi tagamiseks (950 ppm) sobib määrata CO₂ seadeväärtuseks 900 ppm, kui CO₂ andurid paiknevad eluruumides, ning 600 ppm, kui CO₂ andur asub ainult väljatõmbel.
- Sissepuhketemperatuur: Energiatarbimise kohalt tasub seadistada sissepuhke temperatuuriks 18°C. Sissepuhke seadeväärtuse 16°C ja 20°C korral võib tõusta primaarenergia tarbimine.
- Vannitoa temperatuuri seadeväärtus: Korterites, kus kasutatakse veega põrandkütet eluruumides ja elektrilist põrandakütet vannitubades, tuleks hoiduda vannitoa temperatuuri seadeväärtuse kõrgele seadmisest, et vältida vannitoa põrandküttega külgnevate ruumide kütmist ja sellega kaasnevat suuremat primaarenergia tarbimist.

KOKKUVÕTE

Uuemad korterelamud varustatakse targa kodu lahendusega, võimaldades elanikel määrata sobivad sisekliima parameetrid ning vähendada potentsiaalselt korterite energiatarbimist. Käesolev töö tugineb väljaehitatud targa kodu lahendusega 2-toalisest ja 4-toalisest korterist kogutud andmetele. Andmete alusel analüüsiti korterite tehnosüsteemide toimimist ning elanike seadeväärtuste eelistusi. Olemasolevate korterite põhjal koostati simulatsioonimudelid, millega hinnati hoone kavandamisel ja korterite elanike tehtavate valikute mõju energiatarbimisele ning sisekliimale.

Simulatsioonide põhjal vähendas korterite energiatarbimist suurel määral ruumides paiknevate CO₂ anduritega ventilatsioonisüsteemi nõudluspõhine juhtimine, tagades õhukvaliteedi ka kõrge CO₂ seadeväärtuse ja suletud magamistubade uste korral. Seadeväärtuse 900 ppm-i ning suletud uste korral vähenes 2-toalises korteris energiatarbimine ruumide kütmisele 17%, sissepuhkeõhu soojendamisele 46% ning ventilaatorite elektritarbimisele 54% võrreldes konstantselt juhitud süsteemiga. 4-toalises korteris vähenes energiatarbimine vastavalt 11%, 26% ja 29%.

Väljatõmbel paikneva CO₂ anduriga ventilatsioonisüsteemi nõudluspõhine juhtimine ei taganud kõrgemate CO₂ seadeväärtuste korral ruumides soovitud õhukvaliteeti ning magamistubade uste suletuse korral tõusid CO₂ tasemed ruumides märgatavalt. Õhukvaliteedi tagamiseks oli sobilik CO₂ seadeväärtus 600 ppm-i. Antud seadeväärtus on kooskõlas väljaehitatud korterite elanike määratud seadeväärtustega: väljatõmbelt juhitud CO₂ anduriga korterites olid CO₂ seadeväärtused 550 ppm-i ja 700 ppm-i. Korteri simulatsioonide tulemuse põhjal vähenes 2-toalises korteris võrreldes konstantselt juhitud süsteemiga energiatarbimine ruumide kütmisele 7%, sissepuhkeõhu soojendamisele 17% ning ventilaatorite elektritarbimisele 19%. 4-toalises korteris vähenes energiatarbimine vastavalt 5%, 13% ja 15%.

Ventilatsioonisüsteemi juhtimisloogikatest andsid võrdväärseid tulemusi PI ja PID juhtimine. Simulatsioonid viidi läbi eeldusel, et nõudluspõhine juhtimine toimub üksnes CO₂ andurite näitude alusel. Niiskustasemega arvestamine ventilatsioonisüsteemi juhtimisel võib potentsiaalselt suurendada korterite energiatarbimist. Väljaehitatud korterite andmed koguti kütteperioodil, mil nõudluspõhine juhtimine toimus valdavalt ainult CO₂ taseme järgi. Antud töös puudub teave, kuidas väljaehitatud korterite ventilatsioonisüsteem arvestab väljatõmbelt mõõdetud suhtelise niiskuse taset ja vastavaid seadeväärtusi. Niiskustaseme arvestamine süsteemi juhtimisel ja selle mõju energiatarbimisele vajavad täiendavat analüüsi.

Väljaehitatud korterid olid varustatud plaatsoojustagastiga ventilatsiooniseadmetega temperatuuri suhtarvuga 0,8. Simulatsioonide põhjal oli plaatsoojustagasti asemel rootorsoojustagasti kasutamisel võimalik oluliselt vähendada energiatarbimist sissepuhkeõhu soojendamisele. Konstantse ja nõudluspõhise juhtimise korral vähenes energiatarbimine õhu soojendamisele 58%. Korteripõhised ventilatsiooniseadmed on tavapäraselt varustatud elektrilise järelküttekalorifeeriga. Kuna elekter on kõrge kaalumisteguriga energiakandja, võib avaldada sissepuhkeõhu soojendamine arvestatavat mõju korteri primaarenergia tarbimisele.

Korteritest kogutud andmete põhjal olid korteri elanikud määranud sissepuhketemperatuuriks 19°C ja 21°C. Korterite sissepuhketemperatuur varieerus päeva lõikes palju: 2-toalises maksimaalselt 6 °C ning 4-toalises 9 °C. Varieerumine võib tuleneda korterites järelküttekalorifeeri sisse- ja väljalülitumisest, kuid selle täpsem põhjus nõuab põhjalikumat analüüsi. Simulatsioonides varieerumisega ei arvestatud ning sissepuhketemperatuuride mõju energiatarbimisele hinnati väärtustel 16°C, 18°C ja 20°C. Sissepuhketemperatuuri optimaalne väärtus oli 18°C. 16°C või 20°C kasutamisel suurenes energiatarbimine ruumide kütmisele või sissepuhkeõhu soojendamisele, tõstes kaugkütte kasutamisel korteri primaarenergia tarbimist.

Korterite energiatarbimist oli võimalik samuti vähendada pörandküttesüsteemi täpsema juhtimisega. ON/OFF-juhtimisel surnud tsooni vähendamisel või PI-juhtimise kasutamisel vähenes energiatarbimine ruumide küttele, kuid seevastu suurenes energiatarbimine sissepuhkeõhu soojendamisele. Juhtimisloogika mõju primaarenergia tarbimisele oli suurem ventilatsioonisüsteemi konstantsel töötamisel, ruumide CO₂ anduritega juhitud ventilatsioonisüsteemi korral primaarenergia tarbimine oluliselt ei muutunud. Väljaehitatud korterites kasutati vannitubades elektrilist pörandkütet. Simulatsioonide tulemusena tuleks eelistada veega pörandkütet ning elektrilise pörandküttega vannitubades hoida seadeväärtus madalal.

Antud töö tulemuste põhjal on võimalik hoone kavandamisel ja korterite elanike tehtavate valikutega oluliselt mõjutada korterite energiatarbimist. Simulatsioonide tulemuste tõlgendamisel tuleb arvestada töös tehtud lihtsustuste ning määratud tingimustega. Korreksemate hinnangute saamiseks tuleks korterite valimit suurendada, analüüsida korterites määratud minimaalseid ja maksimaalseid õhuvooluhulkasid, sissepuhketemperatuuri juhtimist ja niiskustaseme arvestamist.

SUMMARY

Modern apartment buildings are increasingly equipped with smart home solutions, enabling residents to set desired indoor climate parameters and potentially reduce energy consumption. This study is based on data collected from a smart home solution implemented in one 2-room and one 4-room apartment. The data was analyzed to assess the performance of HVAC systems and residents' preference for setpoints. Simulation models were developed based on the existing apartments to evaluate the impact of building design choices and user defined parameters on energy consumption and indoor climate.

The simulations showed that demand-controlled ventilation (DCV) with CO₂ sensors in rooms significantly reduced energy consumption, enabling to maintain air quality even with high CO₂ setpoints and closed bedroom doors. In a 2-room apartment with closed doors using setpoint 900 ppm reduced energy use for room heating by 17%, for supply air heating by 46%, and for fan electricity by 54%, compared to a constant airflow system. In the 4-room apartment, the reductions were respectively 11%, 26%, and 29%.

However, DCV systems with CO₂ sensors located only in exhaust ventilation duct failed to ensure adequate indoor air quality at higher CO₂ setpoints. CO₂ levels increased significantly in rooms when doors were closed. To ensure acceptable air quality, a CO₂ setpoint of 600 ppm was found to be suitable. This aligns with the setpoints observed in the studied apartments, which were 550 ppm and 700 ppm. Simulations indicated that with a setpoint 600 ppm, energy use in the 2-room apartment decreased for room heating by 7%, for supply air heating by 17% and for fan electricity by 19%. In the 4-room apartment reductions were respectively 5%, 13%, and 15%.

Both PI and PID control strategies provided similar results for ventilation system operation. The simulations assumed that DCV was controlled solely by CO₂ sensor. Including humidity in control strategies may increase energy consumption. The data of existing apartments was collected during the heating season when DCV primarily operated based on CO₂ levels. This study did not have information on how humidity levels and setpoints in the apartments were used to control the ventilation system. Further research is needed to analyze humidity-based control and assess impact on energy consumption.

The analyzed apartments were equipped with heat recovery ventilation (HRV) systems using plate heat exchangers with a temperature efficiency of 0.8. Simulations showed that replacing plate heat exchangers with rotary heat exchangers could significantly reduce supply air heating energy consumption. This reduction was approximately 58% for both constant and demand-controlled operation modes. Local ventilation units in apartments are typically equipped with electric heating coils. Since electricity has a high primary energy conversion factor, heating supply air may increase primary energy consumption considerably.

Data from the apartments indicated that residents set supply air temperatures between 19°C and 21°C. Supply air temperatures varied significantly during the day, with fluctuations up to 6°C in the 2-room apartment and 9°C in the 4-room apartment. This variation might be due to the intermittent operation of heating coils, but further analysis is required to confirm this. Variations were not considered in simulations, which evaluated the impact of fixed supply air temperatures of 16°C, 18°C, and 20°C. The optimal supply air temperature was found to be 18°C. Using 16°C or 20°C increased energy use for room heating or supply air heating, raising the primary energy demand when district heating was used.

Energy consumption could also be reduced by optimizing underfloor heating controls. Reducing the deadband of ON/OFF control or switching to PI control decreased energy use for room heating but increased energy for supply air heating. This effect was more pronounced with constant ventilation systems. In DCV systems controlled by CO₂ sensors in rooms, the impact on primary energy consumption was negligible. In the analyzed apartments, electric underfloor heating was used in bathrooms. Simulations suggest that lowering bathroom heating setpoints to avoid excessive primary energy consumption.

The findings demonstrate that building design decisions and residents' decisions significantly affect apartment energy consumption. However, interpreting simulation results requires consideration of the simplifications and assumptions made during the modeling process. For more accurate assessments, future studies should include more apartments and analyze additional parameters such as minimum and maximum airflow rates, supply air temperature and humidity control.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] A. Merzkirch, S. Maas, F. Scholzen ja D. Waldmann, „A semi-centralized, valveless and demand controlled ventilation system in comparison to other concepts in field tests“, *Building and Environment*, kd 93, nr 2, lk 21–26, november 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.06.007.
- [2] J. Laverge, N. Van Den Bossche, N. Heijmans ja A. Janssens, „Energy saving potential and repercussions on indoor air quality of demand controlled residential ventilation strategies“, *Building and Environment*, kd 46, nr 7, lk 1497–1503, juuli 2011, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.01.023.
- [3] A. Hesaraki ja S. Holmberg, „Demand-controlled ventilation in new residential buildings: Consequences on indoor air quality and energy savings“, *Indoor and Built Environment*, kd 24, nr 2, lk 162–173, aprill 2015, doi: 10.1177/1420326X13508565.
- [4] V. Pavlovas, „Demand controlled ventilation: A case study for existing Swedish multifamily buildings“, *Energy and Buildings*, kd 36, nr 10, lk 1029–1034, oktoober 2004, doi: 10.1016/j.enbuild.2004.06.009.
- [5] T. R. Nielsen ja C. Drivsholm, „Energy efficient demand controlled ventilation in single family houses“, *Energy and Buildings*, kd 42, nr 11, lk 1995–1998, november 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.06.006.
- [6] G. Guyot, M. H. Sherman ja I. S. Walker, „Smart ventilation energy and indoor air quality performance in residential buildings: A review“, *Energy and Buildings*, kd 165, lk 416–430, aprill 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.12.051.
- [7] A. Litiu et al., *Introduction to Building Automation, Controls and Technical Building Management*. Forssa: Forssan Kirjapaino Oy, 2017.
- [8] „Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiiv 2010/31/EL“. [www]. Loetud aadressil: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?uri=CELEX:02010L0031-20210101>. Kasutatud 20.02.2024.

- [9] „European Commission. Ventilation Units.” [www]. Loetud aadressil: https://energy-efficient-products.ec.europa.eu/product-list/ventilation-units_en. Kasutatud 10.09.2024.
- [10] J. Kurnitski et al., *Residential Heat Recovery Ventilation*. Tampere: Juvenes Print, 2018.
- [11] M. Schell ja D. Int-Hout, „Demand control ventilation using CO₂”, *ASHRAE Journal*, kd 43, lk 18–29, veebruar 2001. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.aivc.org/resource/demand-control-ventilation-using-co2>. Kasutatud: 20.02.2024.
- [12] I. Garman, M. Mattsson, J. A. Myhren, ja T. Persson, „Demand control and constant flow ventilation compared in an exhaust ventilated bedroom in a cold-climate single-family house”, *Intelligent Buildings International*, kd 15, nr 4, juuni 2023, doi: 10.1080/17508975.2023.2236993.
- [13] M. S. Shin, K. N. Rhee, E. T. Lee, ja G. J. Jung, „Performance evaluation of CO₂-based ventilation control to reduce CO₂ concentration and condensation risk in residential buildings”, *Building and Environment*, kd 142, lk 451–463, september 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.06.042.
- [14] P. Strøm-Tejsen, D. Zukowska, P. Wargocki, ja D. P. Wyon, „The effects of bedroom air quality on sleep and next-day performance”, *Indoor Air*, kd 26, nr 5, lk 679–686, oktoober 2015, doi: 10.1111/ina.12254.
- [15] N. Brelih, O. Seppänen, T. Bertilsson, M.-L. Maripuu, H. Lamy, ja A. Vanden Borre, *Design of energy efficient ventilation and air-conditioning systems*. Rumeenia, 2012.
- [16] S. Caillou, N. Heijmans, J. Laverge, ja A. Janssens, „Development of an evaluation methodology to quantify the energy potential of demand controlled ventilation strategies”, *35th AIVC Conference „ Ventilation and airtightness in transforming the building stock to high performance”*, Poznań, 2014. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.aivc.org/resource/development-evaluation-methodology-quantify-energy-potential-demand-controlled-ventilation>. Kasutatud: 21.09.2024.

- [17] *Arrêté du Gouvernement wallon du 15 mai 2014 déterminant les valeurs du facteur de réduction pour la ventilation visé à l'annexe A1, en exécution du décret du 28 novembre 2013 relatif à la performance énergétique des bâtiments*. Moniteur Belge, 2015, nr 2015027220. Kasutatud 02.09.2024.
- [18] K.-V. Võsa, A. Ferrantelli, ja J. Kurnitski, „Annual performance analysis of heat emission in radiator and underfloor heating systems in the European reference room“, *E3S Web of Conferences*, kd 111, august 2019, doi: 10.1051/e3sconf/2019111040.
- [19] T. M. Kull, M. Thalfeldt, ja J. Kurnitski, „PI parameter influence on underfloor heating energy consumption and setpoint tracking in NZEBs“, *Energies*, kd 13, nr 8, aprill 2020, doi: 10.3390/en13082068.
- [20] Kredex. *Liginullenergia eluhooned*. Rida- ja korterelamud juhend. Tallinn: 2017 [www] Loetud aadressil: <https://kredex.ee/et/energiatohusus/uute-hoonete-energiatohusus>. Kasutatud 15.10.2024.
- [21] T.-A. Kõiv ja A. Rant, *Hoonete küte*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2012.
- [22] A. Hasan, J. Kurnitski, ja K. Jokiranta, „A combined low temperature water heating system consisting of radiators and floor heating“, *Energy and Buildings*, kd 41, nr 5, lk 470–479, mai 2009, doi: 10.1016/j.enbuild.2008.11.016.
- [23] S. P. Corgnati et al., *Indoor Climate Quality Assessment*. Soome: Forssa Print, 2011.
- [24] *Hoonete energiatõhusus. Hoonete ventilatsioon. Osa 1: Sisekeskkonna lähteandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust keskkonnast, valgustusest ja akustikast. Moodul M1-6. Eesti standard EVS-EN 16798-1:2019+NA:2019*. Tallinn: Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2019.
- [25] M.-L. Maripuu, „Demand controlled ventilation (DCV) systems in commercial buildings. Functional requirements on systems and components.“, [Doktoridissertatsioon] Chalmersi Tehnikaülikool, Göteborg, Rootsi, 2009.

- [26] E. Abel, H. Voll, T. Tark, P. Pikk ja R. Daniel, *Hoonete energiatarve ja sisekliima*. Tallinn: OÜ Presshouse, 2022.
- [27] *Majandus- ja taristuministri määrus nr. 58 „Hoone energiatõhususe arvutamise metoodika”*. Vastu võetud: 05.06.2015. RT I, 09.06.2015, 21. Kasutatud: 31.09.2024.
- [28] S. Wolf et al., „Room-level occupancy simulation model for private households”, *Journal of Physics: Conference Series*, november 2019. doi: 10.1088/1742-6596/1343/1/012126.
- [29] Vallox. *Vallox 101 MV*. [www] <https://www.vallox.com/en/product/vallox-101-mv/>. Kasutatud: 19.10.2023.
- [30] *Ettevõtlus- ja infotehnoloogiainistri määrus nr. 63 „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded”*. Vastu võetud: 11.12.2018. RT I, 13.12.2018, 14. Kasutatud: 13.12.2024.