

VILNIAUS UNIVERSITETAS
MATEMATIKOS IR INFORMATIKOS FAKULTETAS
INFORMATIKOS KATEDRA

Skysčių tekėjimo modeliavimas: ventiliacijos atvejis

Modelling of Fluid Flows: the Case of Ventilation

Magistro baigiamasis darbas

Atliko: Nerijus Kliuba (parašas)

Darbo vadovas: Doc. Olga Štikonienė (parašas)

Recenzentas: D. Baronas (parašas)

Vilnius – 2012

Santrauka

Šiame magistriniame darbe analizuojamas skysčių dinamikos modeliavimas. Pasirinkus ventiliacijos atvejį, apžvelgiama jo modeliavimo specifika, aprašomi pagrindiniai ventiliacijos procesai, kurių modeliuojant negalima ignoruoti arba tik atitinkamai įvertinus nuspręsti jų netraukti į modelį.

Darbo tikslai - pasirinktam ventiliacijos modeliui parinkti programinį paketą modelio kūrimui. Sukurti ventiliacijos sistemos modelį. Pagal pasirinkto modelio rezultatus, pateikti gaires ventiliacijos sistemų modeliavimui.

Summary

This master thesis analyzes fluid dynamics modeling for the particular case of ventilation. Modeling specifics is analyzed for selected case, main ventilation processes, which can not be ignored or only after appropriate evaluation it can be not included into the model, are described.

Main goals of this master thesis are to choose software package for modeling ventilation system, create specific ventilation system model and using simulation results provide guidance on how to model the ventilation system.

Turinys

Įvadas	5
Uždavinio aktualumas	5
Uždavinio formulavimas	8
Magistro darbo tikslas	10
Teorinė uždavinio apžvalga	11
Skysčių mechanika	11
Skysčių tekėjimo skaičiavimo metodai	16
Skysčių dinamikos modeliavimas	19
Formos sukūrimas	19
Tinklelio (angl. „mesh“) generavimas	20
Fizikinių aplinkybių ir skysčio savybių apibrėžimas	20
Srities apibrėžimai ir kraštinės sąlygos	20
Lygčių sprendimo inicijavimas ir kontrolė	21
Susiejimo stebėjimas	21
Rezultatų pateikimas ir vizualizavimas	22
Pastato ventiliacijos sistemų apžvalga	23
Magistro praktinė dalis	25
Uždavinio analizė	25
Programinių produktų analizė	26
Formos sukūrimas	30
Tinklelio (angl. „mesh“) generavimas	33
Fizikinių aplinkybių ir skysčio savybių apibrėžimas	39
Srities apibrėžimai ir kraštinės sąlygos	39
Lygčių sprendimo inicijavimas ir kontrolė	40
Susiejimo stebėjimas	42
Rezultatų pateikimas ir vizualizavimas	44
Modelio verifikavimas, validavimas ir patikslinimas	44
Gautų rezultatų analizė	48
Išvados	50
Literatūros sąrašas	52
Priedai	55

Įvadas

Uždavinio aktualumas

Šiuo metu vis didėjant žmonių populiacijai pasaulyje, o ši tendencija labai aiškiai pastebima didžiuosiuose pasaulio megapoliuose, didėja ir poreikis žmonių apgyvendinimui. Šiai problemai spręsti pasirenkamas paprasčiausias sprendimas – daugiabučių statyba. Jų būna įvairių konstrukcijų, įvairiais pasirinktais techniniais sprendimais. Tačiau ne visada atsižvelgiama į žmonių, kurie gyvens šiame pastate, gerovę. Gana dažnai pastebima problema prasta patalpų ventiliacija. [Rou08] [GA05]

Patalpų ventiliacija turi labai svarbų vaidmenį žmogaus sveikatai, nes blogai ventiliuojamose patalpose kaupiasi drėgmė, padidėja žmogaus kvėpavimo produkto CO₂ koncentracija. Žinoma daug atvejų, kurie praneša apie drėgmės ir pelėsių problemas, su kuriomis susiduriama ofisų pastatuose, mokyklose, vaikų darželiuose, tik nežinoma kokio masto šios problemos. Drėgmė taip pat gali pagreitinti pastatų cheminį irimą, padidinti organinių junginių išsiskyrimą, įskaitant formaldehido ar net tokių pavojingų medžiagų kaip pesticidų. Bet taip pat tikėtina, kad ne tik šie paminėti veiksniai, kurie pasireiškia drėgnose patalpose, gali daryti įtaką žmogaus sveikatai, bet tai galima kitų tyrimų kryptis. [YL09] [JAC04] [HPA08] [NT07] [BHK07] [Nag93]

Taip pat gera patalpų ventiliacija užtikrina ir efektyvų energijos sunaudojimą pastatų šildymui, nes bloga ventiliacija gali įtakoti didelius energijos nuostolius, bandant ventiliuoti patalpas, o pastatai yra viena iš didžiausių energiją naudojančių grupė. [YL09] [Zha06]

Pastatų vėdinimo problema yra viena iš dažniausių problemų su kuria susiduriama, o didėjant žmonių populiacijai ir daugėjant žmonių, kurie gyvena miestuose – ši problema išliks ir tikriausiai net paaštrės, nes labai dažnai projektuojant naujus pastatus taupoma būtent šioje srityje. [Rou08] [GA05] [YL09] [Zha06] [LN11]

Pagal ASHRAE¹ organizacijos standartus, numatoma, kad minimali oro kaitos norma yra nustatoma pagal vėdinamos erdvės tūrį arba gyventojų skaičių. Jame teigiama, kad kiekvienoje patalpoje per valandą turi pasikeisti mažiausiai 0,35 patalpos oro, arba 7.1 L/vienam asmeniui, priklausomai nuo to, kuris iš dviejų yra didesnis. [DFM96] [ONA11]

Jeigu ventiliacijos sistema yra silpna arba netinkama - ji nesugeba tinkamai ventiliuoti patalpų ir kyla įvairiausių problemų: infekcijų protrūkių, tokių kaip SARS² 2003 m. [DFM96] [LN11]

Šie pavyzdžiai tik parodo, kad patalpų ventiliavimo analizė tampa vis aktualesnė, nes tokie besivystantys regionai kaip Azijoje, tik dar dažniau susidurs su minimomis problemomis. [LN11] [DFM96]

Šias problemas spręsti - pastatų ventiliacijos, vis dažniau pasitelkiamas skysčių modeliavimas, kuris paskutiniu metu tampa vis dažniau naudojamas, tiek tyrimų srityje, tiek praktikoje. Per paskutinius 20 metų ir kompiuterinės technikos galimybės padidėjo 1000 – 10.000 kartų. [LN11] [DFM96]

Ventiliacija tai paprasčiausiai skysčio – oro, cirkuliacija patalpose. Oras – tai dujos, o skirtumas tarp dujų ir skysčių yra minimalus žvelgiant iš dinaminių savybių pusės. Dažniausiai skysta medžiagos būseną pasižymi didesniu tankiu nei dujinė, bet tai labiau įtakoja ne skirtumus tarp srautų ir jų modeliavimo, o skirtumus tarp reikalingos jėgos, kad šiems srautai įgautų tam tikrą pagreitį. Taigi pats svarbiausias mechaninis skirtumas tarp dujų ir skysčių yra jų spūdimas: toks pat slėgio pasikeitimas, dujų tūrį įtakos labiau nei skysčių. Todėl skysčių ir oro srautų modeliavimas traktuojamas kaip vienas ir tas pats reiškinys. [Bat02]

Nors kompiuterinis modeliavimas ir nepakeis eksperimentų ar teorinės analizės, bet modeliavimas tapo labai svarbiu patalpų ventiliavimo srities problemų analizės ir sprendimo įrankiu. [LN11] [DFM96] [LH06]

Šiuo metu sukurta daugybė programinių paketų, kurie sugeba modeliuoti skysčių dinamiką, tačiau ne visi jie yra pritaikyti modeliuoti ventiliacijos problemas. Taip pat dažnai, kai programinio paketo galimybės ir didelės, nėra tiksliai dokumentuota, kas

¹ American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

² Severe acute respiratory syndrome

apsunkina modeliavimo procesą, todėl bendrų gairių ar principų pateikimas modeliuojant konkrečiu paketu visada yra pageidautinas.

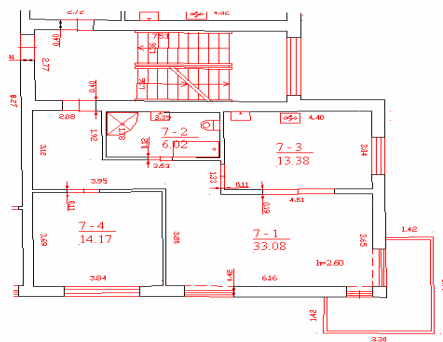
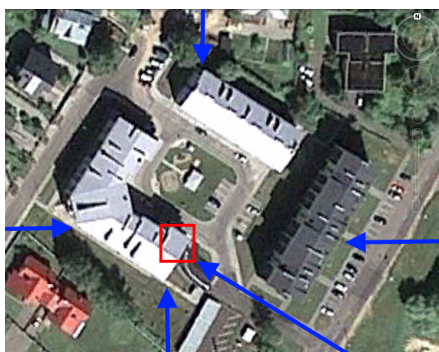
Uždavinio aktualumą patvirtina ir tai, kad modeliuojant ventiliaciją, matematiškai negalima atsakyti, ar visada egzistuoja trimatis sprendinys, arba jeigu jis ir egzistuoja, ar nėra jame begalybės, vienetis ar trūkių.

Uždavinio formulavimas

Su minėtomis problemomis susiduriama ne tik svetur bet ir Lietuvoje. Galima pastebėti, kad projektuojant naujus pastatus mažai dėmesio yra skiriama ventiliacijos problemai spręsti – paprasčiausiai nepaskaičiuojamas, nemodeliuojamas būsimos ventiliacijos sistemos efektyvumas.

Šiame darbe analizuojamas vieno konkretaus buto, naujos statybos daugiabutyje, kurio statybos darbai baigti 2008 m., ventiliacijos problemos. Daugiabutyje yra įrengta natūrali ventiliacijos sistema.

Taigi pagrindinis magistrinio darbo objektas yra 2 kambarių, 65 m² ploto butas, esantis 3 aukšte, keturaukščiame daugiabutyje, jo ventiliavimo sistema ir jos analizė pasinaudojant kompiuterinės technikos pagalba. Butas yra kampinis, jo langai yra nukreipti į šiaurę ir pietus. Langai, kurie nukreipti į šiaurę, pagal topografinį vietos žemėlapi yra užuovėjoje nuo vyraujančių vėjų šiaurės ir rytų. Vakarų ir pietvakarių vėjus taip pat užstoja likusi namo dalis. Rytų vėjus užstoja kitas daugiabutis, kuris topografiškai yra aukščiau, taigi tiesiogiai buto ir namo ventiliacijai daugiausiai įtakoja pietryčių vėjai, kurie dažnesni yra šiltuoju metu laiku. [HPA08]



1 pav. Buto padėtis aplinkinių objektų atžvilgiu su vyraujančių vėjų kryptimis (kairėje)

[Map11] ir buto planas (dešinėje)

Šiltuoju metų laiku vėdinimo problemos yra mažiausios, nes dažniausiai atidaromi visi langai ir vyksta natūrali ventiliacija, bet didžiausios problemos pasireiškia žiemą, kai visos oro įėjimo angos dažniausiai uždarytos.

Pateikiamas detalus buto planas (*1 pav., kairėje*), kuriame yra pavaizduotos šios erdvės:

- 7-1: svetainė
- 7-2: vonios-tualetų kambarys, su jame įrengta vėdinimo anga
- 7-3: virtuvė, su joje įrengta vėdinimo anga
- 7-4: miegamasis.

Pagal šį planą matoma, kad virtuvės kambaryje yra vienas langas, svetainėje balkono durys ir du langai, miegamajame vienas langas. Taip pat visas patalpas galima atskirti uždarius duris, tik šitaip neįmanoma atskirti koridoriaus ir svetainės. Toliau bus analizuojama toks ventiliacijos sistemos modelis, kai visos durys atdaros, tai yra visos patalpos sujungiamos į vieną erdvę, ir vienu metu atidarytos tik dvi oro įėjimo angos – tai dažniausiai pasitaikanti situacija bandant ventiliuoti patalpas.

Magistro darbo tikslas

Pagal pradinius matavimus pastebima, kad šiame bute yra susiduriama su ventiliacijos problemomis. Ne tik pirminiai matavimai informuoja apie ventiliacijos problemas, apie tai informuoja ir ant langų besikondensuojantis vanduo, nes temperatūra esanti ant stiklo paviršiaus yra žemesnė ir pasiekus rasos tašką vandens garai kondensuojasi ant stiklo paviršiaus – kas taip pat informuoja apie didesnę nei normali oro drėgmę – kuri dažniausia yra prastos ventiliacijos padarinys.

Norint išsiaiškinti konkrečias neefektyvios ventiliacijos problemas, nuspręsta sumodeliuoti konkrečią ventiliacijos sistemą, atsižvelgiant į ventiliacijos sistemą, programinių paketų galimybes ir apžvelgiant pagrindinius ventiliacijos modeliavimo principus. Pateikti gaires, kad remiantis šiuo darbu būtų įmanoma sumodeliuoti ventiliacijos sistemą neturint gilių teorinių ar praktinių žinių, iš ko seka ir sekantys pagrindiniai magistrinio darbo tikslai:

- Apžvelgti ventiliacijos modeliavimo principus, atsižvelgiant į ventiliacijos sistemas ir jų ypatybes.
- Apžvelgti programinius paketus ir jų galimybes modeliuoti ventiliacijos sistemą.
- Sudaryti modelį, kuris kuo tiksliau modeliuotų konkrečią ventiliacijos sistemą
- Išanalizuoti modeliavimo rezultatus, palyginant skirtingas ventiliacijos schemas.
- Išanalizuoti programinio paketo galimybes modeliuoti oro srautus, bei pateikti gaires, kuriomis vadovaujantis būtų galima pasinaudoti kituose modeliavimuose, kad procesas būtų efektyvesnis ir tikslesnis.

Teorinė uždavinio apžvalga

Skysčių mechanika

Prieš modeliuojant skysčių tekėjimą labai svarbu yra suprasti skysčių fizikines savybes. Nes šios žinios reikalingos ne tik modeliuojant skysčių tekėjimą, bet ir kitų kryptų specialistams: inžinieriams, fizikams, matematikams. [Tho04]

Reikia apžvelgti pagrindines skysčių fizikines savybes, nes iš šių fizikinių savybių gimsta matematiniai modeliai, kuriuos naudojant, modeliuojamas skysčių tekėjimas.

Kaip dažniausiai pastebimas fenomenas pasaulyje yra skysčių tekėjimas: kaip pavyzdžiui vėjas – oro tekėjimas, o upės tėkmė – skysčių tekėjimas. Debesų ar dūmų judėjimas gerai vizualizuoja oro judėjimą, tačiau tai nepaiškina pačio judėjimo kaip reiškinių. Taigi tekėjimas bendrai – materijos srautas ir deformacija laiko atžvilgiu. Kitaip tariant dalelių grupė tai medžiaga, kurios laikui bėgant juda ir tarpusavyje sąveikauja bei keičia poziciją. Tekėjimas kaip reiškinys yra labai svarbus ir dažnai sutinkamas: oro tėkmė gyvenamajame kambaryje, kraujo tėkmė, dalelių judėjimas chemijos mėgintuvėlyje, atmosferos masių judėjimas, vandenyno srovės, saulės vėjas ir daugelis kitų. [EYS+07] [Tho04] [BMW07]

Technologiniu požiūriu tekėjimas yra išnaudojamas daug kur: laivų, lėktuvų, raketų, kurie tekėjimą panaudoja judėjimui nuo vienos vietos iki kitos.

Biologiniu požiūriu tekėjimas kaip reiškinys išnaudojamas taip pat: žuvys skysčių masių tekėjimą panaudoja plaukimui, vabzdžiai, paukščiai panaudoja oro masės kad pavyktų pakilti ir judėti oru. Kad ir svarbu kaip augalai maitina savo lapus, kaip jie išnešioja sėklas padedami vėjo. [Tho04]

Iš esmės materija, kuri laikui bėgant deformuojasi, tokia kaip oras ar vanduo, vadinami skysčiu arba fluidu.

Kaip minėta anksčiau skysčių tekėjimas yra labai svarbus, o žmogui ypač medicininiu požiūriu svarbu yra tasių skysčių tekėjimo supratimas, nes vienas pagrindinių žmogaus gyvybės prižasčių yra kraujas – tąsus skystis. [Kam07]

Diferencialines lygtys, aprašančios klampaus nespūdaus skysčio tekėjimą, buvo išvestos daugiau kaip prieš 180 metų. Jis 1821 metais užrašė prancūzų inžinierius K. Navje, remdamasis tam tikru molekulinio dėsnio. Gana greitai paaiškėjo, kad kai kurioms medžiagoms postuluotas K. Navje molekulių sąveikos dėsnis netinka. Po 20 metų jaunas anglų mokslininkas G. Stoksas gavo analogiškas lygtis, remdamasis kontinuumo mechanikos principais. Todėl ši lygčių sistema vadinama Navje ir Stokso vardu (Navier-Stokes system).

Navje-Stokso lygtys yra diferencialines lygtys dalinėmis išvestinėmis, aprašančios klampių nespūdžių skysčių tekėjimą. Toliau bandysime apžvelgti pagrindines tąsųjų skysčių tekėjimo charakteristikas ir matematinės lygtis.

Tegu $\Omega \subset R^n$, $n = 2,3$, - klampaus nespūdaus skysčio tekėjimo sritis, $\partial\Omega$ - jos kraštas. Dekarto koordinatų sistemoje Navje-Stokso lygčių sistema, nusakanti tokio skysčio tekėjimą, užrašoma taip:

$$\begin{cases} \rho \mathbf{v}_t - \nu \Delta \mathbf{v} + \rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \nabla p = \rho \mathbf{f}, \\ \operatorname{div} \mathbf{v} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Čia $\mathbf{v} = \mathbf{v}(x, t) = (v_1(x, t), \dots, v_n(x, t))$ - skysčio greičio vektorius taške $x \in \Omega$ ir laiko momentu t , $p = p(x, t)$ - skysčio slėgis, $\nu > 0$ - skysčio klampumo koeficientas (pastovus dydis, priklausantis nuo skysčio savybių), $\rho > 0$ - skysčio tankis, $\mathbf{f} = \mathbf{f}(x, t) = (f_1(x, t), \dots, f_n(x, t))$ - išorinių jėgų, veikiančių skystį, vektorius. Kadangi skystis yra nespūdas (homogeninis), tai jo tankis ρ - pastovus dydis, ir toliau paprastumo dėlei laikysime, kad $\rho = 1$.

(1) lygčių sistemoje v_t reiškia greičio vektoriaus $\mathbf{v}(x, t)$ išvestinę kintamojo t (laiko) atžvilgiu, Δ yra Laplaso operatorius, t. y.

$$\Delta \mathbf{v} = \frac{\partial^2 \mathbf{v}(x, t)}{\partial x_1^2} + \dots + \frac{\partial^2 \mathbf{v}(x, t)}{\partial x_n^2},$$

∇ - gradientas kintamųjų x atžvilgiu, $\operatorname{div} \mathbf{v}(x, t)$ - greičio vektoriaus $\mathbf{v}(x, t)$ divergencija, "." - reiškia skaliarinę daugybą R^n .

Taigi $\operatorname{div} \mathbf{v}(x, t)$, ir netiesinį narį $(\mathbf{v}(x, t) \cdot \nabla) \mathbf{v}(x, t)$ galima užrašyti taip:

$$\operatorname{div} \mathbf{v}(x, t) = \nabla \cdot \mathbf{v}(x, t),$$

$$(\mathbf{v}(x, t) \cdot \nabla) \mathbf{v}(x, t) = \sum_{j=1}^n v_j(x, t) \frac{\partial \mathbf{v}(x, t)}{\partial x_j}.$$

Pirmoji lygtis (1) sistemoje yra vektorine. Naudojant greičio vektoriaus komponentes, (1) sistemą galima užrašyti taip:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{1t} - \nu \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 v_1}{\partial x_j^2} + \sum_{j=1}^n v_j \frac{\partial v_1}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_1} = f_1, \\ \dots \\ v_{nt} - \nu \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 v_n}{\partial x_j^2} + \sum_{j=1}^n v_j \frac{\partial v_n}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_n} = f_n, \\ \sum_{j=1}^n \frac{\partial v_j}{\partial x_j} = 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

Pirmoji (1) sistemos lygtis aprašo skysčio judėjimo kiekio kitimo dėsnį, o antroji tolydumo lygtis ($\operatorname{div} \mathbf{v} = 0$) - masės tvermės dėsnį ir reiškia skysčio nespūdumą.

Kadangi klampus skystis prilimpa prie tekėjimo srities krašto $\partial\Omega$ ir kartu juda, tai papildomai reikia užduoti kraštinę sąlygą

$$\mathbf{v}(x, t) = \boldsymbol{\alpha}(x, t), \quad \text{kai } x \in \partial\Omega, \quad (3)$$

kur $\boldsymbol{\alpha}(x, t)$ aprašo $\partial\Omega$ judėjimą. Be to, turi būti užduotas pradinis skysčio greitis laiko momentu $t=0$:

$$\mathbf{v}(x, 0) = \mathbf{v}_0(x) \quad \forall x \in \Omega. \quad (4)$$

Taigi iš (1), (3), (4) gauname toki pradinį ir kraštinį uždavinį Navje-Stokso lygčių sistemai:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{v}_t - \nu \Delta \mathbf{v} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \nabla p = \mathbf{f}, \quad (x, t) \in \Omega \times (0, T), \\ \operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \quad (x, t) \in \Omega \times (0, T), \\ \mathbf{v}|_{S^T} = \boldsymbol{\alpha}, \quad \mathbf{v}(x, 0) = \mathbf{v}_0(x), \end{array} \right. \quad (5)$$

kur $S^T = \partial\Omega \times (0, T)$, o $(0, T)$ yra laiko intervalas, kuriame nagrinėjamas skysčio tekėjimas. Pradinio ir kraštinio uždavinio (5) nežinomieji yra greičio vektorius $\mathbf{v}(x, t)$ ir slėgis $p(x, t)$, o $\mathbf{f}(x, t)$, $\boldsymbol{\alpha}(x, t)$ ir $\mathbf{v}_0(x)$ yra duoti.

Kai skysčio tekėjimas yra stacionarus, t.y. nepriklausantis nuo laiko t , tai vietoj (5) pradinio ir kraštinio uždavinio gauname kraštinį uždavinį stacionariajai Navje-Stokso lygčių sistemai:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\nu \Delta \mathbf{v} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \nabla p = \mathbf{f}, \quad x \in \Omega, \\ \operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \quad x \in \Omega, \\ \mathbf{v}|_{\partial\Omega} = \boldsymbol{\alpha}. \end{array} \right. \quad (6)$$

Čia visos funkcijos priklauso tik nuo erdvinio kintamojo $x \in \Omega$.

Esant pakankamai mažiems skysčio greičiams netiesinio nario $(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}$ galima nepaisyti. Tada iš (5) bei (6) Navje-Stokso lygčių sistemų gauname vadinamus nestacionarųjį ir stacionarųjį Stokso sistemos uždavinius:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{v}_t - \nu \Delta \mathbf{v} + \nabla p = \mathbf{f}, \quad (x, t) \in \Omega \times (0, T), \\ \operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \quad (x, t) \in \Omega \times (0, T), \\ \mathbf{v}|_{S^T} = \boldsymbol{\alpha}, \quad \mathbf{v}(x, 0) = \mathbf{v}_0(x), \end{array} \right. \quad (7)$$

ir

$$\left\{ \begin{array}{l} -\nu \Delta \mathbf{v} + \nabla p = \mathbf{f}, \quad x \in \Omega, \\ \operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \quad x \in \Omega, \\ \mathbf{v}|_{\partial\Omega} = \boldsymbol{\alpha}. \end{array} \right. \quad (8)$$

Aprašant skysčių tekėjimą Navje-Stokso lygtimis bandoma ir modeliuoti skysčių tekėjimą įvairiomis sąlygomis. Šios supaprastintos ir išplėstos lygtys yra plačiai naudojamos aprašyti ir modeliuoti skysčių tekėjimą ir oro srautus. [Kam07] [Mcd09] [Pil07]

Akademinės bendruomenės susidomėjimą dar labiau kelia ir tai, kad matematiškai negalima atsakyti, ar visada egzistuoja trimatis sprendinys, arba jeigu jis ir egzistuoja, ar nėra jame begalybės, vienetis ar trūkių. Ši problema yra įvardijama kaip viena iš septynių didžiausių šio tūkstantmečio matematinių problemų. [Cla09]

Skysčių tekėjimo skaičiavimo metodai

Visų skysčių tekėjimo reiškinį savybių iširti neįmanoma arba kainuotų labai brangiai, todėl kuriami matematiniai modeliai ir tada jie vizualizuojami, kad geriau atvaizduoti visą reiškinį.

Daugelis mokslininkų yra aktyviai įsitraukę į skysčių tekėjimo vizualizavimą, yra daugybė programinės įrangos, kuri sugeba spręsti įvairias skysčių tekėjimo problemas, tačiau jos nėra pakankamai daug lyginant su išskylančiomis problemomis, nes jų yra daug ir jos pakankamai sudėtingai sprendžiamos. [BMW07]

Skysčio dalelės yra neatsparios išorės jėgų poveikiams: netgi mažiausia išorinė jėga priverčia deformuotis skysčio daleles. Dažniausiai įtakojančios jėgos yra slėgis, gravitacija, šlyties jėga, sūkio jėga ir skysčio paviršiaus įtempimas. Šios jėgos gali būti suskirstytos į trinties ir gravitacijos jėgas.

Jeigu skysčiai maždaug vienodai elgiasi veikiant išorinėms jėgoms, bet jų mikroskopinės savybės skiriasi labai žymiai. Kaip pagrindinės mikroskopinės savybės yra išskiriamos: tankis ir klampumas. Kitos savybės kaip Prandtl skaičius, šiluma įtakoja skysčius tik esant tam tikroms sąlygoms.

Skysčių tekėjimo greitis taip pat įtakoja skysčių savybes, nes esant lėtai tėkmei inerciją galima ignoruoti ir tada gaunamas šliaužiantis tekėjimas. Šis tekėjimo režimas yra labai svarbus mažų dalelių tėkmei, kaip tekėjimas akytoje medžiagoje. Kai tekėjimo greitis didėja, inercija tampa svarbi, bet kiekviena skysčio dalelė juda švelnia trajektorija ir toks tekėjimas vadinamas tiesiniu. Toliau didinant tėkmės greitį, tėkmė tampa nestabili ir tai generuoja daug atsitiktinių tekėjimo tipų vadinamu turbulencija. Galiausiai, kai tekėjimo greitis padidėja iki garso greičio (Mach skaičius), susiformuoja apsikeitimas tarp kinetinės energijos ir vidinės skysčio netvarkos. Kai tekėjimo greitis yra nedidelis, $Ma < 0,3$, tėkmė gali būti apibūdinama kaip spūdi, kai $Ma > 1$ tėkmė tampa viršgarsiniu ir tada susiformuoja smūgio jėga. Kai $Ma > 5$ toks tekėjimas jau tampa ultragarsiniu ir tai gali pakeisti ir cheminę skysčio struktūrą, nes kinta ir temperatūra.

Daugeliu tekėjimo atveju klampumo efektas yra svarbus tik prie sienelių, taigi didžioji tėkmės dalis gali būti apibūdinta kaip neklampi.

Daugelis kitų reiškinių įtakoja skysčių tekėjimą, kaip pavyzdžiui temperatūrų skirtumas sukelia šilumos pasidalijimą ir tirštumo skirtumai iššaukia plūdrumą. Taigi šie reiškiniai tik priverčia atkreipti dėmesį į tvermės dėsnius (Masės tvermės dėsnį, Energijos tvermės dėsnis), kas tik skysčių tekėjimo modelį taip pat įtakoja.

Taigi lygtys tampa pakankamai sudėtingos ir joms spręsti naudojami skaitiniai metodai ir algoritmai. Dažniausiai šias lygtis sprendžia kompiuteriai, kurie atlieka milijonus skaičiavimų. Tačiau net ir kompiuteriai sugeba pasiekti tik apytikslių sprendinių. Tačiau sekantys tyrimai tikriausiai toliau naudosis programinės įrangos teikiamomis galimybėmis skaičiuojant kompleksinius ir sudėtingus uždavinius. [Sto09]

Skysčių modeliavime vienas pagrindinių uždavinių yra skysčio (dujų) užimamos srities diskretizavimas.

Visais metodais naudojama ta pati metodologija:

- Apibrėžiamas srities kraštas;
- Sritis padalijama į baigtines dalis;
- Apibrėžiamas modelis;
- Nusakomos kraštinės sąlygos;
- Modeliuojama situacija sprendžiant lygtis skaitiškai;
- Sprendinio vizualizavimas;

Šių diferencialinių lygčių sprendimui naudojami keli pagrindiniai diskretizacijos metodai:

- Baigtinių tūrių metodas (Finite volume method) – standartinis metodas naudojamas daugelyje komercinės ir mokslinės programinės įrangos paketuose.
- Baigtinių elementų metodas (Finite element method) – metodas naudojamas struktūrinėje analizėje, bet tinkantis ir skysčių modeliavimo lygtims spręsti.
- Baigtinių skirtumų metodas (Finite difference method) – istoriškai svarbus ir lengvai programuojamas metodas.
- Kraštinių elementų metodas (Boundary element method) - skysčio užimamas sritis pagal kraštą suskirstoma į karkasinius paviršius.

Naudojant šiuos metodus modeliuojamos atskiros sistemos dalys - sprendžiamos atskiros diferencialines lygtys, ir po to reikia mokėti visus šiuos uždavinius susieti į vieną - taip sumodeliuojama nauja sistema. Šiam tikslui pasiekti naudojami atskiri algoritmai, tokie kaip: Zeidelio (Gauss–Siedel) metodas arba variaciniai metodai (Krylov subspace algoritms). [DR06] [TYL08]

Tačiau egzistuoja ir keletas kitų metodų, kurie sprendžia skysčių lygtis kitais būdais: spektriniai metodai (panaudojamos spektrinės harmonijos funkcijos arba Chebyshevo polinomiali), Lattice Boltzman metodai. [Sto09]

Gavus matematinę sprendinį reikia sugebėti jį atvaizduoti – vizualizuoti. Tačiau vizualizacijos uždavinys yra vienas iš sudėtingesnių, nes gaunamas sprendinys dažniausiai yra trijų dimensijų (pavyzdžiui: slėgis, tankis, temperatūra). Yra sukurta pakankamai daug vizualizacijos įrankių, kad atitiktų daugelio tyrėjų poreikius. Tačiau šiuolaikiniai skysčių tekėjimo vizualizacijos metodai susiduria su kitomis problemomis:

Gaunamas sprendinys yra daug didesnis nei sugeba atvaizduoti vizualizacijos įrankiai ir dalis informacijos nepatenka į vizualizacijos rezultatus. [Aer09]

Nors gaunami jau pakankamai tikslūs modeliai (pavyzdžiui vandens, rūko, dūmų), tačiau į juos reikia įtraukti daug sudėtingesnių reiškinių ir sugebėti įtraukti trimačius skaičiavimo duomenis. [FP02]

Skysčių dinamikos modeliavimas

Šiame amžiuje skysčių dinamikos modeliavimas tapo labai aktyviai studijuojama šaka. Iš pradžių tai buvo tik aukštųjų technologijų sritis, tačiau vėliau skysčių dinamikos modeliavimas taikomas daugelyje inžinerijos sričių. Skysčių dinamikos modeliavimas susideda iš kelių skirtingų disciplinų: inžinerijos, matematikos ir kompiuterių mokslo. Iš tikrųjų skysčių dinamikos problemas galima spręsti trimis būdais: analitiniu, eksperimentiniu ir kompiuteriniu modeliavimu. Toliau bus aptariamas kompiuterinio modeliavimo principas. Šis principas iš esmės yra pranašesnis prieš kitus, nes leidžia daug detaliau įsigilinti į problemą, tai pakankamai pigus būdas modeliuoti vykstančius reiškinius, galima imituoti tokias sąlygas, kokias eksperimento metu nebūtų įmanoma sudaryti. [FP02]

Tam, kad pradėti modeliuoti reiktų suprasti pagrindinius modeliavimo elementus:

- pre-processorius – jame nustatomas modelis, atliekami pradiniai skaičiavimai, apibrėžiamos ribos;
- sprendiklis - sprendžia lygtis, užduotas pagal modelį;
- post-processorius - pateikia sprendinį ir jį vizualizuoja.

Formos sukūrimas

Pirmas žingsnis skysčių tekėjimo modeliavime yra apibrėžti ir sukurti skysčio tėkmės geometriją. Geometrija iš esmės aprašo kokiu kontūru tekės skystis, taip pat dažnai braižant geometriją jau žinoma ir tekėjimo kryptis – į ką atsižvelgiama jau braižant geometriją – ją atitinkamai optimizuojant.

Svarbu, kad modeliuojamas paviršius būtų pakankamai didelis, kad skysčių dinamikos procesai spėtų pilnai susiformuoti. [DR06] [Mcd09] [Sto09] [TYL08]

Tinklelio (angl. „mesh“) generavimas

Sekantis labai svarbus žingsnis pre-procesoriaus stadijoje yra kontūro (angl. „mesh“) generavimas, nes skysčių dinamikos modeliavime reikalinga, kad paviršius, kuriuo arba kuriame teka skystis būtų suskaidytas į daugelį nepersidengiančių mažų dalių. Šio proceso metu yra sugeneruojamas kontūras arba atskiros celės. Skaidant paviršių svarbu atsižvelgti į dalinimo tankį, nes per tankus sudalijimas gali įtakoti ilgą skaičiavimą, nors rezultatai nebus ypatingai tikslūs, o per retas sudalijimas – gali įtakoti dideles skaičiavimų paklaidas. Naudojama įvairių metodų paviršiaus dalijimui, bet pagrindinai naudojami paprastesni metodai. Dažnai generuojat tinklelį naudojamas struktūrinis ir nestrukūrinis kontūro generavimo metodai, tam kad sumodeliuoti tikslesnius modelius. [DR06] [Mcd09] [Sto09] [TYL08]

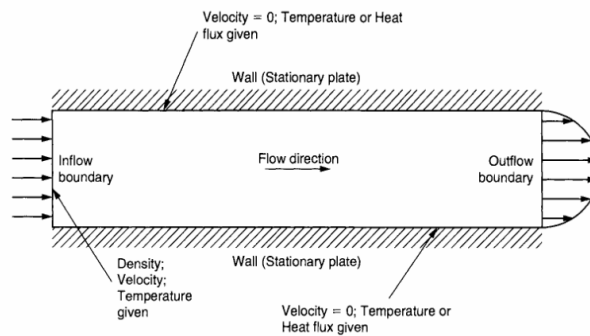
Fizikinių aplinkybių ir skysčio savybių apibrėžimas

Dažniausiai fizikinių savybių pasirinkimas ir skysčių savybių įvedamas per programinio paketo naudotojo sąsają. Taip pat dažnai jau būna surinkta tam tikrų skysčių fizikinių savybių duomenų bazė, iš kurios galima pasirinkti norimą skystį arba jį pakoreguoti, kad atitiktų modeliuojamą. Norint gauti kuo tikslesnius modeliavimo rezultatus, reikia kuo tiksliau apibrėžti fizikines savybes. Reikia nuspręsti, ką įtraukti į modelį, o ką galima ignoruoti – nes kiekvienos papildomos fizikinės savybės apibrėžimas įtakoja sprendinį ir tuo pačiu modelio sprendimo laiką [DR06] [Mcd09] [Sto09] [TYL08]

Srities apibrėžimai ir kraštinės sąlygos

Nustatomos aplinkybės ir pradinės sąlygos, apibūdinančios skysčių tekėjimą. Dažnai šie ribojimai ir aplinkybės yra susijusios su skysčio įtekėjimo ir ištekėjimo į modeliuojamą zoną arba tam tikras sritis modeliuojamoje zonoje. Įvedami skysčio įtekėjimo ir ištekėjimo kraštai, su šiomis sąlygomis galima įvesti ir papildomus parametrus tokius, kaip slėgis, temperatūra, kurie dažniausiai įvedami per naudotojo

grafinę sąsają. Galima ir net dažnai reikia įvesti kitas sąlygas, tokias kaip simetrijos tiesė, apie kurią vyksta modeliavimas – tai pagreitina modelio sprendimą. [DR06] [Mcd09] [Sto09] [TYL08]



2 pav. Apibrėžiamos kraštinės sąlygos pasirinktam modeliui [TYL08]

Lygčių sprendimo inicijavimas ir kontrolė

Skysčių tekėjimo modeliavimo lygtys yra pakankamai sudėtingos, sprendžiamos skaitiniais metodais. Dažniausiai iteracinis skaičiavimas pareikalauja papildomų lygčių parametrų, tokių kaip klampumas, slėgis, temperatūra. Šiame etape naudotojo priežiūra yra būtina, nes teisingai inicijavus skaičiavimo procesą – pasirinkus tinkamiausius metodus ar algoritmus, rezultatai gaunami per trumpesnę laiką, o neteisingai parinkti pradiniai parametrai skaičiavimą gali nuvesti netgi iki divergavimo. Dabar komerciniuose produktuose aktyviai naudojami Algebraic Multi Grid (AMG) algoritmai, kurie naudojami interpoliuojant, reikalauja taip pat didelės naudotojo priežiūros. Šiuo veiksmu dažniausiai baigiamas sąlygų apibūdinimas. [DR06] [Mcd09] [Sto09] [TYL08]

Susiejimo stebėjimas

Inicijavus skaičiavimą vyksta vidinių duomenų susiejimas ir dažniausiai naudotojas turi galimybę stebėti šio proceso eigą. Taip pat vyksta lygčių sprendimas ir jo metu naudotojas gali sekti įvairius parametrus, tokius kaip atliktų iteracijų kiekis,

pasirinktų kintamųjų parametrų reikšmes ar jų grafikus - tam kad sekti skaičiavimo proceso eigą. [DR06] [Mcd09] [Sto09] [TYL08]

Rezultatų pateikimas ir vizualizavimas

Skysčių modeliavimo rezultatai dažniausiai pateikiami grafiškai, kad būtų lengviau išvelgti vykstančius procesus ir gautų rezultatų prasmę, nes dažniausiai tik skaitinės rezultatų reikšmės neapibūdina vykstančių procesų, nes net ir pats rezultatas dažniausiai pateikiamas kaip kontūras. Egzistuoja pakankamai daug atskirų programinių paketų skirtų tik vizualizavimui, bet visų šių paketų pagrindinis tikslas yra kuo tiksliau ir aiškiau atvaizduoti gautus modeliavimo rezultatus. Šiam tikslui pasiekti naudojami įvairūs vizualizacijos metodai:

- Dvimačiai grafikai dažniausiai naudojami skaitinėms reikšmėms ir kintamųjų priklausomumui atvaizduoti
- Vektoriniai grafikai – dažniausiai naudojami skysčio tekėjimo srautui atvaizduoti.
- Kontūro grafikai – dažniausiai skirti tam tikros savybės kitimo vizualizavimui.
- Animacija – skysčių tekėjimo modeliavimui pakankamai artimas ir animacijos terminas, nes jis taip pat dažnai naudojamas gautiems rezultatams vizualizuoti. Dažniausiai - tai eilė sekančių tarpinių sprendinių bėgant laikui sujungti į vieną vaizdą. [DR06] [Mcd09] [Sto09] [TYL08]

Pastato ventiliacijos sistemų apžvalga

Daug ventiliacijos sistemų ir technikų yra sukurta, kad atitiktų ventiliacijos poreikius skirtingose situacijose. Ventiliavimo sistemos pasirinkimą dažnai nulemia klimatas arba pastato tipas.

Ventiliavimo sistemos yra skirstomos į tris tipus: mechaninė, natūrali ir kombinuota ventiliavimo sistema, kurios dažniausiai skirstomos taip:

- Mechaninė ventiliavimo sistema:
 - Oro pašalinimo strategija – ji tik pašalina orą iš patalpų. Iš esmės egzistuoja dvi pagrindinės oro pašalinimo sistemos: centralizuota ir individuali.
 - Oro tiekimo strategija – oras tiekiamas iš išorės į pastatą. Tokią ventiliavimo strategiją naudojant, patalpose didinamas slėgis, taip išstumiant patalpose esantį orą lauk, pro tam tikras vėdinimo angas.
 - Energijos regeneravimo strategija – pagrindinė idėja yra ta, kad su pašalinamu oru pašalina ir didelė dalis šilumos energijos, o ją bandoma sugrąžinti atgal į ventiliacijos ratą arba panaudoti vandeniui pašildyti.
 - Sausinimo strategija – karštuose ir drėgnuose klimatinėse zonose yra poreikis pašalinti drėgmę iš tiekiamo oro iš išorės.
- Natūrali ventiliavimo sistema
 - Vienpusė ventiliavimo strategija – tai kai oras patenka į patalpą ir iš jos pasišalina, per tą pačią pusę. Ventiliaciją skatina atsitiktiniai turbulenciniai slėgio svyravimai prie pastato fasado.
 - Skersinė ventiliavimo strategija – oras patenka pro vieną patalpos pusę ir palieka patalpą pro vėdinimo angas kitoje patalpos pusėje. Slėgių skirtumas yra sukuriamas vėjo, kuris sukuria daug didesni slėgių skirtumą negu turbulenciniai slėgio svyravimai prie pastato fasado.

- Vėjo bokšto strategija – tai bokštas, į kurį pro jame esančias angas pučia vėjas taip įstumdamas gryną orą į vėsiausią patalpą, dažniausiai rūsi, tuo tarpu šiltas oras paimamas iš aplinkos ir atvėsinamas po žeme arba rūsyje, tada slėgių skirtumas sukuria pastovia ventiliacijos ratą.
- Kamino strategija – šia ventiliacijos strategija paremta kaminų, kurie baigiasi ties ventiliuojamomis patalpomis, ir kurie dažniausiai truputį iškyla virš pastato stogo.
- Atriumo strategija – pasinaudojama stiklu dengtu kiemu, kuris suteikia pakankamai oro gyventojams visokiomis oro sąlygomis.
- Kombinuota ventiliavimo sistema – dažniausiai pasirenkama, kai negalima tinkamai pritaikyti tik mechaninės arba natūralios ventiliacijos sistemos. Kombinuota ventiliacijos sistema dažniausiai pasižymi mažesniais energijos nuostoliais.

Magistrinio darbo nagrinėjamos situacijos atveju, pastate yra įrengta natūrali ventiliacijos sistema remiantis kamino strategija. Ventiliavimo angose yra įrengti ventiliatoriai, tačiau jie dažniausiai yra nenaudojami dėl keliamo triukšmo. Šiltu metu laiku ventiliacijos problemos išsprendžiamos pritaikant skersinę ventiliacijos sistemą, tačiau žiemą jos pritaikyti neįmanoma, todėl oro kaitos ratas tampa minimalus arba jis iš vis nevyksta. [BHK07] [GA05] [DFM96]

Magistro praktinė dalis

Uždavinio analizė

Vienas iš pagrindinių modeliavimo uždavinio analizės dalies tikslų yra surinkti pradinių duomenų, kurie bus panaudoti fizikinių aplinkybių apibrėžimui modeliavimo procese. Reikia įvertinti, kurios papildomas parametrus įtraukti į modelį, kuriuos galima ignoruoti.

Konkrečiu atveju pasirinkta modeliuoti kuo paprastesnį patalpos modelį ir jo ventiliacijos sistemą, ignoruojant viduje gyvenančius asmenis, esančius daiktus, augalus, taip išorinius aplinkos veiksnius – atmosferos slėgį, vyraujančius vėjus, prie pastato fasado turbulencinius oro srautus. Tokiu atveju modeliuojama kaip galima maksimaliai autonominė ventiliacijos sistema.

Pagrindinis tikslas yra modeliuoti ventiliacijos sistemą ir išanalizuoti modeliavimo rezultatus, o ne gauti preciziškai tikslų patalpos modelį, todėl atlikti empiriniai eksperimentai, kurių metu buvo renkami pagrindiniai ventiliacijos modeliavime naudojami fizikiniai parametrai: patalpos oro temperatūra, oro srautų greitis ir įtekančio oro temperatūra. [Nie04] [McW02]

Matavimai atlikti tipinės žiemą situacijos metu, kai išryškėja ventiliacijos problemos. Stebėjimų metu vidutinė lauko oro temperatūra buvo $\sim -10^{\circ}\text{C}$. Dėl nepastovaus vėjo greičio ir krypties, matavimų rezultatai lauke dažniausiai būna kintantys, o matuojant oro stiprumą prie pastato fasado – tai praktiškai neįmanoma tiksliai padaryti dėl atsirandančių turbulencinių srovių. Vėjo greitis matuotas atsidarius langus vėdinimo padėtyje ir stebėta kokiu greičiu oras patenka į patalpą. Matuojamo į patalpą patenkančio oro srauto greitis svyravo 0.85 – 1.7 m/s, todėl pasirinktas vidurkis ~ 1 m/s. Kaip galima pastebėti, duomenų rinkimo metu, buvo ignoruoti išoriniai veiksniai tokie kaip topografinis vietovės paviršius, vyraujantys vėjai šioje vietoje. Modeliuojant natūralią patalpos ventiliaciją, reikia atsižvelgti ir į oro pašalinimo angas. Šioje sistemoje oro pašalinimo angos yra vonioje ir virtuvėje. Pro šias angas ištekančio oro srautų greitis

dažniausiai buvo mažiau už 1 m/s, dėl skaičiavimų patogumui pasirinkta modeliuoti su 1m/s.

Renkant empirinius duomenis reikia atlikti ir keletą stebėjimų, kai patalpos paliekamos ventiliuotis skirtingomis ventiliacijos schemomis. Tokie surinkti duomenys dažniausiai naudojami tolimesniame modeliavime, tiek kuriant tiek valiuojant modelį, nes tai yra pradiniai ribinių sąlygų duomenys, nuo kurių vyks tolimesnis uždavinio sprendimas. [McW02]

Programinių produktų analizė

Programinių paketų analizė ir pasirinkimas neatrodo kritinė dalis, tačiau kaip paaiškėja analizės metu, bandant modeliuoti tam tikras situacijas su programiniais paketais – tai taip pat viena iš svarbesnių ir kritinių darbo dalių laiko atžvilgiu. Trumpai aptariami pagrindiniai programiniai paketai, kuriuos galima panaudoti ventiliacijos modeliavime.

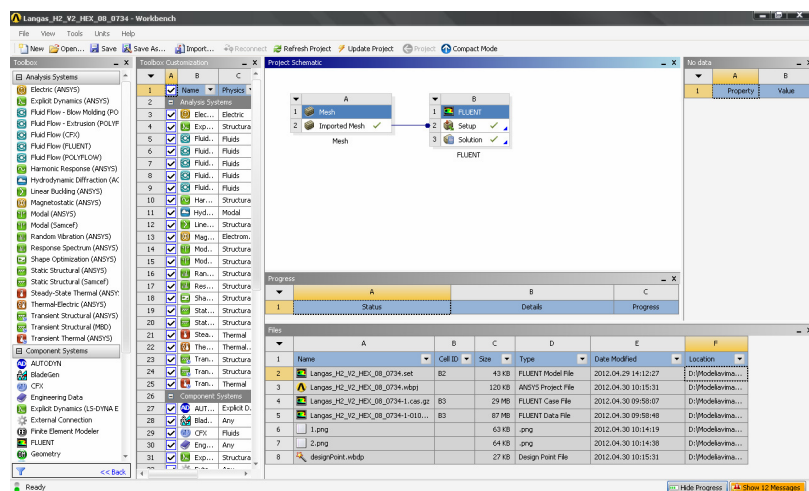
Elmer paketu galima sumodeliuoti šilumos perdavimo, skysčių dinamikos, struktūrinės mechanikos ir kt. problemas, jas sprendžiant baigtinių elementų metodu. Naudotojo grafinė sąsaja pakankamai gerai išvystyta, taip pat galimas ir paralelinis modeliavimas. Nors dokumentaciją stengiamasi palaikyti, tačiau ji pakankamai kebli ir sunkiai skaitoma. Paketo įsisavinimas dažniausiai užtrunka nemažai laiko, nes vis dėl to šis paketas daugiausiai naudojamas tų pačių šalių, kurios jį kūrė ir palaiko. Didžioji dalis atliekamų modeliavimų su šiuo produktu yra orientuotos į tam tikrą problemos sprendimą. Geometrijos braižymas sudėtingas ir nėra tinkamai pritaikytas ventiliacijos sistemų modeliavimui. [Elm12]

FreeFem++ ir MATLAB PDE yra gana panašūs, nes modeliuojama programinio kodo rašymu, kas vėl ilgina modeliavimo laiką ir turi tam tikras apibrėžtas modeliavimo sritis. FreeFem++ pilnas sprendimas skysčių tekėjimo modeliavimui, tačiau projektas nebevystomas nuo 2010 m. Paketas, kuris gali spręsti skysčių dinamikos uždavinius yra MATLAB PDE toolbox, tačiau sugebėjimas spręsti tik dviejų dimensijų koordinatinių

sistemoje, priverčia atsisakyti modeliavimo ir šiuo paketu – ventilacijos modeliavime labai svarbu analizuoti oro srautus trijų dimensijų koordinačių sistemoje. [Par12][Fre12]

Ventilacijos modeliavimo srityje plačiai naudojami ir uždaro kodo programiniai paketai, kurie dažniausiai labai aktyviai palaikomi, atnaujinami ir pasižymi plačiomis modeliavimo galimybėmis. Tokie paketai yra: SolidWorks, FLOW-3D, ANSYS ir daugelis kitų.

Vienas iš plačiausiai naudojamų yra ANSYS programinis paketas, kuris naudojamas daugelyje sričių modeliavime: multifizika, elektromagnetizmas, struktūrinė mechanika, tame tarpe ir skysčių tekėjimas. Šis programinis paketas yra aktyviai palaikomas. Šiuo metu ANSYS pakete yra palaikomi du skysčių dinamikos modeliavimo paketai ANSYS CFX, ANSYS FLUENT. Šie paketai turi daug bendro, tačiau pagrindinis skirtumas yra kaip skysčių dinamikos lygtys integruojamos į sprendiklį: ANSYS CFX naudoja baigtinių elementų metodą (skysčio parametrai yra saugomi elemento taškuose, t.y. tinklelio taškas yra centrinis sprendiklio taškas), o ANSYS FLUENT naudoja baigtinių tūrių metodą (visi skysčio parametrai saugomi skaičiuojamo elemento centre – t.y. tinklelio elementas yra sprendiklio elementas). [Ans12] [Ans09U] [Ans10] [Gor08]



3 pav. ANSYS Workbench darbo aplinka

ANSYS FLUENT paketas įgyvendintas anksčiau negu ANSYS CFX, bet ateityje planuojama šiuo paketą apjungti panaudojant gerąsias jų savybes. ANSYS FLUENT pasižymi dažniausiai greitesniu konvergavimu į uždavinio sprendinį, nes šiame pakete

įgyvendintas sujungtas sprendiklis, kuris sugeba spręsti kelias problemas vienu metu. ANSYS CFX vis dėl to pasižymi daug intuityvia vartotojo sąsaja, ko negalima pasakyti apie ANSYS FLUENT paketą, nors modeliavimo procesas išlieka toks pat. Abu paketai suteikia galimybę pasinaudoti lygiagretaus skaičiavimo privalumais: tiek kompiuterių tinkle, tiek kelių branduolių procesoriumi stacionariame kompiuteryje. [Ans12] [Gor08] [Ans09F]

Renkantis kuriuo programiniu paketu modeliuoti ventiliacijos sistemą – reikalavimai gali būti taikomi bendrai ventiliacijos modeliavimo sričiai, buvo pasirinktas ANSYS FLUENT, nes:

- Įgyvendinta bent keletas skirtingų skaičiavimo metodų, kuriuos galima pritaikyti prie konkrečiai modeliuojamos srities, siekiant pasiekti kuo didesnę efektyvumą ir tikslumą
- ANSYS yra aktyviai palaikomas ir tobulinamas paketas;
- Plačiai naudojamas daugelyje sričių;
- Palaikoma dokumentacija;
- Galimybė kurti 3D modelius;
- Produktas, kuriame galima įgyvendinti visus uždavinio sprendimo etapus: nuo geometrijos kūrimo iki rezultatų vizualizavimo – todėl modeliavimo procesą galima apžvelgti nuosekliai;
- Šis paketas palaiko ir daugelio kitų programinių paketų duomenų failus.

ANSYS programinį paketą sudaro pagrindiniai moduliai, kuriais bus naudojama ventiliacijos modeliavimo metu:

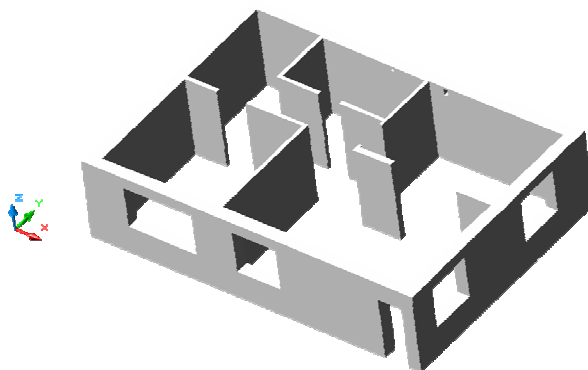
- Workbench (3 pav.) – tai viso modeliavimo proceso valdymo aplinka, kurioje pasirinkus modeliuojamą sritį, sukuriama modeliavimo proceso valdymo medis, kurį praėjus pažingsniui įvykdomas modeliavimas
- DesignModeler – šiame modulyje nubraižoma geometrija, t.y. sukuriama forma
- ICEM CFD – modulis naudojamas kraštinėms sąlygoms pažymėti ir tinkamo generavimui, pasirinkus atitinkamus parametrus

- FLUENT – modulis, kuriame apibrėžiamos fizikinės, kraštinės sąlygos, apibrėžiami metodai ir algoritmai, kuriais bus sprendžiamas uždavinys
- CFD Post – modulis skirtas rezultatų vizualizavimui.

Formos sukūrimas

Pirmas žingsnis skysčių tekėjimo modeliavime yra apsibrėžti ir sukurti skysčio tėkmės geometriją. Ventiliacijos modeliavimo atveju dažniausia reikia nusibraižyti tikslų patalpos trimatį planą. Galima pasinaudoti vienu iš daugelio geometrijos braižymo priemonių. Nuspręsta pasinaudoti AutoCAD programiniu paketu braižant geometriją.

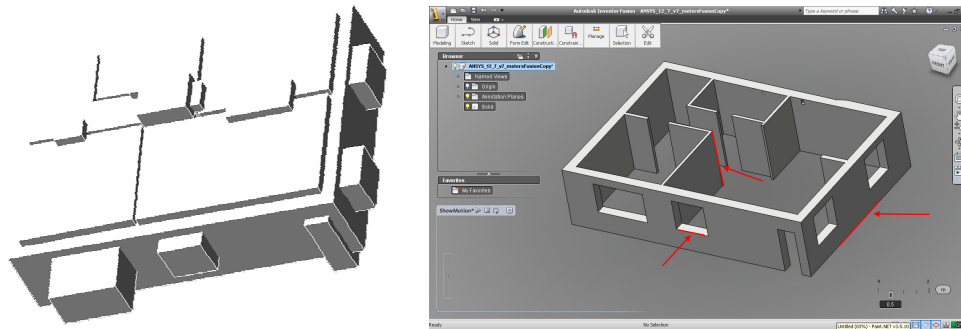
Nubraižius geometriją (4 pav.) AutoCAD pakete, pasinaudojant išstūmimo funkcija (*angl. extrude*), reikia geometrijos failą perkelti į ANSYS projektą. Šiam tikslui buvo naudojamas nemokamas AutoDesk kompanijos produktas Inventor Fusion 2012 Preview, kuris sugeba *.dwg failus konvertuoti į daugelį skirtingų duomenų formatų failus.



4 pav. Brėžinys AutoCAD programoje

Išeksportavus brėžinį iš AutoDesk Inventor Fusion 2012 Preview tinkamu DesignModeler formatu (*.igs), geometrijos failas atidarytas ICEM CFD tinklelio generavimo programa ir bandyta sugeneruoti tinklelį. Tinklelio generavimo metu procesas pranešdavo apie klaidą, kad geometrija yra nevientisa ir neįmanoma sugeneruoti vientiso tinklelio pateiktai geometrijai. Tokio pobūdžio klaidos dažniausiai sprendžiamos didinant tinklelio tankį, t.y. mažinti maksimalų elemento dydį, nustatant tarpų užpildymo parametrus, kas turi užpildyti mažus tarpus geometrijoje – tačiau visi šie atitinkamų parametrų nustatymai nedavė teigiamo rezultato. Kai viena iš alternatyvų yra perbraižyti geometriją (5 pav. *kairėje*), naudojant aibių skirtumo funkciją (*angl. subtract*), kad

nekiltų problemų dėl nevientiso geometrijos objekto. Dažniausiai klaidos dėl nevientisos geometrijos išsprendžiamos įvykužius šiuos pakeitimus, tačiau konkrečiai šios formos kūrimo metu klaidos kartojosi, nors ir kitose geometrijos taškuose (5 pav. dešinėje) – kas iš tikro neatitiko situacijos. [Ans09D] [Ans09T] [Ans09M]



5 pav. Brėžinys AutoCAD (kairėje) ir AutoDesk Inventor Fusion 2012 Preview (dešinėje) programiniuose paketuose

Jeigu programinis paketas nepilnai palaiko trečios šalies duomenų failus, tai dažniausiai formos kūrimas atliekamas modeliavimo paketo modulyje, šiuo atveju - ANSYS DesignModeler ir jame esančiomis priemonėmis. Braižymas DesignModeler įrankiu skiriasi nuo standartinių CAD programinių paketų, nes braižymas jau orientuotas į sekantį modeliavimo etapą – tinklelio generavimą. Formos kūrimo etape reikia nubraižyti skirtingą geometriją kiekvienai ventiliacijos schemai - konkrečiu atveju nubraižyti 3 skirtingi brėžiniai, su kuriais vėliau bus modeliuojama.

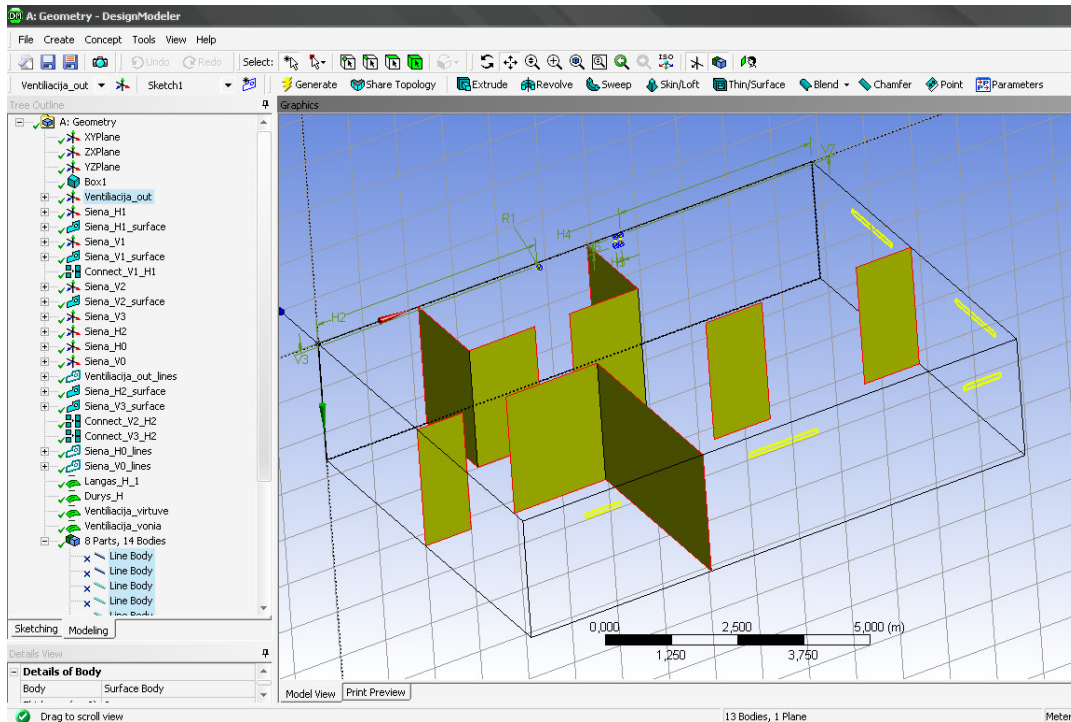
Trumpai apibendrinant kontūro brėžimą, galima išskirti tokius pagrindinius brėžinio kūrimo etapus:

- Nubrėžiamas pagrindinis elementas – stačiakampis, kuris yra viso buto kontūras;
- Nubrėžiamos ventiliacijos angų formos ant stačiakampio sienų ir tada sukuriami atskiri paviršiai ant stačiakampio sienų – tai oro ventiliacijos angos;
- Sukuriamos atskiros plokštumos, ant kurių nubrėžiamos sienų formos ir tada iš formų sukuriami paviršiai. Sienos sujungiamos per lietimosi kraštines;

- Lygiai taip pat, kaip ir vidinės sienos, sukuriami ir radiatorių paviršiai;
- Pašalinami visi nereikalingi geometrijos elementai: linijos, eskizai, kurie neturi dalyvauti modeliavime;
- Visi modeliavimui reikalingi geometrijos elementai sujungiami į vieną dalį;
- Skirtingai ventiliacijos schemai reiktų nusibraižyti ir skirtingą geometrijos brėžinį, nes papildomos linijos ar kitos geometrinės figūros įtakos tinklelio struktūrą ir tai įtakos sprendimą;
- Visi geometrijos brėžiniai buvo išeksportuoti iš DesignModeler paketo kaip atskiri geometrijos duomenų failai, tam, kad juos būtų galima panaudoti ar pakeisti bet kuriame modulyje;

Nors ANSYS DesignModeler modulis yra specifinis įrankis, tačiau jis turi keletą labai svarių pranašumų palyginus su kitomis geometrijos braižymo priemonėmis:

- Geometrija gali būti keičiama viso projekto ribose, nes pavyzdžiui pakeitus geometriją, galima atnaujinti tinklelį ir vėl perskaiciuoti uždavinį praktiškai nieko papildomai nekonfigūruojant;
- DesignModeler įrankis suderinamas su daugeliu CAD sistemų, tačiau kai kuriais atvejais – trūksta stabilumo apdorojant trečios šalies sugeneruotus geometrijos duomenų failus.
- Geometrijos braižymas DesignModeler įrankiu yra orientuotas į sekančią projekto stadiją – tinklelio kūrimą, todėl nors geometrija ir braižoma specifiškai, tačiau ji dažniausiai būna optimizuota ir pritaikyta tinklelio generavimui, ko negalima pasakyti apie importuojamus CAD failus, kuriuos dažniausiai reikia keisti ar optimizuoti.



6 pav. Patalpos brėžinys DesignModeler pakete su visais elementais (kairėje)

Tinklelio (angl. „mesh“) generavimas

Nusibražius skirtingus patalpos brėžinius reikia sugeneruoti ir tinklelius visiems geometrijos failams. ANSYS programinio paketo ICEM CFD modulis suteikia galimybę generuoti įvairaus tipo tinklelius, kuriuos galima suskirstyti į dvi grupes: tetraedrų ir šešiasienių pagrindu sugeneruoti tinkleliai, bet šiuose tinklelių tipuose pasitaiko ir kitų geometrinių figūrų: piramidžių ar prizmių, kad pilnai suskaidyti objektą į atskirus elementus. Labai svarbu, kokio tipo tinklelis yra tinkamiausias ventiliacijos modeliavime, nes skirtingi tinklelio tipai pasižymi skirtingomis savybėmis:

- Tetraedrų pagrindu sugeneruoto tinklelio pagrindinės savybės: bet koks tūrinis objektas gali būti suskaidytas į tetraedrus, dažnai naudojamas sudėtingų geometrinių figūrų tinklelių generavime. Tiksliai atspindi kraštines sąlygas -

pavyzdžiui sienas, tačiau praktiškai neįmanoma tinklelio elementų išrikiuoti pagal tekėjimo kryptį. Nelabai tinkamas plonų kūnų tinklelių generavime;

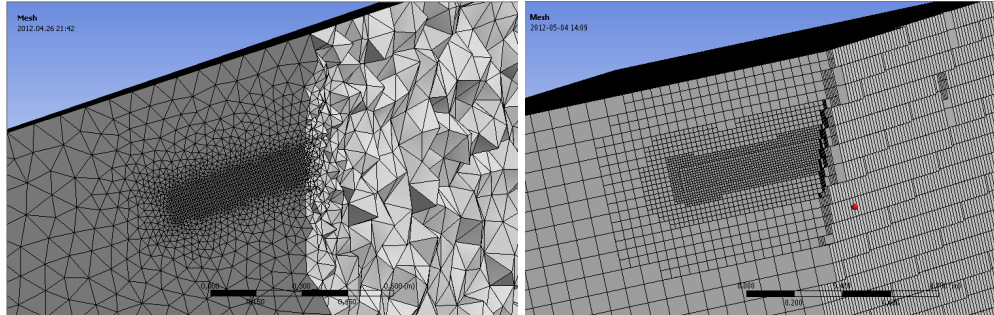
- Šešiasienių pagrindu sugeneruoto tinklelio pagrindinės savybės: rekomenduojamas, kai geometrija nėra lenkta, kai geometrijos vidinis tūris yra didelis, dažniausiai turi daugiau negu 2 kartus mažiau elementų, negu tetraedrų pagrindu generuotas tinklelis. Elementai išrikiuoti pagal skysčio tekėjimo kryptį, tačiau nerekomenduojamas ploniems ir sudėtingiems objektams. Automatiškai neatsižvelgiama į kraštines sąlygas; [Ans09M] [Ans09F]

Nors skysčių modeliavime dažniausiai naudojami tetraedrų pagrindu sugeneruoti tinkleliai, tačiau pagal tinklelių tipo palyginimą tampa aišku, kad ventiliacijos modeliavimui tikslingiausia naudoti šešiasienių pagrindu sugeneruotą tinklelį.

Norint išnaudoti šešiasienių tinklelio pranašumus ir šešiasienių tinklelį palyginti su tetraedrų pagrindu sugeneruotu tinkleliu, kiekvienam brėžiniui generuojami du skirtingi tinkleliai. Nors tinklelių generavimo metu gali būti naudojami skirtingi jų tipai, tačiau pagrindiniai tinklelių generavimo parametrai turėtų būti panašūs:

- Perėjimo tipas (*angl. relevance center*): švelnus. Šis parametras nurodo kaip bus organizuojamas sąryšis tarp skirtingo dydžio figūrų. Pasirinkta šio parametro reikšmė, nes modeliuojant oro srautus, ypatingai artėjant prie kraštinių sienų, nepageidautinas oro srautų lūžimas;
- Tinklelio išlyginimo parametras (*angl. smoothing*): maksimalus. Šis parametras siekia pagerinti elementų kokybę, perkelti elementų mazgus vietas atsižvelgus į aplinkinius mazgus;
- Elementų dydis: maksimalus: 0,08 m., minimalus: 0,01 m. Šis parametras nurodo kokio dydžio elementai galimi sugeneruotame tinklelyje, bet generuojant tetraedrų tinklelį, šio parametro maksimali reikšmė buvo parinkta 0,1 m., nes sugeneruoto tinklelio kokybė ir dydis buvo daug geresni, negu naudojant 0,08 m. maksimalų elemento dydį;
- Naudota papildoma elementų dydžių apibrėžimo funkcija (*angl. proximity and curvature*), kuri atsižvelgdama į paviršių kreivumą ir artumą, bei parenka tinkamiausią elemento dydį; [Ans09M] [Ans09F]

Skirtingomis technologijomis sugeneruotus tinklelius, reikia palyginti pagal jų pagrindinius kokybes parametrus, nes tinklelio kokybė įtakoja tiek uždavinio sprendinio kokybę, tiek sprendimo efektyvumą.



7 pav. Tetraedrų (kairėje) ir šešiasienių (dešinėje) pagrindu sugeneruotas tinklelis

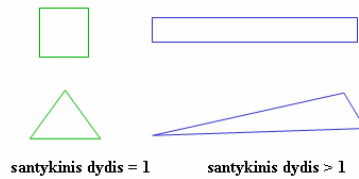
Pagrindiniai tinklelių kokybės parametrai, kurie naudojami tinklelio kokybei įvertinti modeliuojant ventiliaciją, yra du: asimetriškumas (*angl. Skewness*) ir santykinis dydis (*angl. Aspect ratio*).

Asimetriškumas iš esmės pasako, kiek figūros yra asimetrinės. Kuo mažesnis asimetriškumo laipsnis, tuo greitesnis uždavinio sprendinio konvergavimas ir didesnis jo tikslumas. Nors ANSYS FLUENT paketas kai kuriais atvejais sugeba susidoroti ir su prastos kokybės tinkleliu (kai asimetriškumas būna ~0.98), tačiau vis dėl to reiktų stengtis, kad tinklelio asimetriškumo parametras nebūtų didesnis negu 0,95. [Ans09M] [Ans09F]

0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.95	0.95-0.98	0.98-1.00*
puikus	labai geras	geras	patenkinamas	blogas	netinkamas

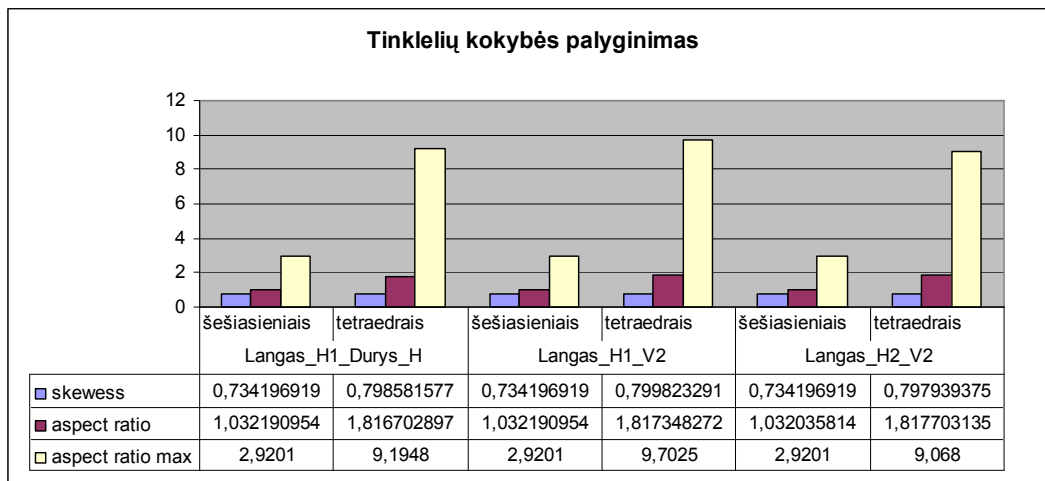
8 pav. Asimetriškumo parametru įvertinimas

Santykinis dydis nusako kiek elemento ilgiausias sienos kraštas yra ilgesnis už trumpiausią sienos kraštą. Šis dydis pageidautina, kad būtų kaip galima mažesnis.



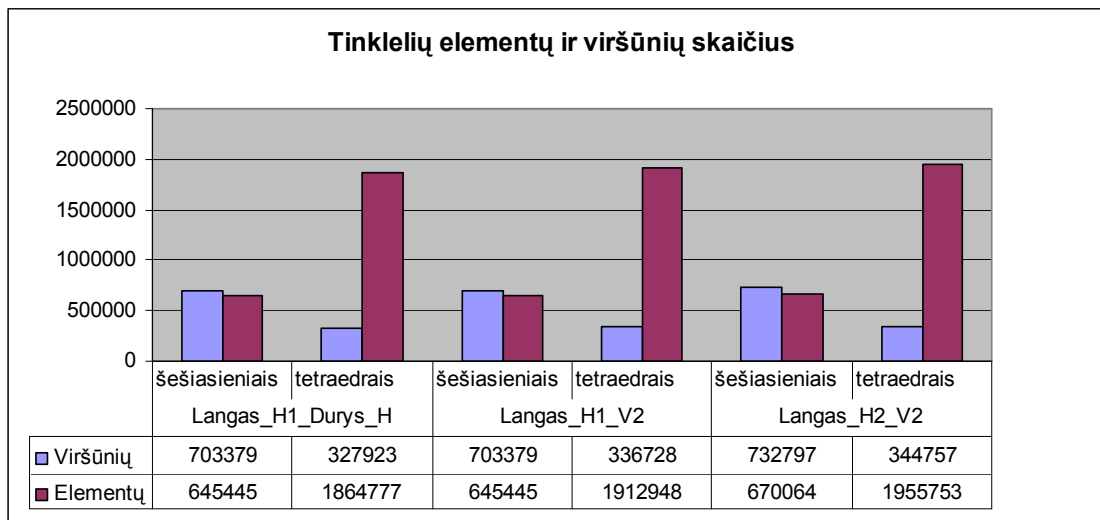
9 pav. Santykinio dydžio nustatymo pavyzdys

Lyginant tetraedrų ir šešiasienių pagrindu sugeneruotus tinklelius pagal anksčiau aprašytus palyginimo kriterijus, matoma, kad šešiasienių pagrindu sugeneruotas tinklelis yra geresnės kokybės, todėl ir tikslesnių rezultatų galima tikėtis uždavinių skaičiuojant šiuo tinkleliu. Šešiasienių pagrindu sugeneruoto tinklelio kokybė yra tikrai gera ~0.734, kai tetraedrų tinklelio kokybė yra tik patenkinama ~0.8. Taip pat pastebėtina, kad kai kuriose tetraedrų tinklelio vietose elementai yra netgi labai ištempti, kas neigiamai paveiks sprendinio tikslumą, nes ANSYS FLUENT sprendiklis naudoja elementų centrą kaip sprendiklio objektą – panašiai bus įtakojami ir kitų programinių paketų sprendikliai.



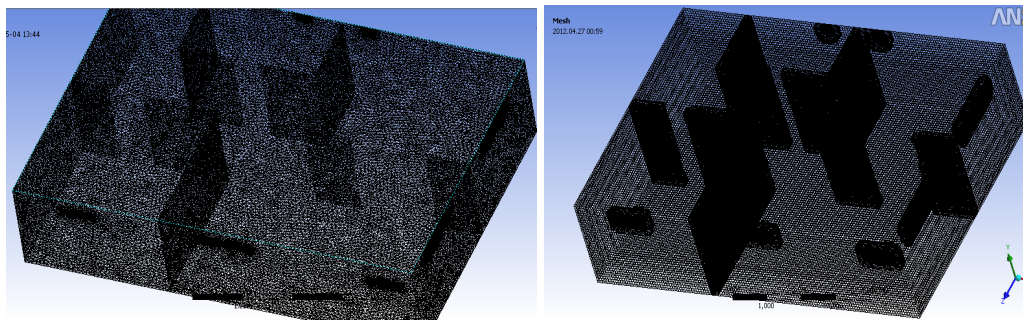
1 lentelė. Šešiasienių ir tetraedrų pagrindu sugeneruotų tinklelių kokybės parametrai

Didelę įtaką skaičiavimo našumui turi elementų skaičius tinklelyje – kuo daugiau elementų, tuo daugiau skaičiavimo užduočių sprendikliui, o lyginant tetraedrų ir šešiasienių pagrindu sugeneruotus tinklelius akivaizdu, kad šešiasienių pagrindu sudarytas tinklelis turėtų būti daug efektyvesnis skaičiavimo metu.



2 lentelė. Šešiasienių ir tetraedrų pagrindu sugeneruotų tinklelių elementų ir viršūnių skaičiaus palyginimas

Elementų skaičius įtakoja ir sugeneruotų tinklelių dydį, kas taip pat skaičiuojant pareikalaus papildomos atminties. Pastebėta, kad kai tinklelio failo dydis viršija 150 MB tiek sprendiklio, tiek tinklelio generavimo modulis pradeda dirbti nestabiliai – paprasčiausiai išsijungdami – kas gali būti siejama su operatyviosios atminties trūkumu, nes tuo metu buvo jos naudojama ~90%.



10 pav. Tetraedrų (kairėje) ir šešiasienių(dešinėje) pagrindu sugeneruotas tinklelis, pateikiamas struktūrinio karkaso peržiūros lange

Apibendrinant šį skyrių, galima pateikti pagrindines gaires ventiliacijos modeliavimo tinklelio kūrimo etapui:

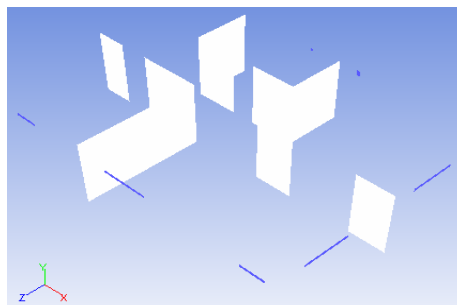
- reikia apsisrašyti visus reikalingus objektus, kurie bus naudojami skaičiavime kaip kraštinės sąlygos;
- oro srautų modeliavime galima naudoti tetraedrų pagrindu paremtą tinklę, tačiau skaičiavimai atliekami ilgiau negu šešiasienių pagrindu sugeneruotu tinkleliu, nors rezultatai praktiškai tie patys – konkrečiu atveju maždaug 4 kartus ilgiau;
- oro srautų modeliavimui geriau naudoti šešiasieniais paremtą tinklę, nes jis dažniausiai būna orientuotas greičio vektoriams;
- įvertinti sugeneruoto tinklelio kokybės parametrus. Didžiausias galimas asimetriškumo dydis FLUENT sprendikliui 0.95;
- naudoti atitinkamas tinklelio dydžio funkcijas - apibrėžti tinklelio paviršių dydžius, kas pagerina tinklelio kokybę ir pasiekiamas didesnis sprendinių tikslumas;

Fizikinių aplinkybių ir skysčio savybių apibrėžimas

Sugeneravus tinklą, reikia apibrėžti skysčio – ventiliacijos modeliavimo atveju oro, fizikines savybes, bei apibrėžti papildomas fizikines aplinkybes, tokias kaip laisvo kritimo pagreitis atitinkamai koordinatinių krypties vektoriams: -9.81 m/s^2 . Svarbiausiai apibrėžti tik didžiausią įtaką turinčius parametrus, nes modelis, kuris yra perkrautas parametrais gali tapti nestabiliu ir sprendinys gali nekonverguoti. Oro srautų modeliavimo atveju, kai skaičiuojamos energijos ir šilumos perdavimo lygtys slėgio sprendiklio atžvilgiu, užtenka apibrėžti šiuos pagrindinius oro parametrus: tankis= 1.225 kg/m^3 , specifinė šiluma= 1006.43 J/(K*kg) , šilumos laidumas= 0.0242 W/(m*K) , dinaminis klampumas= $1.7894\text{e-}05 \text{ kg/(m*s)}$. Nustatytas ir betoninių sienų parametras - šilumos laidumas= 1.5 W/m*K . [Air12] [List12]

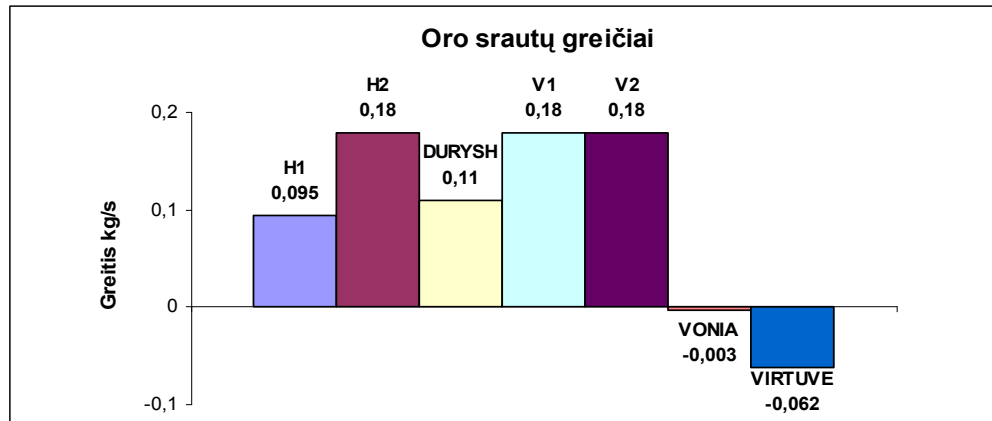
Srities apibrėžimai ir kraštinės sąlygos

Svarbu teisingai nustatyti ir kraštines sąlygas, kurios nusakys kaip oro srautai judės kontūre. Patalpų modeliuose, kuriuose yra vidinės sienos – jos apibrėžiamos kaip kraštinės sąlygos, atskiri paviršiai pažymimi kaip oro patekimo ir išėjimo angos – ventiliacijos angos, bei pro jas ištekantys ir patenkantys oro kiekiai. Apibrėžiant sienų kraštines sąlygas, galima nurodyti ir jų temperatūrą, bei šilumos išskyrimo koeficientą - tikintis tiksliau atvaizduoti ventiliacijos efektyvumą skirtingose patalpos zonose.



11 pav. Apibrėžtos kraštinės sąlygos – vidinės sienos ir ventiliacijos angos

Nors dažniausiai pro oro ventiliacines angas, natūralios ventiliacijos sistemoje, ištekancio oro kiekis yra nedidelis, tačiau šių ištekėjimo srautų ignoruoti negalima, nes jie įtakoti oro srautų dinامينius pasikeitimus, kas gali įtakoti ir ventiliacijos efektyvumą.



3 lentelė. Ventiliacinių angų oro srautų greitis

Lygčių sprendimo inicijavimas ir kontrolė

ANSYS FLUENT sprendiklis yra pagrįstas baigtinių tūrių metodu, kai sritis yra suskaidoma į baigtinę aibę tūrinių elementų, tada sprendžiamos energijos, masės, momento lygtys, diskretizavus dalinėmis išvestinėmis ir sprendžiant jas skaitiškai - taip generuojant reikšmių sritis. Pakete lygtis galima spręsti remiantis slėgiu arba tankiu. Plačiausiai naudojamas slėgiu paremtas sprendiklis, nes jis tinkamas daugelyje sričių, tačiau, kai yra didelė tarpusavio priklausomybė tarp tankio, energijos, ar greičio, kaip pavyzdžiui: dideliu greičiu judančio spūdaus skysčio degimas – tada naudojamas tankiu paremtas sprendiklis. Modeliuojant ventiliacijos sistemas, pagal šias sąlygas, pasirenkamas slėgio pagrindu paremtas sprendiklis, kuris sprendžia energijos, turbulencijos ir šilumos perdavimo lygtis. [Ans09F] [Ans09U]

Turbulencijos lygčių sprendimui pakanka naudoti Spalart-Almaras modelį, kuris yra palyginus paprastas vienos lygties modelis ir pritaiko sienų funkcijas, kai tinkamo kokybė nėra labai gera. Šis modelis tinkamas kai turbulenciniai skaičiavimai nėra kritiniai modeliuojamoje sistemoje. Šilumos perdavimas yra svarbus modeliuojamoje

sistemoje, todėl pasirenkamas DO³ modelis, nes jis atsižvelgia į šilumos perdavimą tarp dujų ir kietųjų dalelių, taip pat tinkamas kai modeliuojamoje sistemoje yra pastovus šilumos šaltinis. [Ans09F]

Naudojant slėgiu paremtą sprendiklį, reikia nurodyti, koks bus naudojamas algoritmas slėgio-greičio apjungimui. ANSYS FLUENT programiniame pakete galimi šie algoritmai: SIMPLE, SIMPLEC, PISO, Coupled, kurie pasižymi savybėmis:

- SIMPLE – standartinis algoritmas modelis, tinkamas pastovių srautų modeliavimams;
- SIMPLEC - dažniausiai naudojamas, kai sprendinys priklauso tik nuo slėgio ir greičio sąveikos, t.y. nenaudojami papildomi modeliai, todėl dažniausiai sprendinys konverguoja greičiau, nes skaičiavimai supaprastinami;
- PISO - naudojamas pereinamųjų arba nestabilių srautų skaičiavimuose, arba naudojant prastos kokybės tinklą. Ventiliacijos modeliavimo atveju šis algoritmas nėra tinkamas;
- Coupled - išsiskiria tuo, kad kiti algoritmai atskirai skaičiuoja lygtis, o šis metodas apjungia jas ir skaičiuoja vienu metu. Tai leidžia panaudojus šį metodą gauti gana greitą ir tikslų sprendinį paprastoms sistemoms. [Ans09F]

Oro srautų modeliavime Coupled metodu gaunamas greitas ir tikslus uždavinio skaitinio sprendinio konvergavimas, nors alternatyviai galima naudoti ir SIMPLE algoritmą. Svarbu pasirinkti tinkamą interpoliacijos metodą, kuris lauko kintamuosius (celių centre) interpoliuos į tūrių paviršius. ANSYS FLUENT pakete galimi šie metodai:

- Pirmos eilės – greičiausias, tačiau netinkamas naudoti galutiniams skaičiavimams. Su juo gali būti atliekami pradiniai skaičiavimai patikrinti modelio korektiškumui.
- Antros eilės – interpoliacijos metodas, dažniausiai naudojamas su ketursienių tinkleliu ir tada kai tinklelis nėra simetriškas skysčių srautams. Šis metodas konverguoja gana lėtai.

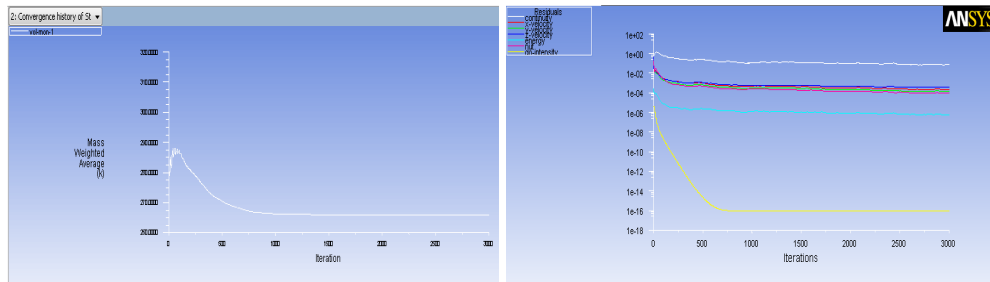
³ Discrete Ordinates

- MUSCL – trečios eilės interpoliavimo metodas nestruktūriniam tinklėliams, tiksliau prognozuoja antrinius srautus, sūkurius.
- QUICK (kvadratinė) – taikoma kvadratų, šešiasienių ir mišrių tinklėlių skaičiavime. Dažnai taikomas rotacinių sūkurinių skysčių tekėjimo srautams modeliuoti. [Ans09F]

Antros eilės metodas yra universaliausias ir suteikia galimybę palyginti skirtingas tinklėlio technologijas, nes tikėtina, kad šešiasienių pagrindu sugeneruotame tinklėlyje skaičiavimai vyks kur kas greičiau naudojant QUICK interpoliacijos metodą. Sprendiklis reikalauja nurodyti ir gradiento apskaičiavimo algoritmą, kuris apskaičiuoja difuzinius srautus, greičio išvestines. Galimi šie metodai: Green-Gauss Cell-Based, Green-Gauss Node-Based, Least-Squares Cell-Based. Pirmi du metodai remiasi Green-Gauss teorema, tik gradientas skaičiuojamas skirtingai. Least Squares Cell based metodas dažniausiai naudojamas nestruktūriniam tinklėliams, kai skaičiavimo metu reikalingos tinklėlio rekonstrukcijos. Oro srautų modeliavime gali būti naudojamas Green-Gauss Cell-Based gradiento apskaičiavimo algoritmas. Galima naudoti Least-Squares Cell-Based algoritmą - kai tinklėlis yra tetraedrų pagrindu, tačiau tai algoritmas netinkamas šešiakampių tinklėlio atveju, nes reiktų atliktų daugiau skaičiavimų visiškai neišnaudojant šešiasienių tinklėlio privalumų, tokių kaip: simetriškumo skysčio srautams ir struktūrizuotumo - kas labai pagreitina gradiento radimą pagal kitus elementus tinklėlyje. [Ans09F] [Ans09U]

Susiejimo stebėjimas

Nėra vieno universalaus kriterijau, kuris vienareikšmiškai atsakytų ar uždavinio sprendinys konverguoja. Kaip vienas iš uždavinio sprendinio konvergavimo kriterijų, gali būti kažkurio stebimo-dominančio parametro nusistovėjimas. Taip pat gali būti stebimi ir lygčių sprendinių liekamieji nariai (paklaidos), kurie visi turėtų nusistovėti tarp 10^{-3} ir 10^{-6} , bet jeigu pradiniai parametrai yra užduodami artimi sprendiniui, tai šiuo metodu vienareikšmiškai tikrinti konvergavimo negalima. [Ans09F] [Ans09U]



12 pav. Vidutinė masės temperatūra (kairėje) ir liekamųjų narių (dešinėje) grafikai

Reikia stebėti ir tokius parametrus, kaip bendras šilumos pasidalijimo koeficientas, kuris turėtų būti kaip galima santykinai mažesnis lyginant su šilumos apsikeitimo kiekiais. Pavyzdžiui vieno paskaičiuoto modelio atveju, šilumos perdavimo koeficientas gaunamas: -4.2277566 , kai vien to modelio oro temperatūros perdavimo koeficientas yra -746 - gaunasi paklaida $\sim 0.56\%$, kas iš tikro yra gana gerai. [Ans09F]

Ventiliacijos modeliavime vieni iš svarbiausių parametrų konvergavimo tikrinimui yra nusistovėjusi vidutinė temperatūra, bei liekamųjų narių nusistovėjimas arba mažėjimo tendencija. Liekamųjų narių nusistovėjimo tendencija galima, kai pradinių duomenų paskaičiavimas – vidutinė temperatūra, nuo konverguojančios sprendinio reikšmės skiriasi nežymiai. [Ans09F]

Skaičiavimai buvo vykdomi su kompiuteriu, kurio pagrindiniai parametrai šie:

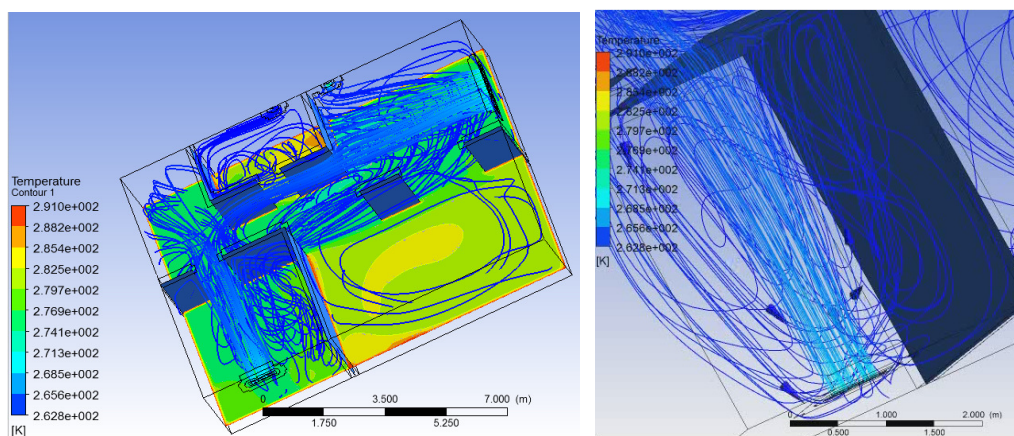
- Operacinė sistema: Windows XP 32-bit Service Pack 3
- Procesorius: Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU P8400 @ 2.26GHz
- Operatyvioji atmintis: 3 GB @ 800 MHz

Kaip matoma iš techninių parametrų, tai nėra našus kompiuteris, todėl sprendinių skaičiavimai vyko ilgai. Pirmieji modeliavimai vykdyti su 5000 iteracijų, bet pastebėjus, kad uždavinio sprendinys gali konverguoti anksčiau - todėl reiktų periodiškai stebėti konvergavimo kriterijus ir jeigu jie tenkina aprašytas sąlygas – stabdyti iteracinį skaičiavimą\ sutaupant daug laiko.

Rezultatų pateikimas ir vizualizavimas

Apskaičiuotus uždavinio sprendinį, gautus rezultatus galima tinkamai vizualizuoti. Programinio paketo ANSYS CFX-POST modulis yra vienas iš patogiausių viso programinio paketo įrankių, nes pakankamai intuityvus ir paprastas. Šis įrankis sugeba vizualizuoti kontūrus, oro srautus, vektorius, tūrinius kontūrus, daleles, galima animuoti.

Ventiliacijos efektyvumo nustatymui svarbiausia yra oro srautų vektorių ir temperatūros kontūrų vizualizavimas.[Xub08][FM96] [Ans10]



13 pav. Gautų rezultatų vizualizavimas: oro srautai bei temperatūros kontūras (kairėje) ir oro srautų animacijos kadras (dešinėje)

Modelio verifikavimas, validavimas ir patikslinimas

Atlikus pirmuosius skaičiavimus arba skaičiavimų inicializacijas, dažnai dėl įvairių priežasčių reikalingas modelio koregavimas. Konkrečiu atveju, inicijuojant pradinių reikšmių paskaičiavimą ar uždavinio skaičiavimo metu sprendiklio procesas išsijungdavo, nepranešdamas apie klaidą. Klaidos priežasčių dokumentacijoje neradus, stebėtas operatyviosios atminties išnaudojimas, kuris piko metu išnaudodavo ~87% operatyviosios atminties šių procesų vykdymo metu, todėl kaip galima priežastis buvo nepakankamas operatyviosios atminties kiekis. Tokio tipo problemoms spręsti galima

koreguoti modelį, kad būtų sumažintas operatyviosios atminties panaudojimas skaičiavimų metu. Skaičiavimų metu operatyviosios atminties panaudojimą lemia daugelis faktorių, tačiau pirmiausia reiktų patikrinti, kiek atminties išnaudoja atskiri modelio parametrai: naudojamas tinklelis, sprendiklio slėgio-greičio apjungimo algoritmas, interpoliavimo metodas, diskretizavimo metodas, skaičiuojamas lygtys. Daug atminties dažniausiai sunaudojama taikant greitus skaičiavimo algoritmus, nes pavyzdžiui Coupled algoritmas dažniausiai pareikalauja 1,5-2 kartų daugiau operatyviosios atminties skaičiavimams atlikti, nei standartinis SIMPLE algoritmas – kas buvo pagrindinė problema ir šiuo konkrečiu atveju.

Operatyviosios atminties trūkumo problemos gali pasireikšti vykdant skaičiavimus tetraedrais paremtu tinkleliu, nes palyginus tetraedrų ir šešiasienių pagrindu sugeneruotų tinklelių parametrus, galima pastebėti du pagrindinius skirtumus:

1. tetraedrų pagrindu sugeneruoto tinklelio kokybės parametras aspect ratio max vidutiniškai yra 3,35 karto didesnis už šešiasienių pagrindu generuotą tinklėlį (*1 lentelė*).
2. tetraedrų pagrindu sugeneruotas tinklelis turi vidutiniškai 3 kartus daugiau elementų nei šešiasienių pagrindu generuotas tinklėlį (*2 lentelė*).

Akivaizdu, kad elementų skaičius yra reikšminis, nes didelė parametro aspect ratio reikšmė lėtina uždavinio sprendinio konvergavimą, tačiau nenaudojama daugiau operatyviosios atminties. Taip pat, kai elementų tinklelyje skaičius viršija milijoną, reikia naudoti lygiagretųjį skaičiavimą, nors ir išnaudojant vieną procesorių. [Ans09U] [Ans09T]

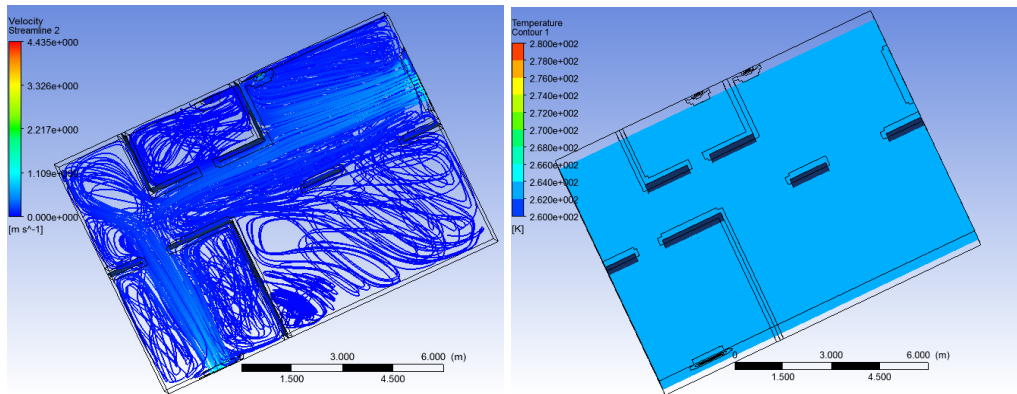
Konkrečiai modeliuojamos sistemos atžvilgiu pasirinkta naudoti šešiasienių pagrindu sugeneruotą tinklėlį, bei vieno proceso lygiagretųjį skaičiavimą, nes dviejų procesų lygiagretusis skaičiavimas šios architektūros atveju nebūtų našiau, nes nepakankamas operatyviosios atminties.

Validavimas ir verifikacija yra svarbūs etapai modeliavimo procese. Viena iš validavimo priemonių yra ANSYS FLUENT pakete, kuri yra pasiekama ir rekomenduojama prieš pradėdant skaičiavimus. Įvykdžius šias procedūras pranešama, kad nepakeisti kai kurie standartiniai parametrai: tokie kaip absorbcijos parametras betoninėms sienoms, kuris ventiliacijos modeliavime yra nereikšmingas. Validuoti ar

teisingai parinkti matematiniai modeliai ir algoritmai sudėtingas uždavinys, todėl reikalinga ir verifikacija, kuri padės įvertinti modelio korektiškumą.

Pirmasis modelis, kuriam atlikti skaičiavimai, neturėjo šilumos šaltinio ir tai yra trūkumas bandant identifikuoti kaip oro srautai įtakoja oro temperatūros patalpose (*1 pav.*).

Šiam tikslui pasiekti galimi du būdai: pridėti bendrą šilumos šaltinį, pavyzdžiui visoms sienoms – kas parodytų ventiliacijos efektyvumą visame patalpos kontūre esant vienodoms šiluminėmis sąlygoms, arba atitinkamose brėžinio vietose nustatyti radiatorius. [Ans09F]



14 pav. Oro srautų modelis (kairėje) ir temperatūros pasiskirstymas (dešinėje), kai nėra šilumos šaltinio

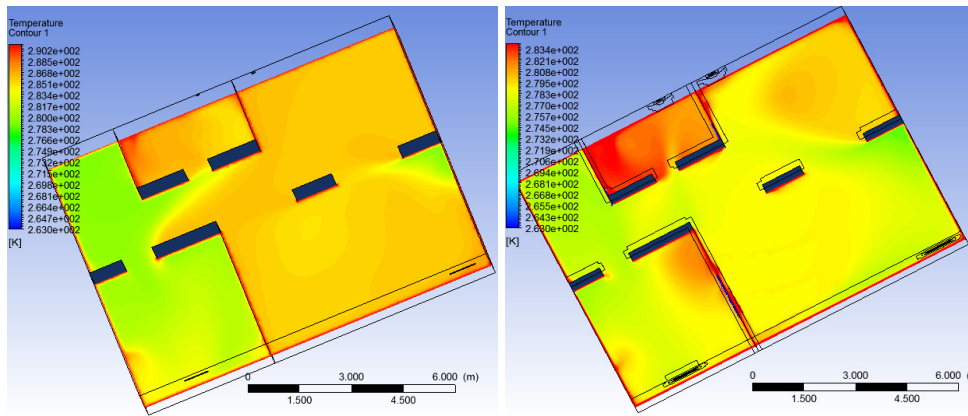
Reikia stebėti ir skaičiavimo proceso trukmę vienodiems modeliams, tik naudojant skirtingos struktūros tinklelius: tetraedrų ir šešiasienių pagrindų generuotiems tinkleliams.

Tinklelis parentas	Viršūnių	Elementų	Elementų skaičiaus santykis	5000 iteracijų skaičiavimo laikas	Skaičiavimo laiko santykis
šešiasieniais	703379	645445	1	20h 17min	1
tetraedrais	327923	1864777	2,89	85h 32min	4,21

5 lentelė. Skirtingų tinklelių parametrai ir skaičiavimo laikai

Iš duomenų (5 lentelė) matoma, kad tinklelio tipas labai smarkiai įtakoja skaičiavimo efektyvumą, nors uždavinio modeliavimo rezultatai yra panašūs (14 pav.).

Gauti rezultatai atitinka ir stebėjimų duomenis, todėl toliau, ir apskritai ventiliacijos modeliavimui, geriau naudoti šešiasienių pagrindu sugeneruotus tinklelius. [Ans09F]



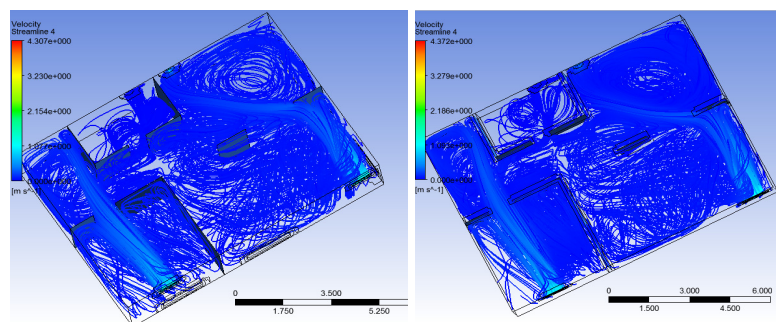
14 pav. Temperatūrų kontūras tetraedrų (kairėje) ir šešiasienių (dešinėje) pagrindu paskaičiuotuose modeliuose

Apibendrinant šiame skyriuje atliktus pakeitimus, kurie dažnai aktualūs ir kitiems ventiliacijos modeliavimo atvejams yra šie:

- Oro srautų modeliavimui patalpose tinkami yra abu tinkleliai: tetraedrų ar šešiakampių pagrindu generuoti tinkleliai, tačiau jeigu nesiekama labai tikslių rezultatų, pranašesnis efektyvumo atžvilgiu yra šešiakampių pagrindu paremtas tinklelis.
- Ventiliacijai modeliuoti reikalingas šilumos šaltinis, kad būtų galima išskirti prastai ventiliuojamas zonas temperatūrų atžvilgiu
- Modeliuojant reikia atsižvelgti į turimos kompiuterinės technikos parametrus, nes gali tekti keisti kai kuriuos algoritmus, skaičiavimo tipą. Šiuo atveju reikėjo naudoti lygiagretųjį vieno proceso skaičiavimo tipą ir pasirinkti slėgio-greičio apjungimo algoritimą - SIMPLE, kuris pareikalauja 1,5-2 kartų mažiau operatyviosios atminties, negu tinkamiausias ventiliacijos atveju Coupled metodas.

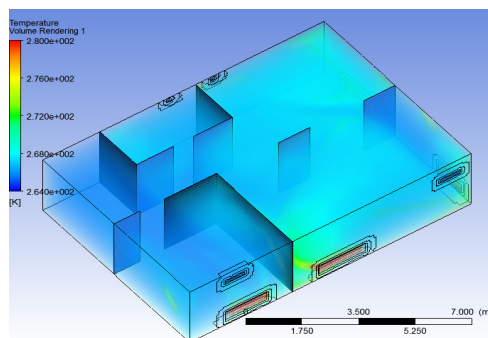
Gautų rezultatų analizė

Įvykdžius visus skaičiavimus, galima palyginti ir skirtingų ventiliacijos schemų efektyvumą ventiliuojant patalpas. Palyginus modelius, kuriems apskaičiuoti buvo naudojamos skirtingos šilumos šaltinio strategijos – šilumą skleidė radiatoriai arba sienos, modelio oro srautų ir temperatūrų kontūrai buvo labai panašūs, tačiau skyrėsi vidutinė temperatūra - kai buvo naudojamas radiatorius jos buvo mažesnės.



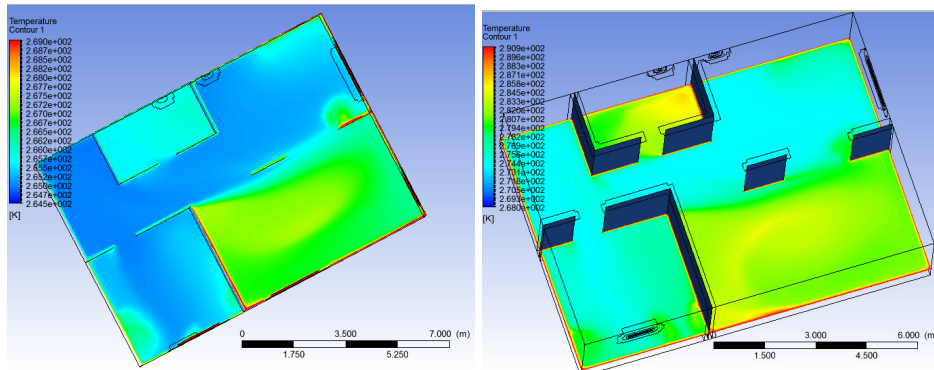
15 pav. Oro srautai ventiliacijos schemos Langas_H1_Durys_H atveju, kai šilumos šaltiniai yra radiatoriai (kairėje) arba sienos (dešinėje).

Lyginant pagal vidutinę temperatūrą tikslesnis modelis yra, kai šilumos šaltiniai naudojami radiatoriai, nes stebėjimų metu, kai ventiliavimo schema Langas_H1_Durys_H, nustatyta vidutinė patalpų temperatūra buvo -3°C , o modeliavimo metu apskaičiuota -7°C temperatūra. Ši temperatūrų skirtumą galima paaiškinti tuo, kad dalis šilumos perduodama ir iš kaimyninių butų, nes ne tik radiatoriai yra šilumos šaltiniai patalpoje – dalį šilumos spinduliuoja ir sienos.



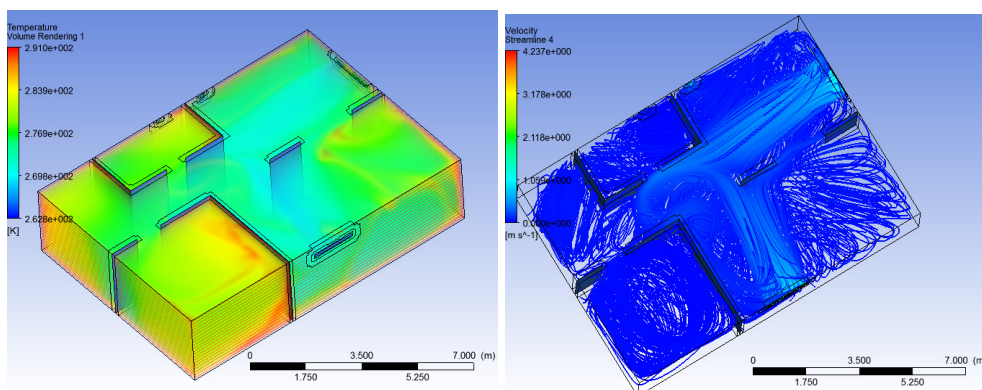
16 pav. Tūrinis temperatūros kontūras ventiliacijos schemos Langas_H1_Durys_H atveju, kai šilumos šaltiniai radiatoriai

Sumodeliavus ventiliacijos sistemą naudojant šilumos šaltinį sienas – vidutinė temperatūra būdavo daugiau už 0oC, , kuri neatitinka realios sistemos išmatuotų parametru, tačiau labai aiškiai parodo, kurios patalpos zonos ventiliuojamos neefektyviai



17 pav. Temperatūros kontūrai ventiliacijos schemos Langas_H1_V2 atveju, kai šilumos šaltiniai yra radiatoriai (kairėje) arba sienos (dešinėje).

Nesitikėta, kad prastas ventiliacijos efektyvumas bus, kai ventiliacijos schema yra Langas_H1_V2. Buvo tikimasi, kad tokia ventiliacijos schema efektyviai vėdins patalpas, bet susidaro oro srautas, kuris beveik neventiliuoja vienos iš patalpų - taigi ne visada skersinė ventiliacija yra efektyvi ir kartais jos reiktų netgi vengti. Modeliavimai patvirtino ventiliacijos schemos Langas_H2_V2 neefektyvumą – ko buvo tikimasi modeliavimo pradžioje.



18 pav. Tūrinis temperatūros kontūras (kairėje) ir oro srautai (dešinėje) ventiliacijos schemos Langas_H2_V2 atveju.

Išvados

Šiame darbe apžvelgtas skysčių dinamikos aktualumas ir šioje srityje sprendžiamos problemos. Viena iš aktualiausių skysčių dinamikos problemų yra patalpų ventiliacija.

Oro srautų problemų analizei ir sprendimams dažniausiai pasirenkamas kompiuterinis modeliavimas, nes tai yra paprasčiau, pigiau ir greičiau. Šiam tikslui yra sukurta daug programinių paketų, tačiau iš visų analizuotų programinių paketų, geriausiomis savybėmis pasižymėjo ANSYS programinis paketas, nes tai vienas iš funkcionaliausių ir plačiausiai naudojamų modeliavimo programinių paketų.

Šiuo programiniu paketu sumodeliuota konkreti ventiliacijos sistema, kurios uždavinio skaitinis sprendinys pagal pasirinktus parametrus nežymiai skiriasi nuo realių stebėjimo rezultatų. Nustatyta efektyviausia ventiliacijos schema, palygintos skirtingos šilumos paskirstymo strategijos, kurios oro srautus modeliuoja panašiai, tik skiriasi vidutinė temperatūra. Taip pat analizės ir modeliavimo metu nustatytos gairės, kurias galima panaudoti atliekant kitus ventiliacijos modeliavimus.

Geometrijos kūrime svarbiausia geometrijos paprastumas, tam tikslui pasieti geometrijos braižyme naudoti primityvus. Visus modeliavimo etapus, geriausia atlikti su tuo pačiu programiniu paketu, nes tada pasiekimas maksimalus stabilumas ir efektyvumas.

Oro srautų modeliavime galima naudoti tetraedrų pagrindu paremtą tinklę, tačiau šešiasieniais paremtame tinklėlyje skaičiavimai atliekami greičiau, nes šešiasienių tinklėlyje elementų yra kur kas mažiau, būna struktūrizuotas ir orientuotas greičio vektoriams. Tinklelio kokybė turi būti kaip įmanoma geresnė, kuri pasiekama apibrėžiant modelio sritis, naudojant atitinkamas tinklelio dydžio funkcijas.

Apibrėžiant fizikines aplinkybes, skysčio savybes ir kraštines sąlygas reikia nurodyti svarbiausius parametrus: šilumos šaltinių temperatūra, įtekančių oro srautų temperatūra ir greitis, medžiagų šilumos laidumas.

Lygčių sprendimo inicijavimo ir kontrolės etape reiktų nurodyti naudotis slėgio pagrindu paremtu sprendikliu ir skaičiuoti energijos, greičio ir šilumos laidumo lygtis.

Pasirenkant algoritmus reikia įvertinti turimos kompiuterinės technikos parametrus – jeigu galima naudoti apjungtus algoritmus slėgio-greičio skaičiavimui.

Konvergavimo stebėjime vidutinė temperatūra turi nusistovėti ir pakankamas tikslumas yra 10^{-3} . Taip pat srauto pusiausvyros reikšmė neturi būti didesnė negu 1% mažiausios ribinės reikšmės.

Literatūros sarakšas

1. [Rou08] Claude-Alain Roulet, "Ventilation and Airflow in Buildings. Methods for Diagnosis and Evaluation", 2008m
2. [GA05] C. Ghiaus, F. Allard, "Natural Ventilation in the Urban Environment. Assessment and Design", 2005m
3. [YL09] Francis W H Yik, Yu Fat Lun, "Energy saving by utilizing natural ventilation in public housing in Hong Kong", 2009m.
4. [JAC04] Jiang, Y., Allocca, C., and Chen, Q., "Validation of CFD Simulations for Natural Ventilation", 2004m
5. [HPA08] SH Hyun, CS Park, GLM Augenbroe, "Analysis of uncertainty in natural ventilation predictions of high-rise apartment buildings", 2008m.
6. [NT07] Jianlei Niu, Thomas Tung, "Ventilation Design in High-Rise Residential Buildings and Infectious Disease Spread", 2007m.
7. [Zha06] Zhiqiang Zhai, "Application of Computational Fluid Dynamics in Building Design: Aspects and Trends", 2006m.
8. [DFM96] Rick Diamond, Helmut Feustel, Nance Matson "Energy-Efficient Ventilation for Apartment Buildings", 1996m.
9. [LH06] Wang Liping, Wong Nyuk Hien, "Natural ventilation simulation with coupling program between building simulation (BS) and computational fluid dynamics (CFD) simulation program for accurate prediction of indoor thermal environment", 2006m.
10. [BHK07] M. Braubach, O. Hänninen, M. Krzyzanowski "WHO guidelines for indoor air quality: dampness and mould", 2007m.
11. [McW02] J. McWilliams, "Review of Airflow Measurement Techniques", 2002m.
12. [Nie04] P. V. Nielsen, "Computational fluid dynamics and room air movement", 2004m.
13. [LN11] Y. Li, P. V. Nielsen, "Commemorating 20 years of Indoor Air. CFD and ventilation research", 2011m.

14. [ONA11] I. Olmedo, P. V. Nielsen, M. Ruiz de Adana, R. L. Jensen, P. Grzelecki, "Distribution of exhaled contaminants and personal exposure in a room using three different air distribution strategies", 2011m.
15. [Bat02] G. K. BATCHELOR, F.R.S., "AN INTRODUCTION TO FLUID DYNAMICS", 2002m.
16. [Nag93] Niren L. Nagda, "Modeling of Indoor Air Quality and Exposure", 1993m.
17. [Xub08] TAN Jie YANG Xubo, "Physically-based Fluid Animation: A Survey", 2008m.
18. [FM96] N Foster, D Metaxas, "Controlling Fluid Animation", 1996m.
19. [DR06] P. G. Drazin, N. Riley „The Navje-Stokes equations: a classification of flows and exact solutions“, 2006m.
20. [TYL08] Jiyuan Tu, Guan Heng Yeoh, Chaoqun Liu „Computational Fluid dynamics a practical approach“, 2008m.
21. [Mcd09] J. M. McDonough „LECTURES IN ELEMENTARY FLUID DYNAMICS: Physics, Mathematics and Applications“, 2009m
22. [Sto09] Howard A. Stone „Fluid Dynamics: Physical ideas, the Navje-Stokes equations, and applications to lubrication flows and complex fluids“, 2004m.
23. [Pil07] Konstantinas Pileckas, „Navjė-Stokso lygčių matematinė teorija“, 2007m.
24. [Ans12] ANSYS, Inc. ANSYS - Simulation Driven Product Development [žiūrėta 2012-04-15]. Prieiga per Internetą: <<http://www.ansys.com/>>
25. [Par12] The MathWorks, Inc. Partial Differential Equation Toolbox <<http://www.mathworks.se/products/pde/index.html>>
26. [Elm12] CSC - IT Center for Science Ltd. Elmer Open Source Finite Element Software for Multiphysical Problems [žiūrėta 2012-03-31]. Prieiga per Internetą: <<http://www.csc.fi/english/pages/elmer>>
27. [Fre12] Laboratoire Jacques-Louis Lions, freeFEM.org [žiūrėta 2012-04-01]. Prieiga per Internetą: <<http://www.freefem.org/>>
28. [Map11] Google Inc. Google Maps

[žiūrėta 2012-02-10]. Prieiga per Internetą:

<<http://maps.google.com/>>

29. [Ans09T] ANSYS, Inc. „ANSYS troubleshooting guide”, Release 14.0, 2011m.
30. [Ans09F] ANSYS, Inc. „ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide”, Release 14.0, 2011m.
31. [Ans09U] ANSYS, Inc. „ANSYS FLUENT 12.0 User Guide”, Release 14.0, 2011m.
32. [Ans10] ANSYS, Inc. „ANSYS CFD-Post User's Guide”, Release 14.0, 2011m.
33. [Gor08] Gordon D. Stubley „Computational Fluid Dynamics for Fluids Engineering Design ANSYS CFX STUDENT USER MANUAL Version 11“, 2008 m.
34. [Ans09M] ANSYS, Inc. „ANSYS meshing help”, Release 14.0, 2011m.
35. [Ans09I] ANSYS, Inc. „ANSYS help manual”, Release 14.0, 2011m.
36. [Ans09D] ANSYS, Inc. „ANSYS DesignModeler”, Release 14.0, 2011m.
37. [Air12] „Air - Absolute and Kinematic Viscosity“
<http://www.engineeringtoolbox.com/air-absolute-kinematic-viscosity-d_601.html>
[žiūrėta 2012-03-14]. Prieiga per Internetą:
38. [List12] „List of thermal conductivities“
[žiūrėta 2012-03-14]. Prieiga per Internetą:
<http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_thermal_conductivities>
39. [Air12] „Air Properties“
[žiūrėta 2012-03-014]. Prieiga per Internetą:
<http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html>

Priedai

ANSYS akademinės licenzijos failas:

SERVER nerkohp DISK_SERIAL_NUM=a0e0e7e0 1055

VENDOR ansyslmd

Products licensed in this file:

1. ANSYS Academic Research (1 Task) 1 task(s) Lease expiring 01-Jun-2012

INCREMENT aa_mcad ansyslmd 9999.9999 01-jun-2012 1 D0B1AA86399D \

VENDOR_STRING=customer:00664610 ISSUER=AUFI_UNIV \

ISSUED=01-jan-2012 START=02-jan-2012

INCREMENT aa_r ansyslmd 9999.9999 01-jun-2012 1 095B36446175 \

VENDOR_STRING=customer:00664610 ISSUER=AUFI_UNIV \

ISSUED=01-jan-2012 START=02-jan-2012