

## PASTATO DINAMINIO ENERGINIO MODELIAVIMO ĮRANKIŲ LYGINAMOJI ANALIZĖ

Vytautas PAJAUJIS<sup>1</sup>, Violeta MOTUZIENĖ<sup>2</sup>

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva*

*El. paštas: <sup>1</sup>pajaujis.vytautas@gmail.com; <sup>2</sup>violeta.motuziene@vgtu.lt*

**Santrauka.** Šiuo metu pasaulyje yra daugybė metodikų ir modeliavimo priemonių, skirtų pastato energijos poreikiams įvertinti. Modeliavimo priemonių rezultatai dažnai skiriasi, o to priežastys detalčiau nepakankamai analizuojamos. Straipsnyje lyginamos dvi pasaulyje populiarios tarpusavyje konkuruojančios dinaminio energinio modeliavimo programos – *DesignBuilder* ir *IES-VE*, rezultatai, kai abiejose programose sukuriamas identiškas pastato modelis ir daromos tos pačios prielaidos. Papildomai palyginimui atliekami skaičiavimai taikant PHPP programą ir remiantis STR2.09.04:2008 metodika. Įrankiuose palyginamos modeliuojant gaunamos pastato šildymo, vėsinimo galios, energijos sąnaudos pastatui šildyti bei vėsinti. Atlikus pastato dinaminį energinį modeliavimą gauti atitinkami poreikių skirtumai modeliuojant dviem programomis: vėdinimo – iki 11 %, vėsinimo – iki 9 %, šildymo – iki 5 %.

**Reikšminiai žodžiai:** dinaminis energinis modeliavimas, pastato energijos poreikiai, *IES-VE*, *DesignBuilder*, PHPP.

### Įvadas

Technologijoms vis sparčiau progresuojant, o energijos ištekliams senkant, vis labiau ieškoma galimybių, kaip būtų galima padidinti energijos vartojimo efektyvumą. Racionalus, protingas bei efektyvus energijos išteklių panaudojimas yra vienas iš esminių ES bei kitų išsivysčiusių šalių tikslų. Norint pasiekti užsibrėžtą pastato energinį naudingumą ir išvengti šiurkščių klaidų projektavimo, statybos bei pastato eksploataavimo etapuose, reikalingas energinis pastato naudingumo vertinimas jau kuriant koncepciją. Tam tikslui pagal skaitmeninės statybos (angl. BIM – *Building Information Modeling*) koncepciją turi būti taikomas dinaminis pastato energijos poreikių modeliavimas. Populiarėjant minėtai koncepcijai, dinaminis pastato energijos poreikių modeliavimas taps neišvengiama pastato kūrimo proceso dalimi. Energinis modeliavimas, lyginant su tradiciniais projektavimo metodais, leidžia įvertinti didesnę alternatyvių sprendimų kiekį ir išsirinkti efektyviausią. Taip pat šiuo metu plačiai paplitę pastatų darnumo vertinimo metodai, kuriuos taikant dinaminis pastato energijos poreikių modeliavimas įtraukiamas į bendrą pastato vertinimo procesą (pvz., BREEAM), t. y. siekiant gauti darnaus pastato sertifikatą, papildomi taškai skiriami už tai, kad projektuojant pastatą buvo taikomas dinaminis modeliavimas.

Praktika rodo (Oates, Sullivan 2012), kad realaus eksploatuojamo pastato energijos poreikiai dažnai neatitinka modeliuojant gautų prognozių pastato energinių poreikių. Šių neatitikimų priežastys gali būti skirtingos, tokios kaip: 1) klimato duomenų skirtumai; 2) vartotojų elgsena eksploatuojant pastatą skiriasi nuo prognozuojamos, neatliekamas jos monitoringas; 3) įranga veikia netinkamai / neefektyviai; 4) neužtikrinimas efektyvus įrangos valdymas, neteisingai suprojektuoti / sumontuoti įrenginiai; 5) netinkamai pasirinkta modeliavimo priemonė, nekompetentingas jos naudotojas ir kt.

Šiuo metu pasaulyje yra daugybė metodikų ir modeliavimo priemonių, leidžiančių įvertinti pastato energijos poreikius, tačiau modeliavimo priemonės dažnai duoda skirtingus rezultatus, o priežastys nėra detalčiau analizuojamos. Neatliekant detalesnės analizės, tampa neaišku, kuri modeliavimo priemonė yra tikslesnė ir patikimesnė, kokie veiksniai lemia skirtumus.

Renkantis modeliavimo priemonę tiriamajam objektui, buvo atsižvelgta į priemones, kurios buvo taikytos analizuotuose literatūros šaltiniuose ir tyrimuose, identifiкуotos populiariausios modeliavimo priemonės. Skirtingos modeliavimo priemonių galimybės detalčiai yra aprašomos Crawley'o *et al.* (2005, 2008). Nguyen *et al.* (2014) pateikia dažniausiai moksliniuose tyrimuose taikomų pastato ir jo aprūpinimo energija

sistemų modeliavimo priemonių statistika: *EnergyPlus* – 37,2 %, TRNSYS – 35,3 %, DOE-2 – 10 %, ESP-r – 5,6 %, eQUEST – 2,7 %, *Ecotect* – 2,7 %, kitos – 6,7 %.

Norint įsitikinti modeliavimo priemonių rezultatų teisingumu, jos yra testuojamos. Labiausiai pasaulyje paplitęs šiuo metu testavimas pagal ASHRAE 140 standartą. Standarte yra aprašoma pastato geometrija, medžiagiškumas, inžinerinių sistemų sprendimai bei darbo laikas ir kita aktuali informacija. Standarte yra nurodomi skirtingi šių įvesties duomenų deriniai ir pateikiami testavimo scenarijai. Modeliavimo priemonių kūrėjai internetiniuose puslapiuose pateikia atliktų testavimų rezultatus ir ataskaitas, kurias galima panagrinėti detaliau. Tyrimo metu buvo nagrinėjamos *EnergyPlus* (kuri yra *DesignBuilder* skaičiavimo variklis) ir IES-VE modeliavimo priemonių testavimo ataskaitos. 1 pav. kaip pavyzdys pateikiama ištrauka iš *EnergyPlus* ataskaitos, kurią nagrinėjant pastebėta, kad modeliuojant vienodą scenarijų skirtingomis modeliavimo priemonėmis gauti rezultatai skiriasi.

Iš pateiktos medžiagos matyti, kad rezultatai, gauti skirtingomis modeliavimo priemonėmis, skiriasi iki 20 %, o kai kuriais atvejais ir truputį daugiau. Kaip pavyzdį galima panagrinėti 620 scenarijų, kuriame gautos reikšmės nuo 4,55 MWh iki 5,94 MWh, o *EnergyPlus* priemone gauta reikšmė lygi 4,55 MWh. Matyti, kad *EnergyPlus* rezultatas nuo maksimalios reikšmės skiriasi 23,5 %. Atkreiptinas dėmesys, kad ASHRAE 140 standartas reglamentuoja ir scenarijų pavadinimus, todėl skirtingų priemonių ataskaitas galima palyginti tarpusavyje.

Atlikus literatūros šaltinių apžvalgą matyti, kad nėra atlikta mokslinių tyrimų, kuriuose būtų nagrinėjami IES-VE ir *DesignBuilder* (*EnergyPlus* komercinė versija) modeliavimo priemonėmis gaunami rezultatai. Modeliavimo priemonėmis gaunami rezultatai dažniausiai yra testuojami

pagal ASHRAE 140 standartą ir tuomet tarpusavyje lyginami, tačiau konkrečios priežastys, kodėl rezultatai skiriasi, nėra identifikuojamos ir toliau neanalizuojamos. Kadangi standarte nenurodoma, kokios paklaidos yra priimtinos, išanalizavus įvairių scenarijų rezultatus, daroma prielaida, kad rezultatų svyravimai esant 20 % paklaidai yra priimtini.

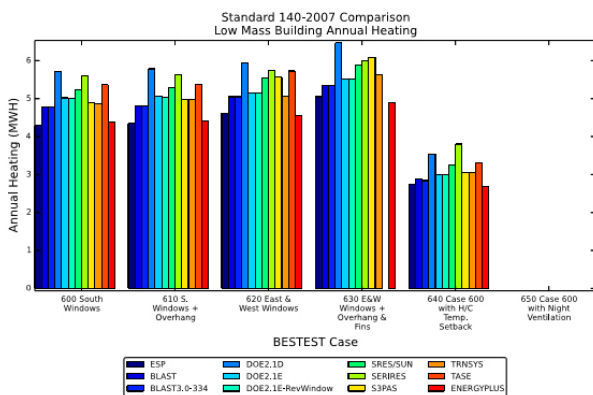
Straipsnyje pristatomo tyrimo tikslas – išanalizuoti gautus rezultatus dviem konkuruojančiomis, bet praktiškai vienodas galimybes turinčiomis energijos poreikių modeliavimo priemonėmis (IES-VE ir *DesignBuilder*) ir pateikti pagrindinius šių modeliavimo priemonių veikimo principus, galimybes, taip pat identifiuoti įvesties duomenų įtaką galutiniam modeliavimo rezultatui.

## Metodika

Siekiant palyginti minėtų programų rezultatų nesąryšius ir identifiuoti jų priežastis abiejomis programomis sukuriamas identiškias pastato modelis, darant lygiai tokias pačias prielaidas. Pastatas tikslingai pasirenkamas kuo paprastesnis tam, kad lengviau būtų identifiuoti, dėl kokių įvesties duomenų skirtumų ar modeliavimo algoritmų rezultatai skiriasi. Atlikus modeliavimą dviem programomis, papildomai atliekamas palyginimas su praktikoje dažniausiai taikomomis nedininėmis priemonėmis ar metodikomis pastato energijos poreikiams ir galiai nustatyti.

Tyrimų objektas – hipotetinis pagal A energetinio naudingumo klasės pastatui keliamus reikalavimus (STR 2.01.02:2016) suprojektuotas administracinės paskirties 1 aukšto 1000 m<sup>2</sup> ploto pastatas, esantis Vilniaus mieste. Pagal reglamentą pasirenkami šilumos perdavimo koeficientai: išorinės sienos – 0,15 W/m<sup>2</sup>K; grindų ant grunto – 0,16 W/m<sup>2</sup>K; stogo – 0,11 W/m<sup>2</sup>K; langų ir išorinių durų – 1,3 W/m<sup>2</sup>K. Atsižvelgiant į šiuo metu vyraujančias statybos tendencijas, pasirinktas administracinis pastatas, kurio į pietus, rytus ir vakarus orientuotos atitvaros yra iš dalies stiklinės. Stiklinės atitvaros sudaro 50 % sienų ploto. Šiaurinės pastato atitvaros – apšiltintos, stiklinių paviršių jose nėra. Pastato stiklinės atitvaros sudarytos iš dviejų stiklų (vienos kameros stiklo paketo), kurie pripildyti argono dujų, visuminis saulės energijos praleisties koeficientas  $g = 0,6$ , šviesos praleisties koeficientas  $\tau = 0,7$ .

Pastato energiniam modeliavimui bus naudojami Kauno miesto tipinių meteorologinių metų klimato duomenys, kurie įvesti į tarptautinio meteorologijos duomenų tinklo IWEC (angl. *International Weather for Energy Calculations*) duomenų bazę. 1 lentelėje pateikiami vietovės, klimato, projektiniai ir kiti įvesties duomenys, kurie buvo naudojami modeliavimo priemonėse. Pagrindiniai modelio įvesties duomenys pateikti 1 lentelėje.



1 pav. *EnergyPlus* testavimo ataskaitos ištrauka. Metiniai energijos poreikiai šildymui (EnergyPlus 2017)

Fig. 1. Fragment of results of *EnergyPlus* testing. Annual energy demand for heating (EnergyPlus 2017)

1 lentelė. Įvesties duomenys

Table 1. Model input data

Vietovė	Kaunas
Šildymo sezono parametrai:	
dienolaipsniai	4137
projektinė temperatūra	-19,9 °C
Vasaros parametrai:	
didžiausioji sauso termometro temperatūra	31,3 °C
dienolaipsniai	797
Grunto temperatūra (visus metus)	
4 °C	
Patalpų oro temperatūra (remiantis HN 42:2009)	
šaltuoju laikotarpiu	20 °C
šiltuoju laikotarpiu	24 °C
Šviežio oro kiekio projektinės reikšmės, remiantis STR 2.09.02:2005 1 priedu	
administracinės patalpos	3,6 m <sup>3</sup> /h·m <sup>2</sup>
oro kaita	1,2 h <sup>-1</sup>
Vėdinimo sistemų temperatūrinis šilumos atgavimo efektyvumas	
80 %	
Šildymo sistemos šilumnešio projektinės temperatūros	
80/60 °C	
Vėsinimo sistemos šaltnešio temperatūros	
6/12 °C	
Šildymo, vėsinimo sistemų darbo laikas	
Nuolatos	
Vėdinimo sistemos darbo laikas	
Kiekvieną dieną, 8:00–18:00	

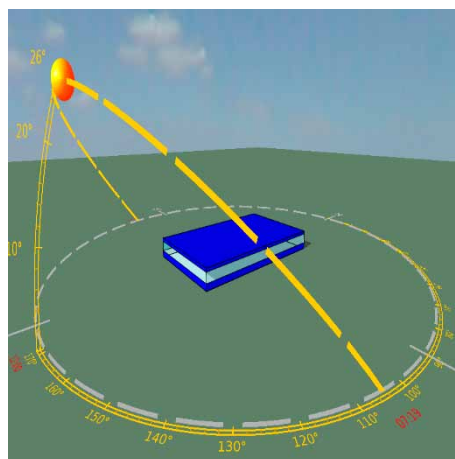
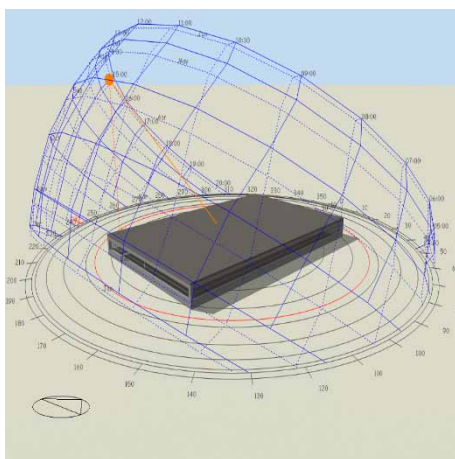
Pastato karšto vandens poreikis, šilumos pritekiai nuo žmonių, buitinių elektros prietaisų ir apšvietimo hipotetiniame pastate nėra vertinamas.

Sudarant tiriamojo objekto dinaminį energijos poreikių modelį, pirmiausia *DesignBuilder* ir IES-VE priemonėse buvo sukurtas hipotetinio pastato geometrinis modelis. Pastato modelis, sukurtas *DesignBuilder* ir IES-VE priemonėse, yra pavaizduotas 2 pav.

Matyti, kad modeliavimo priemonių grafinė vartotojo aplinka šiek tiek skiriasi, tačiau abi modeliavimo priemonės atvaizduoja tuos pačius parametrus.

### Paviršių konvekcijos modeliai ir modeliavimo nuostatos

*DesignBuilder* ir IES-VE modeliavimo priemonėse yra daug įvairių modeliavimo nuostatų, tačiau į daugumą jų paprastas modeliuotojas dažnai nekreipia dėmesio. Šiose modeliavimo priemonėse viena iš gana svarbių nuostatų yra išorės bei vidinių paviršių konvekcijos modelių nuostata. *DesignBuilder* modeliavimo priemonėje yra 6 pagrindiniai *EnergyPlus* vidinių paviršių konvekcijos algoritmai: *Adaptive Convection Algorithm*, *Simple*,

2 pav. Pastato modelis *DesignBuilder* (kairėje) ir IES-VE (dešinėje) modeliavimo priemonėseFig. 2. Building model created in *DesignBuilder* (left) and IES-VE (right)

CIBSE, *Ceiling diffuser*, *Cavity* ir TARP. Taip pat detalesnėse modeliavimo priemonėse nuostatose galima pasirinkti dar 28 papildomus vidinės konvekcijos modelius, kurie yra išvardinti *DesignBuilder* priemonės vartotojo vadove (*DesignBuilder* 3.4, 2017). Tame pačiame vartotojo vadove yra išskiriami ir 7 pagrindiniai išorinės konvekcijos algoritmai: *Adaptive Convection Algorithm*, *Simple Combined*, CIBSE, ASHRAE *Vertical Wall*, TARP, DOE-2 ir MoWiTT. Kaip ir vidinės konvekcijos modelių atveju, išplėstinėse nuostatose galima pasirinkti dar 11 papildomų išorinės konvekcijos modelių, kurie taip pat išvardinti vartotojo vadove (*DesignBuilder* 3.4 2017).

IES-VE modeliavimo priemonėje išorinei konvekcijai taikomi du pagrindiniai modeliai: *McAdams* ir ASHRAE *Simple*, o vidinei konvekcijai priemonėje yra taikomi keturi pagrindiniai modeliai: CIBSE *fixed values*, *Alamdari & Hammond*, CIBSE *variable values*, BS EN 15265. Matyti, kad *DesignBuilder* modeliavimo priemonė stipriai lenkia IES-VE modeliavimo priemonę naudojamų išorinių ir vidinių konvekcijos modelių skaičiumi.

Modeliuojant pastebėta, kad abiejose priemonėse pagal numatytuosius parametrus (angl. *default*) nuostatos skiriasi: *DesignBuilder* priemonėje yra nustatyti DOE-2 ir TARP konvekcijos modeliai, o IES-VE priemonėje *McAdams* ir CIBSE. Iš esmės skirtingų išorinių ir vidinių paviršių konvekcijos modelių taikymas tyrimo objektui yra viena iš pagrindinių priežasčių, kodėl modeliavimo rezultatai *DesignBuilder* ir IES-VE modeliavimo priemonėmis šiek tiek skiriasi, pažymėtina ir tai, kad nei STR, nei PHPP jokių konvekcijos modelių ar algoritmų netaiko, juose taikomos fiksuotos konvekcijos koeficientų reikšmės. Na o modeliavimo programose yra taikomi numatytieji konvekcijos koeficientų skaičiavimo modeliai, tačiau vartotojas turi galimybę pasirinkti ir kitokį modelį. Tam, žinoma, programos naudotojas turi suprasti tų modelių taikymo ypatumus.

## Grunto temperatūra

Vienas iš pagrindinių veiksnių, kuris buvo identifikuotas tyrimo metu kaip darantis įtaką modeliavimo rezultatams

visose priemonėse, yra grunto temperatūra. Šiuo metu nusistovėjusi praktika, kad grunto temperatūros per metus nėra viešai prieinamos, o tai tik dar labiau sustiprina problemą. Lietuvos grunto temperatūros nėra pateikiamos nei RSN 156–94, nei *Meteororm* duomenų bazėse, bet grunto temperatūros skirtingame gylyje Kauno miestui yra pateikiamos IWEC duomenų bazėje, tačiau pačiame klimata apibūdinančiame dokumente tiksliai nurodoma, kad jos negali būti taikomos nuostoliams per gruntą skaičiuoti. Remiantis anksčiau aprašyta situacija, visose modeliavimo priemonėse modeliuojant scenarijus buvo pasirinkta pastovi +4 °C grunto temperatūra per metus. Tačiau ši reikšmė neatspindi tikrosios situacijos ir vyraujančių temperatūrų skirtingais metų mėnesiais. PHPP priemonė grunto temperatūras suskaičiuoja pagal formules, kurios priklauso nuo išorės lauko oro temperatūros. Grunto temperatūrų reikšmės per metus, gautos PHPP priemone, pateikiamos 2 lentelėje.

Kaip matyti iš rezultatų, grunto temperatūrų reikšmės yra didesnės už nustatytąsias, todėl praktikoje rekomenduojama taikyti apskaičiuotąsias arba meteorologinių klimato stočių patvirtintas ir išmatuotas grunto temperatūras, o ne nustatytąsias.

Tyrimo metu taip pat buvo pastebėtas techninis *DesignBuilder* ir IES-VE modeliavimo priemonių niuansas. Abi priemonės pagal numatytuosius parametrus priima netinkamas grunto temperatūras, todėl iš pradžių gaunami realybės neatitinkantys rezultatai: *DesignBuilder* priemonėje pagal numatytuosius parametrus parenkama pastovi +18 °C grunto temperatūra per visus metus, o IES-VE priemonė priima, kad grunto temperatūra yra lygi išorės lauko oro temperatūrai. Tačiau šias nuostatas gana paprasta pakeisti: *DesignBuilder* priemonėje atsidarius vietovės parametrus, reikia pasirinkti grunto nuostatas ir suvesti reikalingas grunto temperatūras, o IES-VE modeliavimo priemonėje įėjus į *ApacheSIM* modulį reikia nurodyti gretimumo (angl. *adjacency*) sąlygas grindims. Gretimumo sąlygos IES-VE priemonėje yra suformuojamos sudarant atskirus temperatūrinius metų grafikus.

2 lentelė. Vidutinės mėnesinės grunto temperatūrų reikšmės per metus, apskaičiuotos PHPP priemone  
Table 2. Average monthly ground temperatures within the year, calculated with PHPP

	Sausis, °C	Vasaris, °C	Kovas, °C	Balandis, °C	Gegužė, °C	Birželis, °C	Liepa, °C	Rugpjūtis, °C	Rugsėjis, °C	Spalis, °C	Lapkritis, °C	Gruodis, °C
Grunto temperatūra	7,2	6,4	6,4	7,4	9,1	11,7	13,3	14,2	13,3	12,3	10,6	8,8

## Rezultatai

*DesignBuilder* ir IES-VE – pažangios, plačiai pasaulyje kompleksiskam pastato vertinimui taikomos modeliavimo priemonės. Lietuvoje šios modeliavimo priemonės dar nėra itin plačiai taikomos, todėl praktikoje dažnai pastato energiniam efektyvumui nustatyti yra taikomi skaičiavimai, atlikti remiantis STR ar PHPP priemone. Siekiant palyginti pažangias modeliavimo priemones su paprastesnėmis, nuspręsta šias dvi priemones įtraukti į tyrimą ir palyginti gautus rezultatus su pažangiomis modeliavimo priemonėmis gautais rezultatais. Šiame skyriuje aptariami bendri tyrimo rezultatai, gauti *DesignBuilder*, IES-VE modeliavimo priemonėmis, taip pat rezultatai, gauti naudojantis PHPP priemone bei STR 2.09.04:2008 (šiuo metu negalioja, bet neturi galiojančio analogo) skaičiavimais.

*DesignBuilder* ir IES-VE modeliavimo priemonėse naudojami Kauno miesto tipinių meteorologinių metų klimato duomenys (kitiems Lietuvos miestams duomenų nėra), kurie įvesti į tarptautinį meteorologijos duomenų tinklą IWEC. Na o PHPP priemonėje Lietuvai naudojami Vilniaus miesto klimato duomenys, kurie suvesti vadovaujantis IWEC ir *Meteonorm* klimato duomenimis ir pasirenkant papildomus pataisos koeficientus. PHPP priemonėje pataisos koeficientai pasirenkami išorės lauko oro temperatūrai ir saulės spinduliuotei, siekiant saugesnio požiūrio (angl. *at the safe side*) ir tam tikros atsargos.

Taikant STR metodiką naudojami Kauno miesto klimato duomenys, kurie pateikti RSN 156–94 „Statybinė klimatologija“, o saulės spinduliuotės duomenys imami iš STR 2.09.04:2008. Šildymo sistemos galioms skaičiuoti visose priemonėse yra pasirenkama –19,9 °C projektinė temperatūra, kuri yra pateikta jau minėtuose Kauno miesto tipinių meteorologinių metų klimato duomenyse. Išorės lauko oro ir grunto temperatūros, kurios naudojamos atliekant skaičiavimus, yra pateiktos 3 lentelėje.

4 lentelėje nagrinėjami gauti saulės pritekiai per skaidrias pastato atitvaras. Pastebima, kad suminiai rezultatai, gauti taikant IES-VE ir *DesignBuilder*, skiriasi 5,8 % (*DesignBuilder* priemonėje pasirenkamas kaip atskaitos taškas), taip pat IES-VE modeliavimo priemonė siek tiek didesnius saulės pritekius gauna vasaros laikotarpiu. Nesąryšiai STR ir PHPP variantuose siekia 0,5 % ir 18 %. Pažymėtina, kad PHPP priemonėje nėra galimybės nustatyti procentinį saulės pritekį panaudojimą. Pati priemonė pagal formules apskaičiuoja, kokia saulės pritekų dalis yra panaudojama pastate. PHPP priemonė pirminiame scenarijuje įvertino 90 % saulės pritekų panaudojimą.

3 pav. pateikiami mėnesiniai saulės pritekų grafiniai rezultatai, iš kurių matyti, kad didžiausias saulės pritekų nesutapimas gaunamas PHPP ir STR variantų rezultatuose, tačiau viena iš šio netolydumo priežasčių yra skirtingų klimato duomenų naudojimas atliekant skaičiavimus ir jau

3 lentelė. Vidutinės mėnesinės išorės lauko oro ir grunto temperatūrų reikšmės, taikomos modeliavimo priemonėse, remiantis IWEC, PHPP ir RSN 156–94 pateikiamais duomenimis

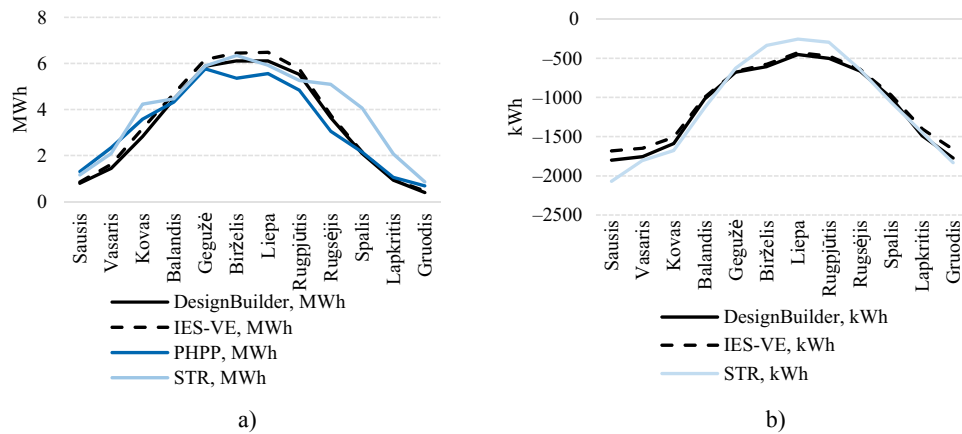
Table 3. Average monthly outside air and ground temperatures, used in simulation tools based on IWEC, PHPP and RSN 156–94

	Sausis, °C	Vasaris, °C	Kovas, °C	Balandis, °C	Gegužė, °C	Birželis, °C	Liepa, °C	Rugpjūtis, °C	Rugsėjis, °C	Spalis, °C	Lapkritis, °C	Gruodis, °C
<i>DesignBuilder</i> IES-VE	-2,2	-4,1	0,1	6,8	12,8	15,4	17,8	16,7	11,9	7,3	0,9	-1,9
PHPP	-5,9	-4,6	-0,4	5,9	12,7	16,0	17,1	16,5	11,8	6,8	1,4	-2,7
STR	-5,2	-4,3	-0,4	5,8	12,4	15,8	16,9	16,4	11,9	7,1	1,8	-2,3
Grunto temperatūra	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0

4 lentelė. Saulės pritekiai, šilumos nuostoliai dėl infiltracijos ir energijos poreikiai

Table 4. Solar heat gains, heat loss because of infiltration and energy demand

Priemonė / metodika	<i>DesignBuilder</i>	IES-VE	PHPP	STR
	MWh			
Saulės pritekiai	40,18	42,51	39,99	47,41
Nuostoliai dėl infiltracijos	13,33	12,65	12,38	13,17
Energijos poreikiai šildymui	41,51	43,40	45,48	40,08
Energijos poreikiai vėdinimui	9,82	10,94	11,31	11,98
Energijos poreikiai vėsinimui	5,36	4,87	4,17	–



3 pav. Saulės pritėkiai (a) ir nuostoliai dėl infiltracijos (b)  
 Fig. 3. Solar heat gains (a) and heat loss because of infiltration (b)

minėtas saulės pritėkių taikymo koeficientas. Pažymėtina, kad IES-VE ir *DesignBuilder* priemonėmis gaunami didesni saulės pritėkiai vasaros laikotarpiu, o PHPP ir STR – žiemos sezono laikotarpiu.

Nagrinęjant 3 pav. pavaizduotus nuostolius dėl infiltracijos, matyti, jog metiniai visomis priemonėmis gauti rezultatai skiriasi nežymiai – nuo 1 iki 7 %. Taip pat galima pastebėti, kad skaičiuojant pagal STR vasaros laikotarpiu gaunami mažesni nuostoliai dėl infiltracijos, o žiemos sezono laikotarpiu – didesni. Nesutapimų tarp rezultatų susidaro, nes nei PHPP, nei STR priemonės tiksliai neįvertina vietovės, pastato geometrijos, vėjo greičio, slėgių patalpoje ir atmosferoje. Modeliavimo priemonėmis (*DesignBuilder* ir IES-VE) šios dedamosios įvertinamos detaliau, tai ir lemia tikslesnius rezultatus, kurie vienas nuo kito skiriasi nežymiai. Nei PHPP, nei STR priemonėse pastato vietovė bei pastato apsauga nuo vėjo taip pat nėra detaliau aprašoma. PHPP priemonėje taip pat nėra įvedamas pastato aukštų skaičius, o tai leidžia daryti išvadą, jog taikant priemonę neįvertinama pastato aerodinamikos ir pastato aukščio įtaka skaičiuojamiems nuostoliams dėl infiltracijos.

Tiek IES-VE, tiek *DesignBuilder* modeliavimo priemonių rezultatai, galima sakyti, yra identiški, modeliavimo priemonėmis nuostoliai dėl infiltracijos vertinami vienodai, taip pat puikiai matyti ir STR priemonės niuansai, kurie buvo aprašyti anksčiau. PHPP priemonėje išskirti nuostoliai dėl infiltracijos pamėnesiui nėra galimybės.

Energijos poreikiai šildymui detalizuojami 4 lentelėje. Iš rezultatų galima matyti, kad IES-VE ir *DesignBuilder* modeliavimo priemonėmis gauti rezultatai skiriasi mažai ir nesąryšis siekia 4,5 % lyginant su *DesignBuilder* priemonės rezultatais. Mažiausi energijos poreikiai šildymui gaunami

STR priemone. PHPP priemonė energijos poreikius šildymui pateikia kartu su energijos kiekiu, reikalingu mechaninei vėdinimo sistemai, todėl yra sudėtinga identifikuoti, koks energijos kiekis kiekvieną mėnesį tenka tik šildymo poreikiams užtikrinti. Paklaidos taikant visas modeliavimo priemonės siekia 3,4–9,5 %, lyginant su *DesignBuilder* priemonės rezultatais.

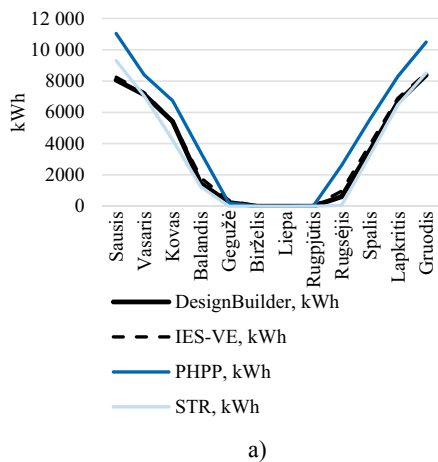
Verta paminėti, jog taikant STR priemonę gautuose rezultatuose matyti tendencija, jog energijos poreikiai šildymui yra didesni žiemos sezono laikotarpiu ir mažesni balandžio bei rugsėjo mėnesiais nei taikant kitas modeliavimo priemones. Viena iš priežasčių – itin besiskiriančios sausio mėnesio išorės lauko oro temperatūros, be to, STR priemonė identifikuoja didesnius saulės pritėkius rugsėjo mėnesį nei kitos modeliavimo priemonės.

Kaip matyti iš 4 pav., energijos poreikiai šildymui IES-VE ir *DesignBuilder* modeliavimo priemonėmis yra vertinami vienodai, o PHPP ir STR priemonėmis gautų rezultatų grafikai šiek tiek skiriasi.

Modeliavimo priemonėmis gauti pastato energijos poreikiai vėdinimui pateikti 4 lentelėje. IES-VE ir *DesignBuilder* modeliavimo priemonėmis gautų rezultatų nesąryšis siekia 11,3 %. Didžiausi energijos poreikiai vėdinimui gauti skaičiuojant STR priemone, jie nuo *DesignBuilder* rezultatų skiriasi 22 %.

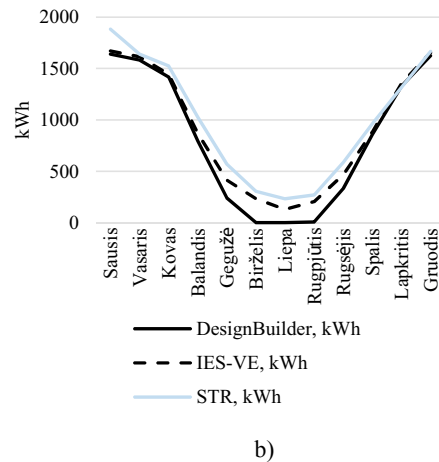
Grafinė pastato rezultatų interpretacija pateikiama 5 pav., kur matyti, kad IES-VE ir STR priemonėmis pakankamai panašiai vertinami energijos poreikiai vėdinimui visų metų laikotarpiu. Papildomą dėmesį reikėtų atkreipti į *DesignBuilder* vasaros rezultatus, nes modeliavimo priemonė šiuo laikotarpiu identifikavo itin mažus energijos poreikius vėdinimui, o kitomis modeliavimo priemonėmis gauti poreikiai vėdinimui buvo žymiai didesni.

5 pav. pateikiami pastato energijos poreikiai vėsinimui. Nesąryšis tarp IES-VE ir *DesignBuilder* modeliavimo priemonių lygus 9,3 %, tarp PHPP ir *DesignBuilder* – 22,2 %. Šiuo atveju matyti, kad mažiausi energijos poreikiai vėsinimui buvo gauti PHPP priemone, tačiau pastebima, kad rugpjūčio mėnesį rezultatai skiriasi nuo rezultatų, gautų IES-VE ir *DesignBuilder* modeliavimo priemone.

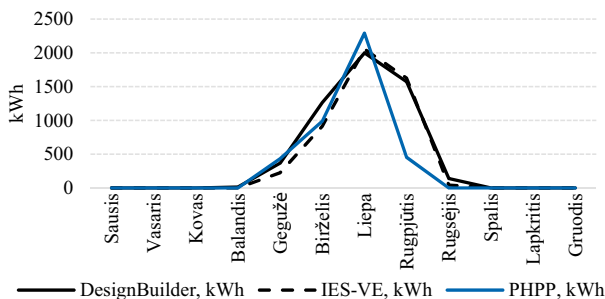


Tai gali būti viena iš priežasčių, kodėl gaunamas toks didelis nesąryšis. Apibendrinant matyti, kad IES-VE ir *DesignBuilder* modeliavimo priemonėmis labai panašiai vertinami energijos poreikiai vėsinimui.

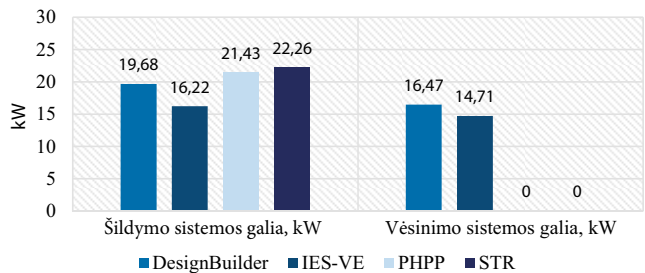
Kaip matyti iš grafiko (5 pav.), PHPP priemone gauti rezultatai išsiskiria ir grafiko forma, tai aiškiai rodo, kad ir pačia priemone kitaip vertinami energijos poreikiai



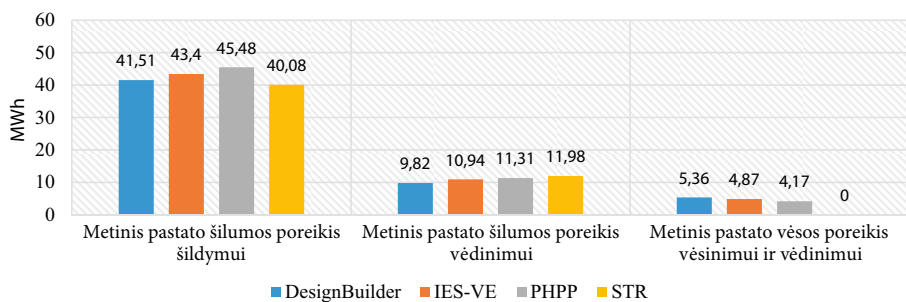
4 pav. Energijos poreikiai šildymui (a) ir vėdinimui (b)  
Fig. 4. Energy demand for heating (a) and ventilation (b)



5 pav. Energijos poreikiai vėsinimui  
Fig. 5. Energy demand for cooling



6 pav. Mikroklimato sistemų galios  
Fig. 6. Loads of indoor climate systems



7 pav. Pastato energijos poreikiai  
Fig. 7. Building's energy demand



vėsinimui pastate. Viena iš priežasčių yra ta, kad taikant PHPP priemonę yra imamos vidutinės mėnesinės išorės lauko oro temperatūros, o tai iš esmės neatspindi temperatūrų dinamikos vasaros laikotarpiu. Taikant *DesignBuilder* ir IES-VE modeliavimo priemonės temperatūrų dinamika yra vertinama valandos žingsniu, todėl ir rezultatai, gauti šiomis priemonėmis, yra vienas kitam labai artimi.

6 pav. pateikiamos pastato šildymo ir vėsinimo galios. Iš rezultatų matyti, kad didžiausios šildymo galios gautos taikant STR ir PHPP variantą – atitinkamai 22,26 kW ir 21,43 kW, mažiausios šildymo galios gautos IES-VE modeliavimo priemone ir siekia 16,22 kW. Vėsinimo galios gautos tik modeliavimo priemonėmis *DesignBuilder* ir IES-VE – didžiausioji galia 16,47 kW, mažiausioji 14,71 kW, o rezultatai skiriasi 10,7 %, lyginant su *DesignBuilder* priemone gautais rezultatais.

Matyti (6 pav.), kad rezultatai taikant abi modeliavimo priemones – *DesignBuilder* ir IES-VE – skiriasi iki 17 %, o lyginant šildymo galias su STR rezultatais – paklaida siekia 13 %. Daroma prielaida, kad taikant IES-VE ir *DesignBuilder* skirtingai vertinami šilumos mainai per gruntą, todėl tiek šildymo, tiek vėsinimo galios šiek tiek skiriasi.

Išnagrinėjus mikroklimato sistemų galių rezultatus, matyti tendencija, kad IES-VE modeliavimo priemone gaunamos mažiausios šildymo ir vėsinimo galios, o didžiausios šildymo galios gaunamos STR ir PHPP priemonėmis. PHPP priemone norint suskaičiuoti vėsinimo galias, reikalingi papildomi įvesties duomenys, kurie tyrimo metu nebuvo įvedami.

Apibendrinant visus modeliavimo priemonėmis gautus rezultatus, buvo sudarytas suvestinis pastato energijos poreikių grafikas (7 pav.). Analizuojant duomenis matyti, kad gauti rezultatai mažai skiriasi vienas nuo kito arba patenka į leistinas paklaidų ribas (neviršija 20 %). Pastato energijos poreikiai vėdinimui – vienas iš punktų, kai modeliavimo priemonėmis energijos poreikiai vertinami šiek tiek skirtingai ir todėl susidaro didesni nesąryšiai.

Pabrėžtinai ir vienas iš esminių tyrimo metu rastų niuansų. IES-VE modeliavimo priemone buvo gautos mažiausios šildymo galios iš visų taikytų modeliavimo priemonių, tačiau energijos poreikiai šildymui yra didesni nei *DesignBuilder* ar kitomis priemonėmis nustatyti. Analogiška situacija yra su vėsinimo poreikiais – IES-VE modeliavimo priemone gautos mažesnės vėsinimo galios, tačiau energijos poreikiai lygūs arba šiek tiek didesni.

Atlikus tyrimą ir išanalizavus jo metu gautus rezultatus, matyti, kad mažo kompleksiskumo (kai detalai nevertinami įvairūs pastato naudojimo ir jo sistemų veikimo režimai ir pan.) modeliams sudaryti galima taikyti PHPP ir STR priemones, o pačios priemonės gali būti taikomos

ir abstrakčiam preliminariam koncepciniam planavimui ar vertinimui. Didesnio kompleksiskumo dinaminiais modeliams, kuriuose yra daugiau kintamųjų, kurie daro įtaką galutiniam pastato energijos suvartojimui, taip pat ir pasaulyje pripažintoms pastato sertifikavimo metodologijoms, rekomenduojama, dažnai ir privaloma, taikyti pažangias modeliavimo priemones IES-VE ir *DesignBuilder*, kuriomis atskiri pastato elementai, inžinerinės sistemos gali būti įvertintos ir suskaičiuotos itin detalai bei tiksliai.

## Išvados

1. Atsižvelgiant į literatūros apžvalgą, dažniausiai moksliniuose tyrimuose taikomos *EnergyPlus* ir TRNSYS modeliavimo priemonės. Modeliavimo priemonės dažniausiai yra testuojamos pagal pasaulyje pripažintą ASHRAE 140 standartą, o išnagrinėjus modeliavimo priemonių testavimo ataskaitas identifiukuota, kad 20 % paklaida modeliavimo rezultatuose taikant skirtingas modeliavimo priemones, kai naudojami tie patys įvesties duomenys, yra priimtina.
2. Tyrimo metu tarp energijos poreikių rezultatų, kurie buvo gauti *DesignBuilder* ir *IES-VE* modeliavimo priemonėmis, identifiukuotas 5–11 % nesąryšis. Taip pat nustatyta, kad skirtingi išorinės ir vidinės konvekcijos modeliai taikomi *DesignBuilder* ir IES-VE modeliavimo priemonėse, o PHPP ir STR taiko tik pastovius konvekcijos koeficientus, tai ir lemia tam tikrą nesąryšių atsiradimą.
3. Taikant *DesignBuilder* ir IES-VE modeliavimo priemonės modeliuoti naudojami tie patys klimato duomenys, tačiau pagal numatytuosius parametrus naudojamos netinkamos grunto temperatūros, kurios turėtų būti koreguojamos modeliuotojo rankiniu būdu.
4. Didžiausios šildymo galios modeliuojamam pastatui gautos taikant STR variantą – 22,26 kW, mažiausios šildymo galios gautos IES-VE modeliavimo priemone ir siekia 16,22 kW. Remiantis tyrimo rezultatais galima daryti prielaidą, kad praktikoje reikėtų taikyti mažesnius atsargos koeficientus modeliavimo priemonėse bei PHPP ir STR variantuose. Skaičiuojant šildymo galią pagal STR, siūloma racionaliau vertinti pataisas dėl atitvaros orientacijos, aukščio, šildymo prietaisų rūšies, taip pat pataisas, kurias taikant įvertinamas infiltracijos padidėjimas kampinėse patalpose. Išvardinti pakeitimai sumažintų šildymo galią 6,5 %. Jei pastatas aukštesnis ir didesnis (5 aukštų, 5000 m<sup>2</sup>), šildymo galia sumažėja nuo 7,4 %. Dažnai praktikoje taikoma 25 % atsarga neturėtų būti taikoma *DesignBuilder*, PHPP ir STR atvejais, o IES-VE modeliavimo priemonei galima taikyti mažesnę atsargos koeficientą, kuris siektų 20 %.



## Literatūra

- ANSI/ASHRAE 2011. *Standard 140–2011, Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA.
- BREEAM [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2017 m. vasario 5 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.breeam.com>
- Crawley, D. B., et al. 2008. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs, *Building and Environment* 43(4): 661–673. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.027>
- Crawley, D. B.; Hand, J. W.; Kummert, M.; Griffith, B. T. 2005. *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*. Report, version 1.0.
- DesignBuilder 3.4 [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2017 m. sausio 30 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.designbuilder.co.uk>
- EnergyPlus. 2017. *EnergyPlus 8.3.0-b45b06b780 Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140–2011* [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. kovo 20 d.]. Prieiga per internetą: [https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel\\_custom/eplusr\\_files/current\\_testing\\_reports/ASHRAE140-Envelope-8.3.0-b45b06b780.pdf](https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel_custom/eplusr_files/current_testing_reports/ASHRAE140-Envelope-8.3.0-b45b06b780.pdf)
- Higienos norma HN 42:2009 „Gyvenamųjų patalpų ir lankytojų skurtų visuomeninių patalpų mikroklimato parametrų ribinės reikšmės“.
- IES-VE [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2017 m. sausio 30 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.iesve.com/software/ve-for-engineers>
- Nguyen, A. T.; Reiter, S.; Rigo, P. 2014. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis, *Applied Energy* 113(2014): 1043–1058. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061>

Oates, D.; Sullivan, K. T. 2012. Postoccupancy energy consumption survey of Arizona's LEED new construction population, *Journal of Construction Engineering and Management* 138(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000478](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000478)

RSN 156–94 Statybinė klimatologija. Vilnius, 1994.

STR 2.01.02:2016 Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas. Vilnius, 2016. 242 p.

STR 2.09.04:2008 Pastato šildymo sistemos galia. Šilumos poreikis šildymui. Vilnius, 2008. 38 p.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DYNAMIC BUILDING ENERGY SIMULATION TOOLS

V. Pajaujis, V. Motuzienė

### Abstract

There are a lot of methodologies and simulation tools in the world to assess the energy demand of a building. The results of simulation tools often differ, but the causes are not analysed in more detail. The article compares the results of two most widely used dynamic energy simulation tools – *DesignBuilder* and *IES-VE*, when simulation of identical building model with the same assumptions in both programs is performed. In addition, for comparison, calculations are performed with the PHPP program, as well as using STR2.09.04:2008 methodology. The tools compare the heating, cooling capacity, energy consumption of the building for heating and cooling the building during the simulation. Following differences comparing energy demands gained with two different simulation tools are defined: ventilation – up to 11%, cooling – up to 9%, heating – up to 5%.

**Keywords:** dynamic energy simulation, building energy demand, *IES-VE*, *DesignBuilder*, PHPP.