



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Netipinės formos aukšto pastato vėjo slėgio į statinio paviršius analizė

Baigiamasis magistro projektas

Silvija Stukaitė

Projekto autorė

Lekt. dr. Nerijus Adamukaitis

Vadovas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Netipinės formos aukšto pastato vėjo slėgio į statinio paviršius analizė

Baigiamasis magistro projektas

Statybos inžinerija (6211EX008)

Silvija Stukaitė

Projekto autorė

Lekt. dr. Nerijus Adamukaitis

Vadovas

Lekt. dr. Nerijus Meslinas

Recenzentas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Silvija Stukaitė

Netipinės formos aukšto pastato vėjo slėgio į statinio paviršius analizė

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Silvijos Stukaitės, baigiamasis projektas tema „Netipinės formos aukšto pastato vėjo slėgio į statinio paviršius analizė“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GAMINIŲ INŽINERIJA

Baigiamojo projekto tema (lietuvių k.):
VĖJO POVEIKIO TYRIMAI AUKŠTIEMS PASTATAMS

Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanų potvarkiu Nr.: 2020 m. lapkričio 30 d. Nr. V25-09-18

(lietuvių k.):
NETIPINĖS FORMOS AUKŠTO PASTATO VĖJO SLĖGIO Į STATINIO PAVIRŠIUS ANALIZĖ

(anglų k.):
ANALYSIS OF WIND-INDUCED PRESSURE ON BUILDING SURFACE FOR ATYPICAL TALL BUILDING

Pradiniai duomenys darbui (pagal poreikį):

Išsirinkti tyrimų objektą.

Baigiamojo projekto dalys:

| | Atlikti |
|--------------------------|--------------------------|
| Įvadas | x |
| Literatūros apžvalga | x |
| Metodologija | x |
| Eksperimentiniai tyrimai | <input type="checkbox"/> |
| Analitiniai tyrimai | x |
| Skaitiniai tyrimai | x |
| Ekonominė dalis | <input type="checkbox"/> |
| Išvados | x |

Kita informacija (pagal poreikį), susitikimų su vadovu savaitės diena (-os) bei laikas:

Vadovas: Lekt. Nerijus Adamukaitis parašas
pareigos, vardas, pavardė

Studentas: Silvija Stukaitė parašas
vardas, pavardė

Stukaitės, Silvijos. Netipinės formos aukšto pastato vėjo slėgio į statinio paviršius analizė. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. dr. Nerijus Adamukaitis; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): inžinerijos mokslai, Statybos inžinerija (E05).

Reikšminiai žodžiai: Vėjo slėgio koeficientai, susuktas aukštas pastatas, skaitmeninis vėjo tunelis, CFD, turbulencija.

Kaunas, 2021. 56 p.

Santrauka

Šio magistro baigiamojo darbo tikslas yra išanalizuoti vėjo poveikį aukštiems, netipinės formos pastatams bei surasti netipinės formos pastato vėjo slėgio koeficientus. Darbas susideda iš trijų pagrindinių dalių: literatūros duomenų analizės, skaitmeninio vėjo tunelio tyrimų metodikos, rezultatų ir jų apibendrinimo.

Pirmojoje dalyje pateikiamos pagrindinės žinios apie vėjo poveikį, išanalizuojami trys pagrindiniai vėjo poveikiai aukštiems pastatams ir apžvelgiami galimi dinaminių simuliacijų variantai vėjo įtakai vertinti. Taip pat, analizuojant mokslinėse publikacijose nagrinėtas įvairių formų pastatų aerodinamines savybes, pateikiamos galimos pastatų modifikacijos, kurių dėka sumažinamas vėjo poveikis.

Antrojoje magistro baigiamojo darbo dalyje pateikiama skaitmeninio vėjo tunelio tyrimų metodika. Šioje metodikoje nurodoma, kaip bus vykdomas skaitmeninis vėjo tunelio bandymas, jam atlikti reikalingi parametrai ir skaičiavimuose naudotos formulės. Šiame darbe yra pritaikomi skaitiniai tyrimų metodai ir panaudojami standartinio aukšto pastato eksperimentiniai duomenys, kurie buvo paimti iš kitų mokslininkų darbų. Šie eksperimentiniai duomenys palyginami su gautais skaitmeninio vėjo tunelio rezultatais, įrodant skaičiavimo programos tikslumą. Galiausiai, pateikiamas skaitmeninio vėjo tunelio bandymas susuktos formos pastatui ir gauti slėgio koeficientai į pastato paviršius.

Trečiojoje dalyje pateikiami atkiltų tyrimų rezultatai ir jų aptarimas. Grafiškai palyginami gauti slėgio koeficientai standartiniam aukštam pastatui ir susuktos formos pastatui.

Apibendrinant magistro baigiamąjį darbą suformuluotos 8 svarbiausios išvados.

Darbo apimtis be priedų – 50 psl., kuriuose pateikta 36 paveikslai, 2 lentelės ir 57 literatūros šaltinių.

Stukaitė, Silvija. Analysis of Wind-Induced Pressure on Building Surface for Atypical Tall Building / supervisor lect. dr. Nerijus Adamukaitis; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering Sciences, Civil Engineering (E05).

Keywords: Wind pressure coefficients, twisted tall building, digital wind tunnel, CFD, turbulence.

Kaunas, 2021. 56 p.

Summary

The aim of master's thesis is to analyze wind influence on tall, atypical shape buildings and to find the wind pressure coefficients of an atypical building. The work consists of three main parts: literature review, digital wind tunnel research methodology, results and discussion.

The first part presents the basic knowledge about wind effects on tall buildings, three main effects of wind on high-rise buildings are analyzed and possible variants of dynamic simulations to assess wind influence are reviewed. Also, by analyzing the aerodynamic properties of various forms of buildings studied in scientific publications, possible modifications of buildings that reduce the impact of wind are presented.

In the second part of master's thesis digital wind tunnel research methodology is presented. This methodology specifies how the digital wind tunnel test will be performed, the parameters required to perform it and the formulas used in the calculations. In this work numerical research methods are applied and experimental data from a standard high-rise building is taken from the work of other scientists. These experimental data are compared with the obtained results of the digital wind tunnel, proving the accuracy of the calculation program. Finally, a digital wind tunnel test for a twisted-shaped building is presented and the pressure coefficients on the building surfaces are obtained.

In the third part the results of study and their discussion is presented. The pressure coefficients are graphically compared for a standard tall building and a twisted building.

By summarizing master's thesis 8 main conclusions are given.

Thesis consists of 50 pages of text, 36 figures, 2 tables and 57 references.

Turinys

| | |
|--|-----------|
| Paveikslų sąrašas | 8 |
| Santrumpų sąrašas | 10 |
| Įvadas..... | 11 |
| 1. Literatūros duomenų analizė..... | 14 |
| 1.1. Vėjo poveikis..... | 14 |
| 1.1.2. Paribio atmosferinis sluoksnis..... | 14 |
| 1.1.3. Šiurkščiojo ruožo ilgis..... | 15 |
| 1.1.4. Turbulencija..... | 15 |
| 1.2. Vėjo sukeltas poveikis pastatams | 15 |
| 1.2.1. Vėjo apkrova išilgai vėjo kryptčiai (išilginis poveikis)..... | 16 |
| 1.2.2. Vėjo apkrova statmenai vėjo kryptčiai (skersinis poveikis)..... | 16 |
| 1.2.3. Sukamasis vėjo poveikis..... | 19 |
| 1.3. Metodai vėjo įtakai nagrinėti..... | 19 |
| 1.3.1. Vėjo tunelio bandymai | 19 |
| 1.3.2. Kompiuterinė skysčių dinamikos simuliacija (CFD) | 21 |
| 1.4. Aerodinaminis slopinimas | 25 |
| 1.4.1. Nedidelės modifikacijos | 25 |
| 1.4.2. Esminės modifikacijos..... | 27 |
| 2. Tyrimų metodologija..... | 30 |
| 2.1. Geometriniai modeliai | 30 |
| 2.1.1. Standartinio aukšto pastato modelis | 30 |
| 2.1.2. Netipinės formos pastato modelis | 31 |
| 2.2. Turbulencijos modelis | 32 |
| 2.3. Skaičiavimo domenai ir tinklėlio tankis..... | 32 |
| 2.4. Vėjo slėgio koeficiento nustatymas..... | 34 |
| 2.5. Vėjo srauto modelis..... | 35 |
| 2.6. Modelio verifikacija | 35 |
| 2.7. Problemų sprendimas | 37 |
| 3. Tyrimų rezultatai..... | 38 |
| 3.1. Slėgis į paviršius..... | 38 |
| 3.2. Slėgio koeficientai | 39 |
| 3.3. Atstojamoji jėga..... | 42 |
| 3.4. Vėjo srauto pasiskirstymas | 42 |
| Išvados ir rekomendacijos | 45 |
| Literatūros sąrašas | 46 |
| Priedai..... | 51 |
| 1 priedas. Verifikacijos procedūros skaičiavimų duomenys | 51 |
| 2 priedas. Slėgio koeficientų skaičiavimo duomenys..... | 52 |

Paveikslų sąrašas

| | |
|--|----|
| 1 pav. Sąrašas aukščiausių susuktos formos pastatų pasaulyje, kurių pasisukimo laipsnis daugiau nei 90° (pritaikyta iš: http://www.skyscrapercenter.com/)..... | 11 |
| 2 pav. Atmosferos ribiniai sluoksniai ir jų priklausomybė nuo reljefo [13]..... | 14 |
| 3 pav. Aerodinaminės jėgos aukštiems pastatams [6]..... | 16 |
| 4 pav. Periodinis sūkurių srautas [16]..... | 17 |
| 5 pav. Įvairių skerspjuvių Strouhalo (Strouhal) skaičiai St [12] | 18 |
| 6 pav. Stačiakampių skerspjuvių aštriais kampais Strouhalo (Strouhal) skaičius St [12] | 18 |
| 7 pav. HFB modelis (kairėje) ir pagrindo matuoklio pavyzdys (dešinė) [18] | 20 |
| 8 pav. HFPI modelis (kairėje) [19] ir paviršiaus slėgio tyrimo modelis su slėgio davikliais (dešinė) [18] | 20 |
| 9 pav. Aeroelastinio modelio pavyzdys, iliustruojantis vidinį stuburą, skirtą atkurti pastato standumą [18] | 21 |
| 10 pav. RANS ir LES turbulencijos modelių skirtumai [28] | 23 |
| 11 pav. Aerodinaminės modifikacijos [5]..... | 25 |
| 12 pav. Nedidelės aerodinaminės modifikacijos [6]..... | 26 |
| 13 pav. Srauto pasiskirstymai apie skirtingus skerspjuvius [6] | 26 |
| 14 pav. Taipei 101 pastato geometrijos modifikacija (pritaikyta iš [36])..... | 27 |
| 15 pav. Plyšių įrengimas kampuose [37] | 27 |
| 16 pav. Esminės aerodinaminės modifikacijos [6] | 28 |
| 17 pav. Vėjo statmena kryptimi spektrinis energijos pasiskirstymas [44]..... | 29 |
| 18 pav. CAARC pastato pagrindinės charakteristikos [45] | 30 |
| 19 pav. <i>Turning Torso</i> plano vaizdas ir konstrukcinės schemos aksonometrinis vaizdas (pritaikyta iš [17]). | 31 |
| 20 pav. Modelio paviršiai ties 0° , 90° , 180° , 270° kampais. | 31 |
| 21 pav. Skaičiavimo domeno matmenys. Kairėje pusėje CAARC pastato modeliui, dešinėje – suktos formos pastatui ir vėjo tunelio parametrų įvestis. | 33 |
| 22 pav. Modelio apgaubimas baigtinių elementų tinkleliu. (a) pavyzdžiais pateikiami www.dlupal.com ; (b) <i>Turning torso</i> pastatui sugeneruotas tinklelis..... | 33 |
| 23 pav. Skaičiavimo domeno tinkleliai su pavaizduotais skirtingais tankumo sluoksniais. | 34 |
| 24 pav. Vėjo greičio profiliai, kairėje pusėje verifikacijos procedūrai, o dešinėje pusėje esant vėjo greičiui 26m/s. | 35 |
| 25 pav. Liekamasis slėgis..... | 36 |
| 26 pav. Kairėje pusėje C_p reikšmės gautos atliekant skaičiavimus, dešinėje pusėje kitų mokslininkų gauti duomenys [50] | 36 |
| 27 pav. Vėjo kryptis (0°) ir pastatų paviršių slėgio pasiskirstymas ties priekiniu, galiniu ir šoniniais paviršiais. | 38 |
| 28 pav. Vėjo kryptis (90°) ir pastatų paviršių slėgio pasiskirstymas ties priekiniu, galiniu ir šoniniais paviršiais. | 38 |
| 29 pav. Vėjo kryptis (180°) ir pastatų paviršių slėgio pasiskirstymas ties priekiniu, galiniu ir šoniniais paviršiais. | 39 |
| 30 pav. Vėjo kryptis (270°) ir stačiakampio pastato paviršių slėgio pasiskirstymas ties priekiniu, galiniu ir šoniniais paviršiais. | 39 |
| 31 pav. Vėjo slėgio koeficientų C_p pasiskirstymas CAARC pastatui. | 40 |

| | |
|---|----|
| 32 pav. Vėjo slėgio koeficientų C_p pasiskirstymas susuktos formos pastatui, kai vėjo kryptis 0° ir 180° | 41 |
| 33 pav. Vėjo slėgio koeficientų C_p pasiskirstymas susuktos formos pastatui, kai vėjo kryptis 90° ir 270° | 41 |
| 34 pav. Pastatų atstojamosios jėgos palyginimas ties skirtingomis vėjo kryptimis..... | 42 |
| 35 pav. Srauto atsiskyrimas ir turbulentinės zonos aplink bandomuosius modelius, vaizduose iš viršaus..... | 43 |
| 36 pav. Sūkurių susidarymo momentinė vizualizacija (viršuje), pritaikyta iš [57], <i>RWIND Simulation</i> vėjo srauto linijų atvaizdavimas (apačioje)..... | 43 |

Santrumpų sąrašas

Santrumpos:

CAARC – standartinis aukšto pastato modelis (ang. *Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council*);

CFD – kompiuterinė skysčių dinamika (ang. *Computational Fluid Dynamics*);

CWE – kompiuterine vėjo inžinerija (ang. *Computational Wind Engineering*);

DNS – tiesiogine skaitine simuliacija;

DOF – sistemos laisvės laipsnis;

FEM – baigtinių elementų metodas;

FDM – baigtinių skirtumų metodas;

FVM – baigtinių tūrių metodas;

HFB – Aukšto dažnio balanso metodas (ang. *high-frequency balance*);

HFPI – Aukšto dažnio slėgio integravimas (ang. *high-frequency pressure integration*);

LES – didelis sukurinis modeliavimas (ang. *Large Eddy Simulation*);

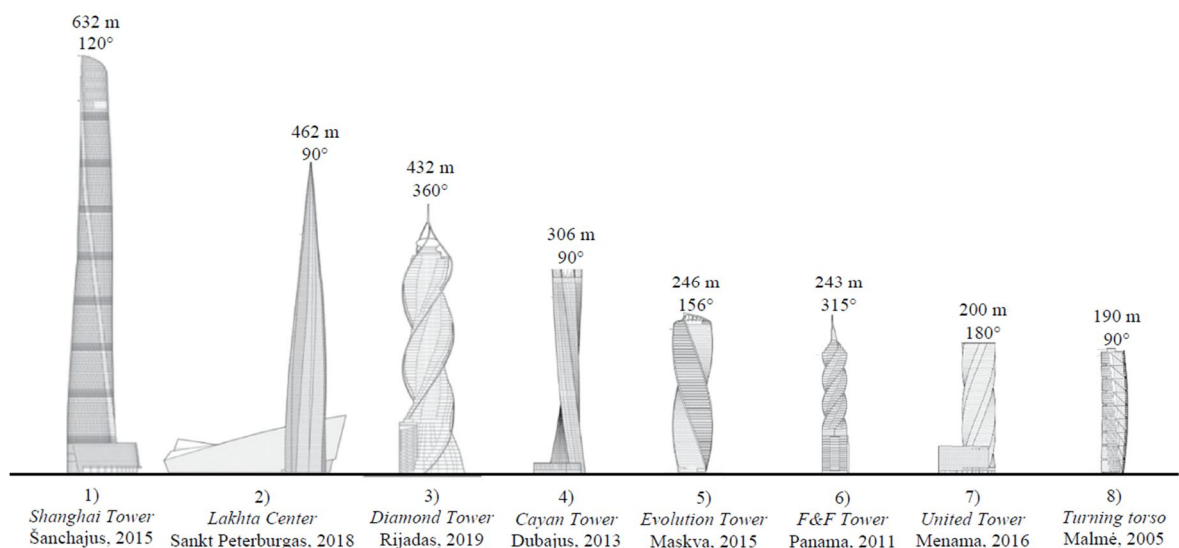
RANS – Reinoldso vidutinis Navjero- Stokso (ang. *Reynolds Averaged Navier- Stokes*).

Įvadas

Temos aktualumas

Didėjant gyventojų skaičiui pasaulyje, proporcingai auga ir žmonių, norinčių gyventi miestuose, kiekis. Dėl to auga poreikis statyti daugiau pastatų, o miestuose, kur ir taip yra didelis teritorijos užimtumas, išauga poreikis statyti savo plotu mažai vietos užimančius pastatus. Tai kartu sukelia ir pasekmių skirtingiems žmogaus gyvenimo aspektams, tokiems kaip: aplinka, miesto oro, sveikatos sąlygos ir, žinoma, saugumas. Pagal minėtus aspektus, aukštų pastatų tyrimas ir analizė dėl vėjo sukurto slėgio įtakos yra būtina siekiant užtikrinti miesto gyventojų saugumą ir gerovę [1]. Vėjo apkrova didėja proporcingai kylančiai pastato altitudei, todėl labai aukštuose pastatuose ši apkrova neretai yra didesnė nei pastovioji. O kaip teigiama viename moksliniame darbe, vėjo sukeliamas slėgis ir ištraukimas yra efektyvus aukštybinių pastatų architektūrinio ir konstrukcinio projektavimo parametras [2].

Jau seniai yra žinoma, jog vėjo apkrovos labai priklauso nuo pastato formos. Nemažai ankstesnių darbų [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9] svarstė daugybę skirtingų formų, kuriomis būtų sumažinama aukštų pastatų vėjo apkrova, tokių kaip siaurėjantis pastatas, su angomis viršuje, besisukančios formos ir kita. Štai besisukančios formos pastatai yra vienas iš naujausių architektūrinių tendencijų, projektuojant aukštus pastatus [10]. Kitaip tariant „susuktas“ pastatas yra toks, kuris per visą savo aukštį turi tam tikrą pasisukimo kampą, kuris gali būti sukuriamas pasukant kiekvieno aukšto planą. Nors ir šio darbo rašymo metu pats aukščiausias pasaulio pastatas nėra būtent šios formos, tačiau pasaulyje per pastaruosius 15 metų buvo pastatyta nemažai šio tipo dangoraižių (žr. 1 pav.). Antras aukščiausias pasaulio pastatas yra Kinijoje, 120° per visą savo aukštį besisukantis *Shanghai Tower*. Kaip jau minėta prieš tai, susuktos formos pastatai yra dar visai nauja tendencija ir pagal Čikagoje įsikūrusios aukštųjų pastatų ir miesto tarybos (ang. *Council on Tall Buildings and Urban Habitat*) duomenis tokio tipo pirmuoju dangoraižiu yra skaitomas Malmėje stovintis *Turning Torso*, užbaigtas statyti 2005 metais, paveikslėlyje pažymėtas aštuntuoju numeriu. Būtent šis, bene arčiausiai Lietuvos esantis tokio tipo dangoraižis, buvo pasirinktas šio baigiamojo darbo tyrimui, kaip netipinės formos aukštas pastatas.



1 pav. Sąrašas aukščiausių susuktos formos pastatų pasaulyje, kurių pasisukimo laipsnis daugiau nei 90° (pritaikyta iš: <http://www.skyscrapercenter.com/>)

Lietuvoje ir Europoje esančiose projektavimo normose nerasime metodikos, kaip įvertinti vėjo sukiamas apkrovas netipinės formos pastatams, tokiems kaip *Turning Torso*. Tada yra rekomenduojama atlikti vėjo tunelio bandymus. Tačiau vėjo tunelio bandymas yra brangus ir laiko reikalaujantis testas, todėl kaip alternatyva tam, gali būti taikoma kompiuterinė skysčių dinamikos simuliacija (CFD). Moksliskai vėjo poveikis yra apibrėžiamas per skysčių dinamiką, o lygtys, kurios yra reikalingos modeliuojant, vadinamos Navjė-Stokso lygčių sistema. Šios lygtys įvardijamos kaip bene sudėtingiausios, nes turi didžiulę informaciją ir yra gana mažai iširtos, o sudėtingumą lemia turbulencija. Fizikai apibūdina turbulencijos susidarymą kaip sūkurio susiformavimą tolygiame dalelių tėkmės sraute, po to sūkurių susidarymą tame sūkuryje ir t. t., kol skysčio ar dujų srautas suskyla į atskiras dalis ir pradeda judėti atskirai [11]. Toks apibrėžimas ir skamba sudėtingai, ir reikalauja labai didelių skaičiavimo išteklių. Tačiau tobulėjant kompiuterių techninėms ir programinės įrangos galimybėms bei sukūrus turbulencijos modelius, vėjo modeliavimas aplink pastatą nebėra toks sudėtingas procesas. Pastaruoju metu yra nemažai komercinių programų su integruotais turbulencijos modeliais, skirtų atlikti kompiuterinę skysčių dinamikos analizę. CFD analizė sėkmingai taikoma aviacijos inžinerijoje ir jau kalbama, jog vėjo poveikio modeliavimas aplink pastatus, taip pat yra labai perspektyvus. Todėl šiame darbe, analizuojant sudėtingos formos pastatą, buvo pasirinkta *RWIND Simulation* kompiuterinės skysčių dinamikos skaičiavimo programa. Naudojantis šia programa, atliekamas eksperimentas – skaitmeninis vėjo tunelio bandymas.

Apibendrinant galima teigti, jog vėjo sukeltų apkrovų įvertinimas yra ir išliks svarbi statinio projektavimo dalis. Augant miesto pastatų altitutei ir architektams parenkant netipines formas, vėjo apkrovų įvertinimas tampa sudėtinga užduotimi, kuri gali būti sprendžiama atliekant vėjo tunelio bandymus. Tačiau, kaip alternatyva brangiems vėjo tunelio bandymams gali būti atliekama, sparčiai populiarėjanti, CFD vėjo analizė.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Darbo tikslas – išanalizuoti vėjo poveikį aukštiems, sudėtingos formos pastatams bei surasti netipinės formos pastato vėjo slėgio į paviršius koeficientus, naudojant kompiuterinės skysčių dinamikos analizę.

Siekiant darbo tikslo reikia atlikti šiuos uždavinius:

1. atlikti išsamią vėjo poveikio aukštiems pastatams literatūros analizę;
2. įvykdyti skaičiavimo programos verifikaciją, palyginant su kitų mokslininkų gautais eksperimentiniais duomenimis;
3. atlikti skaičiavimus skaitmeniniame vėjo tunelyje standartinės bei netipinės formos aukštiems pastatams;
4. gauti vėjo slėgio koeficientus stačiakampės prizmės ir suskutos formos pastatams bei juos palyginti.

Mokslinis naujumas

Šiandien Lietuvoje ir Europoje esančios projektavimo normos neapibrėžia, kaip turi būti įvertinama vėjo įtaka netipinės formos pastatams. Todėl yra rekomenduojama atlikti vėjo tunelio bandymą, jei pastato forma ženkliai skiriasi, nuo to kas yra apibrėžta eurokodo septintajame skyriuje [12]. Tačiau vėjo tunelio bandymas reikalauja daug resursų, yra reikalingos kvalifikuotos ir sudėtingus įrenginius turinčios laboratorijos. Dėl šios priežasties, tai gali būti ne ekonomiška, ypač esant pradinei

projektavimo stadijai. Taigi, pravartu ieškoti alternatyvų, kaip tinkamai įvertinti vėjo apkrovas sudėtingos formos aukštiems pastatams.

Praktinė vertė

Siekama atlikti tokį diplominį darbą, kurį būtų galima naudoti praktikoje ir kuris gelbėtų projektuojant vėjo apkrovas daugiaaukščiams sudėtingos formos pastatams, naudojant kompiuterinės skysčiu dinamikos vėjo analizę.

1. Literatūros duomenų analizė

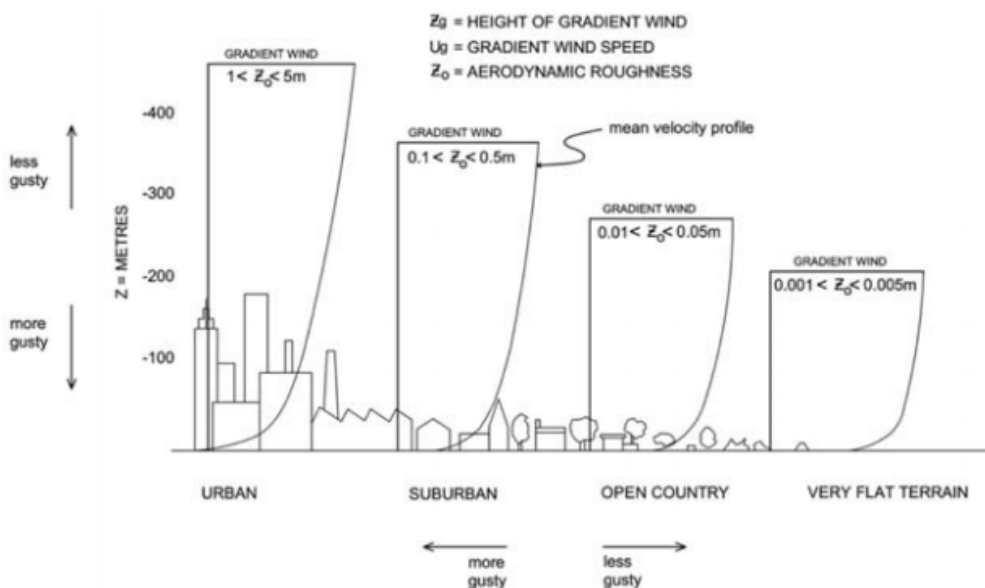
Šis skyrius yra suskirstytas į keturias dalis ir yra pateikiama susisteminta informacija, kuri buvo surinkta literatūros apžvalgos metu. Pirmiausia yra pateikiamos pagrindinės žinios apie vėjo poveikį. Tolimesniame skyriuje nurodomas trijų tipų vėjo sukiamas poveikis aukštiems pastatams. Trečiame skyriuje pristatomos galimos dinaminės simuliacijos vėjo įtakai nagrinėti. Paskutiniame skyriuje aptariamos galimos pastatų geometrinės modifikacijos, remiantis kitų mokslininkų atliktais darbais.

1.1. Vėjo poveikis

Vėjas yra oro judėjimas žemės paviršiaus atžvilgiu. Vėjas įgyja energiją tiesiogiai iš Saulės, nes yra sukiamas netolygus šiluminis poveikis, kuris yra stipresnis ties pusiauju, todėl atsiradęs temperatūrų skirtumas verčia skirtingų temperatūrų oro mases maišytis, o tai galiausiai sukelia atmosferinę cirkuliaciją. Įtakos vėjo susidarymui turi ir cirkuliacija, susidariusi dėl geografinių ypatybių, sezoniškumo bei žemės sukimosi. Ekstremalūs reiškiniai, kaip audros ir uraganai, gali sukelti labai didelių ir katastrofiškų padarinių pastatams, kadangi judėdamas vėjo srautas sukuria slėgį į bet kurį paviršių, esantį jo kelyje. Svarbu ir tai, jog vėjo srautas susidurdamas su bet kuriuo paviršiumi, sukelia ne tik tiesioginį poveikį į šį paviršių, bet ir aplenkdamas kliūtį, veikia iš šonų bei už jos. Taip yra sukeliama įvairūs struktūriniai atsakai, kaip deformacijos, virpesiai ir svyravimai.

1.1.2. Paribio atmosferinis sluoksnis

Vėjo srautas arti Žemės paviršiaus nėra tolygus, o priešingai – turbulentiškas. Taip yra dėl to, jog Žemės paviršius nėra tolygus, todėl atsiranda trinties dėl augmenijos, orografijos (kalnų, uolų, slėnių ir kt.) bei pastatų. Visi šie išvardinti dalykai turi įtakos vėjo greičiui – jį slopina. Taigi, prie Žemės paviršiaus greitis artimas nuliui, o kylant aukštyn logaritmiškai didėja, kol pasiekia didžiausią reikšmę, dar vadinamą geostrofiniu vėju. Geostrofinis vėjas, tai hipotetinis oro judėjimas neveikiant trinties jėgoms. Būtent šis sluoksnis, kuriame veikia turbulentiškas vėjo judėjimas, yra vadinamas atmosferiniu paribio sluoksniu (ang. *Atmospheric Boundary Layer*). Sluoksnio aukštis priklauso nuo paviršiaus šiurkštumo, todėl šis sluoksnis gali būti siauras atvirose teritorijose ir labai platus, ten kur vyrauja aukšti pastatai (žr. 2 pav.).



2 pav. Atmosferos ribiniai sluoksniai ir jų priklausomybė nuo reljefo [13]

1.1.3. Šiurkščiojo ruožo ilgis

Šiurkščiojo ruožo ilgis z_0 , dydis apibrėžiantis vėjo greičio variaciją pagal aukštį. Šis faktorius yra labai svarbus tiksliam vėjo greičio profilio suformavimui atliekant kompiuterinę skysčių dinamikos (CFD) analizę ar vėjo tunelio bandymą. Dažniausiai šis dydis pateikiamas lentelėse, remiantis vietovės reljefu, kaip parodyta 1 lentelėje.

1 lentelė. Vietovės kategorijos ir vietovės parametrai [12]

| Vietovės kategorija | Vietovės charakteristika | z_0 , m | z_{min} , m |
|---------------------|---|-----------|---------------|
| 0 | Atviri jūros ar jūros pakrančių ruožai | 0,003 | 1,0 |
| I | Ežerai ir plokšti horizontalūs ruožai su nežymia augalija ir be kliūčių | 0,01 | 1,0 |
| II | Mažai augmenijos; izoliuotos kliūtys atstumais bent 20 kartų didesniais už kliūčių aukštį | 0,05 | 2,0 |
| III | Reguliari augmenija; miškai; priemiesčiai; kaimai | 0,3 | 5,0 |
| IV | Bent 15% paviršiaus užstatyta pastatais, kurių vidutinis aukštis bent 15 m | 1,0 | 10,0 |

1.1.4. Turbulencija

Vėjas yra turbulentiškas, ypač arti Žemės paviršiaus. Tam turi įtakos reljefo netolygumas ir kintantis aukštis virš paviršiaus.

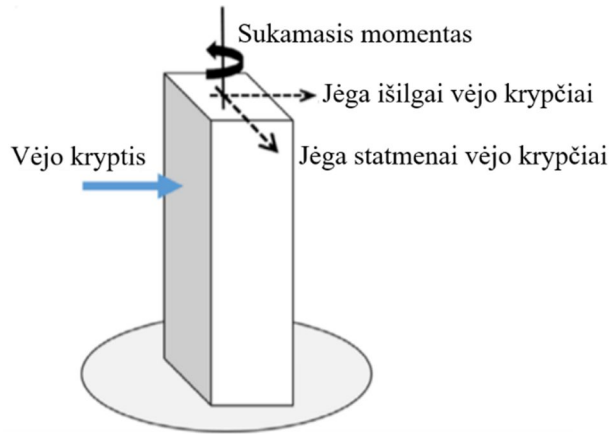
Oro tūriai nuolatos maišosi, judėdami nelygiagrečiais keliais. Skirtingų oro tūrių, dar vadinamų turbulencijos elementais, judėjimo greitis nuolat kinta. Iš to galima daryti išvadą, jog kryptingos bendrosios oro pernašos sraute yra daugybė chaotiškų turbulencijos elementų judesių, kurie sukuria momentines vėjo greičio ir krypties pulsacijas, dar žinomas, kaip gūšiai. Taip pat dėl vėjo susidūrimo su kliūtimis (medžiais, pastatais, reljefu) susidaro mechaninė turbulencija. Tai pasireiškia, kada vėjo srautas sutikęs kliūtį, deformuojasi, t. y. sukuria cirkuliuojančius sūkurius, kurie plinta į likusį srautą.

Turbulencijos įvertinimas yra labai svarbus trimis aspektais. Pirmiausia, struktūra yra veikiamą laike kintančia jėga, o ne nuolatine. Antra, dėl šios pulsacinės jėgos, lanksčios struktūros gali įgyti rezonansinį piką, jei vėjo pulsacinis dažnis sutaptų su konstrukcijos savaisiais virpesiais. Galiausiai, aerodinaminis poveikis labai priklauso nuo struktūros formos, todėl į tai turi būti atsižvelgiama atliekant skaičiavimus ir fizinius testus [14].

1.2. Vėjo sukeltas poveikis pastatams

Vėjo poveikis paviršiams turi didelę reikšmę, todėl svarbu tai įvertinti projektuojant aukštus pastatus. Vėjo sukeltos apkrovos gali tapti pagrindinėmis tada, kai kalbame apie pastatus, kurie yra aukštesni nei dešimt aukštų. Kuo didesnė pastato altitudė, tuo stipresnis vėjas veikia išorinius paviršius [15]. Akivaizdu, jog norint projektuoti daugiaaukščius pastatus, reikia ieškoti būdų, kaip sumažinti vėjo įtaką, atsižvelgiant į konstrukcijos formą, ar pasitelkiant kitus sprendinius (virpesių slopintuvai ir kt.).

Daugiaaukščiai pastatai yra veikiami šių aerodinaminių jėgų: išilgai vėjo krypties, statmenai bei sukamojo poveikio. Atitinkamai pastatas yra veikiamas trimis kryptimis (žr. 3 pav.). Vėlesniuose poskyriuose plačiau aprašoma kiekvienas iš šių poveikių, siekiant išsiaiškinti jų kilmę.



3 pav. Aeorodinaminės jėgos aukštiems pastatams [6]

1.2.1. Vėjo apkrova išilgai vėjo kryptčiai (išilginis poveikis)

Pastato svyravimas lygiagrečia vėjui kryptimi, vadinamas išilginiu vėjo atsaku (ang. *Along-wind motion*). Šį judesį skatina vėjo slėgio svyravimai ant priekinės ir galinės pastato dalies.

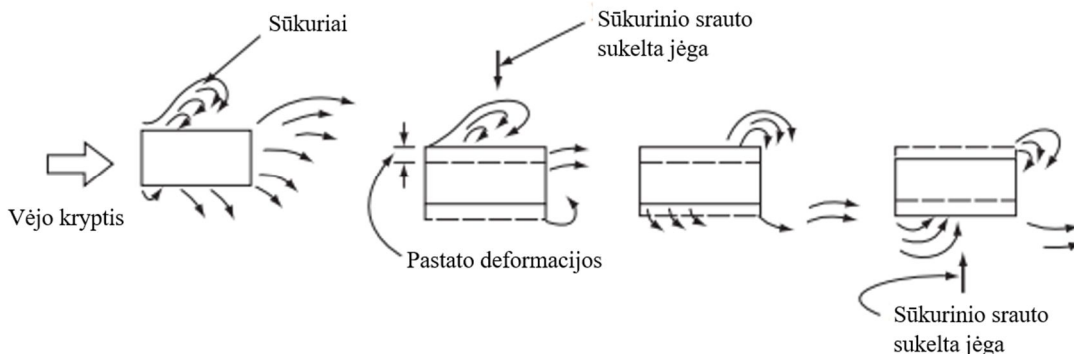
Išilginės vėjo apkrovos vienas iš pagrindinių parametru įvertinant vėjo poveikį konstrukcijai yra vėjo viršūninio greičio charakteringoji reikšmė q_p . Šis parametras yra charakteringasis slėgis, atitinkantis netrikdomo vėjo greitį. Viršūninį vėjo greitį ir slėgį sudaro vidutinis ir pulsacinis komponentai. Vėjo viršūninio greičio slėgio q_p charakteringoji reikšmė priklauso nuo meteorologinio vėjo bei geografinių faktorių (vietovės šiurkštumo ir kalnuotumo, aukščio virš žemės paviršiaus). Pulsacinis komponentas įvertina atsitiktinių ir skirtingų dydžių sūkurių ir gūsių poveikį. Daugumos pastatų savasis svyravimų dažnis yra didesnis nei pulsacinė apkrova, sukelta didesnių sūkurių. Dėl šios priežasties dinaminis poveikis nėra sukeliamas ir gali būti vertinama tik kaip pagrindinis vėjo slėgis.

Dauguma nacionalinių ir tarptautinių normų remiasi anksčiau apibūdintu vėjo padalinimu į pagrindinę ir pulsacinę dedamąsias. Nuo to laiko, kai mokslininkas Davenportas (1967) pristatė šį metodą, taikomą nustatyti turbulencijos poveikiui tam tikroje vietovėje. Tačiau toks principas taikomas toms konstrukcijoms, kurios nėra jautrios turbulencijos sukeltiems virpesiams, o kvazistatinis atsakas yra lemiamas.

1.2.2. Vėjo apkrova statmenai vėjo kryptčiai (skersinis poveikis)

Skersinis vėjo poveikis nebeatitinka kvazistatinės prielaidos, kaip tai yra taikoma vėjo apkrovai išilgine kryptimi. Pastato kontūras, esantis nuolatiniame vėjo veikimo lauke, sukelia oro pasidalijimą. Kitaip tariant, vėjas turi aplenkli kliūtį, o kontakto metu susidaro trintis tarp oro dalelių ir pastato paviršiaus, kas sukelia sūkurių susidarymą. Atsiradus sūkuriniam srautui (ang. *Vortex shedding*), sūkuriiai metami nuo priešingų konstrukcijos šonų, todėl sukeliami statmena vėjo kryptčiai kintamoji apkrova. Statinio virpėjimas gali atsirasti, kai sūkurinio srauto dažnis sutampa su konstrukcijos laisvųjų svyravimų dažniu. Šis sūkurių susidarymo fenomenas yra labai pavojingas daugiaaukščiams pastatams, kadangi dėl to gali stipriai išaugti konstrukcijos apkrovos.

Aukštiesiems pastatams statmenasis vėjo poveikis yra dažniausiai labiau pavojingas nei išilginis poveikis [16]. Labiausiai kritinis poveikis yra dėl susidarančių sūkurinių srautų, kurie periodiškai veikia iš kintančių pasato pusių (žr. 4 pav.).



4 pav. Periodinis sūkurių srautas [16]

Sūkurių atplėšimo dažnis yra apibrėžiamas bedimensiu dydžiu, dar vadinamu Strouhala dažniu. Šis dydis priklauso nuo kūno formos ir yra apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$St = fB/U; \quad (1)$$

čia:

f – sūkurių susidarymo dažnis;

U – vėjo greitis;

B – pastato plotis.

Kritinis vėjo greitis – dar vienas svarbus dydis, kuriam esant sūkurinio srauto dažnis lygus konstrukcijos ar konstrukcinio elemento laisvųjų svyravimų dažniui. Eurokode yra pateikta formulė kritiniam vėjo greičiui apskaičiuoti [12]:

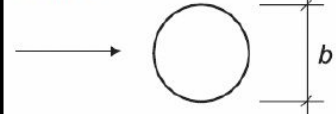
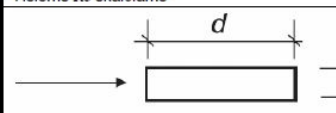
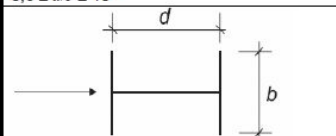
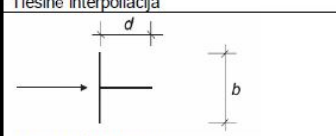
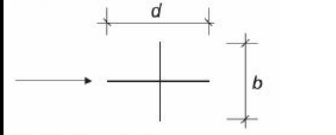
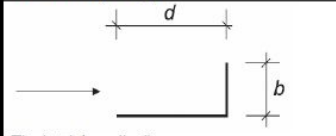
$$v_{crit} = \frac{b \cdot n_{i,y}}{S_t}; \quad (2)$$

čia:

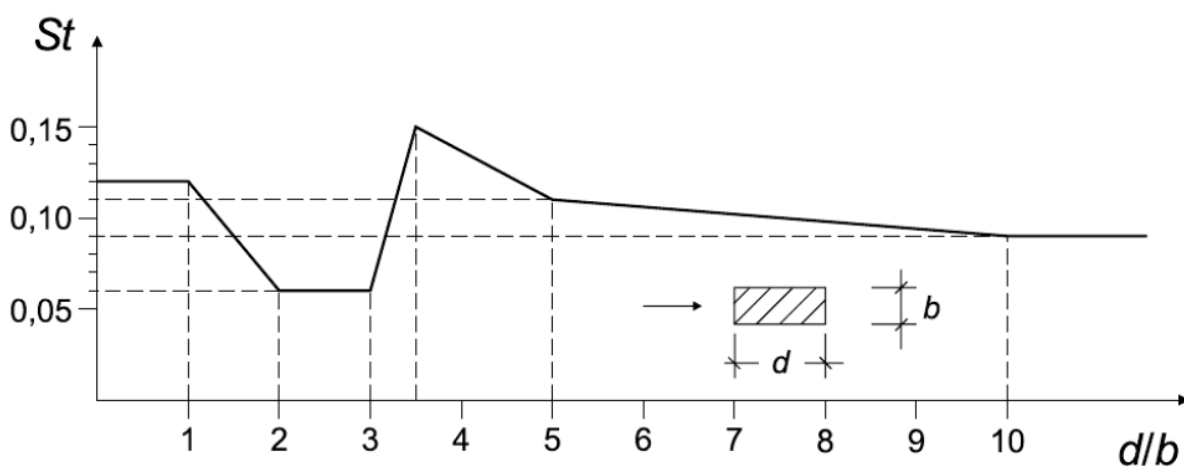
b – skerspjūvio, ties kuriuo atsiranda sūkurinio srauto rezonansas ir kur nagrinėjamos konstrukcijos ar konstrukcijos dalies svyravimo formos ilkinis yra didžiausias, atskaitos plotis; apvaliųjų cilindro atskaitos plotis yra cilindro skersmuo;

$n_{i,y}$ – vėjo kryptimi statmenų nagrinėjamosios i formos laisvųjų lenkiamųjų svyravimų dažnis;

S_t – Strouhala skaičius, apibrėžtas 5 paveiksle

| Skerspjūvis | St |
|--|--|
|  Visiems Re skaičiams | 0,18 |
|  $0,5 \leq d/b \leq 10$ | Iš E. 1 paveikslu |
|  Tiesinė interpoliacija | $d/b = 1$ 0,11 $d/b = 1,5$ 0,10 $d/b = 2$ 0,14 |
|  Tiesinė interpoliacija | $d/b = 1$ 0,13 $d/b = 2$ 0,08 |
|  Tiesinė interpoliacija | $d/b = 1$ 0,16 $d/b = 2$ 0,12 |
|  Tiesinė interpoliacija | $d/b = 1,3$ 0,11 $d/b = 2,0$ 0,07 |
| PASTABA Strouhalo (Strouhal) skaičių ekstrapoliuoti d/b atžvilgiu neleidžiama. | |

5 pav. Įvairių skerspjūvių Strouhalo (Strouhal) skaičiai S_t [12].



6 pav. Stačiakampių skerspjūvių aštriais kampais Strouhalo (Strouhal) skaičius S_t [12]

Liaunoms konstrukcijoms į sukurinio srauto efektą reikia atsižvelgti, kai santykis tarp konstrukcijos didžiausio ir mažiausio vėjui statmenų matmenų, nustatytų vėjo kryptčiai statmenoje plokštumoje, yra didesnis nei 6. Taip pat eurokode yra apibrėžta kada nereikia atsižvelgti į sukurinio srauto efektą:

$$v_{crit,i} > 1,25 \cdot v_m; \quad (3)$$

čia:

$v_{crit,i}$ – i svyravimų formos kritinis vėjo greitis [2];

v_m – charakteristinis 10 minučių vidutinis vėjo greitis;

1.2.3. Sukamasis vėjo poveikis

Vėjo veikiami pastatai be išilgai ir statmenai atsirandančių poveikių gali patirti ir sukamąjį poveikį. Šis poveikis atsiranda tada, jei pasato forma yra nesimetriška arba apkrovos išsidėsto netolygiai.

Sukamasis poveikis yra sukuriamas dėl atsiradusio slėgių svyravimo ties pastato paviršiumi, kas sukelia jėgų disbalansą. Šis poveikis tampa reikšmingu tada, jei pastato masės centras nesutampa su reakcijos jėgų (standumo) centru. Tokia situacija susidaro dėl geometrinės pastato formos, ekscentriškos ar netolygios apkrovimo schemos, kaip netolygi apkrovos schema nuo dinaminio vėjo poveikio, dėl kitų pastatų užstojamos dalies. Sukamasis momentas gali pažeisti fasadus ar kitus tvirtinimo elementus bei sukelti nemalonų pojūtį pastate esantiems žmonėms. [13]

Apibendrinant galima teigti, jog tik nedaugelyje standartų sukamasis momentas kaip ir skersinis vėjo poveikis yra vertinami. Tačiau projektuojant aukštus pastatus visi trys poveikiai turi būti įvertinami [17].

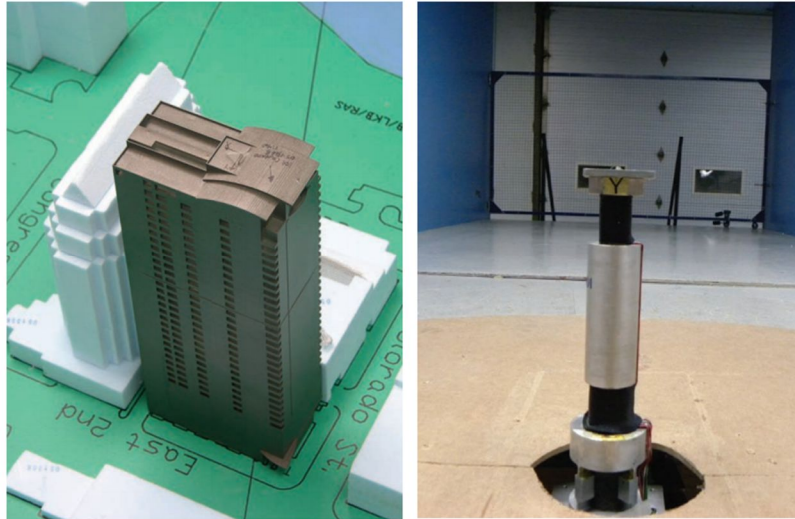
1.3. Metodai vėjo įtakai nagrinėti

Projektuojant pagal norminiu dokumentus, neretai kompleksiškas ir sudėtingas vėjo poveikis gali būti pilnai neįvertintas. Taip yra dėl to, jog projektavimo normose tinkamai neįvertinama neįprasta pastato forma, padėtis ar įtaka aplinkinių pastatų atžvilgiu. Dėl šios priežasties, projektuojant aukštus ar kitaip savo forma sudėtingus pastatus, jau gana natūralu, jog taikomi ir papildomi metodai, tokie kaip vėjo tunelio bandymai ar kompiuterinės skysčių dinamikos simuliacijos.

1.3.1. Vėjo tunelio bandymai

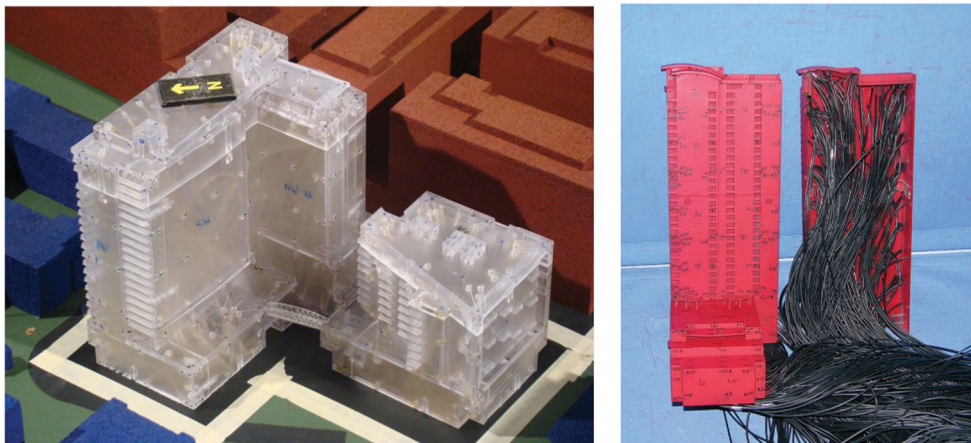
Norint nustatyti aukštų pastatų apkrovas ir reakcijas yra keli skirtingi metodai vėjo tunelio bandymams atlikti. Trys dažniausiai pasitaikantys metodai yra aukšto dažnio balanso metodas (ang. *high-frequency balance, HFB*), aukšto dažnio slėgio integravimas (ang. *high-frequency pressure integration, HFPI*) ir aerolastinės technikos [18]. HFB ir HFPI yra dažniausiai sutinkami metodai, kuriuose naudojami standūs aerodinaminiai modeliai. Abu metodai matuoja veikiančias vėjo apkrovas ir įtraukia dinaminės pastatų savybes į matematinę analizę, siekiant nustatyti bendrą vėjo poveikį pastatui.

HFB bandymuose naudojamas lengvo svorio modelis, kuris montuojamas ant labai standaus pagrindo (žr. 7 pav.), jog būtų galima išmatuoti susidarantį momentą ar kai kuriais atvejais skersinę jėgą modelio pagrinde [18]. Kadangi HFB modelio konstrukcija yra gana nesudėtinga, lyginant su HFPI metodu, todėl tokia technika dažniausiai naudojama projektavimo pradžioje, kai pastato geometrija dar gali kisti. Pasirinkus šį metodą, gali būti taikomi optimalios formos paieškos tyrimai, nes šis modelis gali būti lengvai modifikuojamas. HFB metodo privalumas yra toks, jog tinkamai sukurtas modelis gali apimti daugybę reguliuojamų funkcijų, todėl galima iširti daugybę geometrinių pakeitimų.



7 pav. HFB modelis (kairėje) ir pagrindo matuoklio pavyzdys (dešinė) [18]

HFPI metodas dabar taikomas daugumai projektų, nes jis naudoja tą pačią metodiką kaip ir paviršiaus slėgio bandymai (žr. 8 pav.). Tokia technika tapo galima, kai buvo išstobulintos greitos elektrinio slėgio nustatymo sistemos, galinčios matuoti vėjo slėgį tunelyje tuo pat metu, ties keliais šimtais matavimo vietų. Sudarant laiko momento slėgių imtį, bendra aerodinaminė apkrova apskaičiuojama ties pastato paviršiumi [18]. Nuo šios vietos analizė toliau yra tokia pat kaip ir HFB metodo.



8 pav. HFPI modelis (kairėje) [19] ir paviršiaus slėgio tyrimo modelis su slėgio davikliais (dešinė) [18]

Aeroelastinė technika skiriasi nuo aerodinaminių modelių tuo, kad į modelį yra įtraukiamos atitinkamo mastelio dinaminės savybės: savasis svyravimų dažnis, svorio charakteristikos ir slopinimo koeficientai. Aeroelastinio modeliavimo metu fiksuojamas aerodinaminis slopinimas, kuris nėra matuojamas nei HFB, nei HFPI metodais. Šis slopinimas paprastai yra teigiamas, t. y. prideda pastatams amortizacijos ir taip yra sumažinamas pastato judėjimas. Tačiau yra tokių vėjo reiškinių, kaip sūkurinis srautas, flateris, šuoliniai virpesiai [20], kurie gali aerodinaminį slopinimą paversti neigiamu ir taip būtų sukeltas pastato judėjimas. Taigi, aeroelastinis modelis yra ne tik teisinga geometrijos kopija, bet ir masteliu atkartojamas standumas, masė pasiskirstymas, slopinimas ir savasis svyravimų dažnis. Žemiau pateiktame paveikslėlyje pavaizduotas tokio modelio pavyzdys (žr. 9 pav.). Visiškas aeroelastinį modelį yra žymiai sudėtingiau ir brangiau sukurti nei HFB ar HFPI modelius.



9 pav. Aeroelastinio modelio pavyzdys, iliustruojantis vidinį stuburą, skirtą atkurti pastato standumą [18]

Apibendrinant apžvelgtą informaciją, vėjo tunelio bandymus reikia atlikti šiais atvejais:

1. pastato forma ženkliai skiriasi, nuo to kas yra apibrėžta eurokodo septintajame skyriuje [12] , ar kitoks neapibrėžtas vėjo apkrovos pobūdis, tai gali būti neįprastas pastato skerspjūvis bei aukštis;
2. kai reikia įvertinti aplinkinių pastatų įtaką (kas gali sukelti vėjo apkrovos padidėjimą arba sumažėjimą);
3. palyginti su rezultatais gautais naudojant kitus vėjo simuliacijų metodus (pavyzdžiui, kompiuterinė vėjo simuliacija) ;
4. rinkti duomenis, kurie būtų pritaikomi naujų gairių ir norminių dokumentų kūrimui.

1.3.2. Kompiuterinė skysčių dinamikos simuliacija (CFD)

Skysčiu galime pavadinti tai, kas teka ir įgyja indą užpildančią formą, kaip pavyzdžiui vanduo ar oras. Skysčių dinamika – skysčių mechanikos šaka, kurioje nagrinėjamas skysčio judėjimas, įvertinant jį veikiančias jėgas. Skysčių judėjimas yra sudėtingas reiškinys ir negali būti modeliuojamas paprastai, kaip tai galima padaryti kietiesiems kūnams. Skysčių dinamika remiasi šiais trimis pagrindiniais principais:

1. masė yra pastovi.
2. $F = ma$. (antrasis Niutono dėsnis).
3. energija yra pastovi.

Šie principai, savo ruožtu formuoja pagrindines skysčių dinamikos lygtis, kurios apibendrinamos kaip dalinių diferencialinių lygčių serija ir dar kitaip yra vadinamos Navjė-Stokso lygtimis. Skaičiuojamoji skysčių dinamika yra skaitinių metodų ir algoritmų naudojimas, siekiant analizuoti ir spręsti problemas, susijusias su skysčių srautais [21]. Tam yra reikalingas srities sudalinimas į kontrolinių tūrių tinklą, kuriam ir būtų surasti sprendiniai į matematinio modelio lygtis. Tam, jog šis sprendimas būtų įmanomas, ištinis netiesinis diferencialas turi būti pakeistas algebrine išraiška,

kuri duoda sprendimą konkrečiame taške. Šis procesas yra vadinamas diskretizavimu ir gali būti atliekamas vienu iš šių metodų: baigtinių skirtumų metodu (FDM), baigtinių tūrių metodu (FVM) ar baigtinių elementų metodu (FEM). CFD gali apibūdinti daugybę tipų skysčių ir jų srautų. Tuo atveju, kai nagrinėjame vėjo poveikį pastatui, vėją galime apibūdinti kaip nesuspaudžiamą klampų skystį, o ši analizė dar vadinama kompiuterine vėjo inžinerija (CWE). Nors klampumas yra gana mažas, būtina į tai atsižvelgti, norint kuo tiksliau aprašyti srauto pasidalinimą ir susidarančią turbulenciją ties pastato paviršiumi. Norint analizuoti šiuos srautus, turbulencijos modelis paprastai integruojamas į sprendimą.

Per pastaruosius kelis dešimtmečius kompiuterinės skysčių dinamikos simuliacijos panaudojimas išaugo ženkliai, to priežastis yra padidėjusios kompiuterinio skaičiavimo galimybės [22]. Per tą patį laiką buvo atlikta ir daugybė tyrimų susijusių su CFD pritaikymo problemomis vėjo inžinerijoje spręsti, buvo rasti greitesni ir tikslesni sprendimų metodai. Tačiau nepaisant to, tai nėra plačiai pripažinta daugelio standartų, kaip analizės metodas vėjo apkrovoms nustatyti. Daugelyje standartų, tokių kaip eurokodas, JAV ASCE 7-10 ir ISO 4354: 2009 vis dar nėra aiškiai paminėtas CFD panaudojimas. Kai tuo tarpu Japonijos architektūros institutas yra paskelbęs pastatų vėjo apkrovų skaitinio prognozavimo vadovą, kuriame pateikiami išsamūs patarimai, kaip CFD pritaikyti vėjo inžinerijos tikslams [23]. Tai, jog nėra bendro sutarimo dėl CFD ir CWE metodų panaudojimo rodo, jog yra tam tikrų trūkumų, lyginant su tradiciniais vėjo tunelio bandymais. Tačiau žinant tai, jog vėjo tunelio bandymas atliekamas vėlesnėje projektavimo stadijoje, CFD gali būti labai naudinga priemonė ankstyvame projektavimo etape, kai geometrija vis dar yra preliminari.

Taigi, kaip alternatyva fiziniams vėjo tunelio bandymams, gali būti taikoma kompiuterinė skysčių dinamikos simuliacija, kai norima apskaičiuoti vėjo apkrovas. Be to, mokslininkas Bernardinis paskelbė taip [24]: *Dažniausiai vėjo tunelio bandymas yra atliekamas tada, kai norima gauti aerodinaminį poveikį, jau pagal patirtį pasirinktos pastato formos, nes bandymo atlikimų skaičius yra labai apribotas dėl reikalingų didelių piniginių ir laiko resursų.* Todėl pradinėje projektavimo stadijoje CFD analizė gali tapti puikiu įrankiu, nustatant vėjo apkrovų sumažinimui palankią pastato geometriją.

1.3.2.1. Navjė– Stokso lygtys

Matematikas Loenardas Oileris XVIII a. pirmasis sukūrė lygtis apibūdinančias skysčių srautą [25].

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = \frac{\nabla P}{\rho}; \quad (4)$$

čia:

u – skysčio greičio vektorius;

P – skysčio slėgis;

ρ – tankis;

∇ – žymi diferencialinį operatorių.

Tačiau Oilerio lygtis visai nepaiso klampumo, masės paplitimo ir šiluminio laidumo. XIX amžiuje prancūzų inžinierius Clodas Liui Navjė ir britų fizikas Džordžas Gabrielis Stoksas sukūrė lygčių sistemą, šiandien žinomą kaip Navjė-Stokso lygtimis. Šiose lygtyse buvo įtrauktas klampos įvertinimas.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = \frac{\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 u; \quad (5)$$

čia:

ν – kinematinis klampumas;

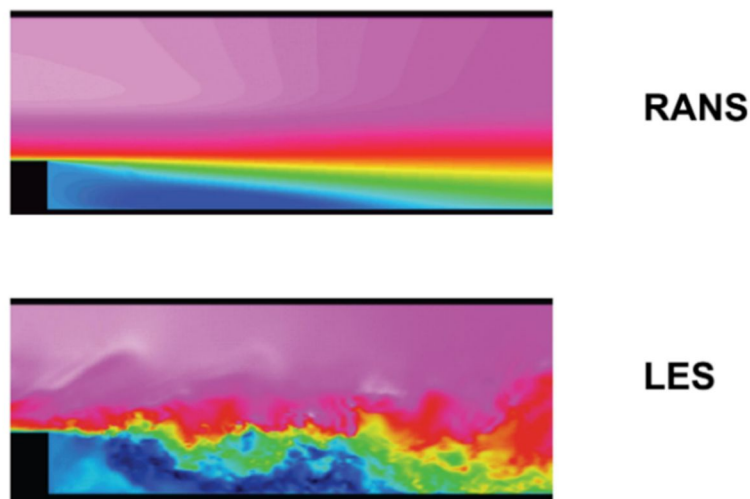
∇^2 – Laplaso operatorius.

Navjė-Stokso lygtys yra sujungtos netiesinio dalinio diferencialo sistema, todėl jas labai sunku analitiškai išspręsti. Iki šios dienos, nėra žinomas bendras sprendimas visoms pradinėms sąlygoms, net nežinoma ar jis egzistuoja. Todėl skysčių mechanika ir CFD vis dar yra labai sudėtinga mokslo šaka.

1.3.2.2. Turbulencijos modeliai

Pats turbulencijos reiškinys iš esmės yra labai atsitiktinis ir sudėtingas. Vėjo srautui susidūrus su kliūtimi, susidaro turbulentiniai regionai, kurie yra sunkiai prognozuojami. Tačiau CFD gali diskretizuoti ir išspręsti Navjė-Stokso lygtis, kas dar kitaip yra vadinama tiesiogine skaitine simuliacija (DNS). DNS reikalauja labai smulkaus sudalinimo į tinklą, nes kiekviena sritis turi būti mažesnė už mažiausią sūkurį, jog būtų galima pilnai užfiksuoti turbulencijos reiškinį [26]. Tai padaro DNS skaičiavimų požiūriu daug laiko reikalaujančiu ir neveiksmingu procesu [27]. Tačiau, CFD skaičiavimus galima supaprastinti naudojant įvairius turbulencijos modelius [26]. Toliau išnagrinėsime kai kuriuos iš esamų turbulencijos modelių, tam kad išsiaiškinti, koks yra tinkamiausias šio darbo tikslui.

Du pagrindiniai turbulencijos modeliai yra šie: didelis sūkurinis modeliavimas (ang. *Large Eddy Simulation*, LES) ir Reinoldso vidutinis Navjė- Stokso (ang. *Reynolds Averaged Navier- Stokes*, RANS). Pirmajam metodui yra naudojama erdvinio filtravimo technika, kai yra skaičiuojami visi didesni sūkuriai, kai tuo tarpu mažesnieji modeliuojami tik kaip pagalbiniai. Antrasis modelis yra pastovios būsenos vidurkio suradimo technika, kai per tam tikrą laiką, greičio vektorius yra padalinamas į pagrindinę ir pulsuojančią dalį. Tik pagrindinė dalis yra skaičiuojama. Taigi, RANS pateikia tik vidutines vertes, o LES gali pateikti didžiausias vertes ir tikslesnę trumpalaikių tėkmės reiškinį vaizdą tam tikru laiko momentu. Skirtumas tarp šių modelių pavaizduotas 10 paveiksle.



10 pav. RANS ir LES turbulencijos medelių skirtumai [28]

Norint atlikti LES turbulencijos modeliavimą, reikia daug tikslesnio ir mažesnio žingsnio tinklelio, todėl toks skaičiavimo būdas yra daug ilgesnis ir reikalauja didelių skaičiavimo išteklių [23]. Įvertinus iššūkius ir tai, jog kaip teigia mokslininkas Yang Zhiyin, neturint ilgametės LES modeliavimo patirties, geriau rintis RANS, todėl toliau bus nagrinėjamas tik šis metodas [29].

Dažniausi RANS modeliai yra $k - \varepsilon$ ir $k - \omega$. Šių metodų esmė, jog yra sprendžiamos dvi papildomos lygtys, kinetinės energijos k ir turbulentinio išsisklaidymo greitis ε arba savitasis išsisklaidymo greitis ω .

$k - \omega$ modelis geriau pritaikomas srautams, kurie yra arti paviršiaus. Toks modelis yra labiau netiesinis ir sunkiau konverguojantis nei $k - \varepsilon$, todėl gana jautrus pasirinkus netinkamą pradinį spėjimą. Šis modelis yra naudingas tais atvejais, kai $k - \varepsilon$ modelis nėra tikslus, o pritaikymo pavyzdžiais galėtų būti nagrinėjami vidiniai srautai, srautai pasižymi dideliu kreivumu, kaip srautas pro lenktą vamzdį.

$k - \varepsilon$ yra dažniausiai naudojamas modelis skaičiuojamosios skysčių dinamikos uždaviniams spręsti. Populiarumą lemia geras konvergavimo greitis ir santykinai maži kompiuterio atminties poreikiai. Šis modelis gerai veikia nagrinėjant sudėtingesnės išorinės geometrinės formos srauto problemas. Kaip pavyzdžiui, $k - \varepsilon$ modelis gali būti taikomas spręsti oro tėkmei apie kūnus, kurie dėl savo formos atskiria srautą, o būtent tokie yra aukšti pastatai.

Akivaizdu, jog tinkamesnis modelis atliekant CFD simuliacijas yra $k - \varepsilon$. Žemiau yra pateikiamos lygtys, turbulencijos kinetinei energijai k ir turbulentinio išsisklaidymo greičiui ε apskaičiuoti [30]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_j E_{ij} - \rho \varepsilon; \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}; \quad (7)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}; \quad (8)$$

čia:

u_i – greičio dedamoji atitinkama kryptimi;

E_{ij} – santykinės deformacijos dedamoji;

μ_t – klampumas.

Į lygtį taip pat įeina penkios reguliuojamos konstantos. Standartiniame $k - \varepsilon$ modelyje naudojamos konstantų reikšmės buvo gautos atliekant daugybę matavimų turbulenciniame sraute. Šių konstantų reikšmės: $C_\mu = 0,09$; $\sigma_k = 1,00$; $\sigma_\varepsilon = 1,30$; $C_{1\varepsilon} = 1,44$; $C_{2\varepsilon} = 1,92$;

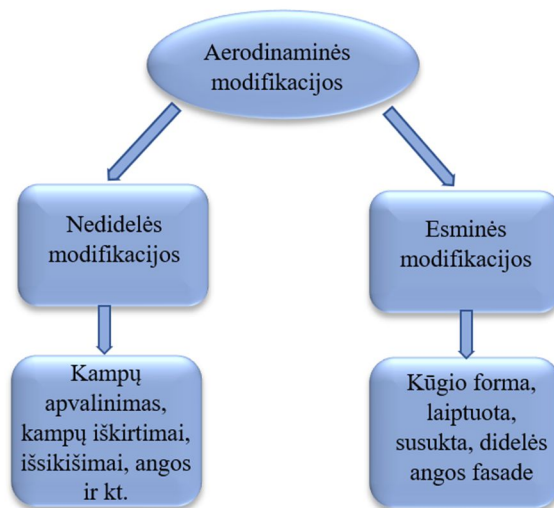
Žodine forma, lygtys (6) ir (7) gali būti aprašomos taip:

$$\boxed{\begin{array}{c} \text{Santykinis} \\ \text{pasikeitimas } k \\ \text{arba } \varepsilon \end{array}} + \boxed{\begin{array}{c} \text{Perdavimas } k \\ \text{arba } \varepsilon \text{ dėl} \\ \text{konvekcijos} \end{array}} = \boxed{\begin{array}{c} \text{Perdavimas } k \\ \text{arba } \varepsilon \text{ dėl} \\ \text{difuzijos} \end{array}} + \boxed{\begin{array}{c} \text{Santykinis} \\ \text{pasigaminimo} \\ k \text{ arba } \varepsilon \end{array}} - \boxed{\begin{array}{c} \text{Santykinis} \\ \text{praradimo } k \\ \text{arba } \varepsilon \end{array}}$$

1.4. Aerodinaminis slopinimas

Vėjo apkrovos yra reikšmingos aukštiems pastatams, dėl statiškų ir dinamiškų poveikių atsiradimo konstrukcijose. Yra teigiama, jog išgauti rodiklius atitinkančius tinkamumo ribinį būvį yra kur kas sunkiau, nei pasiekti reikiamą aukšto pastato stiprumą [31]. Žinoma, pastato reakcija į vėją priklauso ne tik nuo geometrinės formos, taip pat ir nuo struktūros standumo, masės pasiskirstymo ir slopinimo savybių [31]. Tačiau, kaip jau buvo minėta anksčiau, aukštiems pastatams yra labai pavojingas sūkurinio srauto susidarymas, o šio fenomeno susidarymo priežastį, galima keisti tik per geometrinės formos modifikacijas, kadangi kiti atvejai tik slopina jau susidariusį poveikį. Keičiant išorinę pastato architektūrą taip, jog sumažinti trintį tarp paviršiaus ir vėjo srauto, galima ženkliai sumenkinti sūkurių susidarymą [15].

Yra keletas metodų, kurių projektuotojai gali imtis, jog sumažintų dinamines jėgas, atsižvelgdami į pastato geometriją. Geometrijos optimizavimas ankstyvajame projektavimo etape gali lemti daug mažesnę vėjo apkrovą atsiradimą ir intensyvumą [31],[32]. Remiantis modifikacijos pobūdžiu išorinei geometrijai, aerodinaminės modifikacijos gali būti skirstomos į dvi pagrindines dalis: esminės ir nedidelės modifikacijos (žr. 11 pav.). Esminės modifikacijos turi didelę įtaką galutinei pastato formai ir architektūriniam vaizdui bei tokie sprendimai turi būti priimami pradinėje projektavimo stadijoje, kai tuo tarpu, nedidelės modifikacijos, turi gana mažą poveikį pradinei geometrijai ir gali būti taikoma vėlesnėse projektavimo stadijose [5].

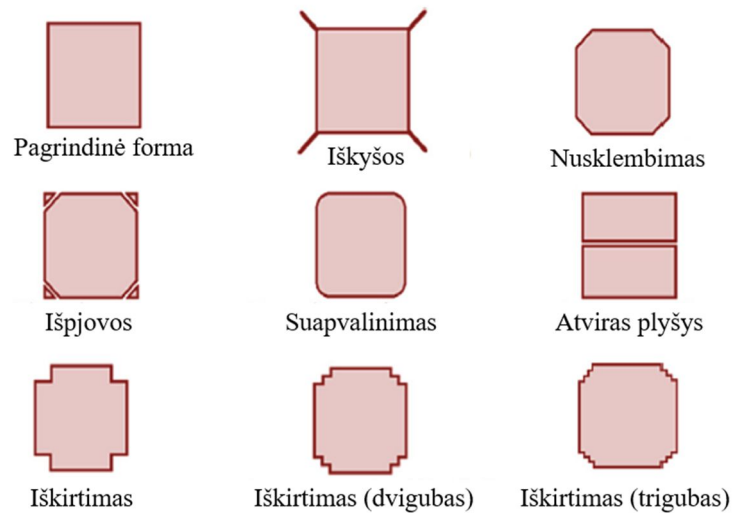


11 pav. Aerodinaminės modifikacijos [5]

1.4.1. Nedidelės modifikacijos

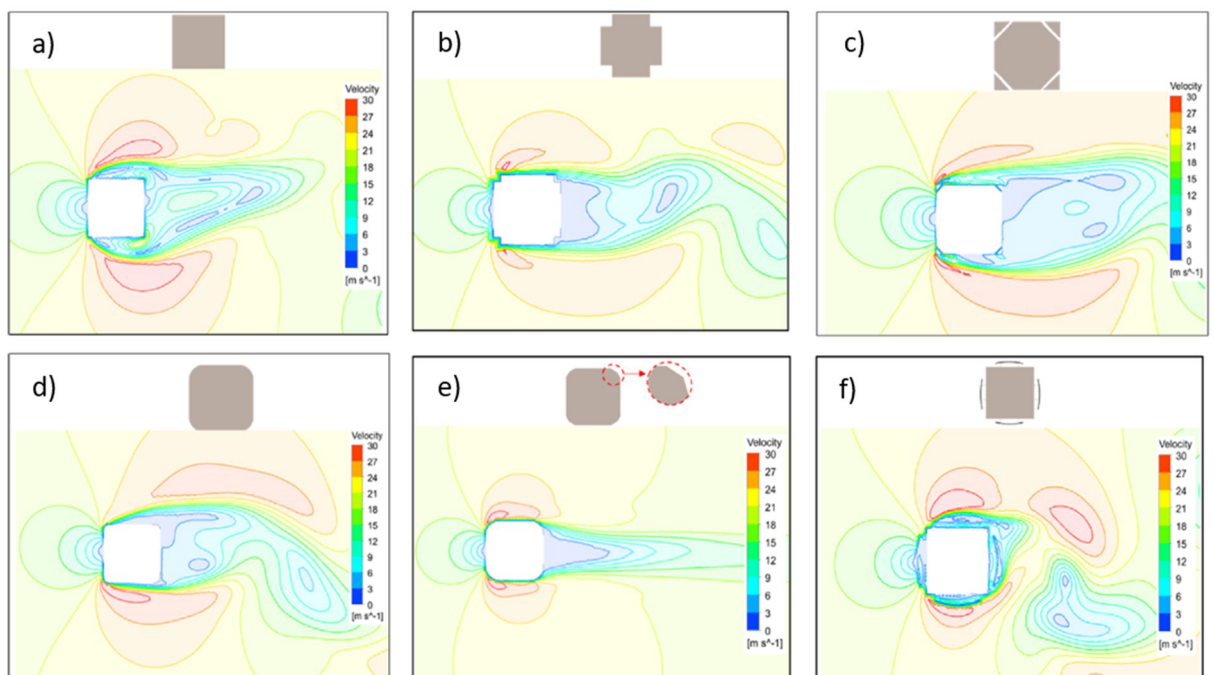
Šios modifikacijos turi nereikšmingą poveikį galutinei pastato struktūrai ir architektūrai. Dažniausiai sutinkami pastatai yra kvadratinio ar stačiakampio plano, tačiau ši geometrija aerodinaminiu požiūriu nėra efektyvi, nes lemia gana didelį sūkurių susidarymą ties pastato paviršiumi. Todėl gali būti keičiami pastato skerspjūvio kampai juos suapvalinant, nusklembiant, įrengiant plyšius (žr. 12 pav.). Šie metodai gali sumažinti tiek skersinį, tiek išilginį vėjo poveikius, lyginant su stačiakampės prizmės

formos pastatais. Keičiant pastato kampus, galima transformuoti atskirų šlyties sluoksnių savybes, taip sumažinant tempimo ir pulsuojančias kėlimo jėgas. Daugybė mokslininkų tyrė pastato kampų modifikacijų poveikį aerodinaminėms jėgoms [33, 34, 35].



12 pav. Nedidelės aerodinaminės modifikacijos [6]

Geresniam supratimui, kaip keičiasi vėjo srautas esant atitinkamai kampų modifikacijai, žemiau yra pateikiama CFD simuliacijomis gauti rezultatai paimti iš mokslininkų Asghari Mooneghi ir Kargarmoakhar darbo (žr. 13 pav.).



13 pav. Srauto pasiskirstymai apie skirtingus skerspjūvius [6]

Galime pastebėti iš 13 pav., jog kampų modifikacijos gali pakeisti srauto schemą apie nagrinėjamą formą. Kiekvieno pakeitimo veiksmingumas priklauso nuo kampo tipo ir dydžio. Matyti, jog kampų modifikacijos sukelia mažesnes atsiskyrimo zonas ir siauresnes sužadinto ribas lyginant su paprasta kvadrato forma. Todėl ši technika gali būti veiksminga mažinant šonines vėjo sukeltas jėgas

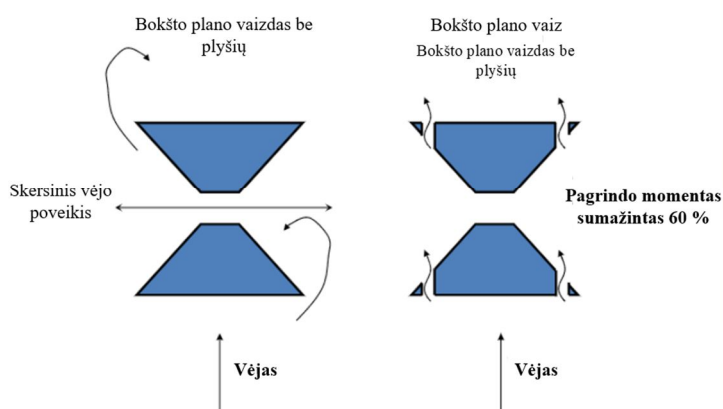
pastato paviršiui. Viename iš nagrinėtų straipsnių yra pateikiama, jog kampų keitimas yra patikima metodika siekiant sumažinti vėjo sukeltą pastato judėjimą iki 30 % [5].

Vieno puikiai žinomų dangoraižių *Taipei 101* vėjo tunelio bandymo metu buvo nustatyta, jog vėjo sukeltos jėgos statmena kryptimi buvo labai didelės ir pastato svyravimai nebūtų tenkinę tinkamumo reikalavimų. Pakeitus pastato skerspjūvį, kaip pavaizduota 14 pav., pagrindo momentas buvo sumažintas 25 % [6].



14 pav. Taipei 101 pastato geometrijos modifikacija (pritaikyta iš [36])

Dar geresnių rezultatų teigiama buvo pasiekta Pietų Korėjoje, kur pastebėta, jog kampuose įrengus plyšius *102 Incheon* bokšto pagrindo momentas sumažėjo net 60 % [37].

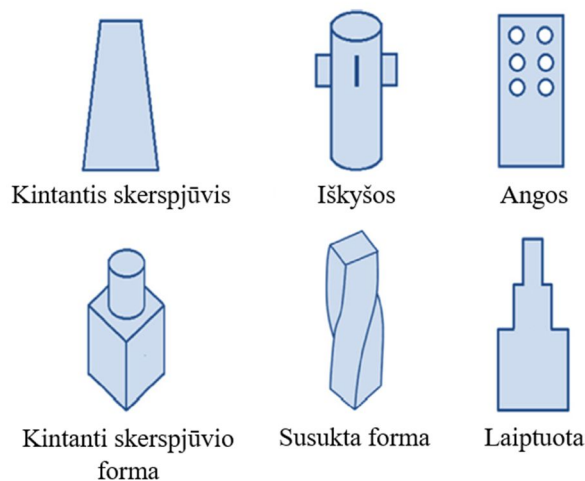


15 pav. Plyšių įrengimas kampuose [37]

Nepaisant to, jog dauguma šių dienų mokslinių darbų teigia, jog kampų modifikacijos turi teigiamą efektą, peržvelgus senesnės literatūros, teko pastebėti, jog yra ir priešingos nuomonės. Mokslininkai Kareemas ir kiti, pasiūlė prielaidą, jog kampų pakeitimas yra ne visada reikšminga priemonė, nes galimas ir neigiamas efektas [38]. Tačiau, pasitelkiant naujausias technologijas ir teisingai suprojektavus bei parinkus tinkamiausią metodą, kaip pagrindžia prieš tai paminėta mokslinė literatūra, galima pasiekti teigiamą efektą, pritaikant pastato kampų modifikacijas.

1.4.2. Esminės modifikacijos

Šios modifikacijos turi reikšmingą poveikį architektūriniam ir konstrukciniam pastato dizainui. Šio tipo pavyzdžiais būtų: siaurėjantis, kintančio skerspjūvio, kiaurymės pastato viršuje, besisukančios formos ar laiptuotos (žr. 16 pav.).



16 pav. Esminės aerodinaminės modifikacijos [6]

Apie kiekvieną modifikaciją plačiau:

Siaurėjanti ir laiptuota forma. Dėl šio tipo geometrinių modifikacijų, pastato plotis kinta keičiantis aukščiui, taip priverčiant susidaryti skirtingiems sūkuriniams srautams, kurie per visą aukštį sklinda skirtingu dažniu [7, 39]. Viename iš straipsnių įrodoma, jog sūkurių formavimasis juda aukštyn priverstinai, o dėl mažesnių pastato matmenų viršutiniuose lygiuose sūkurių dažnis yra didesnis nei apatiniuose. Prisiminkime jau anksčiau užrašytą formulę, jog sūkurinio srauto dažnis priklauso nuo pastato pločio (žr. 1 lygtį). Taigi, toks išblaškytas sūkurių dažnis turi kur kas mažesnę įtaką pastato sužadimui.

Kintančio skerspjūvio pastatai. Pereinantis skerspjūvis nuo apvalaus iki stačiakampio turi panašų efektą, kaip ir siaurėjančios formos pastatai. Kintant aukščiui kinta ir Strouhala skaičius.

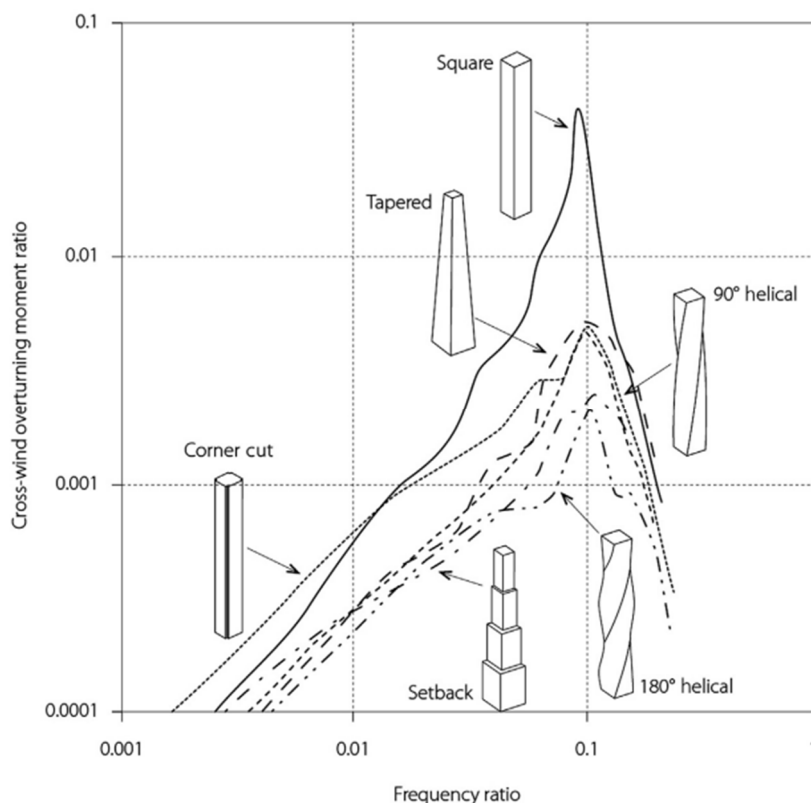
Iškyšos. Taip pat gali sumažinti sūkurinį srautą pridedant prie pastato geometrijos tam tikrus išsikišimus. Labiausiai žinomi yra spiralinės formos išsikišimai, naudojami apskritiems aukštiems kaminams. Tačiau yra patariama vengti išsikišimų projektavimo ant pastatų, kadangi tai gali padidinti ištraukimo jėgą bei apsunkinti pastato priežiūrą [5].

Papildomos angos pastato viršuje. Papildomos angos leidžia vėjui eiti kiaurai pastato, taip neleidžiant susidaryti dideliame sūkuriniame sraute [9]. Tačiau yra svarbu tai, jog šis būdas yra efektyvus tuomet, jei pastatas orientuotas tinkamai, t. y. vėjas pučia būtent išėmos kryptimi. Tokia projektavimo strategija buvo panaudota keliuose žymiuose pastatuose, iš kurių bene garsiausias yra *Shanghai World Financial Center*, kurio viršutinėje dalyje suprojektuota trapecinės formos vėjo anga.

Susukto pastato forma. Per aukštį besisukantis pastatas gali būti labai efektyvus, mažinant sūkurinio srauto sukeltas vibracijas, o suderinus vyraujančio vėjo kryptį ir šio pastato pasukimo kampą, galima gauti dar geresnius rezultatus. Taip pat yra atlikta nemažai tyrimų, kaip skirtingų formų ir susukimo kampų pastatai, veikiami vėjo [40, 41]. Pirmasis tokio tipo dangoraižis yra *Turning Torso*, besisukantis 90^0 per visą aukštį. Pagal mokslininką Vollers [42] tokios formos pastatas yra klasifikuojamas kaip pagrindinės besisukančios formos, dėl vienodų aukštų plano, besisukančių aplink cilindrinę šerdį ir atsikartojančio fasado.

Susuktos formos pastatams galima atlikti daugybę projektavimo sprendimų, kaip tarkim susukimo kampas tarp aukštų, bendras susukimo laipsnis per visą pastato aukštį, arba fasado konstrukciją. Žinoma, dėl tokios formos atsiranda didelių iššūkių projektuojant. Tačiau, bendrame tiesių linijų pastatų kontekste, šios formos tampa viena lengviausiai suprantamų dizaino alternatyvų architektams, tarp neseniai sukurtų netradicinės formos pastatų [43].

Taigi, visos esminės modifikacijos turi reikšmingą efektą, tiek pastato architektūrai tiek dizainui. Šių dažniausiai analizuojamų formų pastatų suvestinė buvo rasta vienoje iš knygų [44]:



17 pav. Vėjo statmena kryptimi spektrinis energijos pasiskirstymas [44]

Ryški smailė yra pastebima kvadratinei stačiais kampais figūrai, o štai dėl formos modifikacijų, tokių kaip kampų sušvelninimas, smailėjanti į viršų forma, spiralinė ir kt., yra atvaizduojamas mažesnis periodinių sukurių poveikis aerodinaminėms jėgoms ir reakcijoms, o pats efektyviausias pastato modelis iš šio grafiko yra 180° susisukimo pastatas.

2. Tyrimų metodologija

Šiame skyriuje aprašoma CFD skaičiavimo metodika. Šioje metodikoje nurodoma kaip bus vykdomas skaitmeninis vėjo tunelio bandymas ir jam atlikti reikalingi parametrai, kaip atliekama skaičiavimo programos verifikacija.

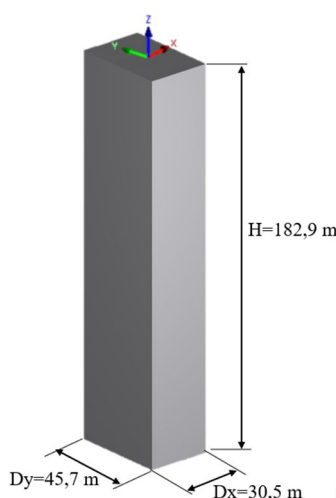
2.1. Geometriniai modeliai

Tyrimui pasirinkti du pastatų modeliai: pirmasis yra standartinis aukštas pastatas, kuris vėjo poveikio atžvilgiu yra plačiai išnagrinėtas, antrasis – netipinės formos dangoraižis, pagal *Turning Torso* geometriją. Modeliavimo atveju pasirinktos keturios vėjo kryptių konfigūracijos (0° , 90° , 180° ir 270°). Kiekvienai konfigūracijai geometrija ir kiti parametrai sukurti naudojantis nustatymais, kurie bus pateikiami kituose poskyriuose.

2.1.1. Standartinio aukšto pastato modelis

Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council (CAARC) koordinatoriai 1969 metais, priėmė bendrą apibrėžimą, standartiniam aukšto pastato modeliui. Po to, iki 1975 metų, penki centrai atliko matavimus naudodami CAARC standartinio pastato standartą. Šių bandymų duomenys buvo susisteminti W. H. Melbourne [45] ir šis rezultatų palyginimas aptartas penktoje tarptautinėje konferencijoje apie vėjo poveikius pastatams. Susirinkimo metu buvo priimtas bendras lygus modelis, kurio tikslas padidinti aukštų pastatų palyginimų tikslumą. Nuo to laiko iki šiandien, šis standartinio aukšto pastato modelis naudojamas lyginant vėjo slėgio poveikius aukštiems pastatams, atliekant verifikacijos procedūras skaičiavimo programoms.

Šis aukšto pastato modelis specifikuotas kaip stačiakampės prizmės formos (žr. 18 pav.). Kalbant apie šio pastato dinamines charakteristikas, yra vertinama tik pirmoji vibracijų moda, kurios dažnis priimtas $0,2$ Hz. Masės paskirstymas priimtas 160 kg/m^3 . Struktūros kritinis slopinimas priimtas lygus 1% (logaritminis slopinimo dekrementas $0,063$), tokiu būdu palengvinat rezultatų palyginimą [45]. Paribio atmosferinis sluoksnis priimtas toks, jog turėjo atspindėti vėjo pūtimą per miškingas zonas ar miesto vietas, kur pastatų aukštis $6\text{-}15$ m (galios eksponentas $0,28$) [45].

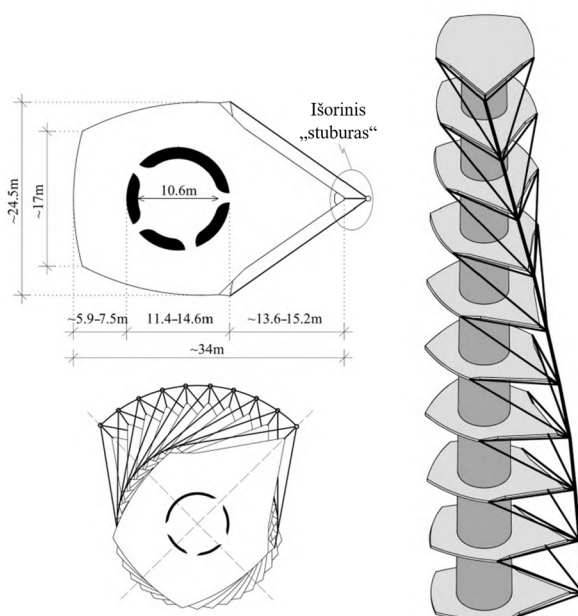


18 pav. CAARC pastato pagrindinės charakteristikos [45]

2.1.2. Netipinės formos pastato modelis

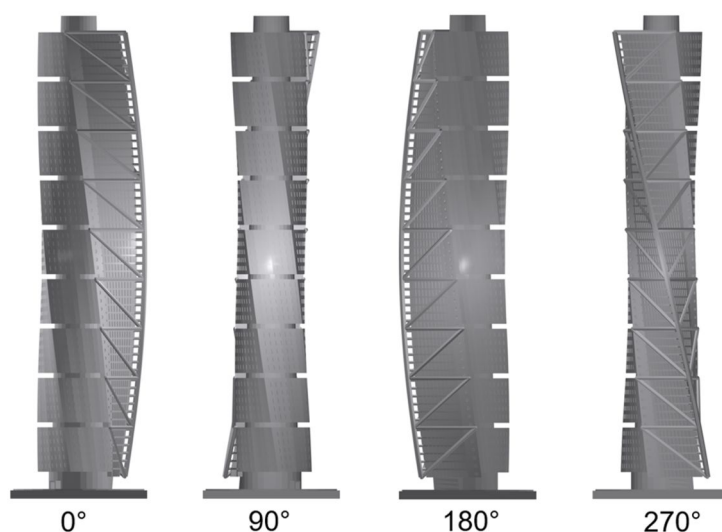
Netipinės formos pastato geometrija yra pagal *Turning Torso* dangoraižį. Šis pastatas žinomas kaip pirmasis susuktos formos dangoraižis, kurio aukštis yra 190 m, susisukimo kampas per visą aukštį 90° , viso yra 56 aukštai, o vidutinis aukšto plotas 400 m^2 .

Konstruktinė schema sudaryta iš apskritos gelžbetoninės šerdies. Tiek gravitacines, tiek šonines apkrovas perima centrinė šerdis. Gelžbetoninės šerdies vidinis skersmuo yra 10,6 m, o sienelės storis svyruoja nuo 2 m iki 40 cm kylant iš apačios į viršų, o išorinis skersmuo svyruoja tarp 14,6 ir 11,4 m [17] (žr. 19 pav.). Be šerdies papildomai naudojamos gelžbetoninės perimetro kolonos ir plieninis išorinis skeletas. Visa tai padeda ne tik išlaikyti gembines aukšto plokštes, tačiau ir perima šonines apkrovas, kurios atsiranda dėl vėjo poveikio.



19 pav. *Turning Torso* plano vaizdas ir konstrukcinės schemas aksonometrinis vaizdas (pritaikyta iš [17])

Skaitmeninio vėjo tunelio bandymui yra reikalingos keturios vėjo kryptių konfigūracijos, šie keturi paviršiai parodyti 20 pav.



20 pav. Modelio paviršiai ties 0° , 90° , 180° , 270° kampais

2.2. Turbulencijos modelis

RWIND Simulation naudoja techniką, kai vėjo srauto kintamieji, kaip greitis ir slėgis yra suskaidomi į vidutinius ir svyruojančius komponentus. Kitaip tariant, iš pagrindinės skysčių judėjimo lygties yra gaunamos vidutinės reikšmės, atmetus visas mažas pulsacines reikšmes, taip gaunant modifikuotas lygtis, kurios leidžia skaičiavimų požiūriu kur kas lengviau rasti sprendinius. Kaip jau buvo minėta literatūros apžvalgoje, tos lygtys yra vadinamos RANS lygtimis.

RWIND Simulation modeliavime yra naudojamas $k - \varepsilon$ turbulencijos modelis, kuriuo sprendžiamos RANS lygtys. Sprendžiant šias lygtis yra įvedamos dvi turbulencijos savybių transportavimo lygtis. Pirmoji yra turbulencijos kinetinės energijos lygtis (6), o antroji reguliuoja k sklaidos greitį ε (7).

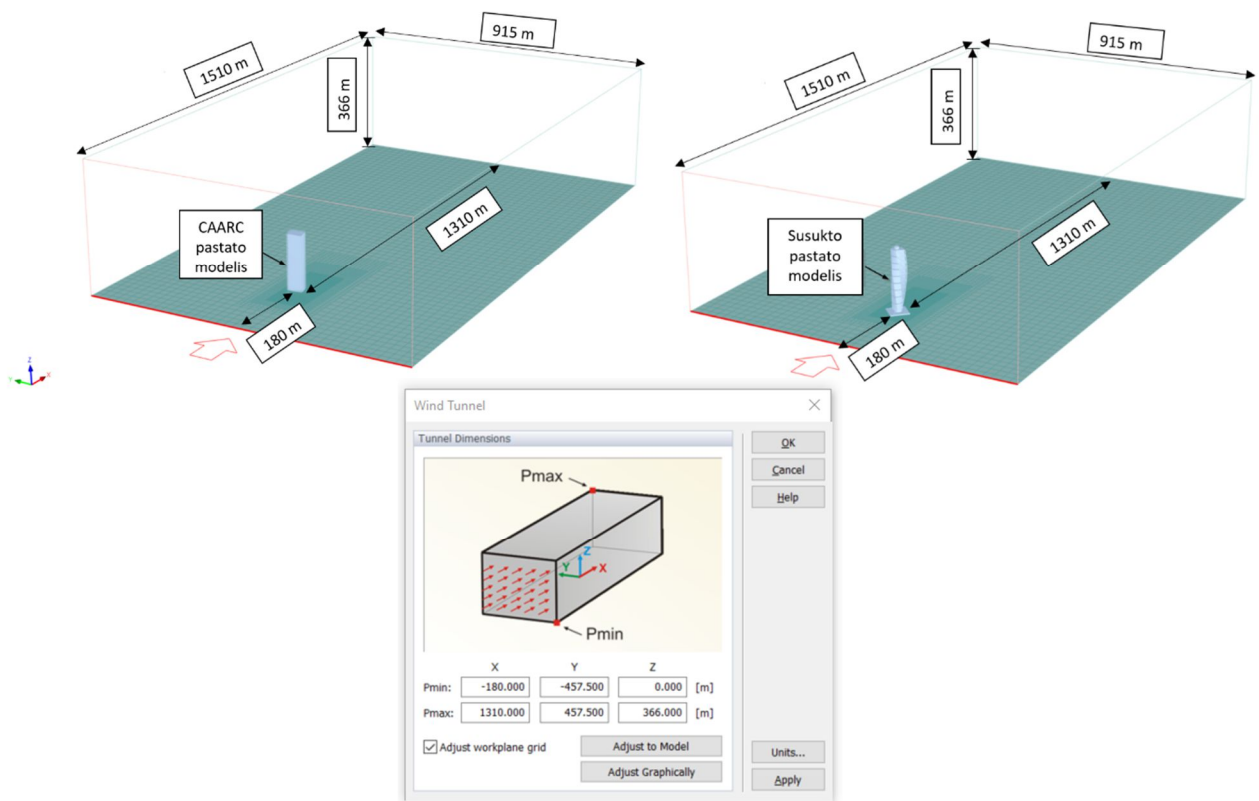
RWIND Simulation galima pasirinkti, jog programa suskaičiuotų sudėtingas kinetinės energijos ir sklaidos greičio formules, pasirenkant turbulencijos intensyvumą I . Norint pasirinkti tinkamą turbulencijos intensyvumą, gerai turėti tam tikrą matavimų šabloną arba ankstesnių eksperimentų duomenis, kuriais būtų galima pagrįsti pasirinktą turbulencijos intensyvumo vertę. Štai keletas turbulencijos intensyvumo įvertinimo pavyzdžių [46]:

1. Aukštos turbulencijos atvejis, kai I yra tarp 5 % ir 20 %. Tai gali būti labai didelio greičio srautai, kurie susidaro tokiuose įrenginiuose, kaip turbinos ir kompresoriai.
2. Vidutinės turbulencijos, kai I yra tarp 1 % ir 5 %. Srautams, kurie yra ne tokiuose sudėtinguose įrenginiuose, kaip ventiliacijos vamzdžiuose.
3. Žemos turbulencijos atvejis, kai I yra ženkliai mažiau nei 1 %. Tai gali būti, tokiais atvejais, kaip išorinis srautas susidaro ties automobilio ar orlaivio paviršiumi. Labai kokybiški vėjo tuneliai gali pasiekti labai žemą turbulencijos lygį.

Bandymų metu turbulentinis intensyvumas naudojamas $I = 0,15$ %.

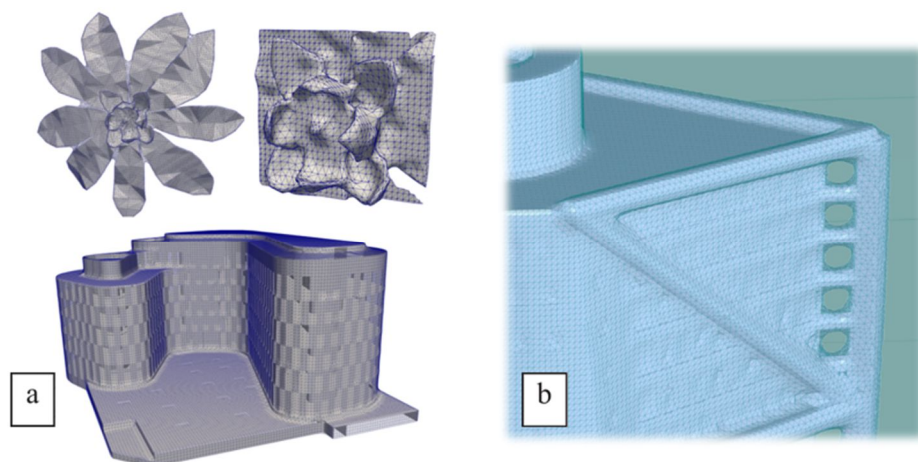
2.3. Skaičiavimo domenai ir tinklelio tankis

Skaičiavimo sritis aplink tiriamą pastatą parodyta 21 pav. Skaičiavimo sritis, arba kitaip – domenai, apibrėžia regioną, kuriame skaičiuojamas srauto laukas nagrinėjamam modeliui. Skaičiavimo domenai turi būti pakankamai dideli, jog būtų įvertintas visas srauto poveikis. Taip pat išnagrinėti du dokumentai, kuriuose pateikta dviejų skirtingų standartų naudojimo rekomendacijos [47, 48]. Naudojantis rasta informacija priimti skaičiavimo domeno matmenys, kaip rekomenduojama, užimto ir laisvo skaičiavimo ploto santykis atitinka 3 %.



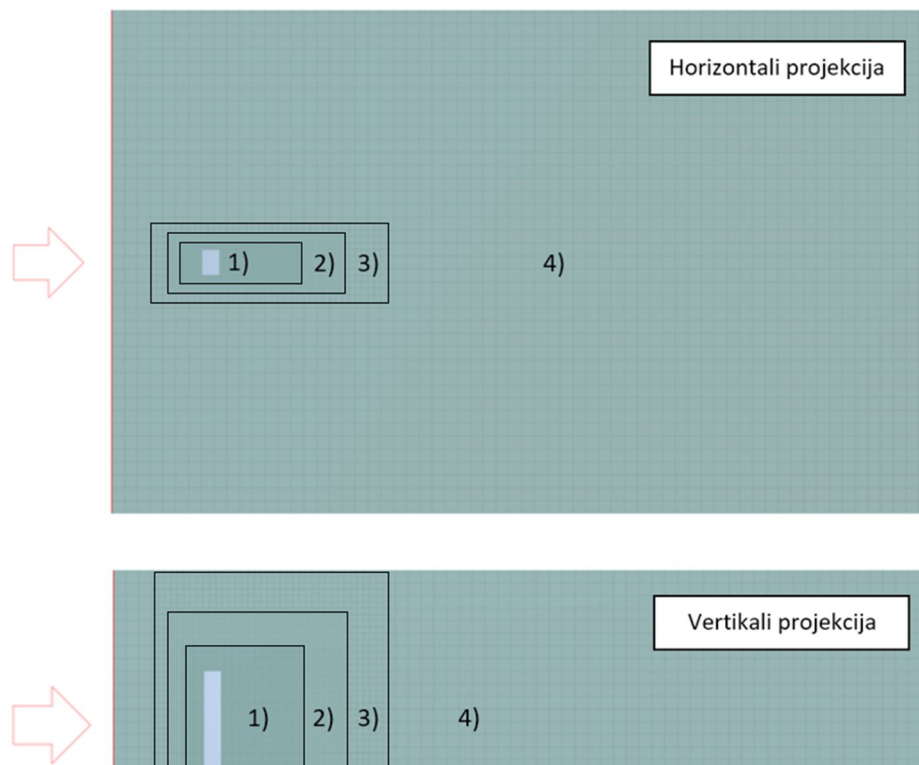
21 pav. Skaičiavimo domeno matmenys. Kairėje pusėje CAARC pastato modeliui, dešinėje – sukto formos pastatui ir vėjo tunelio parametrų įvestis

Norint sugeneruoti baigtinių elementų tinklą, modelis turi būti topologiškai teisingas. *RWIND Simulation* programoje modelio geometrija apgaubiamą trikampaiais baigtiniais elementais, o terminas „topologiškai teisingas“ reiškia, jog šie trikampiai turi sudaryti uždarą tinklą, kitaip tariant kiekvieno baigtinio elemento kraštas turi būti susijungęs su gretimai esančio ir griežtai negali būti laisvų tarpų ar persidengimo. Tarkim tokiais atvejais, kai turime sudėtingos formos geometriją, kokia yra nagrinėjamo susukto pastato, apgaubimas baigtiniais elementais tą modelį mums supaprastina, ištaiso anksčiau paminėtas geometrijos problemas. Žemiau pateiktame paveikslėlyje galime pamatyti keletą pavyzdžių, kaip sudėtingos geometrijos kūnas paverčiamas į paprastesnį ir skaičiavimo programai suprantamą modelį.



22 pav. Modelio apgaubimas baigtinių elementų tinkleliu. (a) pavyzdžiai pateikiami www.dlubal.com; (b) *Turning torso* pastatui sugeneruotas tinklelis

Taip pat atitinkamas tinklelis turi būti sugeneruojamas domeno paviršiuose. Nagrinėjamu atveju sugeneruotas tinklelis, turintis keturias skirtingo tankumo zonas. Pirmoji zona yra arčiausiai pastato ir tankiausia, baigtinio elemento dydis 2,9x2,9 (m), antroji – 5,8x5,8 (m), trečioji – 11,67 (m). Paskutinė zona yra kur kas retesnė, BE dydis 23,3x23,3 (m), nes ši tolimesnė riba yra ne tokia svarbi skaičiavimų atžvilgiu. Žemiau pateiktame paveikslėlyje galime matyti plano ir profilio 2D vaizdus:



23 pav. Skaičiavimo domeno tinkeliai su pavaizduotais skirtingais tankumo sluoksniais

Siekiant įvertinti tinklelio įtaką skaičiavimams buvo atlikti du skaičiavimai su 20 % ir 40 % tinklelio tankumais. Pirmuoju variantu gauti 487 559 baigtiniai elementai, o antruoju – 2 572 020 BE. Taigi, skirtumas tarp abiejų variantų yra beveik penki kartai, tolygiai gautas ir ilgesnis skaičiavimo laikas. Jei pirmuoju atveju užtruko apie 10 minučių sugeneruoti tinklelį ir atlikti visus skaičiavimus, antrojo atvejo skaičiavimas užsitęsė beveik valandą. Esant tankesniai tinkleliui buvo sugeneruota šiek tiek didesnė apkrova į pastato paviršių. Akivaizdu, jog norint gauti tikslesnius rezultatus reikalingas kuo mažesnių baigtinių elementų sugeneravimas, tačiau atsižvelgiant į laiko sąnaudas, kurios būtų reikalingos atlikti skaičiavimus daug kartų, optimaliausias yra pirmasis variantas, priimant 20 %.

2.4. Vėjo slėgio koeficiento nustatymas

Vėjo slėgio koeficientas C_p virš kūno yra išreiškiamas bedimensiu slėgio koeficientu:

$$C_p = \frac{p - p_o}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_H^2}; \quad (9)$$

čia:

p – statinis slėgis taške, kuriame vertinamas slėgio koeficientas;

p_o – atmosferos slėgis ($p_o = 0 \text{ Pa}$);

ρ – oro tankis ($\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$);

v_H^2 – vėjo greitis, imamas ties pastato aukščiu.

2.5. Vėjo srauto modelis

Vidutinis vėjo greitis tam tikroje vietoje ar aukštyje z apskaičiuojamas logaritminiu būdu, pagal šią empirinę formulę [49]:

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{k_f} \ln \frac{z}{z_0}; \quad (10)$$

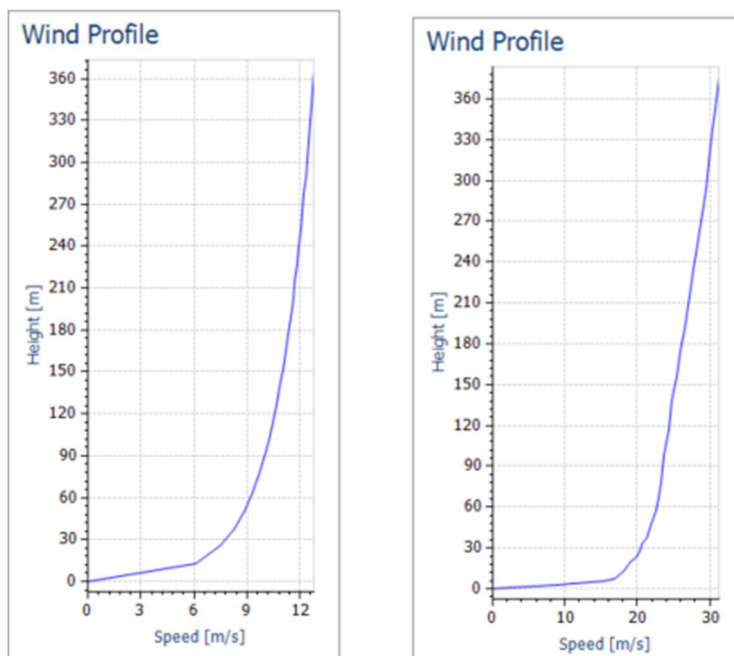
čia:

k_f – Karmano konstanta;

z_0 – paviršiaus šiurkštumas;

u_* – trinties greitis, išreiškiama kita formule.

Programoje *RWIND Simulation* sugeneruojamas toks vėjo greičio profilis:



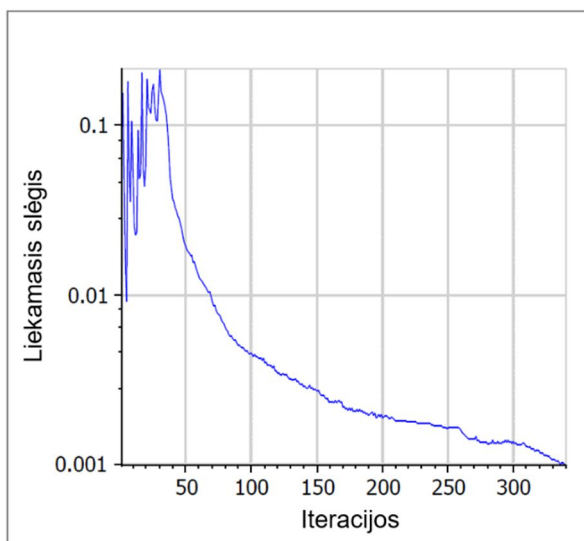
24 pav. Vėjo greičio profiliai verifikacijos procedūrai (kairėje), esant vėjo greičiui 26 m/s (dešinėje)

2.6. Modelio verifikacija

Teigiama, jog būtina patvirtinti CFD programą, kuria bus atliekami skaičiavimai. Verifikacija yra laikomas procesas, kuriuo nustatoma kiek tiksliai bandomasis modelis atspindi realiąją reikšmę. Bene geriausias būdas patikrinti bandomąjį CFD modelį, jį tiesiogiai palyginti su publikuotais kitų mokslininkų eksperimentiniais ir skaitiniais duomenimis.

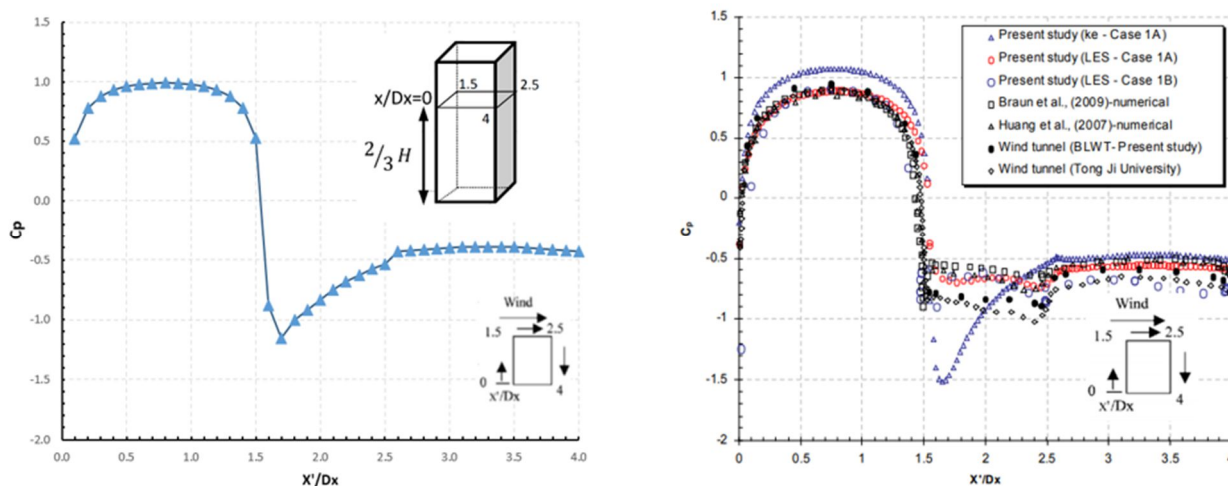
Kaip jau minėta ankstesniame poskyryje, *Commonwealth Advisory Aeronautical Council* aukšto pastato modelis yra plačiai naudojamas tiriant aukštų pastatų vėjo apkrovą, atliekant vėjo tunelio bandymus ir paprastai yra priimtas eksperimentinių metodų kalibravimui. Todėl toliau *CAARC* pastatas bus naudojamas verifikavimo procedūrai. Šio standartinio aukšto pastato duomenys, gauti skirtingų skaitinių metodų ir eksperimentinių vėjo tunelio bandymų metu, kurie buvo publikuoti vienuoliktoje Amerikos vėjo inžinerijos konferencijoje 2009 metais [50], bus palyginami su mano gautais duomenimis iš *RWIND Simulation*.

Atliekant skaičiavimus liekamojo slėgio konvergencijos kriterijus nustatomas lygus 0,001. Toks konvergavimo kriterijus pasiekiamas po 400 iteracijų.



25 pav. Liekamasis slėgis

Daugelis rastų tyrimų apima paprastus grafinius palyginimus [51, 52, 53], kai skaitiniai ir eksperimentiniai rezultatai palyginami, kaip parodyta 26 paveiksle. Tokiuose grafiniuose palyginimuose sakoma, jog modelis yra patvirtintas, jei rezultatai iš esmės sutampa. Kaip matome 26 pav. kairėje pusėje yra pavaizduoti gauti skaičiavimų rezultatai, o dešinėje pusėje – kitų mokslininkų. Slėgio koeficientai apskaičiuoti ties keturiomis pasato pusėmis, kurios atitinkamai yra sunumeruotos, o tokio perimetro aukštis nuo nulinio taško atitinka $2/3$ viso pastato aukščio. Ties šoninėmis pastato briaunomis, gauname identiškus rezultatus, todėl plokštuma 4-0 nevaizduojama grafike, nes yra veidrodinis atspindys 1.5-2.5 plokštumos rezultatų.



26 pav. Kairėje pusėje C_p reikšmės gautos atliekant skaičiavimus, dešinėje pusėje kitų mokslininkų gauti duomenys [50]

RWIND Simulation gauti rezultatai ir eksperimentiniai rezultatai pagal Dagnew ir kt. [50] yra glaudžiai palyginami. Šoniniame ir galiniame paviršiuose pastebimi 10-20 % duomenų skirtumai, kuriuos galima paaiškinti dėl naudojamo turbulencijos modelio ($k - \varepsilon$) ar tinklelio tankumo.

2.7. Problemų sprendimas

Nors ir *RWIND Simulation* esantis *OpenFOAM* įrankių rinkinys dažniausiai pateikia stabilius ir teisingus rezultatus, visgi reikia nepamiršti, jog 3D turbulentinio srauto modeliavimas yra netiesinės matematikos problema, todėl iteracinių sprendimų seka ne visuomet gali konverguoti į tikslų sprendinį. *RWIND Simulation* programoje standartiškai yra priimta, jog sprendinys yra teisingas, kai liekamas slėgis nukrenta žemiau nei 0,001. Tai paprastai įvyksta per 500 iteracijų, tačiau kartais skaičiavimas yra pabaigiamas nepasiekus norimos vertės. Ši problema iškilo *Turning Torso* pastatui skaitmeniniame vėjo tunelyje, kai po 500 iteracijų, liekamas slėgis nepasiekė žemiausios vertės. Tam gali būti daugybė priežasčių ir sunku rasti vieną universalų sprendinį, tačiau susisteminus, tai kas buvo rasta literatūroje, yra galimi šie sprendimo variantai:

1. tęsti skaičiavimus, pasirinkus didesnę iteracijų skaičių, patikrinti ar sprendinys toliau artėja, ar ne;
2. padidinti skaičiavimo srities matmenis, t. y. vėjo tunelio ribas, kadangi automatiškai nustatytų matmenų kartais gali nepakakti, ypač atstumo už modelio;
3. padidinti baigtinių elementų tinklelio tankį;
4. supaprastinti ir optimizuoti modelį, tai galima padaryti keliais būdais:
 - jei nagrinėjamas pastatas turi bet kokių angų, tokių kaip langai ir durys, reiktų jas uždaryti, priimant, jog vėjas nepatenka į pastato vidų;
 - pašalinti mažas detales nuo pastato geometrijos, kurios turi mažą ar visai jokios įtakos modeliavimo rezultatams;
 - pastatas turi būti tinkamai pastatytas ant vėjo tunelio apatinio sluoksnio arba žemiau šio lygi, jei modelis yra orientuotas virš vėjo tunelio dugno, rezultatai nebus teisingi.

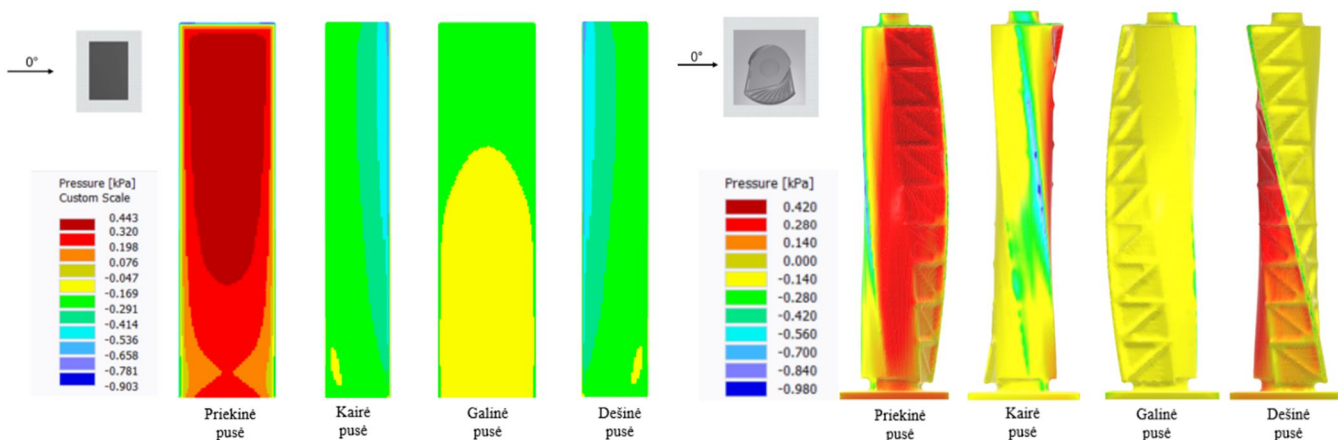
Tęsiant skaičiavimus sudėtingos formos pastatui buvo pastebėta, jog liekamas slėgis didėjant iteracijų skaičiui ne mažėja, o priešingai – didėja. Tai parodo, jog sprendinys tolsta ir galimai nekonverguos. Toliau įvertinus tai, jog nenorint keisti nei tinklelio tankumo, nei pastato geometrijos, lieka vienas galimas problemos sprendimo variantas – pakeisti vėjo tunelio matmenis. Kaip buvo minėta, jog dažniausiai nepakanka atstumo už modelio, šis atstumas buvo padidintas 40 m ir atlikus skaičiavimus, buvo pasiekta 0,001 liekamojo slėgio riba.

3. Tyrimų rezultatai

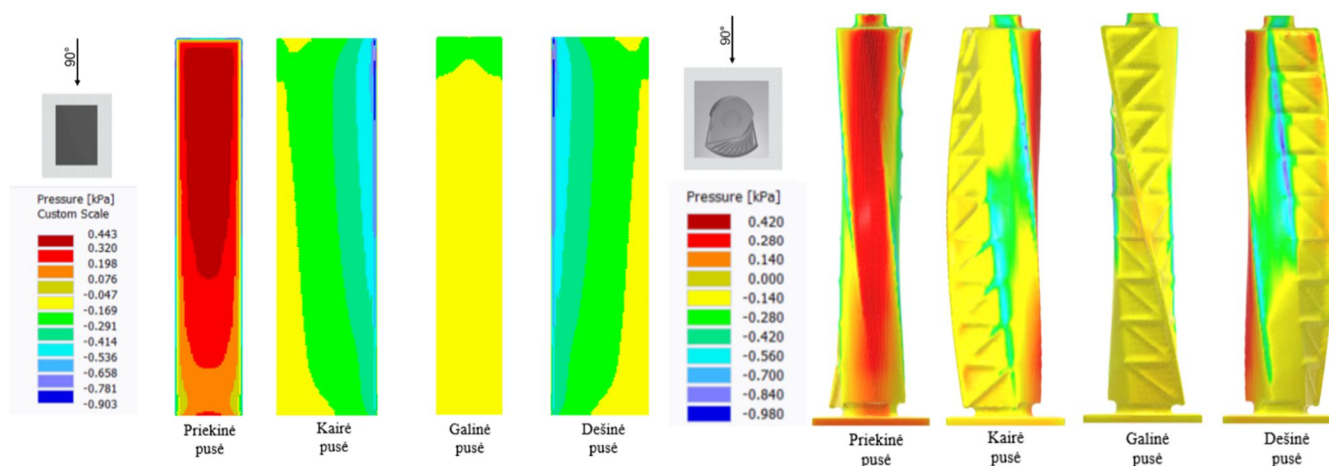
Šis skyrius yra skirtas tyrimo rezultatams ir jų aptarimui. Palyginami vėjo apkrovos, atstojamosios jėgos ir apskaičiuoti slėgio koeficientų rezultatai. Galiausiai visa tai aptariama atsižvelgiant į ankstesnius bandymus rastus literatūros apžvalgos metu.

3.1. Slėgis į paviršius

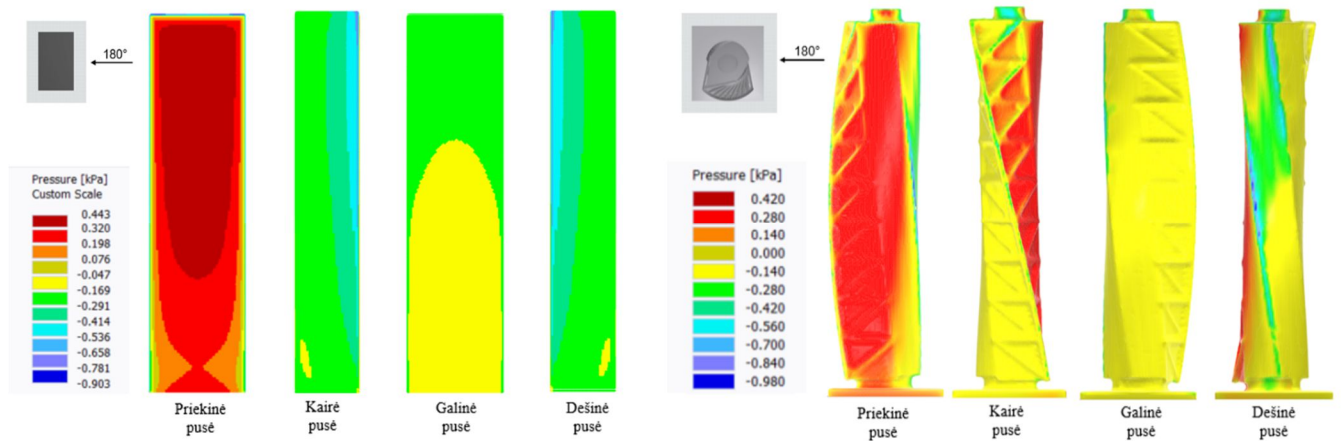
Žemiau pateiktuose paveikslėliuose (27 pav. – 30 pav.) pavaizduota visų keturių vėjo krypčių slėgio pasiskirstymas ties pastatų paviršiais. Kaip matome, visiems stačiakampės prizmės pastato paviršiams yra fiksuojamos maksimalus slėgis, kuris atitinka 0,443 kPa. Sudėtingos formos pastatui toks maksimalus slėgis yra mažesnis ir lygus 0,420 kPa. Iš to matyti, jog antrasis pastato variantas patiria mažesnę vėjo poveikį. Detalesnis poveikis aptarimas kitame skyriuje, kadangi yra kur kas pravarčiau naudoti bedimensį C_p koeficientinį pasiskirstymą.



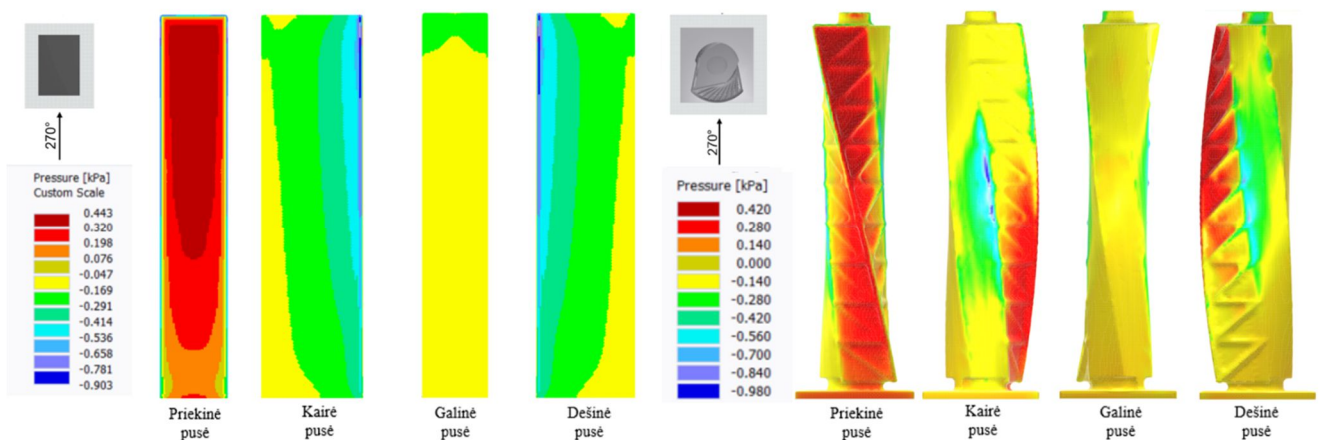
27 pav. Vėjo kryptis (0°) ir pastatų paviršių slėgio pasiskirstymas ties priekiniu, galiniu ir šoniniais paviršiais



28 pav. Vėjo kryptis (90°) ir pastatų paviršių slėgio pasiskirstymas ties priekiniu, galiniu ir šoniniais paviršiais



29 pav. Vėjo kryptis (180°) ir pastatų paviršių slėgio pasiskirstymas ties priekiniu, galiniu ir šoniniais paviršiais



30 pav. Vėjo kryptis (270°) ir stačiakampio pastato paviršių slėgio pasiskirstymas ties priekiniu, galiniu ir šoniniais paviršiais

3.2. Slėgio koeficientai

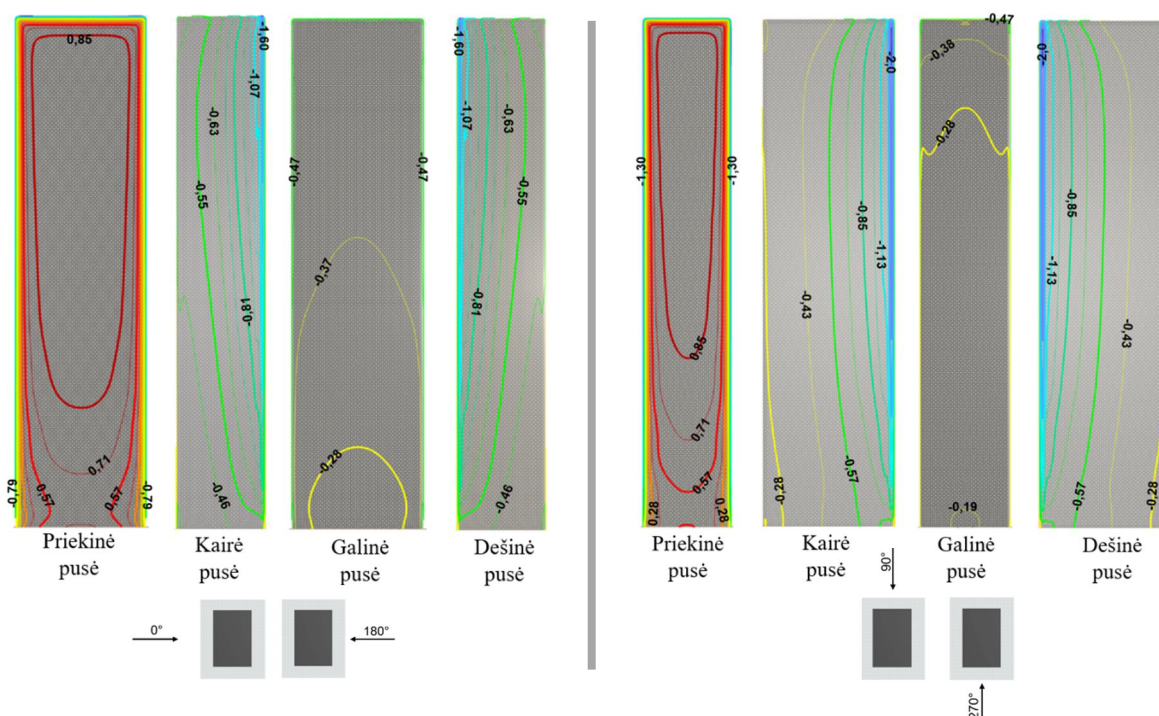
Vietoj realių slėgio verčių, galima naudoti bedimensį slėgio koeficientą C_p ir kaip teigia Andersonas [54], šio koeficiento naudojimas yra įprasta aerodinaminės inžinerijos praktika. Jis yra taikomas ne tik matavimo masteliui, bet ir suprasti vidutinę paviršiaus slėgio sklaidą. Šie slėgio koeficientai pavaizduoti nuo 31 pav. iki 32 pav., abiem pastatų variantams, ties 0° , 90° , 180° ir 270° vėjo kryptimis. Išskyrus stačiakampei prizmei užtenka pavaizduoti iš jos ilgesniosios ir trumpesniosios kraštinių, kadangi kitos dvi yra identiškos išvardintoms.

Teigiamos slėgio koeficiento reikšmės nurodo slėgį, o neigiamos ištraukimą. Toje pastato pusėje, iš kurios yra vėjo atakos kryptis, stačiakampės prizmės pastatui aukščiausia koeficiento reikšmė yra 0,85 tiek ilgesnei, tiek ir trumpesnei kraštinei. Kitų mokslininkų atliktuose darbuose ši reikšmė svyruoja nuo 0,8 iki 0,97 [50, 55, 56]. Tuo tarpu susuktos formos pastatui maksimali slėgio koeficiento reikšmė yra kiek mažesnė 0,76, kai vėjo kryptis 180° .

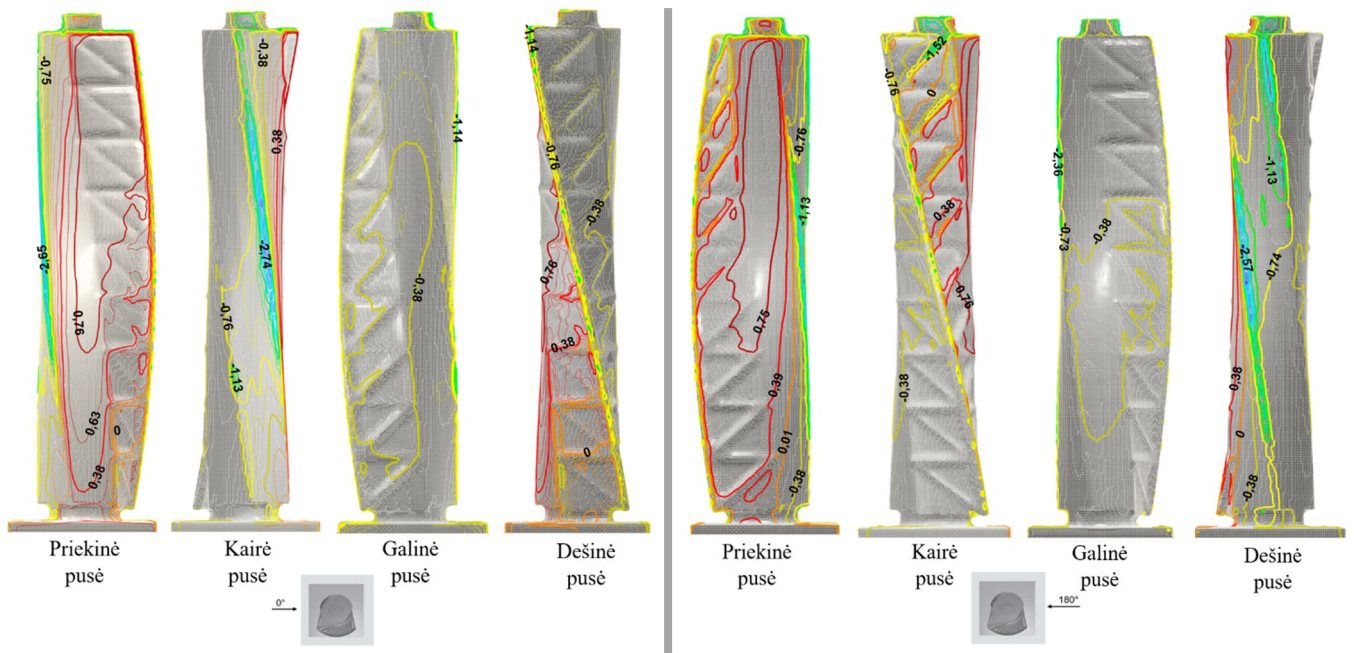
Kalbant apie šoninius pastatų paviršius, čia atsiranda ryškūs skirtumai. Kadangi, besisukančios geometrijos modeliui daugumai paviršių pastebimas stiprus C_p verčių pokytis nuo slėgio iki išsiurbimo. Tuo tarpu, standartiniam stačiakampiam pastatui šonuose visada vyrauja tik neigiamos reikšmės. Nagrinėtu atveju šoninio paviršiaus pusė arčiau priekinės patiria tarp -1,6 ir -2,0 ištraukimą,

o tolstant link galinės pusės sumažėja iki -0,28. Susukto pastato šonuose ryškios tendencijos negalima pastebėti, čia atsiranda ir vėjo slėgis, kadangi dalis 0° vėjo atakos paviršiaus priklauso ir šoniniai pusei dėl pastato pasisukimo. Tačiau, tai nėra bloga praktika, kaip ir buvo paminėta literatūros apžvalgoje, toks netolygus vėjo poveikis sąlygoja į mažesnius sūkurinio srauto sukeltus pastato virpesius.

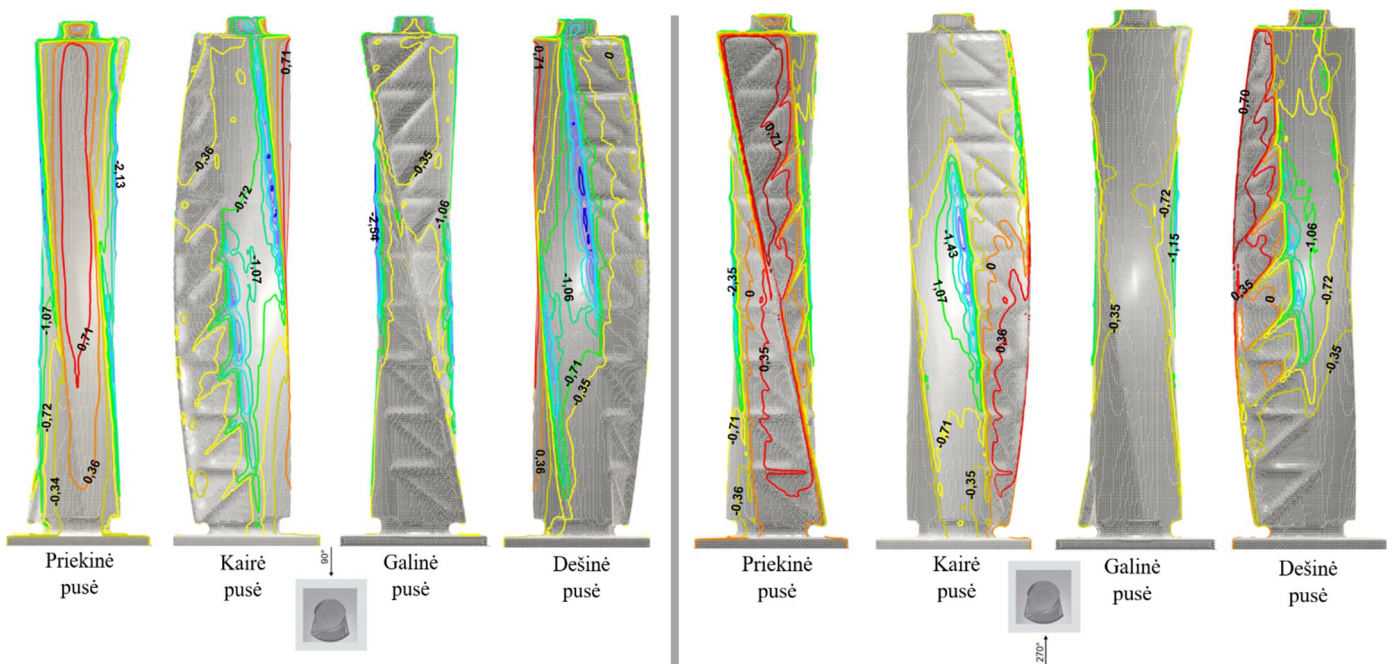
Taip pat, pastebima ištraukimo jėga ne tik šoniniuose pastato paviršiuose, tačiau ir galinėse pastato pusėse. Kaip ir buvo galima tikėtis, atskiri vėjo srautai pasidalinę ties pastatų šonais užsisuko ir galinėje pusėje sukūrė ištraukimo jėgas. Stačiakampės prizminės formos pastatui ištraukimo jėga iš apačios kylant į viršų didėja nuo -0,19 iki -0,38 abiem vėjo krypčių konfigūracijoms. Lyginant su galinėmis susuktos formos pastato plokštumomis, čia nėra simetrinio pasiskirstymo, tačiau plokštumos vidurinėje dalyje slėgio ištraukimo koeficientas svyruoja nuo -0,38 (0° , 180°) iki -0,35 (90° , 270°). Kaip galime pastebėti, kuo platesnė pastato pusė yra atkreipta statmenai vėjo pūtimo kryptiai, tuo už pastato susidaro didesnė ištraukimo jėga.



31 pav. Vėjo slėgio koeficientų C_p pasiskirstymas CAARC pastatui



32 pav. Vėjo slėgio koeficientų C_p pasiskirstymas susuktos formos pastatui, kai vėjo kryptis 0° ir 180°



33 pav. Vėjo slėgio koeficientų C_p pasiskirstymas susuktos formos pastatui, kai vėjo kryptis 90° ir 270°

Skaičiavimais gautų maksimalių C_p reikšmių palyginimas, abiem pastatų tipams, pateiktas 2 lentelėje. Visais vėjo krypties atvejais priekinėje pastato pusėje teigiami vėjo slėgio koeficientai yra mažesni *Turning Torso* pastatui. Pati nepalankiausia vėjo atakos kryptis šiam pastatui yra ties 0° kampu. Neigiamos vėjo slėgio koeficientų reikšmės mažesnės stačiakampės prizmės pastatui. *Truning Torso* pastatui nepalankiausia vėjo atakos kryptis dėl vėjo ištraukimo taip pat, ties 0° kampu.

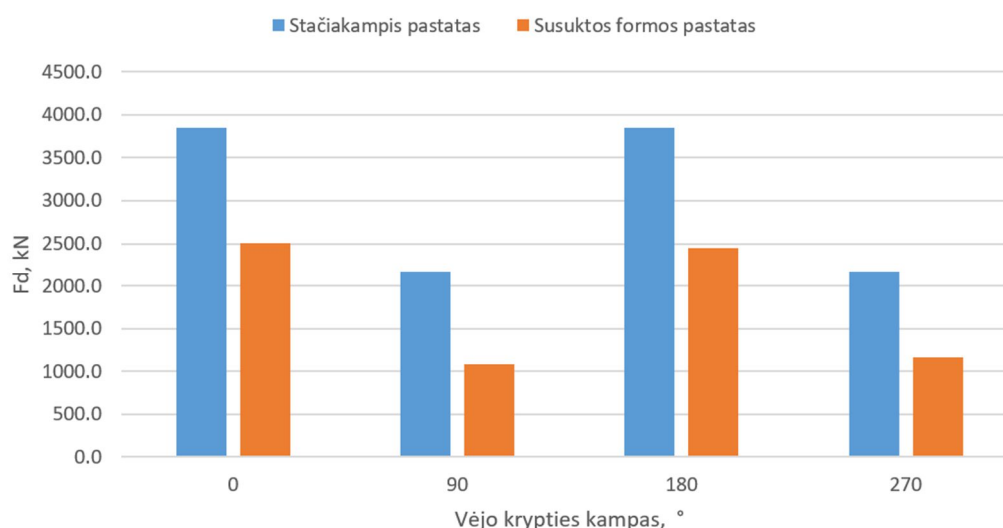
2 lentelė. Vėjo slėgio koeficientų C_p maksimalių verčių palyginimas

| Maksimali vertė | Vėjo atakos kampas 0° | | Vėjo atakos kampas 90° | | Vėjo atakos kampas 180° | | Vėjo atakos kampas 270° | |
|------------------------|-----------------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
| | | | | | | | | |
| CAARC pastatas | 0,85 | priekis | 0,85 | priekis | 0,85 | priekis | 0,85 | priekis |
| | -1,6 | kairė/dešinė pusė | -2,0 | kairė/dešinė pusė | -1,6 | kairė/dešinė pusė | -2,0 | kairė/dešinė pusė |
| Turning Torso pastatas | 0,76 | priekis | 0,71 | priekis | 0,75 | priekis | 0,71 | priekis |
| | -2,74 | kairė pusė | -2,54 | galas | -2,57 | dešinė pusė | -1,43 | kairė pusė |
| Skirtumas, % | 11,18 % | | 17,95 % | | 12,50 % | | 17,95 % | |
| | 52,23 % | | 23,79 % | | 46,52 % | | 33,24 % | |

Mažiausią poveikį sukelti vėjo atakos kryptis *Turning Torso* pastatui yra ties 270° kampu.

3.3. Atstojamoji jėga

Dar vienas dydis, padedantis įvertinti vėjo sukuriamą poveikį pastatui, yra atstojamoji jėga. Tai jėga, kuri atsiranda dėl vėjo suminio poveikio ir sukeliama masės centre. Žemiau pateiktame paveiksle palyginama kiekvieno atakos kampo atstojamoji jėga abiem pastatų variantams.

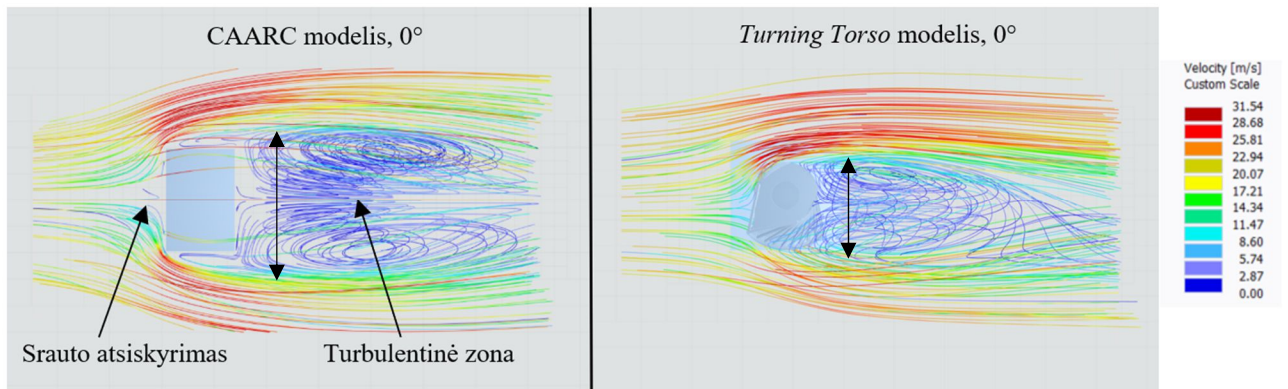


34 pav. Pastatų atstojamosios jėgos palyginimas ties skirtingomis vėjo kryptimis

Rezultatai rodo, jog susuktos formos pastatui ties 0° ir 180° kampais reikšmės mažesnės 42-44 %, o ties 90° ir 270° mažesnės 61-67 %, nei stačiakampės prizmės pastatui.

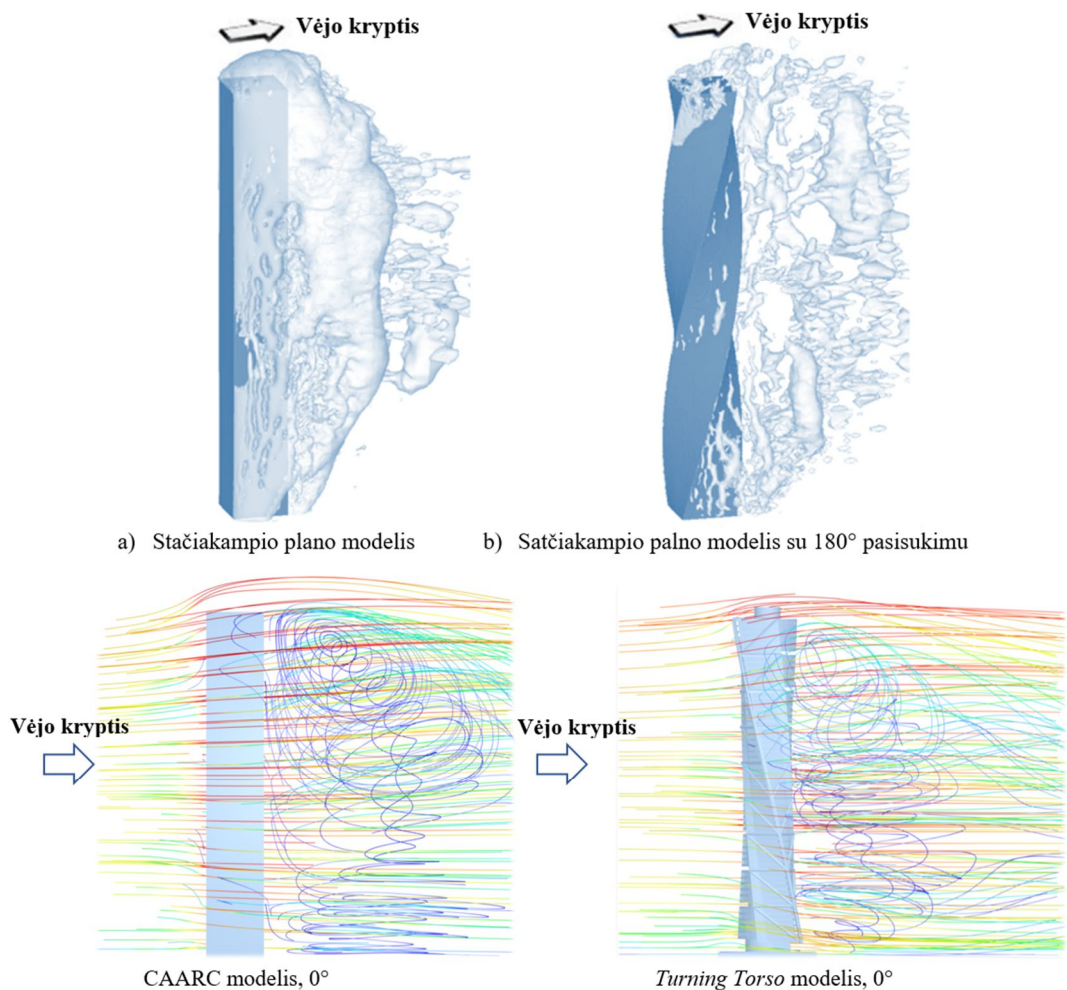
3.4. Vėjo srauto pasiskirstymas

Taip pat, yra labai svarbu suprasti vėjo srauto pasiskirstymą aplink pastatą, siekiant pagrįsti vėjo simuliacijos rezultatus. CFD modelis parodo srauto atsiskyrimo vietas bei turbulentiškumo (sūkurių susidarymo) zonas už modelio. Tos zonos susidaro tuomet, kai vėjo srautas tekėdamas neaptakios kliūtis paviršiumi pereina per skirtingus slėgio gradientus, todėl tam tikrame taške atsiskiria nuo kūno ir priklausomai nuo pastato geometrijos, pavėjinėje pusėje, susidaro turbulentinė zona (žr. 35 pav.). Ši turbulentinė zona sukuria mažesnę slėgį ir todėl yra sukuriama išsiurbimo jėga.



35 pav. Srauto atsiskyrimas ir turbulentinės zonos aplink bandomuosius modelius, vaizduose iš viršaus

Prisimenant iš literatūros apžvalgos kaip susidaro sūkurinis srautas aplink pastatą, yra žinoma, jog neigiami vėjo slėgio regionai atsiranda dėl sūkurinio srauto. Susuktos formos pastatui turbulentinė zona yra kur kas mažesnė lyginant su stačiakampės prizmės forma, kaip tai matome 33 paveiksle. Tai reiškia, jog mažesnis sūkurinio srauto poveikis atitenka *Turning Torso* pastatui. Šis teiginys gali būti pagrindžiamas vizualizacija paimt iš tarptautinio aukštų pastatų žurnalo, kurioje matome du skirtingus pastatų modelius ir aplink juos susidarančius momentinius sūkurius:



36 pav. Sūkurių susidarymo momentinė vizualizacija (viršuje), pritaikyta iš [57], *RWIND Simulation* vėjo srauto linijų atvaizdavimas (apačioje)

Taigi, stačiakampės prizmės pastatui susidaro didelis neigiamo slėgio regionas pavėjinėje pastato pusėje, tai matyti 36 pav., kuris driekiasi per visą pastato aukštį. Dėl šio periodiško ir gerai koreliuojančio sūkurinio srauto susidarymo, šiam modeliui atitenka didelis skersinis vėjo poveikis. Visai kitoks sūkurinio srauto formavimasis pastebimas spiralinės formos pastatui. Čia sūkurių susidarymas pavėjinėje pusėje yra kiek mažesnis, kadangi jie ties skirtingu pastato aukščiu formuojasi skirtingais laiko intervalais, dėl to susidaro mažesnis skersinis vėjo poveikis.

Išvados ir rekomendacijos

1. RWIND Simulation skaičiavimo modelis gali būti naudojamas gauti realius rezultatus, nes buvo patvirtintas verifikacijos procedūra. Standartinio aukšto pastato perimetro (perimetro aukštis nuo nulinio taško atitinka 2/3 pastato aukščio) C_p reikšmėms šoniniame ir galiniame paviršiuose pastebimi 10-20 % duomenų skirtumai. Skirtumus galima paaiškinti dėl naudojamo turbulencijos modelio ar tinklelio tankumo. Norint gauti tikslesnes reikšmes ir turint daugiau patirties CFD skaičiavimuose, galima rinktis LES turbulencijos modelį, vietoj naudoto RANS.
2. Skaitmeninio vėjo tunelio bandymo rezultatai parodė, jog *Turning Torso* pastato modelis patiria mažesnę vėjo slėgio poveikį. Stačiakampės prizmės pastato paviršiams nustatytas maksimalus vėjo slėgis lygus 0,443 kPa. Susuktos formos pastatui toks maksimalus slėgis yra mažesnis ir lygus 0,420 kPa (abu variantai skaičiuoti esant 26 m/s vėjo greičiui).
3. Gauti standartinio aukšto pastato slėgio koeficientai ties paviršiais yra panašiose ribose, lyginant su kitų mokslininkų atliktais eksperimentinių darbų duomenimis [50, 55, 56]. Maksimali gauta reikšmė lygi 0,85, kitų mokslininkų atliktuose darbuose ši reikšmė svyruoja nuo 0,8 iki 0,97.
4. Lyginant standartinio aukšto pastato paviršių slėgių koeficientus su susuktos formos pastato duomenimis, gauname mažesnes reikšmes antrajam pastatui. Didžiausia teigiamo slėgio koeficiento reikšmė užfiksuota stačiakampės prizmės pastatui ir lygi 0,85, kai tuo tarpu ši reikšmė susuktos formos pastatui yra 0,76. Šiems pastatams koeficientų pasiskirstymas panašus priekinėse ir galinėse pastatų pusėse, tačiau ženkliai skiriasi šoniniuose paviršiuose.
5. Dėl mažesnio vėjo slėgio apskaičiuotos ir mažesnės atstojamosios jėgos reikšmės susuktos formos pastatui.
6. Stačiakampės prizmės pastatui vėjo srauto sukuriai formuojasi beveik tuo pat metu ir per visą pastato aukštį, taip sukeldami didelį skersinį vėjo poveikį. *Turning Torso* pastato modeliui pastebimas netolygus sukurių susidarymas per visą aukštį, todėl gaunama atitinkamai mažesnė skersinė jėga.
7. Šio darbo tyrimui pasirinktas susuktos formos pastatas pademonstravo geresnes aerodinamines savybes nei standartinis stačiakampės prizmės pastato modelis. Todėl kaip ir teigiama kituose moksliniuose darbuose, kurie buvo nagrinėti literatūros apžvalgos metu, pastato forma yra glaudžiai susijusi su vėjo sukeliama apkrovomis.
8. Apibendrinant magistro baigiamajame darbe atlikto skaitmeninio vėjo tunelio bandymo rezultatus, galima teigti, jog CFD skaičiavimo metodai gali būti taikomi nustatyti vėjo poveikį praktikoje, kadangi modeliuojant standartinį aukštą pastatą gauti rezultatai artimai sutapo su eksperimentinių bandymų rezultatais. Taip pat, gauti netipinės formos pastato vėjo slėgio koeficientai, kurie negali būti randami naudojantis euro kodu, nes tokios formos pastatas nėra aprašytas, todėl rekomenduojama atlikti vėjo tunelio bandymą. Fizinis vėjo tunelio bandymas yra brangus ir laiko reikalaujantis testas, todėl ir ekonominiu atžvilgiu daug naudingiau atlikti CFD analizę. Šio darbo autorės požiūriu, yra rekomenduotina taikyti CFD programas skirtas vėjo poveikiui nustatyti, kadangi taip galima gauti tikslesnę vėjo poveikį pastatui nei vadovaujantis esančiomis normomis, pagal kurias pastatai gali būti suprojektuojami su didesne atsarga nei būtų ekonomiškai reikalinga, arba priešingai – įvertinti vėjo poveikį, kuris normose nėra įvertinamas.

Literatūros sąrašas

1. ELSHAER, A., GAIROLA, A., ADAMEK, K. and BITSUAMLAK, G. Variations in Wind Load on Tall Buildings due to Urban Development. *Sustainable Cities and Society* [interaktyvus]. 2017, vol. 34 [žiūrėta 2020-03-28]. Prieiga per: DOI 10.1016/j.scs.2017.06.008.
2. HUANG, M.F., et al. Peak Distributions and Peak Factors of Wind-Induced Pressure Processes on Tall Buildings. *Journal of Engineering Mechanics* [interaktyvus]. 2013, vol. 139, no. 12. pp. 1744-1756 [žiūrėta 2020-03-28]. Prieiga per: DOI 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000616.
3. KIM, Y.C., et al. Wind-Induced Responses of Super-Tall Buildings with various Atypical Building Shapes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* [interaktyvus]. 2014, vol. 133. pp. 191–199 [žiūrėta 2020-04-20]. Prieiga per: DOI 10.1016/j.jweia.2014.06.004.
4. TANAKA, H., et al. Experimental Investigation of Aerodynamic Forces and Wind Pressures Acting on Tall Buildings with various Unconventional Configurations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* [interaktyvus]. 2012, vol. 107-108. pp. 179-191 [žiūrėta 2020-04-21] ISSN 0167-6105. Prieiga per: DOI <https://doi-org.ezproxy.ktu.edu/10.1016/j.jweia.2012.04.014>.
5. SHARMA, A., MITTAL, H. and GAIROLA, A. Mitigation of Wind Load on Tall Buildings through Aerodynamic Modifications: Review. *Journal of Building Engineering* [interaktyvus]. 2018, vol. 18. pp. 180-194 [žiūrėta 2020-04-21]. ISSN 2352-7102. Prieiga per: DOI 10.1016/j.jobe.2018.03.005.
6. ASGHARI MOONEGHI, M. and KARGARMOAKHAR, R. Aerodynamic Mitigation and Shape Optimization of Buildings: Review. *Journal of Building Engineering* [interaktyvus]. 2016, vol. 6. pp. 225-235 [žiūrėta 2020-04-21]. ISSN 2352-7102. Prieiga per: DOI 10.1016/j.jobe.2016.01.009.
7. KIM, Y.C. and KANDA, J. Wind Pressures on Tapered and Set-Back Tall Buildings. *Journal of Fluids and Structures* [interaktyvus]. 2013, vol. 39. pp. 306-321 [žiūrėta 2020-04-21]. ISSN 0889-9746. Prieiga per: DOI 10.1016/j.jfluidstructs.2013.02.008.
8. BAGHAEI DAEMEI, A., KHOTBEHSARA, E.M., NOBARANI, E.M. and BAHRAMI, P. Study on Wind Aerodynamic and Flow Characteristics of Triangular-Shaped Tall Buildings and CFD Simulation in Order to Assess Drag Coefficient. *Ain Shams Engineering Journal* [interaktyvus]. 2019, vol. 10, no. 3. pp. 541-548 [žiūrėta 2020-04-25]. ISSN 2090-4479. Prieiga per: DOI <https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.08.008>.
9. F.-B. Chen and Q. S. Li. Investigation of the Influence of Openings on the Wind Effect of Tall Buildings. *Hunan Daxue Xuebao/Journal of Hunan University Natural Sciences*. 2015, vol. 42.
10. GOLASZ-SZOŁOMICKA, H. and SZOŁOMICKI, J. Architectural and Structural Analysis of Selected Twisted Tall Buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [interaktyvus]. 2019, vol. 471 [žiūrėta 2020-04-27]. ISSN 1757-899X. Prieiga per: DOI 10.1088/1757-899x/471/5/052050.
11. WESTERWEEL, J., BOERSMA, B. and NIEUWSTADT, F. *Turbulence*. 1st ed. Springer International Publishing, 2016 ISBN 978-3-319-31599-7.

12. [LST EN 1991-1-4:2005]. *Eurokodas 1. Poveikiai Konstrucijoms: Eurocode 1: Actions on Structures : Europos Standartas EN 1991-1-4:2005 Turi Lietuvos Standarto LST EN 1991-1-4:2005 Statusą*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.
13. LEIGHTON, C. *Wind Issues in the Design of Buildings*, 2012 ISBN 978-0-7844-1225-1.
14. SIMIU, Emil, Yeo, DONGHUN,. *Wind Effects on Structures : Modern Structural Design for Wind*. , 2019. ISBN 9781119375890.
15. ZHAOA, X., DING, J.M. and SUNA, H.H. *Structural Design of Shanghai Tower for Wind Loads* [interaktyvus]. 2011 ISBN 1877-7058 [žiūrėta 2020-05-28]. Prieiga per: DOI <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.221>.
16. B.S. TARANATH. *Structural Analysis and Design of Tall Buildings : Steel and Composite Construction*. Boca Raton, Fla.; [Washington, D.C.]: CRC Press ; International Code Council [interaktyvus]. 2012 Prieiga per: [http://www.crcnetbase.com/isbn/9781439850893 /z-wcorg/](http://www.crcnetbase.com/isbn/9781439850893/z-wcorg/).
17. GÜNEL, M.H. and ILGIN, H.E. *Tall Buildings: Structural Systems and Aerodynamic Form*. 2014 [žiūrėta 2020-05-28]. ISBN 9781138021778.
18. IRWIN, P., DENOON, R. and SCOTT, D. *Wind Tunnel Testing of High-Rise Buildings*. CRC Press [interaktyvus]. 2013 [žiūrėta 2020-05-28]. Prieiga per: <https://books.google.lt/books?id=I9NIqi66UxcC> ISBN 9781317999959.
19. STRUCTURE magazine | Wind Tunnel Testing for Tall Buildings [interaktyvus] [žiūrėta 2020-11-04]. Prieiga per: <https://www.structuremag.org/?p=13256>.
20. KARGAUDAS, V. and VAIČAITIS, R. *Konstrucijų Virpesiai: Vadovėlis*. Kaunas: Technologija, 2014 ISBN 9786090210338.
21. MOHOTTI, D., MENDIS, P. and NGO, T.D. *Application of Computational Fluid Dynamics (CFD) in Predicting the Wind Loads on Tall Buildings - a Case Study*, 2014.
22. TOMINAGA, Y. Flow Around a High-Rise Building using Steady and Unsteady RANS CFD: Effect of Large-Scale Fluctuations on the Velocity Statistics. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* [interaktyvus]. 2015, vol. 142. pp. 93-103 [žiūrėta 2020-06-22]. ISSN 0167-6105. Prieiga per: DOI 10.1016/j.jweia.2015.03.013.
23. FRANSOS, D. and LO GUIDICE, A. *On the use of Computational Simulation in the Determination of Wind Loads on Structures: Design Experiences and Food for Thought*. [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2020-06-22]. Prieiga per: <https://docplayer.net/48319757-On-the-use-of-computational-simulation-in-the-determination-of-wind-loads-on-structures-design-experiences-and-food-for-thought.html>.
24. BERNARDINI, E., SPENCE, S.M.J., WEI, D. and KAREEM, A. Aerodynamic Shape Optimization of Civil Structures: A CFD-Enabled Kriging-Based Approach. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* [interaktyvus]. 2015, vol. 144. pp. 154-164 [žiūrėta 2020-06-25]. ISSN 0167-6105. Prieiga per: DOI 10.1016/j.jweia.2015.03.011.
25. *Navier-Stokes Equation | Definition & Facts*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-27]. Prieiga per: <https://www.britannica.com/science/Navier-Stokes-equation>.

26. THORDAL, M.S., BENNETSEN, J.C. and KOSS, H.H. Review for Practical Application of CFD for the Determination of Wind Load on High-Rise Buildings. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* [interaktyvus]. 2019, vol. 186. pp. 155-168 [žiūrėta 2020-05-07]. ISSN 0167-6105. Prieiga per: DOI 10.1016/j.jweia.2018.12.019.
27. BLOCKEN, B. 50 Years of Computational Wind Engineering: Past, Present and Future. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* [interaktyvus]. 2014, vol. 129. pp. 69-102 [žiūrėta 2020-06-27]. ISSN 0167-6105. Prieiga per: DOI 10.1016/j.jweia.2014.03.008.
28. *Numerical Modelling - what are the Differences between an LES-SGS Model and a RANS Based Turbulence Model?* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-27]. Prieiga per: <https://earthscience.stackexchange.com/questions/2932/what-are-the-differences-between-an-les-sgs-model-and-a-rans-based-turbulence-mo>.
29. ZHIYIN, Y. Large-Eddy Simulation: Past, Present and the Future. *Chinese Journal of Aeronautics* [interaktyvus]. 2015, vol. 28, no. 1. pp. 11-24 [žiūrėta 2020-06-07]. ISSN 1000-9361. Prieiga per: DOI 10.1016/j.cja.2014.12.007.
30. VERSTEEG, H.K. and VERSTEEG, H.K. An Introduction to Computational Fluid Dynamics : The Finite Volume Method / *H.K. Versteeg and W. Malalasekera*. Harlow (GB) New York Boston etc: Pearson Education Ltd, 2007 ISBN 978-0-13-127498-3.
31. IRWIN, P.A. Wind Engineering Challenges of the New Generation of Super-Tall Buildings. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* [interaktyvus]. 2009, vol. 97, no. 7-8. pp. 328-334 [žiūrėta 2020-04-27]. ISSN 0167-6105. Prieiga per: DOI 10.1016/j.jweia.2009.05.001.
32. TAGHIZADEH, K. and SEYEDINNOOR, S. Super-Tall Buildings Forms Based on Structural Concepts and Energy Conservation Principles. *Architecture Research*, /26/ [interaktyvus]. 2013, vol. 3, no. 2 [žiūrėta 2020-04-05]. pp. 13-19 ISSN 2168-5088.
33. IRWIN, P.A. Bluff Body Aerodynamics in Wind Engineering. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* [interaktyvus]. 2008, vol. 96, no. 6-7. pp. 701-712 [žiūrėta 2020-09-20]. ISSN 0167-6105. Prieiga per: DOI 10.1016/j.jweia.2007.06.008.
34. TSE, K.T., et al. Economic Perspectives of Aerodynamic Treatments of Square Tall Buildings. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* [interaktyvus]. 2009, vol. 97, no. 9. pp. 455-467 [žiūrėta 2020-09-22]. ISSN 0167-6105. Prieiga per: DOI 10.1016/j.jweia.2009.07.005.
35. ELSHAER, A., BITSUAMLAK, G. and EL DAMATTY, A. Enhancing Wind Performance of Tall Buildings using Corner Aerodynamic Optimization. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2017, vol. 136. pp. 133-148 [žiūrėta 2020-09-22]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: DOI 10.1016/j.engstruct.2017.01.019.
36. *TAIPEI 101 - the Skyscraper Center* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-27]. Prieiga per: <https://www.skyscrapercenter.com/building/taipei-101/117>.
37. *Wind Issues in the Design of Tall Buildings*. [interaktyvus]. 2010 [žiūrėta 2020-05-27]. Prieiga per: <https://docplayer.net/31048563-Wind-issues-in-the-design-of-tall-buildings.html>.
38. KAREEM, A., KIJEWski, T. and TAMURA, Y. Mitigation of Motions of Tall Buildings with Specific Examples of Recent Applications. *Wind and Structures*, /09/01 [interaktyvus]. 1999, vol. 2,

no. 3. pp. 201-251 [žiūrėta 2020-09-27]. ISSN 1226-6116. Prieiga per: DOI 10.12989/was.1999.2.3.201.

39. KIM, Y. and KANDA, J. Characteristics of Aerodynamic Forces and Pressures on Square Plan Buildings with Height Variations. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* [interaktyvus]. 2010, vol. 98, no. 8-9. pp. 449-465 [žiūrėta 2020-10-27]. ISSN 0167-6105. Prieiga per: DOI 10.1016/j.jweia.2010.02.004.

40. BANDI, E.K., et al. Experimental Investigation on Aerodynamic Characteristics of various Triangular-Section High-Rise Buildings. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* [interaktyvus]. 2013, vol. 122. pp. 60-68 [žiūrėta 2020-10-27]. ISSN 0167-6105. Prieiga per: DOI 10.1016/j.jweia.2013.07.002.

41. KIM, Y.C., BANDI, E.K., YOSHIDA, A. and TAMURA, Y. Response Characteristics of Super-Tall Buildings – Effects of Number of Sides and Helical Angle. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* [interaktyvus]. 2015, vol. 145. pp. 252-262 [žiūrėta 2020-05-17]. ISSN 0167-6105. Prieiga per: DOI 10.1016/j.jweia.2015.07.001.

42. VOLLERS Karel. The CAD-Tool 2.0 Morphological Scheme of Non-Orthogonal Highrises. *CTBUH Journal*, (3), 38–49, 2009 ISSN 1946-1186.

43. BAŞARIR, B. A Recent Trend in Tall Building Design: Twisted Forms. *E-Journal of New World Sciences Academy*, 2011.

44. LAGO, A., TRABUCCO, D. and WOOD, A. Damping Technologies for Tall Buildings A. LAGO, D. TRABUCCO and A. WOOD eds., Butterworth-Heinemann, January 1, 2019 [žiūrėta 2020-05-30]. *Chapter 3 - Damping Considerations in Tall Buildings*, pp. 39-106. Prieiga per: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128159637000038>.

45. MELBOURNE, W.H. Comparison of Measurements on the CAARC Standard Tall Building Model in Simulated Model Wind Flows. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* [interaktyvus]. July 1, 1980, vol. 6, no. 1. pp. 73-88 [žiūrėta 2020-09-27]. ISSN 0167-6105. Prieiga per: DOI 10.1016/0167-6105(80)90023-9.

46. *Turbulence Intensity -- CFD-Wiki, the Free CFD Reference*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-06-28]. Prieiga per: https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_intensity.

47. TOMINAGA, Y., et al. AIJ Guidelines for Practical Applications of CFD to Pedestrian Wind Environment Around Buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* [interaktyvus]. 2008, vol. 96, no. 10. pp. 1749-1761 [žiūrėta 2020-09-20]. ISSN 0167-6105. Prieiga per: DOI 10.1016/j.jweia.2008.02.058.

48. FRANKE, J.ö. Recommendations of the COST Action C14 on the use of CFD in Predicting Pedestrian Wind Environment. *The Fourth International Symposium on Computational Wind Engineering, Yokohama, Japan, 2006*. pp. 529-532.

49. KARGAUDAS, V. and VAIČAITIS, R. *Konstrukcijų Virpesiai: Vadovėlis*. Kaunas: Technologija, 2014 ISBN 9786090210338.

50. DAGNEW, A., BITSUAMLAK, G. and MERRICK, R. *Computational Evaluation of Wind Pressures on Tall Buildings*. 11th Americas Conference on Wind Engineering 2009.

51. HUANG, S., LI, Q.S. and XU, S. Numerical Evaluation of Wind Effects on a Tall Steel Building by CFD. *Journal of Constructional Steel Research* [interaktyvus]. 2007, vol. 63, no. 5. pp. 612-627 [žiūrėta 2020-09-21]. ISSN 0143-974X. Prieiga per: DOI <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.06.033>.
52. HUANG, M. High-Rise Buildings under Multi-Hazard Environment: Assessment and Design for Optimal Performance M. HUANG ed., Singapore: Springer Singapore, 2017 *A Hybrid RANS and Kinematic Simulation of Wind Load Effects on Full-Scale Tall Buildings*, pp. 55-81 ISBN 978-981-10-1744-5.
53. ELSHAER, A., et al. LES Evaluation of Wind-Induced Responses for an Isolated and a Surrounded Tall Building. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2016, vol. 115. pp. 179-195 [žiūrėta 2020-09-27]. Prieiga per: DOI 10.1016/j.engstruct.2016.02.026.
54. JOHN D. ANDERSON, J. *Fundamentals of Aerodynamics 5th Edition.*, 2011 ISBN 9780073398105.
55. LI, Y. Aerodynamic Treatments for Reduction of Wind Loads on High-Rise Buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* [interaktyvus]. 2017, vol. 172 [žiūrėta 2020-10-17]. Prieiga per: DOI 10.1016/j.jweia.2017.11.006.
56. MOU, B., HE, B., ZHAO, D. and CHAU, K. Numerical Simulation of the Effects of Building Dimensional Variation on Wind Pressure Distribution 2017, vol. 11, no. 1. pp. 293-309 [žiūrėta 2020-09-20]. ISSN 1994-2060. Prieiga per: DOI 10.1080/19942060.2017.1281845.
57. BANDI, E. Aerodynamic and Flow Characteristics of Tall Buildings with various Unconventional Configurations. *International Journal of High-Rise Buildings*, 2013, vol. ol 2. pp. 213-228.

Priedai

1 priedas. Verifikacijos procedūros skaičiavimų duomenys

P 2 lentelė. Verifikacijos procedūros skaičiavimų duomenys standartiniam aukštam pastatui

| Žingsnis | Statinis slėgis taške, Pa | Oro tankis, kg/m ³ | Vėjo srauto greitis, m/s | Vėjo slėgio koeficientai, C _p |
|----------|------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|---|
| 0.1 | 50.6 | 1.2 | 12.7 | 0.5 |
| 0.2 | 75.6 | 1.2 | 12.7 | 0.8 |
| 0.3 | 85.2 | 1.2 | 12.7 | 0.9 |
| 0.4 | 90.1 | 1.2 | 12.7 | 0.9 |
| 0.5 | 93.2 | 1.2 | 12.7 | 1.0 |
| 0.6 | 95 | 1.2 | 12.7 | 1.0 |
| 0.7 | 95.8 | 1.2 | 12.7 | 1.0 |
| 0.8 | 95.9 | 1.2 | 12.7 | 1.0 |
| 0.9 | 95.7 | 1.2 | 12.7 | 1.0 |
| 1.0 | 94.9 | 1.2 | 12.7 | 1.0 |
| 1.1 | 93.1 | 1.2 | 12.7 | 1.0 |
| 1.2 | 90.1 | 1.2 | 12.7 | 0.9 |
| 1.3 | 85.2 | 1.2 | 12.7 | 0.9 |
| 1.4 | 75.9 | 1.2 | 12.7 | 0.8 |
| 1.5 | 50.9 | 1.2 | 12.7 | 0.5 |
| 1.6 | -85.2 | 1.2 | 12.7 | -0.9 |
| 1.7 | -112 | 1.2 | 12.7 | -1.2 |
| 1.8 | -97.3 | 1.2 | 12.7 | -1.0 |
| 1.9 | -89 | 1.2 | 12.7 | -0.9 |
| 2.0 | -80.5 | 1.2 | 12.7 | -0.8 |
| 2.1 | -72.9 | 1.2 | 12.7 | -0.8 |
| 2.2 | -66.2 | 1.2 | 12.7 | -0.7 |
| 2.3 | -60.6 | 1.2 | 12.7 | -0.6 |
| 2.4 | -55.5 | 1.2 | 12.7 | -0.6 |
| 2.5 | -51.7 | 1.2 | 12.7 | -0.5 |
| 2.6 | -41.8 | 1.2 | 12.7 | -0.4 |
| 2.7 | -41 | 1.2 | 12.7 | -0.4 |
| 2.8 | -40.2 | 1.2 | 12.7 | -0.4 |
| 2.9 | -39.4 | 1.2 | 12.7 | -0.4 |
| 3.0 | -38.8 | 1.2 | 12.7 | -0.4 |
| 3.1 | -38.3 | 1.2 | 12.7 | -0.4 |
| 3.2 | -38 | 1.2 | 12.7 | -0.4 |
| 3.3 | -37.9 | 1.2 | 12.7 | -0.4 |
| 3.4 | -38 | 1.2 | 12.7 | -0.4 |
| 3.5 | -38.3 | 1.2 | 12.7 | -0.4 |

| Žingsnis | Statinis slėgis taške, Pa | Oro tankis, kg/m ³ | Vėjo srauto greitis, m/s | Vėjo slėgio koeficientai, C _p |
|----------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|--|
| 3.6 | -38.8 | 1.2 | 12.7 | -0.4 |
| 3.7 | -39.4 | 1.2 | 12.7 | -0.4 |
| 3.8 | -40.2 | 1.2 | 12.7 | -0.4 |
| 3.9 | -41 | 1.2 | 12.7 | -0.4 |
| 4.0 | -41.8 | 1.2 | 12.7 | -0.4 |

2 priedas. Slėgio koeficientų skaičiavimo duomenys

P 2 lentelė. Standartinio aukšto pastato slėgio koeficientų skaičiavimo duomenys, ties 0° kampu

| Pastato paviršiaus pusė | Statinis slėgis taške, Pa | Oro tankis, kg/m ³ | Vėjo srauto greitis, m/s | Vėjo slėgio koeficientai, C _p |
|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|--|
| Priekis | 360 | 1.2 | 26 | 0.85 |
| | 299 | 1.2 | 26 | 0.71 |
| | 239 | 1.2 | 26 | 0.57 |
| | -335 | 1.2 | 26 | -0.79 |
| Kairė | -231 | 1.2 | 26 | -0.55 |
| | -193 | 1.2 | 26 | -0.46 |
| | -342 | 1.2 | 26 | -0.81 |
| | -454 | 1.2 | 26 | -1.07 |
| | -268 | 1.2 | 26 | -0.63 |
| | -678 | 1.2 | 26 | -1.60 |
| Galas | -117 | 1.2 | 26 | -0.28 |
| | -155 | 1.2 | 26 | -0.37 |
| | -200 | 1.2 | 26 | -0.47 |
| Dešinė | -231 | 1.2 | 26 | -0.55 |
| | -193 | 1.2 | 26 | -0.46 |
| | -342 | 1.2 | 26 | -0.81 |
| | -454 | 1.2 | 26 | -1.07 |
| | -268 | 1.2 | 26 | -0.63 |
| | -678 | 1.2 | 26 | -1.60 |

P 3 lentelė. Standartinio aukšto pastato slėgio koeficientų skaičiavimo duomenys, ties 90° kampu

| Pastato paviršiaus pusė | Statinis slėgis taške, Pa | Oro tankis, kg/m ³ | Vėjo srauto greitis, m/s | Vėjo slėgio koeficientai, C _p |
|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|--|
| Priekis | 240 | 1.2 | 26 | 0.57 |
| | 301 | 1.2 | 26 | 0.71 |
| | 360 | 1.2 | 26 | 0.85 |
| | 119 | 1.2 | 26 | 0.28 |
| | -548 | 1.2 | 26 | -1.30 |
| Kairė | -120 | 1.2 | 26 | -0.28 |

| Pastato paviršiaus pusė | Statinis slėgis taške, Pa | Oro tankis, kg/m ³ | Vėjo srauto greitis, m/s | Vėjo slėgio koeficientai, C _p |
|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|--|
| Kairė | -181 | 1.2 | 26 | -0.43 |
| | -239 | 1.2 | 26 | -0.57 |
| | -360 | 1.2 | 26 | -0.85 |
| | -479 | 1.2 | 26 | -1.13 |
| | -844 | 1.2 | 26 | -2.00 |
| Galas | -80 | 1.2 | 26 | -0.19 |
| | -120 | 1.2 | 26 | -0.28 |
| | -162 | 1.2 | 26 | -0.38 |
| | -199 | 1.2 | 26 | -0.47 |
| Dešinė | -120 | 1.2 | 26 | -0.28 |
| | -181 | 1.2 | 26 | -0.43 |
| | -239 | 1.2 | 26 | -0.57 |
| | -360 | 1.2 | 26 | -0.85 |
| | -479 | 1.2 | 26 | -1.13 |
| | -844 | 1.2 | 26 | -2.00 |

P 4 lentelė. Standartinio aukšto pastato slėgio koeficientų skaičiavimo duomenys, ties 180° kampu

| Pastato paviršiaus pusė | Statinis slėgis taške, Pa | Oro tankis, kg/m ³ | Vėjo srauto greitis, m/s | Vėjo slėgio koeficientai, C _p |
|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|--|
| Priekis | 360 | 1.2 | 26 | 0.85 |
| | 299 | 1.2 | 26 | 0.71 |
| | 239 | 1.2 | 26 | 0.57 |
| | -335 | 1.2 | 26 | -0.79 |
| Kairė | -231 | 1.2 | 26 | -0.55 |
| | -193 | 1.2 | 26 | -0.46 |
| | -342 | 1.2 | 26 | -0.81 |
| | -454 | 1.2 | 26 | -1.07 |
| | -268 | 1.2 | 26 | -0.63 |
| | -678 | 1.2 | 26 | -1.60 |
| Galas | -117 | 1.2 | 26 | -0.28 |
| | -155 | 1.2 | 26 | -0.37 |
| | -200 | 1.2 | 26 | -0.47 |
| Dešinė | -231 | 1.2 | 26 | -0.55 |
| | -193 | 1.2 | 26 | -0.46 |
| | -342 | 1.2 | 26 | -0.81 |
| | -454 | 1.2 | 26 | -1.07 |
| | -268 | 1.2 | 26 | -0.63 |
| | -678 | 1.2 | 26 | -1.60 |

P 5 lentelė. Standartinio aukšto pastato slėgio koeficientų skaičiavimo duomenys, ties 270° kampu

| Pastato paviršiaus pusė | Statinis slėgis taške, Pa | Oro tankis, kg/m ³ | Vėjo srauto greitis, m/s | Vėjo slėgio koeficientai, C _p |
|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|--|
| Priekis | 240 | 1.2 | 26 | 0.57 |
| | 301 | 1.2 | 26 | 0.71 |
| | 360 | 1.2 | 26 | 0.85 |
| | 119 | 1.2 | 26 | 0.28 |
| | -548 | 1.2 | 26 | -1.30 |
| Kairė | -120 | 1.2 | 26 | -0.28 |
| | -181 | 1.2 | 26 | -0.43 |
| | -239 | 1.2 | 26 | -0.57 |
| | -360 | 1.2 | 26 | -0.85 |
| | -479 | 1.2 | 26 | -1.13 |
| | -844 | 1.2 | 26 | -2.00 |
| Galas | -80 | 1.2 | 26 | -0.19 |
| | -120 | 1.2 | 26 | -0.28 |
| | -162 | 1.2 | 26 | -0.38 |
| | -199 | 1.2 | 26 | -0.47 |
| Dešinė | -120 | 1.2 | 26 | -0.28 |
| | -181 | 1.2 | 26 | -0.43 |
| | -239 | 1.2 | 26 | -0.57 |
| | -360 | 1.2 | 26 | -0.85 |
| | -479 | 1.2 | 26 | -1.13 |
| | -844 | 1.2 | 26 | -2.00 |

P 6 lentelė. Susuktos formos pastato slėgio koeficientų skaičiavimo duomenys, ties 0° kampu

| Pastato paviršiaus pusė | Statinis slėgis taške, Pa | Oro tankis, kg/m ³ | Vėjo srauto greitis, m/s | Vėjo slėgio koeficientai, C _p |
|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|--|
| Priekis | 320 | 1.2 | 26 | 0.76 |
| | 266 | 1.2 | 26 | 0.63 |
| | 160 | 1.2 | 26 | 0.38 |
| | 0 | 1.2 | 26 | 0.00 |
| | -317 | 1.2 | 26 | -0.75 |
| | -1119 | 1.2 | 26 | -2.65 |
| Kairė | -322 | 1.2 | 26 | -0.76 |
| | -479 | 1.2 | 26 | -1.13 |
| | -1158 | 1.2 | 26 | -2.74 |
| | -161 | 1.2 | 26 | -0.38 |
| | 162 | 1.2 | 26 | 0.38 |
| Galas | -160 | 1.2 | 26 | -0.38 |
| | -482 | 1.2 | 26 | -1.14 |

| Pastato paviršiaus pusė | Statinis slėgis taške, Pa | Oro tankis, kg/m ³ | Vėjo srauto greitis, m/s | Vėjo slėgio koeficientai, C _p |
|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|--|
| Dešinė | -161 | 1.2 | 26 | -0.38 |
| | -322 | 1.2 | 26 | -0.76 |
| | -481 | 1.2 | 26 | -1.14 |
| | 320 | 1.2 | 26 | 0.76 |
| | 161 | 1.2 | 26 | 0.38 |

P 7 lentelė. Susuktos formos pastato slėgio koeficientų skaičiavimo duomenys, ties 90° kampu

| Pastato paviršiaus pusė | Statinis slėgis taške, Pa | Oro tankis, kg/m ³ | Vėjo srauto greitis, m/s | Vėjo slėgio koeficientai, C _p |
|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|--|
| Priekis | 300 | 1.2 | 26 | 0.71 |
| | 152 | 1.2 | 26 | 0.36 |
| | -145 | 1.2 | 26 | -0.34 |
| | -303 | 1.2 | 26 | -0.72 |
| | -450 | 1.2 | 26 | -1.07 |
| | -900 | 1.2 | 26 | -2.13 |
| Kairė | -151 | 1.2 | 26 | -0.36 |
| | -304 | 1.2 | 26 | -0.72 |
| | -450 | 1.2 | 26 | -1.07 |
| | 298 | 1.2 | 26 | 0.71 |
| | -1073 | 1.2 | 26 | -2.54 |
| Galas | -149 | 1.2 | 26 | -0.35 |
| | -449 | 1.2 | 26 | -1.06 |
| | -1075 | 1.2 | 26 | -2.54 |
| Dešinė | 0 | 1.2 | 26 | 0.00 |
| | -149 | 1.2 | 26 | -0.35 |
| | -300 | 1.2 | 26 | -0.71 |
| | -449 | 1.2 | 26 | -1.06 |
| | 301 | 1.2 | 26 | 0.71 |
| | 153 | 1.2 | 26 | 0.36 |

P 8 lentelė. Susuktos formos pastato slėgio koeficientų skaičiavimo duomenys, ties 180° kampu

| Pastato paviršiaus pusė | Statinis slėgis taške, Pa | Oro tankis, kg/m ³ | Vėjo srauto greitis, m/s | Vėjo slėgio koeficientai, C _p |
|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|--|
| Priekis | 318 | 1.2 | 26 | 0.75 |
| | 163 | 1.2 | 26 | 0.39 |
| | 3 | 1.2 | 26 | 0.01 |
| | -160 | 1.2 | 26 | -0.38 |
| | -320 | 1.2 | 26 | -0.76 |
| | -478 | 1.2 | 26 | -1.13 |

| Pastato paviršiaus pusė | Statinis slėgis taške, Pa | Oro tankis, kg/m ³ | Vėjo srauto greitis, m/s | Vėjo slėgio koeficientai, C _p |
|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|--|
| Kairė | -160 | 1.2 | 26 | -0.38 |
| | 319 | 1.2 | 26 | 0.76 |
| | -320 | 1.2 | 26 | -0.76 |
| | -644 | 1.2 | 26 | -1.52 |
| | -638 | 1.2 | 26 | -1.51 |
| | 160 | 1.2 | 26 | 0.38 |
| Galas | -159 | 1.2 | 26 | -0.38 |
| | -309 | 1.2 | 26 | -0.73 |
| | -997 | 1.2 | 26 | -2.36 |
| Dešinė | -314 | 1.2 | 26 | -0.74 |
| | -160 | 1.2 | 26 | -0.38 |
| | -477 | 1.2 | 26 | -1.13 |
| | 160 | 1.2 | 26 | 0.38 |
| | -1085 | 1.2 | 26 | -2.57 |

P 9 lentelė. Susuktos formos pastato slėgio koeficientų skaičiavimo duomenys, ties 270° kampu

| Pastato paviršiaus pusė | Statinis slėgis taške, Pa | Oro tankis, kg/m ³ | Vėjo srauto greitis, m/s | Vėjo slėgio koeficientai, C _p |
|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|--|
| Priekis | 300 | 1.2 | 26 | 0.71 |
| | 149 | 1.2 | 26 | 0.35 |
| | -301 | 1.2 | 26 | -0.71 |
| | -154 | 1.2 | 26 | -0.36 |
| | -991 | 1.2 | 26 | -2.35 |
| Kairė | -149 | 1.2 | 26 | -0.35 |
| | -299 | 1.2 | 26 | -0.71 |
| | -453 | 1.2 | 26 | -1.07 |
| | 151 | 1.2 | 26 | 0.36 |
| | -605 | 1.2 | 26 | -1.43 |
| Galas | -148 | 1.2 | 26 | -0.35 |
| | -303 | 1.2 | 26 | -0.72 |
| | -486 | 1.2 | 26 | -1.15 |
| Dešinė | -149 | 1.2 | 26 | -0.35 |
| | -302 | 1.2 | 26 | -0.71 |
| | -449 | 1.2 | 26 | -1.06 |
| | 148 | 1.2 | 26 | 0.35 |
| | 295 | 1.2 | 26 | 0.70 |