

NEJSTIKLINTO PRATAKAUS SAULĖS KOLEKTORIAUS TYRIMAS TAIKANT SKAIČIUOJAMOSIOS FLUIDŲ DINAMIKOS METODĄ

Martin PISKULOV, Giedrė STRECKIENĖ*

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Aplinkos inžinerijos fakultetas,

Pastatų energetikos katedra, Saulėtekio al. 11, Vilnius, Lietuva

**El. paštas giedre.streckiene@vilniustech.lt*

Gauta 2023 m. kovo 6 d.; priimta 2023 m. balandžio 3 d.

Santrauka. Neįstiklintas pratakus saulės kolektorius – puikus ekologiškas ir nemokamas būdas sušildyti į patalpas tiekiamą lauko orą, vartojant saulės energiją. Tai orinis saulės kolektorius, skirtas pro jį pratekančiam orui sušildyti saulės spinduliuotės energija, montuojamas ant labiausiai saulės apšviesto (dažniausiai pietinio) pastato fasado. Jis taip pat dažnai vadinamas saulės siena dėl dažno jo montavimo ant pastato išorinės sienos. Šio straipsnio tikslas – naudojant „ANSYS Fluent“ skaičiuojamosios fluidų dinamikos (SFD) programų paketą, skaitiškai išnagrinėti neįstiklinto pratakus saulės kolektorius (saulės sienos) veikimą vėsiaus vidutinių platumų klimato, kuriam priklauso ir Lietuvos klimatas. Straipsnyje tiriama Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VILNIUS TECH) Aplinkos inžinerijos fakulteto neįstiklintas pratakus saulės kolektorius, priklausantis universiteto Pastatų energetinio mikroklimato sistemų (PEMS) laboratorijai, įrengtas ant išorinės fakulteto sienos, kurio bendras plotas yra 100 m². Kadangi visa minėta saulės siena yra labai didelė, tai gali labai apkrauti SFD skaičiavimus, todėl pasirinktas tirti tik nedidelis 0,085 m² ploto jos fragmentas. Tyrimui atlikti naudojamas vienas populiariausių tarp pasaulio mokslininkų „ANSYS Fluent“ SFD programų paketas minėtam nagrinėjamos saulės sienos fragmentui analizuoti. Straipsnyje nagrinėjamas oro temperatūros bei greičio pasiskirstymas nagrinėjamame saulės sienos fragmente, taip pat nustatomas bendras kolektorius efektyvumas.

Reikšminiai žodžiai: neįstiklintas pratakus saulės kolektorius, saulės siena, skaičiuojamoji fluidų dinamika, „ANSYS Fluent“, Pastatų energetinių ir mikroklimato sistemų laboratorija.

Įvadas

Kasmet vis senkantys neatsinaujinančio iškastinio kuro (naftos, akmens anglies, gamtinių dujų ir pan.) rezervai bei dėl to kylanti jų kaina vis labiau verčia susimąstyti dėl alternatyvių, atsinaujinančios energijos technologijų (saulės, vėjo, vandens ir pan.), kurioms taip pat priskiriamas ir neįstiklintas pratakus saulės kolektorius (saulės siena). Taip pat dėl atsinaujinančių energijos šaltinių verčia susimąstyti iškastinio kuro degimo metu keliama tarša aplinkai ir jos sukeltos globalios problemos, kurių nesukelia atsinaujinantys energijos šaltiniai. Kalbant apie Lietuvą, iškastinis kuras vis dar yra esminė Lietuvos metinės suvartojamos galutinės energijos dalis, o atsinaujinantys energijos ištekliai sudaro suvartojamos galutinės energijos mažumą (International Energy Agency [IEA], 2021), todėl atsinaujinančios energetikos sritis tiek Lietuvoje, tiek visame pasaulyje iš esmės yra tobulintina. Dėl to pastarąjį laikotarpį atsinaujinantys energijos šaltiniai tampa vis aktualesni,

vis labiau diskutuoti pasaulio mokslininkų ir dėl šių priežasčių vis labiau dominuojantys šiuolaikinės energetikos rinkoje.

Apžvelgus Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VILNIUS TECH) absolventų magistro baigiamuosius darbus, pastebėta, kad visi darbai, kuriuose buvo tiriama neįstiklintas pratakus saulės kolektorius (Miežėnas, 2013; Rudzinskas, 2014; Jucys, 2014; Rimdžius, 2016; Kiškis, 2017), iš esmės yra paremti eksperimentu, tačiau juose mažai analizuota būtent modeliavimo pusė, t. y. kaip šį sprendimą pritaikyti kitam objektui ar kitoms klimato sąlygoms. Apžvelgtoje pasaulinėje mokslinėje literatūroje rasta palyginti nedaug informacijos apie saulės sienos skaičiuojamosios fluidų dinamikos (angl. *computational fluid dynamics*, CFD) analizę skaitiniu metodu, gerokai mažiau nei apie šios sistemos eksperimentinius ar analitinius tyrimus. Be to, apžvelgtoje literatūroje nerasta saulės sienos tyrimų, atliktų būtent vėsiaus vidutinių platumų pereinamojo klimato juostai, kuriai taip pat priklauso ir Lietuvos klimatas.

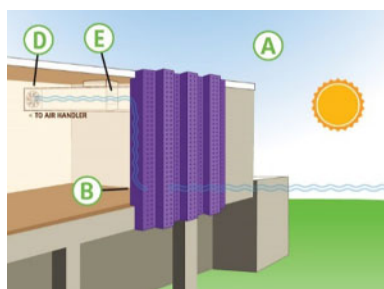
Tyrimo tikslas – naudojant skaičiuojamosios fluidų dinamikos programų paketą, skaitiškai ištirti neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus (saulės sienos) veikimą vėsaus vidutinių platumų pereinamajame (Lietuvos) klimate.

1. Tyrimų objektas

Neįstiklintas pratakus saulės kolektorius (angl. *unglazed transpired solar collector*, UTSC) – orinis saulės kolektorius, skirtas pro jį pratekančiam orui šildyti saulės spinduliuotės energija, montuojamas ant labiausiai saulės apšviesto (dažniausiai pietinio) pastato fasado. Jis taip pat dažnai vadinamas saulės siena dėl jo montavimo ant pastato sienos, taip pat jį analogiškai pavadino ir pats oficialus jo gamintojas – Kanados įmonė „Conserval Engineering“ marketingo dėlei tokiai sąrankai suteikė pavadinimą „SolarWall“. Iš esmės saulės sieną sudaro 5.183.39 B tipo trapeciniai perforuoti profiliuoti aliuminio skardos lakštai, padengti tamsia milteline danga, turinčia gana aukštą juodumo laipsnį ($\epsilon \rightarrow 1$), atliekantis absorberio funkciją, kurie gali būti montuojami vertikaliai ant pastato išorinės sienos arba tam tikru posvyrio kampu ant šlaitinio stogo, paliekant maždaug 15 cm oro tarpą.

Pats tokios sistemos gamintojas „Conserval Engineering“ deklaruoja, kad ji gali pagaminti iki 600 W šilumos iš 1 m² absorberio paviršiaus ploto, arba 416–972 kWh/m² šiluminės energijos per metus. Kai saulė įkaitina skardos lakšto A paviršius, sistema pasiurbia išilusį orą per tūkstančius mažų perforacijų profiliuotos skardos paviršiuje B ir nukreipia jį į viršutinėje dalyje esančią šilto oro tiekimo angą E. Paskui šis išilęs oras kanaliniais ventiliatoriais D tiekiamas toliau naudoti pastato mikroklimato sistemose įvairiems tikslams (1 pav.). Pagal gamintojo specifikacijas Kanados klimato sąlygomis, priklausomai nuo metų laiko, saulėtą dieną šio tiekiamo oro temperatūros prieaugis nuo lauko oro temperatūros gali sudaryti nuo 15 °C iki 40 °C (Siegele, 2014).

Nagrinėjamu atveju tiriamas Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VILNIUS TECH) pastatų energinių ir mikroklimato sistemų (PEMS) laboratorijai priklausantis neįstiklintas pratakus saulės kolektorius



1 paveikslas. Neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus (saulės sienos) veikimo principas (Siegele, 2014)

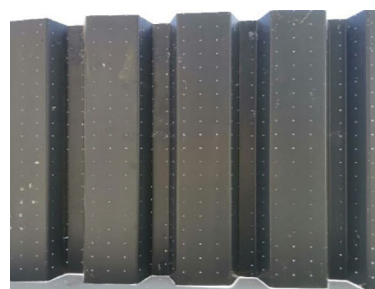


2 paveikslas. Nagrinėjamas objektas – VILNIUS TECH neįstiklintas pratakus saulės kolektorius (saulės siena)

(saulės siena), įrengtas 2011 m. ant aštuonių aukštų VILNIUS TECH Aplinkos inžinerijos fakulteto (VILNIUS TECH Saulėtekio rūmų II (SRK-II) korpuso) pietinio fasado ties viena iš laiptinių (2 pav.).

Nagrinėjamą neįstiklintą pratakų saulės kolektorių (saulės sieną) sudaro apie 0,6 mm storio trapeciniai perforuoti profiliuoti aliuminio skardos lakštai (3 pav.). Perforacijos akutės yra apvalios formos, maždaug 1,5 mm skersmens, taisyklingai išdėstytos. Horizontalus atstumas tarp akučių yra lygus apie 30 mm, vertikalus – apie 25 mm. Pačios skardos profilį sudaro reguliariai pasikartojančios trapecijos formos rievės suapvalintais kampais. Iš vienos pusės jie yra platesni, iš kitos – siauresni. Skardos lakštai iš išorinės pusės yra padengti pilka „Basalt Grey“ (RAL 7012) spalvos milteline danga, kurios juodumo laipsnis yra lygus apie 0,87 („Kalzip“, 2011). Skarda sumontuota apie 10–15 cm atstumu nuo mūrinės fakulteto sienos iš pilnavidurių silikatinių plytų mūro.

Nagrinėjamo neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus plotis yra lygus apie 6,0 m, aukštis – apie 16,6 m, iš čia bendras kolektoriaus plotas projekcijoje lygus apie 100 m². Kolektorių sudaro trys atskiros vertikalios skirtingo pločio sekcijos, sandariai atskirtos viena nuo kitos metalinėmis pertvaromis. Pirmos sekcijos plotis yra



3 paveikslas. Nagrinėjamo neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus absorberį sudarančios perforuotos profiliuotos skardos fragmentas



4 paveikslas. Nagrinėjamo neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus oro surinkimo gaubtas (plenumas) su iš jo išeinančiais ortakiais

lygus apie 1,0 m, antros – apie 2,0 m, o trečios – apie 3,0 m (Miežėnas, 2013) (4 pav.).

Viršutinėje kolektoriaus dalyje sumontuotas per kolektorių pratekėjusio sušildyto oro surinkimo plenumas (gaubtas), kuriame yra trys skirtingų skersmenų sušildyto oro tiekimo angos – po vieną orui surinkti iš kiekvienos kolektoriaus sekcijos. Iš šių angų palei fakulteto stogą išeina trys skirtingų skersmenų sušildyto oro tiekimo ortakiai – atitinkamai 125 mm iš pirmos 1 m pločio sekcijos, 160 mm iš antros 2 m pločio sekcijos bei 200 mm iš trečios 3 m pločio sekcijos.

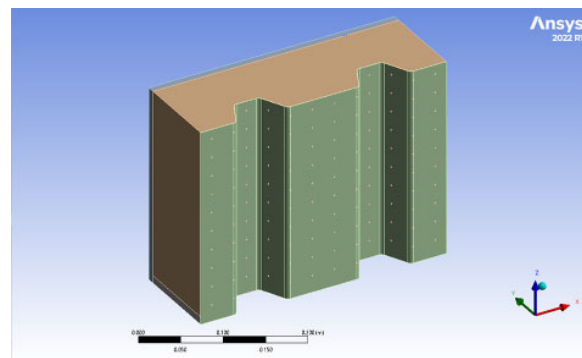
2. Tyrimų metodika

Kaip rašyta, visi anksčiau su nagrinėjamu objektu – VILNIUS TECH neįstiklinto pratakiu saulės kolektoriumi (saulės siena) – atlikti tyrimai buvo iš esmės remti eksperimentu ir trūksta būtent tos modeliavimo pusės. Todėl nagrinėjamu atveju jo veikimą nuspręsta tirti labiau skaitinio modeliavimo kompiuterinėmis programomis būdu. Kadangi nagrinėjame neįstiklinate pratakiam saulės kolektoriuje oro tarpu prateka ir saulės spinduliuotės veikiamas sušyla oras, kuris iš esmės yra fluidas, jo elgsenai sistemoje modeliuoti iš visų skaitinio modeliavimo programų paketų reikalingas būtent skaičiuojamosios fluidų dinamikos (SFD) (angl. *computational fluid dynamics*, CFD) paketas, dažniausiai taikantis baigtinių tūrių metodą (angl. *finite volume method*) (Vaitiekūnas, 2007).

Iki šios dienos yra sukurta nemažai kompiuterinių programų, skirtų skaičiuojamosios fluidų dinamikos (SFD) uždaviniams spręsti. Pasaulio mokslininkų dažniausiai naudojamas tokių kompiuterinių programų paketų yra amerikiečių leidybos ANSYS paketas, skirtas įvairios fizikinės prigimties uždaviniams spręsti, kuris turi taip pat ir skaičiuojamosios fluidų dinamikos (SFD) fizikos šakos programų. Tarp pasaulio mokslininkų labiausiai paplitęs iš ANSYS paketo SFD programų yra „ANSYS Fluent“ SFD sprendiklis, kuris šiuo atveju ir pasirinktas nagrinėjamo neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus veikimui tirti. Iš kitų paplitusių SFD

programų galima taip pat būtų paminėti ANSYS CFX, „COMSOL Multiphysics“ bei PHOENICS paketus (Majumdar, 2005).

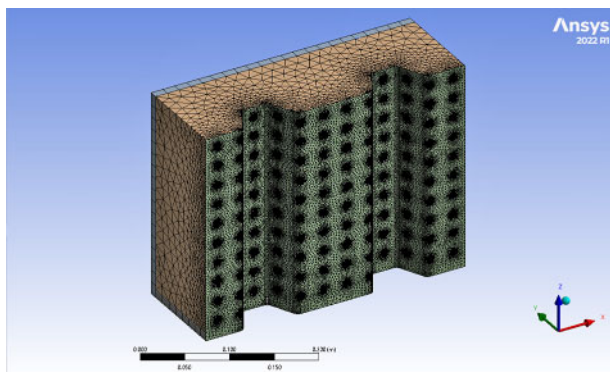
Iš pradžių pagal tyrimo objekto aprašyme aptartus faktinius matmenis sudaroma virtuali nagrinėjamo objekto trimatė (3D) geometrija. Pastebėta, kad nagrinėjamo neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus konstrukcijoje yra gana nemažai palyginti smulkių geometrijos detalių, kurios, vertinant visos nagrinėjamos saulės sienos mastu ir lyginant su gana nemažu visos saulės sienos dydžiu, gali labai apkrauti skaičiuojamąjį modelį. Todėl, atliekant nagrinėjamo objekto veikimo tyrimą, nuspręsta nagrinėti tik nedidelį 0,085 m² ploto saulės sienos fragmentą. Geometrija braižoma „Autodesk AutoCAD“ vektorinio braižymo programa. Sukurta nagrinėjamos saulės sienos geometrija įkeliami į ANSYS skaitinio modeliavimo programų paketą (5 pav.).



5 paveikslas. Nagrinėjamo neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus geometrijos vizualizacija „ANSYS DesignModeler“ aplinkoje

SFD skaičiavimams atlikti sukurta geometrija diskretizuojama, ant jos generuojamas baigtinių tūrių tinklas, tokiu būdu pereinant iš begalinio laisvės laipsnio skaičiaus į baigtinį. Tinklas sudaromas „ANSYS Meshing – CFD PrePost“ specialiai tam veiksmui atlikti skirtoje diskretizavimo aplinkoje. Sugeneruotam baigtinių tūrių tinklui būdinga linijinė elementų išsidėstymo tvarka. Elementai sugeneruotame tinkle yra gauti skirtingos konfigūracijos: vienur piramidiniai, ketursienio (tetraedrinės) konfigūracijos, keturių mazgų, o kitur prizminiai, šešiasienio (heksaedrinės) konfigūracijos, aštuonių mazgų. Iš viso ant visos nagrinėjamos saulės sienos geometrijos sugeneruotame baigtinių tūrių tinkle yra 2 431 422 elementai ir 51 5517 mazgų (6 pav.).

Nagrinėjamo atveju skaitinio modeliavimo rezultatams validuoti vienareikšmingumo sąlygos nagrinėjamo neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus skaitiniam modeliui buvo paimtos iš Rimdžiaus (2016) atliktų eksperimentinių bandymų su 1 m pločio saulės sienos sekcija rezultatai. Pasirinktos 2016 m. sausio 18 d. eksperimentinio bandymo metu užfiksuotos įvairių parametų



6 paveikslas. Sugeneruotas nagrinėjamos saulės sienos baigtinių tūrių tinklas „ANSYS Meshing – CFD PrepPost“ aplinkoje

vidutinės paros vertės. Remiantis bandymo duomenimis išmatuota lauko oro temperatūra, kuri šiuo atveju taip pat lygi per įtekėjimo angas įtekančio oro temperatūrai, gauta lygi $-2,64\text{ }^{\circ}\text{C}$, saulės spinduliuotės intensyvumas į vertikalų paviršių – $733,45\text{ W/m}^2$, barometrinis atmosferos slėgis – $99\,696,8\text{ Pa}$, vidutinis vėjo greitis – $1,93\text{ m/s}$. Visa tai gauta esant $64,08\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ savitajam arba $1064\text{ m}^3/\text{h}$ absoliučiajam išmatuotam oro tūriniam debitui iš 1 m pločio saulės sienos sekcijos išeinančiame 125 mm ortakyje (Rimdžius, 2016).

Likusieji iš eksperimentinio bandymo duomenų nežinomi, tačiau nagrinėjamos saulės sienos SFD analizei atlikti reikalingi parametrai nustatomi teoriškai, remiantis įvairiais literatūros šaltiniais. Tokiu būdu gravitacijos jėgų veikimą įvertinančio laisvojo kritimo pagreičio vertė imama tipinė, lygi $9,81\text{ m/s}^2$. Taip pat įvertinama ir konvekcija nuo paviršių, kurią apibūdina šilumos atidavimo koeficientai, kurie šiuo atveju nustatomi pagal statybos techninio reglamento STR 2.01.02:2016 rekomendacijas (Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija, 2016). Jomis remiantis, vidinių paviršių šilumos atidavimo koeficientas vertikaliesiems paviršiams imamas lygus $7,69\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, o išoriniams paviršiams įvertinama vėjo įtaka pagal formulę (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2017):

$$\alpha_{se} = 4 + 4v + 4\sigma\varepsilon T^3, \quad (1)$$

čia α_{se} – išorinio paviršiaus konvekcijos šilumos atidavimo koeficientas, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; v – vėjo greitis, m/s ; σ – Stefano–Bolcmano konstanta, $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8}\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$; ε – išorinio paviršiaus dangos juodumo laipsnis; T – atmosferos oro temperatūra absoliučiojoje skalėje (termodinaminė temperatūra), K ; $T = t + 273,15$.

Tokiu būdu gauta, kad išorinių paviršių šilumos atidavimo koeficientas yra lygus $15,63\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.

Iš esmės oro judėjimas kolektoriaus oro tarpu sukeliamas nagrinėjamos saulės sienos 1 m sekcijos oro paėmimo ortakyje sudarant išretėjimą ventiliatoriumi.

Tačiau tai įvertinti modelyje yra gana komplikutuota, todėl modeliui supaprastinti tariama, kad oras tiekiamas per absorberio perforacijos akutes, šiose vietose nustatant fluideo įtekėjimo, žinant jo pradinį judėjimo greitį (angl. *velocity inlet*), kraštinę sąlygą. Tam tereikėtų nustatyti oro judėjimo greitį perforacijos akutėje. Žinant oro tūrinį debitą iš 1 m pločio saulės sienos sekcijos išeinančiame 125 mm ortakyje bei saulės sienos geometriją, jį galima apskaičiuoti pagal formulę:

$$v_{inlet} = \frac{\dot{I}A_{abs}}{A_{ak}n_{ak} \times 3600}, \quad (2)$$

čia v_{inlet} – pradinis oro judėjimo greitis absorberio perforacijos akutėje, m/s ; \dot{I} – išmatuotas savitasis oro tūrinis debitas iš 1 m pločio saulės sienos sekcijos išeinančiame 125 mm ortakyje, $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$; A_{abs} – 1 m pločio saulės sienos sekcijos absorberio plotas, $16,6\text{ m}^2$; A_{ak} – absorberio perforacijos akutės skerspjūvio plotas, $\pi d_{ak}^2/4$, m^2 ; n_{ak} – perforacijos akučių skaičius nagrinėjamos 1 m pločio saulės sienos sekcijos absorberio, $664 \cdot 42 = 27\,888$ vnt.

Gauta, kad pradinis oro judėjimo greitis absorberio perforacijos akutėje yra lygus $5,995\text{ m/s}$.

Taip pat, siekiant supaprastinti nagrinėjamos saulės sienos skaičiuojamąjį modelį, tačiau sykiu išlaikant priimtina skaičiavimų tikslumą, kolektoriaus absorberio paviršiumi pritaikoma vadinamosios saulės ir oro temperatūros (angl. *sol-air temperature*) kraštinė sąlyga, kuri viena kartu įvertina lauko oro temperatūros, saulės spinduliuotės ir konvekcijos įtaką absorberiumi. Saulės oro temperatūra apskaičiuojama pagal formulę (American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE], 2021; Chartered Institution of Building Services Engineers [CIBSE], 2015):

$$t_{s-a} = t_e + \frac{fq_{sj} - \varepsilon \times q}{\alpha_{se} - \alpha_{se}}, \quad (3)$$

čia t_{s-a} – saulės ir oro temperatūra, $^{\circ}\text{C}$; t_e – lauko oro temperatūra, $^{\circ}\text{C}$; f – išorinio paviršiaus dangos saulės spinduliuotės sugerties koeficientas; q_{sj} – saulės spinduliuotės šilumos srauto tankis į paviršių, W/m^2 ; α_{se} – išorinio paviršiaus konvekcijos šilumos atidavimo koeficientas, apskaičiuotas pagal (1) formulę, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; ε – išorinio paviršiaus dangos juodumo laipsnis; Δq – tiesioginės ilgabangės spinduliuotės į paviršių nuo dangaus bei aplinkinių objektų ir absoliučiai juodo kūno skleidžiamos spinduliuotės, esant lauko oro temperatūrai, srauto tankių skirtumas, vertikaliesiems paviršiams – apie $0\text{ W}/\text{m}^2$, horizontaliesiems paviršiams – apie $63\text{ W}/\text{m}^2$ (ASHRAE, 2021).

Kadangi nagrinėjamos saulės sienos skaičiuojamojo modelio vienareikšmiškumo sąlygoms iš Rimdžiaus (2016) atliktų eksperimentinių bandymų duomenų buvo

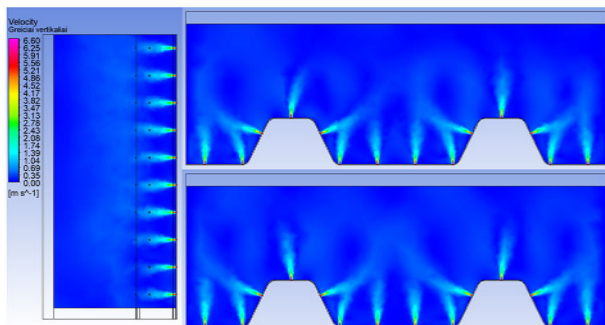
paimtos tik vidutinės paros sistemos veikimo ir aplinkos parametrų vertės, daroma prielaida, kad per parą jie nekis. Todėl nagrinėjama atveju pagal priklausomybę nuo laiko bus sprendžiamas stacionarus (angl. *steady-state*) skaitinis uždavinys. Šis stacionarus uždavinys spręstinas esant 250 iteracijų ir sprendimo konvergavimo sąlygoms, paliktoms, kaip numatyta.

Taip pat buvo parinktas atitinkamas turbulencijos modelis. Jis iš esmės parenkamas pagal nagrinėjamos sistemos veikimo metu fluide vyraujančias Reinoldso skaičiaus vertes. Remiantis Wang et al. (2020) atliktų tyrimų rezultatais, dažniausiai, esant priverstiniam oro judėjimui saulės sienoje, Reinoldso skaičiai joje viršija 4000, todėl oro judėjimą galima laikyti visiškai turbulentišku. Todėl tokiems atvejams dažniausiai tinka labiausiai paplitęs SFD srityje standartinis k -epsilon (k - ϵ) turbulencijos modelis, kuris šiuo atveju ir pasirenkamas.

3. Tyrimų rezultatai

Nagrinėjamo tyrimo objekto – VILNIUS TECH neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus (saulės sienos) SFD modeliavimas „ANSYS Fluent“ programa atliekamas remiantis minėtais Rimdžiaus (2016) gautais eksperimentinio bandymo metu atliktų matavimų duomenimis, orientuojantis į juos. Ištiriama oro elgsena jam pratekant per nagrinėjamos saulės sienos 1 m pločio sekciją, oro temperatūros, judėjimo ir slėgio pasiskirstymas joje stacionariomis sąlygomis, esant pastoviai lauko oro temperatūrai, saulės spinduliuotės intensyvumui, vėjo greičiui bei per saulės sieną pratekančio oro tūriniam debitui.

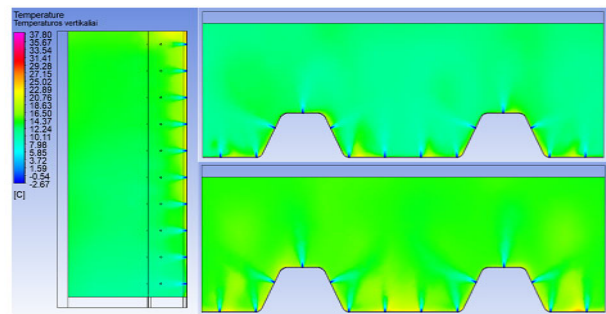
Nagrinėjamos saulės sienos skaitinio modeliavimo rezultatai pateikiami grafiškai. Tam tikslui vaizduojami tam tikrų per saulės sieną pratekančio oro parametrų, o būtent temperatūros ir judėjimo greičio kitimo kontūrinės diagramos (angl. *contour plot*) pasirinktose nagrinėjamos saulės sienos vietose. Šių oro fizikinių parametrų kitimui nagrinėjamoje saulės sienoje pavaizduoti pasirinkamos trys plokštumos: viena vertikali, einanti išilgai



a)

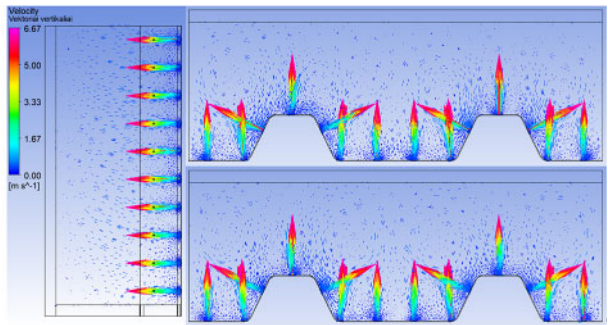
skaitinio modelio lygiai per vertikali perforacijos akučių eilės skylių centrus, bei dvi horizontalios, einančios skersai: viena per pirmos, antra – per paskutinės horizontalių perforacijos akučių eilės skylių centrus.

Visų pirma vaizduojamas oro temperatūros pasiskirstymas modelyje (7 pav.). Iš diagramos matyti, kad bendrąja tendencija oro temperatūra saulės sienos oro tarpe iš apačios kyla į viršų, tačiau ne visai tolygiai, nes yra įsiterpiančių šaltesnių zonų, kuriomis pasiurbiamos lauko oro srovės. Žemiausia pratekančio oro temperatūra gauta ties įtekėjimo angomis – $-2,64$ °C, taip pat palyginus žema temperatūra yra ir apatinėje nagrinėjamo saulės sienos fragmento dalyje – $10,35$ °C. Aukščiausia temperatūra yra prie pat kolektoriaus absorberio vidinio paviršiaus – $21,40$ °C, taip pat palyginti aukšta temperatūra yra ir viršutinėje nagrinėjamo saulės sienos fragmento dalyje – $14,97$ °C. Bendras temperatūros prieaugis per nagrinėjamą saulės sienos fragmentą nuo lauko oro temperatūros gautas $18,47$ °C, o nuo oro temperatūros žemiausiame oro tarpo taške – $4,95$ °C.



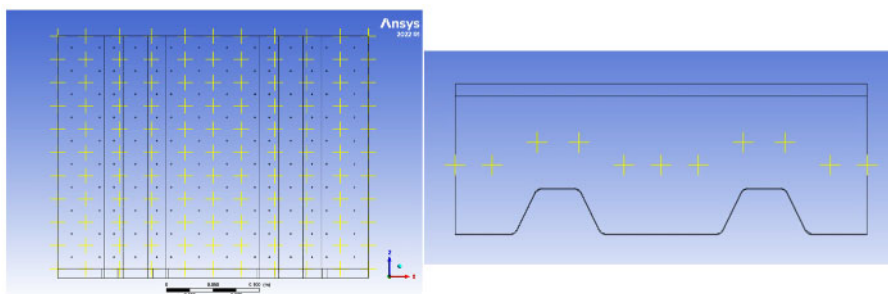
7 paveikslas. Per nagrinėjamos saulės sienos fragmentą oro tarpu pratekančio oro temperatūros kitimo kontūrinės diagramos

buvo stebima, kaip keičiasi oro judėjimo greitis modelyje (8 pav.). Iš diagramos matyti, kad oro judėjimo greitis saulės sienos tarpe, keliantis iš apačios į viršų, vizualiai didėja. Iš vektorių rodomų judėjimo krypčių galima pastebėti, kad oro judėjimo saulės sienos oro tarpu kelyje susidaro sūkuriai, iš to galima spręsti, kad oro



b)

8 paveikslas. Per nagrinėjamos saulės sienos fragmentą oro tarpu pratekančio oro greičio kitimo kontūrinės (a) ir vektorių (b) diagramos



9 paveikslas. Analizei pasirinktų taškų išsidėstymas nagrinėjamos saulės sienos fragmente

srauto judėjimas per saulės sieną yra sūkurinis. Didžiausias oro judėjimo greitis gautas ties įtekėjimo angomis – 6,00 m/s, taip pat pastebimas greitis yra ir viršutinėje nagrinėjamo saulės sienos fragmento dalyje, maždaug oro tarpo viduryje – 0,28 m/s, mažiausias – apatinėje fragmento dalyje, prie pat kolektoriaus absorberio vidinio paviršiaus – artėja prie 0 m/s, taip pat palyginti mažas oro judėjimo greitis yra tarp įtekėjimo angų, vidury atstumo tarp jų, prie pat kolektoriaus absorberio vidinio paviršiaus – 0,05 m/s.

Tyrime taip pat nagrinėjamos pirmiau aptartų skaitiškai apskaičiuotų fizikinių parametrų, t. y. oro temperatūros bei judėjimo greičio, vertės tam tikruose nagrinėjamo saulės sienos fragmento taškuose. Tam tikslui buvo pasirinkti maždaug vienodu atstumu vienas nuo kito tiek horizontaliai, tiek vertikalčiai išsidėstę taškai skirtinguose aukščiuose. Šių taškų vietos pasirinktos oro tarpo storio viduryje taip, kad, žiūrint į absorberį iš priekio, esant priešais jį, jie būtų lygiai atstumų tarp skardos perforacijos akučių viduryje. Tokiu būdu iš viso pasirinktas 121 taškas, kurių išsidėstymas pavaizduotas 9 paveiksle.

Sudarius minėtas 11 eilių po 11 taškų, pateikiami skaitiškai nustatytų oro temperatūros (t), temperatūros prieaugio nuo lauko oro temperatūros ($t - t_{lauko}$) bei judėjimo greičio (v) verčių vidurkiai kiekvienoje iš šių horizontalių taškų eilių. Minėti duomenys nurodyti 1 lentelėje.

Iš 1 lentelės duomenų galima matyti praktiškai tą patį, ką ir iš prieš tai pavaizduotų kontūrinių ir vektorių diagramų, tiesiog šiuo atveju jau ne grafiškai, o kiekybiškai: pratekančio oro temperatūra, o kartu ir jos skirtumas nuo lauko oro temperatūros bendrąja tendencija didėja, o oro judėjimo greičio vertė jau kinta chaotiškai. Tokiam oro judėjimo greičio kitimui įtakos gali turėti būtent šios saulės sienos dalies pačioje oro tarpo pradžioje pasirinkimas nagrinėti, kur kryptingas oro judėjimas dėl nykstamai mažo debito (vos iki 5,34 m³/h) iš esmės dar nėra susiformavęs ir oro judėjimą lemia praktiškai vien tik didelio greičio pasiurbiamos lauko oro srovės.

Pagal tyrimo metu skaitiškai nustatytus parametrus buvo apskaičiuotas bendras nagrinėjamos saulės sienos

1 lentelė. Skaitiškai nustatytų oro temperatūros (t), temperatūros prieaugio nuo lauko oro temperatūros ($t - t_{lauko}$) ir judėjimo greičio (v) verčių vidurkiai kiekvienoje iš horizontalių taškų eilių

Eilė	Taškai	t , °C	$t - t_{lauko}$, °C	v , m/s
1	1–11	10,88	13,52	0,235
2	12–22	12,41	15,05	0,226
3	23–33	13,14	15,78	0,221
4	34–44	13,44	16,07	0,230
5	45–55	13,56	16,20	0,227
6	56–66	13,68	16,32	0,225
7	67–77	13,79	16,43	0,239
8	78–88	13,96	16,60	0,220
9	89–99	14,13	16,77	0,231
10	100–110	14,36	17,00	0,229
11	111–121	15,83	18,47	0,240

efektyvumas. Tam visų pirma būtina žinoti šildomo oro iš absorberio paimtą šilumos srautą, išnešamą už nagrinėjamo saulės sienos fragmento ribų. Taip pat tam reikalingas bendras kolektoriaus gaunamas šilumos srautas, kuris nagrinėjamu atveju yra atnešamas saulės spinduliuotės. Nagrinėjamu atveju kolektoriaus efektyvumas yra šių dviejų šilumos srautų santykis. Tai įvertinant, nagrinėjamos saulės sienos bendrasis efektyvumas gali būti apskaičiuotas pagal formulę:

$$\eta_{ss} = \frac{\Phi_{oro}}{\Phi_{sj}} = \frac{\dot{L}c_{p,o}\rho_o(t_{out} - t_{in})}{q_{sj}A_{abs} \times 3600}, \quad (4)$$

čia Φ_{oro} – šildomo oro iš absorberio paimtas šilumos srautas, W, °C; Φ_{sj} – saulės spinduliuotės į absorberio paviršių atnešamas šilumos srautas, W; \dot{L} – per nagrinėjamą saulės sienos fragmentą pratekančio oro tūrinis debitas, 5,34 m³/h; $c_{p,o}$ – oro savitoji izobarinė šiluma, 1,005 J/(kg·K); ρ_o – oro tankis, 1,23 kg/m³; t_{out} – ištekiančio oro temperatūra nagrinėjamo saulės sienos fragmento ištekėjimo angyje (11-oje (111–121) taškų eilėje; žr. 1 lentelę), °C; t_{in} – įtekančio oro temperatūra nagrinėjamo saulės sienos fragmento įtekėjimo angose (lauko oro temperatūra), °C; q_{sj} – išmatuotas saulės spinduliuotės

šilumos srauto tankis į absorberio paviršių, W/m^2 ; A_{abs} – nagrinėjamo saulės sienos fragmento absorberio plotas, $0,085 m^2$.

Tokiu būdu nagrinėjamos saulės sienos bendras efektyvumas gautas lygus 54,32 %. Šis skaitiškai gautas tyrimo rezultatas validuojamas Rimdžiaus (2016) gautais su nagrinėjamos saulės sienos 1 m sekcija atlikto eksperimentinio bandymo rezultatais. Pasak Rimdžiaus (2016), pagal eksperimentinių bandymų rezultatus, esant šio tyrimo metu priimtoms kraštinėms sąlygoms, nagrinėjamos saulės sienos bendras efektyvumas buvo gautas 53,43 %. Iš čia galima apskaičiuoti, kad skaitiškai nustatyto efektyvumo vertė gauta su 1,68 % nuokrypiu į didesnę pusę, lyginant su eksperimentinio bandymo metu gauta efektyvumo verte. Tai palyginti nedidelis nuokrypis, todėl galima teigti, kad skaitinis tyrimas buvo atliktas tinkamai.

Pasak Golneshan ir Nemati (2014), tipinė tinkamai įrengtos saulės sienos efektyvumo vertė gali svyruoti nuo 65 % iki 77 %. Todėl, kalbant jau konkrečiai apie gautą saulės sienos efektyvumo vertę, ji yra žemesnė nei tipinė. Taip gali būti dėl konkrečiai šiame tyrime nagrinėjamos VILNIUS TECH saulės sienos konstrukcijos savybių, Lietuvos klimato sąlygų specifikos ir pan.

Išvados

Šio tyrimo metu, naudojant ANSYS skaičiuojamosios fluidų dinamikos programų paketo „ANSYS Fluent“ SFD sprendiklį, buvo skaitiškai išnagrinėtas VILNIUS TECH neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus (saulės sienos) veikimas vėsiaus vidutinių platumų pereinamojo (Lietuvos) klimato sąlygomis. Apibendrinant gautus atlikto tyrimo rezultatus, galima daryti tokias išvadas:

1. Bendrąja tendencija oro temperatūra saulės sienos oro tarpe iš apačios į viršų kyla, tačiau ne visai tolygiai, nes yra įsiterpiančių šaltesnių zonų, kuriomis yra pasiurbiamos lauko oro srovės. Bendras oro temperatūros prieaugis per nagrinėjamą saulės sienos fragmentą nuo lauko oro temperatūros gautas lygus $18,47 ^\circ C$, o oro temperatūros prieaugis nuo oro temperatūros žemiausiame oro tarpo taške – $4,95 ^\circ C$.
2. Oro judėjimo greitis saulės sienos oro tarpe, keliaujant iš apačios į viršų, vizualiai didėja, tačiau kiekybiškai oro judėjimo greičio vertė kinta chaotiškai dėl nykstamai mažo oro debito pasirinktame nagrinėti saulės sienos fragmente, kuriame oro judėjimą lemia praktiškai vien tik didelio greičio pasiurbiamos lauko oro srovės. Oro judėjimo saulės sienos oro tarpu kelyje susidaro sūkurių, todėl oro srauto judėjimas per saulės sieną yra turbulentinis. Pratekėjusio nagrinėjamą

saulės sienos fragmentą oro greitis ištekėjimo angoje lygus apie $0,33 m/s$.

3. Nagrinėjamos saulės sienos bendras efektyvumas gautas lygus 54,32 %. Lyginant su Rimdžiaus (2016) su saulės sienos 1 m sekcija atliktų bandymų metų gauta efektyvumo verte, lygia 53,43 %, skaitiškai nustatyto efektyvumo vertė gauta su 1,68 % nuokrypiu į didesnę pusę. Tai palyginti nedidelis nuokrypis, todėl galima teigti, kad skaitinis tyrimas buvo atliktas tinkamai.
4. Siekiant išnagrinėti visapusiškesnę visos nagrinėjamos saulės sienos veikimą, reikalingi skaitinio modelio supaprastinimai, nes modelio detalumas dėl ilgo skaičiavimo laiko ir didelio kompiuterinių resursų nasudojimo galimas tik nedideliame nagrinėjamos saulės sienos fragmente. Todėl tolesniems VILNIUS TECH saulės sienos skaitiniams tyrimams rekomenduojama supaprastinti geometriją arba nagrinėti dvimatę (2D).

Literatūra

- American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers. (2021). *2021 ASHRAE handbook – fundamentals* (SI ed.). ASHRAE. Peachtree Corners.
- Chartered Institution of Building Services Engineers. (2015). *CIBSE guide A: Environmental design*. CIBSE.
- Golneshan, A. A., & Nemati, H. (2014). Exergy analysis of Unglazed Transpired Solar Collectors (UTCs). *Solar Energy*, 107, 272–277. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.04.025>
- International Energy Agency. (2021). *Lithuania 2021 – Energy policy review*. IEA. <https://www.iea.org/reports/lithuania-2021>
- Jucys, M. (2014). *Neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus įtakos pastato atitvaroms analizė*. „Kalzip“.
- „Kalzip“. (2011). *Solar reflectance, thermal emittance and Solar Reflectance Index (SRI)*.
- Kiškis, Ž. (2017). *Pirminio oro pašildymo būdų vėdinimo sistemoje efektyvumo tyrimas*.
- Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija. (2016). Įsakymas dėl statybos techninis reglamentas STR 2.01.02:2016 „Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas“. TAR, 2016-12-01, Nr. 27896. <https://eseimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/15767120a80711e68987e8320e9a5185/asr>
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2017). *Pastato komponentai ir elementai. Šiluminė varža ir šilumos perdavimo koeficientas. Skaičiavimo metodai* (LST EN ISO 6946:2017). https://view.elaba.lt/standartai/view?search_from=aleph&id=1246766
- Majumdar, P. (2005). *Computational methods for heat and mass transfer*. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/b15915>
- Miežėnas, A. (2013). *Eksperimentinis aplinkos inžinerijos fakulteto saulės sienos efektyvumo tyrimas* [Baigiamasis magistro darbas]. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.
- Rimdžius, D. (2016). *Neįstiklinto orinio saulės kolektoriaus charakteristikų tyrimas realiomis sąlygomis* [Baigiamasis magistro darbas]. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.

- Rudzinskas, L. (2014). *Saulės sienos efektyvumo eksperimentinis tyrimas* [Baigiamasis magistro darbas]. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.
- Siegele, L. (2014). *SolarWall solar air heating technology*. <http://www.motheearthnews.com/article.aspx?id=2147492099>
- Vaitiekūnas, P. (2007). *Šilumos mainų matematinis modeliavimas*. Technika. <https://doi.org/10.3846/878-S>
- Wang, D., Gao, M., Gao, Q., Liu, Y., Liu, Y., & Liu, J. (2020). Experimental and numerical study of the airflow and thermal characteristic of non-uniform transpired solar collector. *Building Simulation*, 13(6), 1305–1319. <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0634-1>

RESEARCH OF UNGLAZED TRANSPIRED SOLAR COLLECTOR USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS METHOD

M. PISKULOV, G. STRECKIENĖ

Abstract. Unglazed transpired solar collector is an ideal environmentally friendly and costless way to preheat outdoor air using solar energy. Such a device is an air solar collec-

tor, which is used to preheat outdoor air with solar radiation energy, installed on mostly irradiated by sun building façade, which is usually south one. Unglazed transpired solar collector is also often called “solar wall” as it is usually installed on a building outer wall. The purpose of this article is to numerically investigate the operation of the unglazed transpired solar collector (“solar wall”) work in a moderate intermediate (Lithuanian) climate, using “ANSYS Fluent” computational fluid dynamics (CFD) software package. There is a Vilnius Gediminas technical university (VGTU) Environmental engineering faculty unglazed transpired solar collector investigated. It is installed on Vilnius Gediminas Technical University (“VILNIUS TECH”) Environmental engineering faculty building. It is owned by the laboratory of building energy and indoor climate systems. The total area of the solar wall equals to 100 m². To reduce the computation time needed to obtain numerical results, a small piece of 0.085 m² of the solar wall was chosen to investigate. The paper analyses temperature and velocity variations in a selected fragment of a solar wall, also the total efficiency of collector is calculated.

Keywords: unglazed transpired solar collector, “solar wall”, computational fluid dynamics, “ANSYS Fluent”, laboratory of building energy and indoor climate systems.