



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**Liutauras Adomavičius**

**Geležinkelio sąstato aerodinaminio pasipriešinimo tunelyje tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Prof. dr. Žilvinas Bazaras

**KAUNAS, 2017**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**GELEŽINKELIO SAŠTATO AERODINAMINIO PASIPRIEŠINIMO  
TUNELYJE TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas  
Transporto priemonių inžinerija (621E20001)

**Vadovas**

(parašas) Prof. dr. Žilvinas Bazaras  
(data)

**Recenzentas**

(parašas) Vyriaus. moksl. darb. Habil. dr.  
Algimantas Bubulis  
(data)

**Projektą atliko**

(parašas) Liutauras Adomavičius  
(data)

**KAUNAS, 2017**



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

(Fakultetas)

Liutauras Adomavičius

(Studento vardas, pavardė)

Transporto priemonių inžinerija, 621E20001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Baigiamojo projekto pavadinimas“

**AKADEMINIO SAŽINGUMO DEKLARACIJA**

20 17 m. Gegužės 17 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Liutauras Adomavičius**, baigiamasis projektas tema „Geležinkelio sąstato aerodinaminio pasipriešinimo tunelyje tyrimas“ 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)

Adomavičius, Liutauras. Geležinkelio sąstato aerodinaminio pasipriešinimo tunelyje tyrimas. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Žilvinas Bazaras; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Technologijos mokslai, Transporto inžinerija (03T)

Reikšminiai žodžiai: *aerodinamika, tunelis, aerodinaminis pasipriešinimas, pasipriešinimo jėga, aerodinaminis vamzdis.*

Kaunas, 2017. 65 p.

## SANTRAUKA

Šio darbo tikslas – traukinio judėjimo Kauno tuneliu tyrimas. Nagrinėjimo metu stebima oro pasipriešinimo įtaka tunelyje keičiant traukinio geometrinius parametrus. Rekomendacijos Kauno tunelio tobulinimui.

Darbas susideda iš keturių dalių: aerodinamikos ir jos jėgų, dėsnių literatūrinės analizės, užsienio autorių darbų analizės ir išvadų.

Pirmoje dalyje apžvelgiama aerodinamika ir jo pasipriešinimo priežastys.

Antroje dalyje apžvelgiami traukinių judėjimo įvairios geometrijos tuneliuose tyrimo metodai. Aerodinaminio pasipriešinimo apskaičiavimo būdai, jo poveikis traukiniu vežamiems kroviniams, keleivių komfortui. Tunelių geometrijos įtaka pasipriešinimo jėgų dydžiui.

Trečioje dalyje pateikiamas įvairios geometrijos traukinių įtaka judant Kauno tunelyje. Atliekami ir nagrinėjami atlikti matavimai bei jų rezultatai. Tai pat nagrinėjama Kauno tunelio įvažiuojamosios dalies geometrijos įtaka bendram traukio aerodinaminiam pasipriešinimui.

Ketvirtoje dalyje pateikiamos išvados, suformuluotos remiantis naudota literatūra ir gautais eksperimentų rezultatais.

Darbe pateikiama 7 lentelės ir 56 paveikslėliai. Darbe naudojama literatūra lietuvių, anglų, lenkų, rusų kalbomis.

Adomavičius, Liutauras. *Aerodynamics research of train resistance inside a tunnel: Master's thesis in transport engineering* / prof. dr. Žilvinas Bazaras. The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Technological Science, Transport Engineering (03T)

Key words: *aerodynamic tunnel, aerodynamics resistance, drag coefficient, aerodynamics pipe.*

Kaunas, 2017. 65 p.

## **SUMMARY**

The aim of this research work is train motion in Kaunas tunnel. At the moment of the research we observe air resistance influence in tunnel by changing trains geometrical parameters. Give recommendations to Kaunas tunnel development.

This research work consists of 4 chapters: Question Analysis, Analyze of foreigner authors works, Conclusions.

The first chapter describes aero dynamical resistance reasons.

The second chapter describes train motions varying by changing geometrical parameters in tunnel. Aero dynamical resistance estimate methods and influence to train cargo, passenger comfort.

The third chapter describes varying geometrical train nose parts influence when train move in Kaunas tunnel. Do research, measurements and analyze results.

The fourth chapter describes conclusions, according to results, measurements and literature.

There are 7 tables and 56 pictures presented in the research work. Literature of different languages: Lithuanian, English, Russian, Polish, Russian was used.

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**  
**TRANSPORTO INŽINERIJOS KATEDRA**

**Suderinta:**

Studijų krypties programų vadovas  
prof. Artūras Keršys

Transporto inžinerijos katedros vedėjas  
doc. Rolandas Makaras

2016 m. vasario mėn. 8 d.

**MAGISTRO BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS**

Išduota studentui: *Liutauras Adomavičius*

**1. Projekto tema:**

Geležinkelio sąstato aerodinaminio pasipriešinimo tunelyje tyrimas.

Patvirtinta: 2017 m. balandžio mėn. 21 d. dekanų įsakymu Nr. V25-11-8

**2. Projekto tikslas:**

Ištirti geležinkelio sąstato aerodinaminį pasipriešinimą tunelyje.

**3. Projekto uždaviniai ir reikalavimai:**

- Išanalizuoti aerodinaminį pasipriešinimą;
- Pritaikyti aerodinaminį pasipriešinimą geležinkelio sąstatui tunelyje;
- Atlikti skaičiavimus „ANSYS 17.2” kompiutrine programa;
- Atlikti praktinius bandymus aerodinaminiam vamzdyje.

**4. Projekto konsultantai (nurodant projekto skyrius)<sup>1</sup>:**

5. Užduoties išdavimo terminas: 2016 m. vasario mėn. 8 d.

Užbaigto projekto pateikimo terminas: 2017 m. gegužės mėn. 18 d.

**Vadovas:**

\_\_\_\_\_  
Žilvinas Bazaras

(vardas, pavardė)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

**Užduotį gavau:**

\_\_\_\_\_  
Liutauras Adomavičius

(studento vardas, pavardė)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

<sup>1</sup> Esant reikalui, suderinus su katedros vedėju

## Turinys

|  |    |
|--|----|
| 1 Įvadas .....   | 4  |
| 2 Aptekėjimo režimai ir pasienio sluoksnis .....                     | 5  |
| 3 Reinoldso skaičius laminariniam ir turbulenciniam tekėjimams ..... | 7  |
| 4 Sąstato aerodinamika .....   | 11 |
| 4.1 Aerodinaminis pasipriešinimas .....                              | 14 |
| 4.2 Formos pasipriešinimas.....                                      | 15 |
| 4.3 Tunelio geometrija .....   | 17 |
| 4.4 Traukinio pasipriešinimo komponentai atvirame ore .....          | 18 |
| 5 K-epsilon turbulencinis modelis .....                              | 20 |
| 6 Kutta- Joukowski teorema .....                                     | 21 |
| 7 Aerodinaminio bandymo metodika.....                                | 23 |
| 7.1.1 Bandymo priemonės ir įranga .....                              | 23 |
| 7.1.2 Modeliavimas su kompiuterine programa.....                     | 25 |
| 7.1.3 Braižymas su Solidworks .....                                  | 25 |
| 7.1.4 Uždavinio modeliavimas su ANSYS 17.2 .....                     | 27 |
| 7.1.5 Traukinio judėjimo tunelyje rezultatai .....                   | 28 |
| 7.1.6 Bandymas vėjo tunelyje .....                                   | 54 |
| 8 Išvados .....  | 56 |
| 9 Literatūros sąrašas.....   | 57 |
| 10 Priedai .....   | 59 |
| P-1. PESA 620M techninės charakteristikos.....                       | 60 |
| P-2. Kauno tunelio viršaus ir bėgių išilginis profilis.....          | 61 |
| P-3. Kauno tunelio skersinis profilis.....                           | 62 |
| P-4. Įdėklo brėžinys.....  | 63 |
| P-5. EUROLAB mokomojo vėjo tunelio techninės charakteristikos.....   | 64 |
| P-6. 3D spausdinimo kainų palyginimas.....                           | 65 |

## 1 ĮVADAS

Dauguma šiuolaikinių geležinkelio kelių nutiesta per daugybę tunelių tam, kad būtų išvengta automobilių kelių, kalnų bei kitų reljefo nepatogumų. Kuo didesnis traukinio greitis, tuo didesnės aerodinaminės jėgos, veikiančios traukinį. Ribota erdvė tunelyje labai svarbi aerodinaminiam efektui, ir tai gali būti viena iš priežasčių, kuri lemia traukinio judėjimą, keleivių ir krovinių saugumą tunelyje. Aerodinaminio pasipriešinimo jėgos susideda iš slėgio, kuris savo ruožtu priklauso nuo traukinį supančios aplinkos. Taip pat labai svarbus ir traukinio svoris, kuris šiuolaikinių traukinių labai padidėjo. Kadangi traukinių važiuoklės labiau pritaikytos kelio nelygumams sugerti, jos nepadedą absorbuoti mažus atsirandančio šoninio bei tiesioginio slėgio svyravimus. Tačiau tokia važiuoklė puikiai slopina staiga besikeičiančio slėgio jėgas. Tam, kad išvengtume tunelyje atsirandančių pašalinių veiksnių įtaką traukinio judėjimui juos būtina mažinti tiek pačio traukinio modifikavimu, tiek ir racionaliū tunelio išplanavimu. Taigi tunelyje būtina apriboti neigiamus aerodinaminius efektus, todėl inžinieriai jau yra išnaginę daugumą parametų, kurie padeda sukonstruoti atitinkamos formos tunelius, bei traukinius. Tam, kad išvengti neigiamų aerodinaminių efektų tunelyje galime panaudoti kelias priemones: greičio apribojimų nustatymą, slėgio mažinimo priemonių įrengimas pačiame tunelyje, modifikuoti paties traukinio formą.

Lietuvoje yra iškastas Kauno geležinkelio tunelis, kurio ilgis 1280 metrų. Šis tunelis atkreipia geležinkelio transporto specialistų dėmesį didinant traukinių greitį atskiruose geležinkelio ruožuose. Tam, kad maksimaliai galėtume padidinti traukinio greitį tunelyje, būtina išanalizuoti šio tunelio geometrinius parametrus, nustatyti galimus pakeitimus, įvertinti sąstato pasipriešinimą siekiant didinti juo važiuojančių traukinių greitį.



## 2 APTEKĖJIMO REŽIMAI IR PASIENIO SLUOKSNIS

Esant klampiai terpei, egzistuoja du srauto judėjimo pobūdžiai:

1. Laminarinis tekėjimas;
2. Turbulencinis tekėjimas.

Laminarinis arba sluoksniuotas tekėjimas pasižymi tvarkingu dalelių judėjimu, kai sluoksniai nesimaišo tarpusavyje. Laminariniame sraute šilumos ir medžiagos pernešimas vyksta tik dėl tarpmolekulinių trinties, šilumos mainų ir difuzijos procesų. Toks tekėjimo režimas gali atsirasti ir išlaikyti savo savybes tik esant nedideliems srauto greičiams.

Jei esant numatytoms sąlygoms yra viršijamas kritinis greitis, tai laminarinis judėjimas pereina į naują būvį, kuriam būdingas intensyvus dalelių judėjimas skersine kryptimi. Tokiu būdu išnyksta tvarkingas sluoksniuotas molekulių judėjimas ir toks tekėjimo režimas yra vadinamas turbulenciniu. Prie chaotiško molekulių judėjimo, kuris buvo būdingas laminariniam tekėjimui, čia dar prisideda makroskopinių dalelių judesys. Šis tekėjimo režimas pasižymi nepastoviu charakteriu ir jo greitis bei kiti parametrai tam tikrame taške priklauso nuo laiko.

Tiriant turbulencinį tekėjimą, patogiu naudoti ne momentinį (faktinį) greitį, o suvidurkintą jo reikšmę per tam tikrą laiką  $t_2$  [1]. Tada suvidurkinta greičio reikšmė  $x$  ašies kryptimi bus:

$$\bar{V}_x = \left(\frac{1}{t}\right) \int_{t_1}^{t_1+t_2} V_x dt, \quad (1)$$

kur  $V_x$  – faktinis greitis taške, kuris priklauso nuo laiko  $t$ .

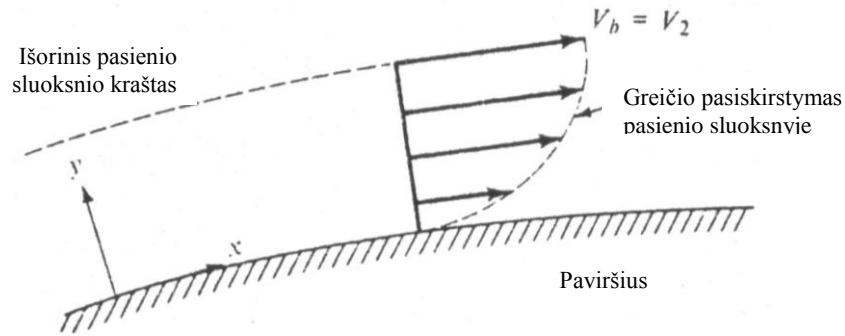
Naudojantis suvidurkinto greičio sąvoka, faktinį greitį galima išreikšti kaip sumą:

$$V_x = V_x + V_x', \quad (2)$$

kur  $V_x'$  - papildoma kintanti dedamoji, vadinama pulsaciniu greičiu.

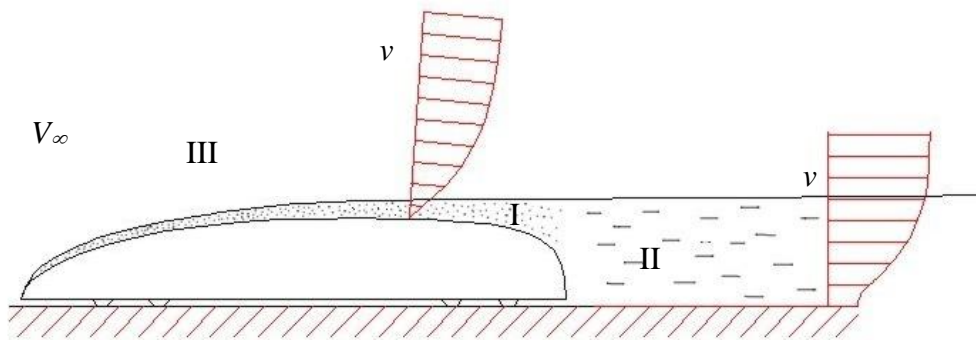
Pulsacinio greičio atsiradimas turbulenciniame tekėjime lemia slėgio ir trinties įtempimų padidėjimą ir intensyvina šilumos ir medžiagos mainus.

Tyrimai parodė, kad didžiausias greičio gradientas yra prie pat paviršiaus, kur oro srautas tarsi prilimpa prie aptekamo kūno sienelių ir dėl to yra stipriai stabdomas. Oro srauto greitis lygus nuliui prie pat sienelės (2.1 pav.) ir nutoldamas nuo sienelės pamažu didėja. Atitinkamai kinta ir trinties įtempimai - prie pat sienelės jie yra didesni nei toliau nuo jos. Šis plonas sluoksnis, esantis prie pat paviršiaus ir turintis didžiausią greičio gradientą statmenai tam paviršiui bei atitinkamai didžiausius trinties įtempimus, yra vadinamas pasienio sluoksniu.



2.1 pav. Greičio pasiskirstymas pasienio sluoksnyje

Kaip pasiskirstys greitis pasienio sluoksnyje priklauso nuo to, ar tekėjimo režimas jame bus laminarinis ar turbulencinis. Tiriant kūnų aptekėjimą mažo klampumo skysčiais (arba dujomis), galima tarti (2.2 pav.), kad srovės erdvė yra suskirstyta į tris sritis: pirma sritis (I) yra pasienio sluoksnis. Iš vienos pusės jis apribotas kūno paviršiumi, iš kitos – sąlygine plokštuma, kurioje galima neįvertinti tangentinių įtempimų [2].



2.2 pav. Mažo klampumo skysčio (dujų) srauto tekėjimo schema

Pasienio sluoksnio viduje judėjimas apibūdinamas staigiu greičio keitimu pagal normalę į kūno paviršių. Skystis pasienio sluoksnyje iš esmės yra klampus, o jo tekėjimas gali būti kaip laminarinis, taip ir turbulencinis, t.y. prie pat kūno paviršiaus dėl stabdančios kūno paviršiaus įtakos ir skysčio klampumo greičiai yra labai maži, todėl judėjimą galima vadinti laminariniu. Tolstant nuo kūno paviršiaus pagal normalę, greičiai didėja ir jei pasienio sluoksnio storis yra pakankamai didelis (arba jei yra pakankamai didelis Reinoldso skaičius), tada laminarinio “pasluoksnio” išorėje judėjimas yra turbulencinis [3].

Pasienio sluoksnyje esančios skysčio dalelės, tekėdamos išilgai kūno paviršiaus, patenka į sritį už kūno. Ši sritis turi paribio sluoksnio “pėdsakus“, t.y. joje greičiai yra mažesni už aplinkos greičius. Sulėtintos dalelės už kūno užpildo tam tikrą sritį, kuri teoriškai gali būti begaline. Tai yra antra sritis (II). Ji dar vadinasi lydintis pėdsakas (srovė). Šioje srityje gali būti atskiri sukūriai, kurie susiformuoja dėl paribio sluoksnio nutrūkimo. Likusią erdvę apie aptekamą kūną, sudaro labai mažų tangentinių įtempimų sritis (III), kurios, į paviršiaus trinties pasipriešinimą galima neįvertinti. Atmosferos sąlygose judėjimo režimas šioje srityje visada turbulencinis [4]. Skaičiavimuose yra laikoma, kad šioje srityje

skystis yra idealus, o judėjimas vyksta be dalelių sukimo. Vadinasi, šiai srauto sričiai taikomi visi idealaus skysčio judėjimo dėsniai. Klampaus skysčio judėjimo dėsnius reikia taikyti ne visame sraute, o tik plonoje pasienio sluoksnio srityje ir pėdsako sraute už kūno.

Greičio kitimas pasienio sluoksnyje pasižymi tuo, kad toldamas nuo paviršiaus jis asimptotiškai artėja prie išorinio srauto greičio reikšmės. Tačiau praktiniais sumetimais patogiau išskirti tą pasienio sluoksnio dalį, kurioje šis kitimas yra pakankamai žymus ir greitis šio sluoksnio riboje yra artimas išorinio sluoksnio greičiui. Atstumas nuo paviršiaus iki šios ribos lemia pasienio sluoksnio storį. Paprastai šis storis nustatomas kaip atstumas iki to pasienio sluoksnio taško, kuriame greitis nuo išorinio srauto greičio skiriasi ne daugiau kaip vienu nuošimčiu.

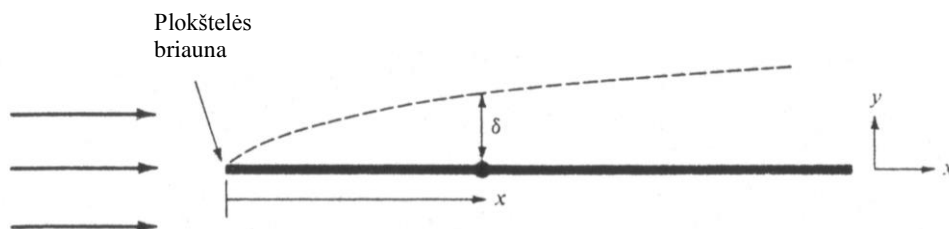
### 3 REINOLDSO SKAIČIUS LAMINARINIAM IR TURBULENCINIAM TEKĖJIMAMS

Tarkime, kad turime plokštelę (3.1 pav.). Dydis  $x$  tegul bus matuojamas nuo plokštelės pradžios taško,  $V_\infty$  - srauto greitis toli prieš plokštelę. Tada Reinoldso skaičių bus galima apskaičiuoti pagal šią formulę [5]:

$$\text{Re} = \frac{\rho_\infty V_\infty x}{\mu_\infty} , \quad (3)$$

čia  $\rho$  - oro srauto tankis;  $\mu_\infty$  - dinaminis klampumo koeficientas.

Reinoldso skaičius yra bematis dydis, kuris priklauso nuo atstumo  $x$ . Dėl šios priežasties jis kartais vadinamas “vietiniu” Reinoldso skaičiumi.



3.1 pav. Plokštelės pasienio sluoksnis

Laminarinio pasienio sluoksnio storis gali būti apskaičiuotas pasinaudojant Reinoldso skaičiumi:

$$\delta = \frac{5.2x}{\sqrt{\text{Re}_x}} . \quad (4)$$

Aerodinamikoje vietoj paviršiaus trinties įtempimų  $\tau_w$  yra naudojamas vietinis paviršiaus trinties koeficientas  $c_{fx}$ .

$$c_{fx} = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2} = \frac{\tau_w}{q_\infty} . \quad (5)$$

Paviršiaus trinties koeficientas yra bematys dydis, apibrėžiamas kaip vietiniai paviršiaus trinties įtempimai, padalinti iš dinaminio slėgio pasienio sluoksnio riboje. Remiantis laminarinio pasienio sluoksnio teorija:

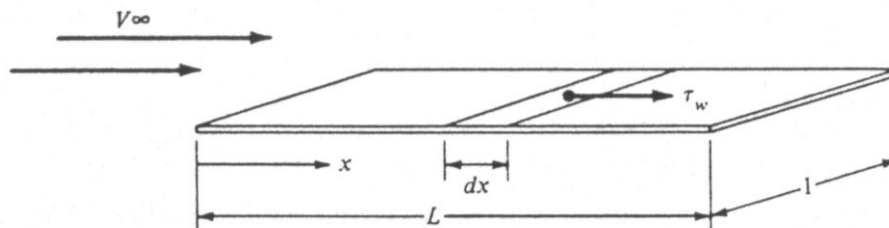
$$c_{fx} = \frac{0.664}{\sqrt{Re_x}} \quad (6)$$

Ši lygtis rodo nedimensinių dydžių naudojimo privalumus. Iš vienos pusės, trinties įtempimai priklauso nuo tokių parametru, kaip  $\rho_\infty$ ,  $V_\infty$ ,  $Re_x$ , o iš kitos pusės,  $c_{fx}$  priklauso tik nuo  $Re_x$ . Taikydami prieš tai parašytas formules galime užrašyti:

$$\tau_w(x) = \frac{0.664q_\infty}{\sqrt{Re_x}} \quad (7)$$

Reikia atkreipti dėmesį, į tai kad laminarinio pasienio sluoksnio  $\tau_w$  ir  $c_{fx}$  yra  $x^{1/2}$  funkcijos ir mažėja srauto kryptimi. Norėdami apskaičiuoti bendrą pasipriešinimo jėgą dėl paviršiaus trinties, turime suintegruoti vietinius trinties įtempimus išilgai paviršiaus 3.2 pav.:

$$D_f = \int_0^L \tau_w dx \quad (8)$$



3.2 pav. Suminiai pasipriešinimo jėgai apskaičiuoti schema

Remdamiesi prieš tai užrašytais formulėmis, lygtį perrašome taip:

$$D_f = 0.664 * q_\infty \int_0^L \tau_w dx = \frac{0.664q_\infty}{\sqrt{\frac{\rho_\infty V_\infty}{\mu_\infty}}} \int_0^L \frac{dx}{\sqrt{x}} \quad (9)$$

$$D_f = \frac{1.328q_\infty L}{\sqrt{\frac{\rho_\infty V_\infty L}{\mu_\infty}}} \quad (10)$$

Tada bendras paviršiaus trinties koeficientas bus:

$$C_f = \frac{D_f}{q_\infty S} \quad (11)$$

kur  $S$  - plokštelės plotas.

Kitaip:

$$C_f = \frac{1.328qL}{q_\infty L \left( \frac{\rho_\infty V_\infty L}{\mu_\infty} \right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (12)$$

arba:

$$C_f = \frac{1.328}{\sqrt{Re_L}}. \quad (13)$$

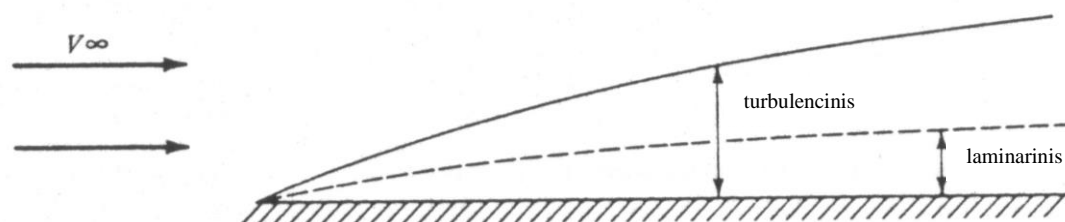
Šiuo atveju  $Re_L$ , priklauso nuo bendro paviršiaus ilgio  $L$ :

$$Re_L = \frac{\rho_\infty V_\infty L}{\mu_\infty}. \quad (14)$$

Esant tokioms pačioms tekėjimo sąlygoms, turbulencinis pasienio sluoksnis bus storesnis už laminarinį pasienio sluoksnį. Kadangi turbulencinis tekėjimas nėra teoriškai aprašytas, tai, tiriant turbulencinį pasienio sluoksnį, labiau pasikliaujama eksperimentiniais duomenimis. Jais remiantis, apytikslė formulė turbulencinio pasienio sluoksnio storiui nustatyti:

$$\delta = \frac{0.37x}{Re_x^{0.2}}. \quad (15)$$

Reikia atkreipti dėmesį į tai, kad šis storis didėja apytiksliai pagal  $x^{4/5}$  funkciją, tuo tarpu laminarinis pasienio sluoksnis – pagal  $x^{1/2}$  funkciją. Iš to matyti, kad turbulencinis pasienio sluoksnis didėja greičiau ir yra storesnis (3.3 pav.) [5].

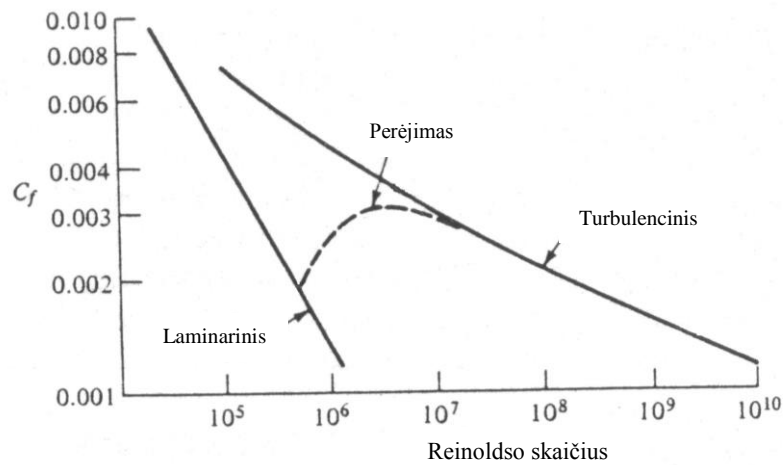


3.3 pav. Turbulencinis ir laminarinis pasienio sluoksniai

Bendras paviršiaus trinties koeficientas, esant turbulenciniam tekėjimui, apytiksliai apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$C_f = \frac{0.074}{Re_L^{0.2}}. \quad (16)$$

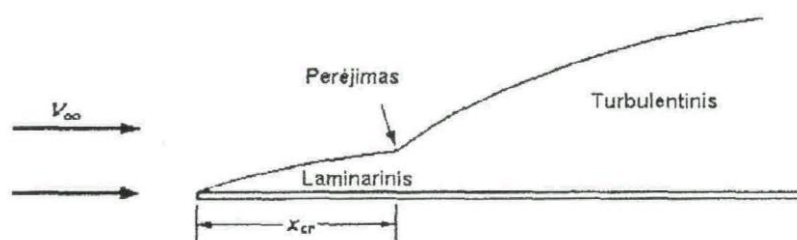
Galima pastebėti, kad, esant turbulenciniam tekėjimui,  $C_f$  kinta pagal  $x^{1/5}$  funkciją, o tuo tarpu esant laminariniam tekėjimui, jis kinta pagal  $x^{1/2}$  funkciją. Dėl šios priežasties esant turbulenciniam tekėjimui, bendras paviršiaus trinties koeficientas  $C_f$  bus didesnis nei esant laminariniam tekėjimui 3.4 pav..



3.4 pav. Paviršiaus trinties koeficiento priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus, esant turbulenciniam ir laminariniam tekėjimams, kai srauto greičiai nedideli

Iki šiol mes kalbėjome atskirai apie laminarinį ir apie turbulencinį tekėjimus. Iš tiesų, aptekėdamas kokį nors profilį, srautas visada profilio pradžioje bus laminarinis. Tekedamas toliau pasienio sluoksniu, oro srautas tampa nestabilus. Jame atsiranda turbulencijos židiniai. Pratekėjęs pro, taip vadinamąją perėjimo zoną, oro srautas tampa turbulenciniu 3.5 pav.. Perėjimo zonos taškas  $x_{cr}$  lemia kritinį Reinoldso skaičių:

$$Re_{x_{cr}} = \frac{\rho_{\infty} V_{\infty} x_{cr}}{\mu_{\infty}} \quad (17)$$



3.5 pav. Perėjimas iš laminarinio į turbulencinį tekėjimą

Antra vertus, norėdami sužinoti, kuriame taške laminarinis tekėjimas pereis į turbulencinį, mes galime pasinaudoti ta pačia formule, tik turime žinoti kritinį Reinoldso skaičių  $Re_{x_{cr}}$ . Jį galima sužinoti iš eksperimentinių duomenų. Mažiems greičiams ši reikšmė bus:  $Re_{x_{cr}} = 5 \cdot 10^5$ . Tada:

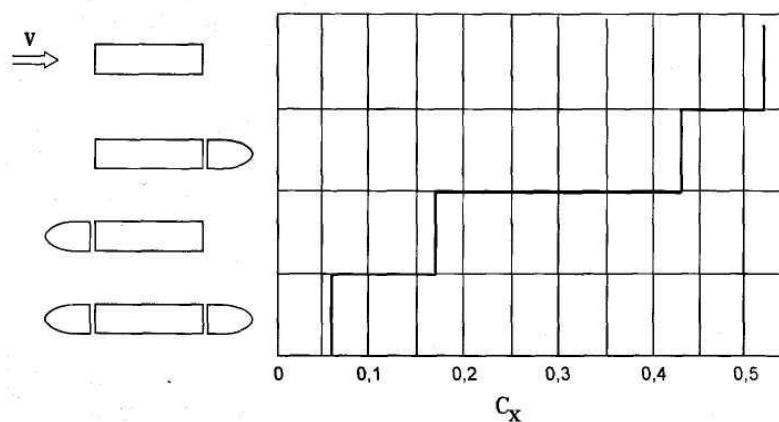
$$x_{cr} = \frac{\mu_{\infty} Re_{x_{cr}}}{\rho_{\infty} V_{\infty}} \quad (18)$$

## 4 SĄSTATO AERODINAMIKA

Traukiniai yra specialios rūšies transporto priemonės, kurioms būdingi dideli pasiekiamų greičių skirtumai. Greičiausi gali judėti apie 300 km/h greičiu. Tie traukiniai dažniausiai susideda iš tam tikro vagonų skaičiaus ir yra varomi elektra. Juda jie geležinkelio bėgiais, nors greičiausiems traukiniams buvo bandomos važiuoklės ant oro ir ant magnetinių pagalvių. Pastarieji sprendimai reikalauja visiškai naujos bėgių rūšies ir net esant teigiamiems bandymų rezultatams jie reikalauja didelių investicijų [7]. Inžinieriams pavyko išspręsti vibracijos problemą, atsirandančią judant dideliais greičiais paprastais metaliniais bėgiais. Tai sudaro sąlygas naudoti paprastus geležinkelio bėgius vis greitesniems traukiniams judėti. Pagrindinės problemos, susijusios su traukinių aerodinamika: vagonų aerodinaminio pasipriešinimo sumažinimas, aerodinaminio aptekėjimo garso lygio ir oro paėmimo į vidų sumažinimas ir aerodinaminių stabdžių panaudojimas greičiui mažinti.

Atsižvelgiant į ribotus vagonų pločius, kuriuos nulemia jau daug metų priimtas bėgių pločio standartas, sąstatų konstrukciją sudaro labai didelis santykis tarp ilgio ir aukščio. Atsižvelgiant į aerodinamiką, tokia geometrija palankiai veikia mažus slėginius pasipriešinimo rodiklius, bet pasireiškia žymiu paviršiaus trinties pasipriešinimo didėjimu. Išskiriami trys sąstato vagonų tipai: priekinis vagonas, viduriniai vagonai ir galinis vagonas. Kiekvienas iš šių tipų yra skirtingos geometrijos.

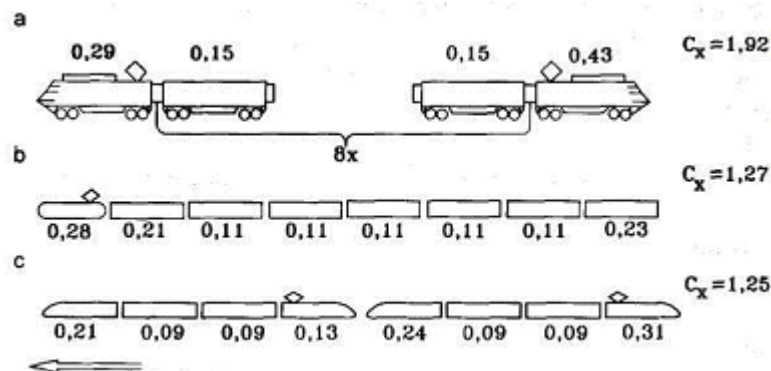
Priekinio vagono forma turi didelės įtakos slėginės trinties dydžiui, todėl jo forma turi užtikrinti oro aptekėjimą be trukdžių ir atplėšimų. Viduriniai vagonai sudaro paviršiaus trinties bei oro tarpų tarp jų pasipriešinimą. Galinis vagonas sprendžia baigiamąjį pasipriešinimą, todėl turi suteikti netrukdomą oro nutekėjimą į atitrūkimo vietą kiek galima mažesniu pjūviu [6]. 1 paveiksle sudaryti pasipriešinimai paprastos keturkampės konstrukcijos, kuri yra supaprastintas vidurinio vagono modelis, uždengtas aptakiais apdangalais iš priekio ir iš galo.



4.1 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo įtaka apdangalų priekiu ir galui

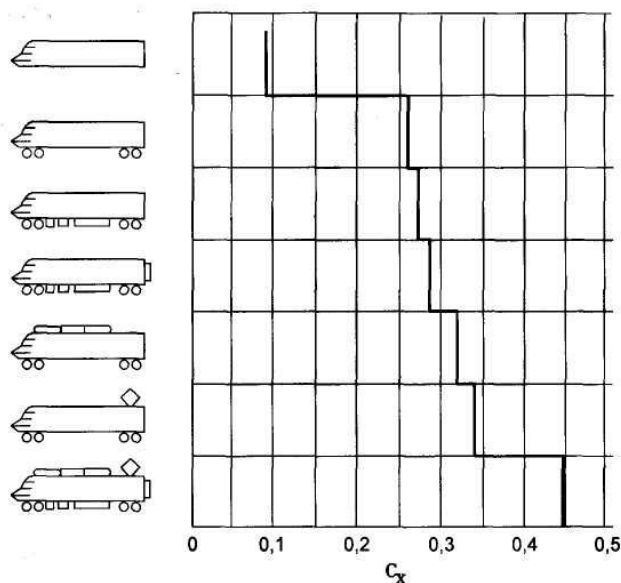
Kaip matome iš šių duomenų, visų pirma pasipriešinimui didelės įtakos turi aptakus traukinio priekis. Tačiau, kad būtų maksimaliai sumažintas aerodinaminis pasipriešinimas, reikalinga aptaki ne tik traukinio priekinė dalis, bet ir jo galas [10]. Kaip matome iš 4.1 pav., vien aptakaus galo nepakanka, kad pasipriešinimas būtų maksimaliai sumažintas. Aerodinaminio pasipriešinimo pavyzdžiai sudėtiniuose ir atskiruose įvairių vagonų sąstatuose pavaizduoti 4.2 pav.

Reikia atkreipti dėmesį į gana mažus priekinių vagonų pasipriešinimo dydžius ir gana didelį galinių vagonų pasipriešinimą. Vagonas su paprastu užbaigimu sudaro mažesnę pasipriešinimą, negu galinis vagonas su pantografu ir aptakiu užbaigimu.



4.2 pav. Suminiai ir atskirų įvairių sąstatų vagonų tipų pasipriešinimai: a - traukinys 4 WE2 varikliniai vagonai ir 8 keleiviniai vagonai, b - elektrinio tipo traukinys su 7 vagonais, c - du sujungti elektriniai keturių vagonų sąstatai.

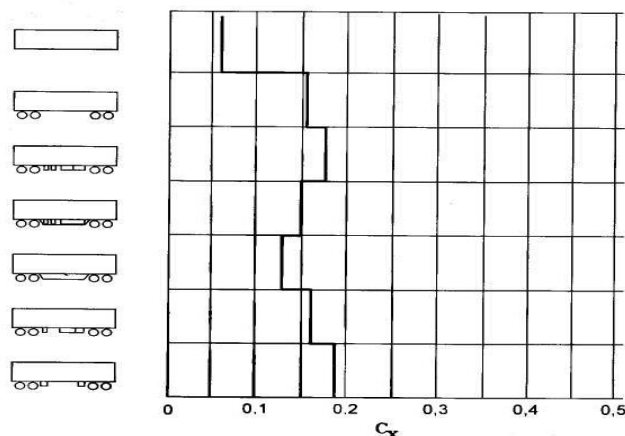
Traukiniai yra varomi elektros energija iš pastatytų tinklų per srovės imtuvus. Kaip matome iš 4.3 pav., paties pantografo buvimas padidina vagono pasipriešinimą nuo  $C_x = 0.26$  iki  $C_x = 0.334$ , tai reiškia pasipriešinimo padidėjimą beveik 28%. Deja, pavieniai papildomi elementai sudaro interferenciją ir jų suminis pasipriešinimas yra didesnis negu sąstato pasipriešinimas.



4.3 pav. Įvairios komplektacijos traukinių pasipriešinimo koeficientai



Ratų ir apdengimų įrengimo įtaka į oro pasipriešinimo koeficientą sąstato vidiniam vagonui pavaizduota paveiksle. Matoma labai didelė vagonų ratų apdangalų teigiama įtaka bendram pasipriešinimui. Kaip matome, erdvės išpildymas tarp vagonų ratų sumažina bendrą pasipriešinimą.



4.4 pav. Ratų apdengimų įtaka pasipriešinimo koeficientui

Bandymai buvo atliekami Reinoldso skaičiams virš kritinės ribos. Gackenholtzas atliko bandymus  $R_e > 10^5$ , Neppertas ir Sandersonas  $R_e = 4 * 10^5$  [12]. Pagal Visockio bandymus, pasipriešinimo koeficientas nesikeičia virš  $R_e = 5 * 10^5$ .

Visų greitų traukinių pagrindinė problema yra aerodinaminis garsas, atsirandantis aptekėjimo metu. Garso židiniai yra taip pat ventiliacinės angos ir pantografai, kurie reikalingi elektros energijai paimti iš elektros tinklo. Didžiausia problemą sudaro oras, patenkantis į traukinio vidų. Patekęs oras kuria tam tikro dažnio garsą. Pantografai, per kuriuos yra tiekama elektros srovė, yra gaminami aukštų sudėtinių konstrukcijų. Oras aptekėdamas pantografą sukelia savaiminę vibraciją pasireiškiančią garsu.

Norint išspręsti šią problemą taikomi du būdai: naudojami aerodinaminiai apdangalai ant traukinio stogo, apdengiantys pantografus tokiu būdu, kad jie būtų jų aerodinamiame šešėlyje. Aptekėjimo greičiai tada būna maži ir garso efektas yra suredukuojamas. Tokio sprendimo kaina yra vis dėl to dideli aerodinaminiai pasipriešinimai. Europoje projektuotojai stengiasi pakeisti pantografų konstrukciją. Yra atliekami bandymai, kurių metu identifikuojami triukšmo židiniai. Bandymuose naudojami kryptiniai mikrofonai, kurie nustato akustinį lauką aplink pantografo elementus.

Prancūzai atlieka aptekėjimo tyrimus aplink pantografą pasitelkdami vizualizaciją, šiuo būdu stengiantis rasti pratekėjimo trukdančias vietas [13]. Prie didelių greičių judant traukiniui tunelyje, juos pradeda veikti dinamikos jėgos. Tunelyje atsiranda tarpinių slėgio svyravimų, sukeltų traukinio judėjimo. Norint išspręsti tokią problemą, bandoma naudoti skaitines simuliacijas.

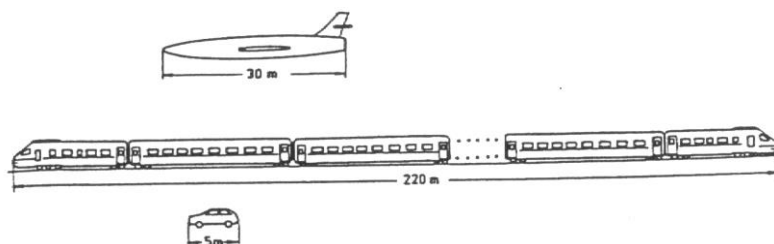
Trinties metalo į metalą reikšmės nėra didelės, todėl tradiciniai mechaniniai stabdžiai nėra labai efektyvūs. Esant dideliems greičiams, kuriuos išvysto greičiausi traukiniai, mechaniniai stabdžiai gali būti sustiprinami aerodinaminiais stabdžiais.

Mašininio vagono priekinės dalies, ratų profiliu, įrengimus po vagonais, atraminių užvedimo bloką, pantografų ir perėjų tarp vagonų geometrijos optimizavimas sumažino trinties pasipriešinimą beveik 60% ir padidino labai didelę elektros energijos sunaudojimo ekonomiją. Pagal Europinę bandymo programą buvo bandomi priekiniai vagonai. Sąstatuose iš keturių vagonų kartu su aptakiu traukinio priekiu, pagaminti masteliu 1:10, naudojam daug vagono formų rūšių. Išlyginus traukinio šonines sienas sumažėja trinties pasipriešinimas beveik 14% (priklausomai nuo vėjo krypties). Atstumų tarp vagonų sumažinimas sumažino trintį apie nuo 5% iki 31%, priklausomai nuo vėjo krypties. Šoninių sienų prailginimas sumažino trintį nuo 4% iki 20%, o šoninių apdangalų ir važiuoklės pridengimas maždaug nuo 3% iki 13%.

#### 4.1 Aerodinaminis pasipriešinimas

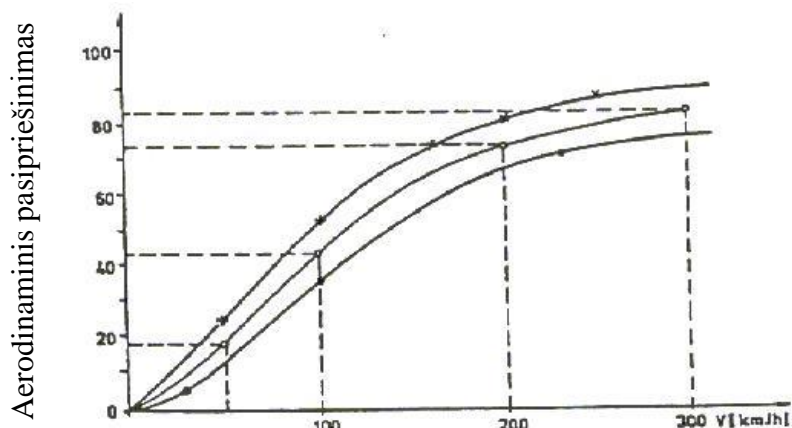
Greitaeigių traukinių projektavimas susietas su traukinio aerodinaminių poveikių optimizavimu. Oro srauto pasipriešinimo apskaičiavimas pagrįstas aerodinaminių koeficientų, kurie gaunami atliekant eksperimentinius bandymus, suma.

Sąstatų aerodinaminiai bandymai skiriasi nuo lėktuvų ir automobilių bandymų, nes sąstatas yra ilgas kūnas, su dideliu paviršiaus plotu, judantis prie pat žemės paviršiaus, kurio maždaug  $10 \text{ m}^2$  skerspjūvio plois ir daugiau kaip 100 m ilgis (4.1.1 pav.).



4.1.1 pav. Aptekamų ilgių palyginimas

Dėl to yra didelė oro trinties pasipriešinimo įtaka bendram aerodinaminiam pasipriešinimui ir didelių galių, kurios turi nugalėti aerodinaminį pasipriešinimą, panaudojimo būtinumas [15]. 4.1.2 paveiksle parodyta kiek padidėja aerodinaminis pasipriešinimas, priklausomai nuo judėjimo greičio.



4.1.2 pav. Oro pasipriešinimo priklausomybė nuo judėjimo greičio grafikas

Bendras aerodinaminis pasipriešinimas susideda iš penkių pagrindinių dalių:

1. Formos pasipriešinimas;
2. Induktyvinis pasipriešinimas;
3. Paviršiaus pasipriešinimas;
4. Interferencinis pasipriešinimas;
5. Vidinių srautų pasipriešinimas.

Formos pasipriešinimas tiesiogiai priklauso nuo sąstato konfigūracijos. Pagrindinės kėbulo kontūro linijos lemia ar tolygiai oro srautas aptekės sąstata. Tokiu būdu kėbulo forma turi įtakos aerodinaminių apkrovų pasiskirstymui statmenai jo paviršiui. Šių apkrovų projekcijų suma sąstato važiavimo kryptimi ir sukelia formos pasipriešinimo jėgą.

Induktyvinis pasipriešinimas yra sukuriamas vertikaliosios jėgos, kuri atsiranda sąstatai važiuojant. Vertikaliosios jėgos dydis priklauso nuo pagrindinių geometrinių kėbulo parametrų. Vertikaliam jėgai susidaryti ir su ja susijusiam induktyviniam pasipriešinimui nugalėti yra eikvojama sąstato kinetinės energijos dalis.

Paviršiaus pasipriešinimas atsiranda trinantis oro dalelėms į lokomotyvo ir vagonų kėbulų paviršių. Ši trintis atsiranda dėl oro klampumo ir vyksta tik ploname pasienio sluoksnyje. Paviršiaus pasipriešinimas tuo didesnis, kuo didesnis oro srauto aptekamas paviršius.

Interferencinis pasipriešinimas atsiranda dėl įvairių išsikišančių sąstato kėbulo dalių. Šie elementai sąveikauja su oro srautu ir sukelia jame nepageidaujamus pokyčius, dėl kurių bendra pasipriešinimo jėga išauga dydžiu, kuris gali viršyti atskirai paimto to elemento pasipriešinimo jėgą nesutrikdytame sraute.

Vidinių srautų pasipriešinimas – tai visų energijos nuostolių įėjimuose ir išėjimuose tų sistemų, kurios priverstinai ar natūraliai yra apipučiamos oro srauto suma.

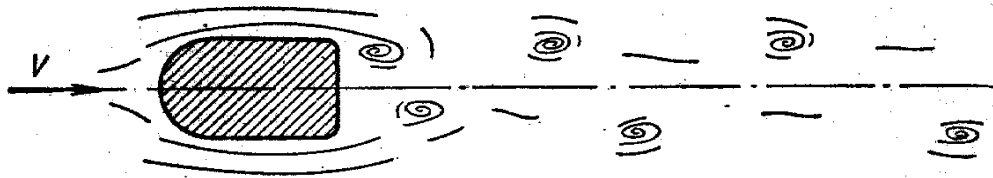
## **4.2 Formos pasipriešinimas**

Formos pasipriešinimas priklauso nuo pagrindimų kėbulo formos parametrų, kuriuos sukuria dizaineris ir kuriems didelę įtaką daro kėbulo konstruktorius. Ideali šiuo požiūriu kėbulo forma būtų tada, kai teigiamos aerodinaminės jėgos, t.y. slėgis į priekinę lokomotyvo dalį ir neigiamos aerodinaminės jėgos, t.y. oro išretėjimas galinėje sąstato dalyje, būtų minimalios. Tada formos pasipriešinimas turėtų mažiausią savo reikšmę [8].

Šiuo metu formos pasipriešinimą stengiamasi sumažinti projektuojant kėbulą tokiu būdu, kad jis būtų kuo aptakesnių formų, be įvairių išsikišančių dalių. Vis didesnis dėmesys skiriamas aerodinamikai, kuriant greitaigius taukinius.

Tyrimai parodė, kad, esant mažiems Reinoldso skaičiams, už kūno susidaro sulėtintų dalelių sritis, kuri siaurėja tostant nuo kūno [12].

Jei kūno galo forma yra suapvalinta, tai, didėjant Reinoldso skaičiui lydinčios srovės svyravimai didėja ir galu gale srautas pasiskirsto į dvi eilės priešingos krypties sūkurių (pav. 4.2.1). Ši sritis juda paskui srautą, sūkurių tampa nesimetriški – jie paėliui atitrūksta nuo abiejų kūno pusių ir juda paskui srautą. Jeigu kūnas turi simetrijos ašį ir srautas nukreiptas išilgai jos, tada nuo kūno šonų atitrūkinės lygūs pagal reikšmę sūkurių. Šis reiškinys pavadintas Karmano “sūkurių kelio”.



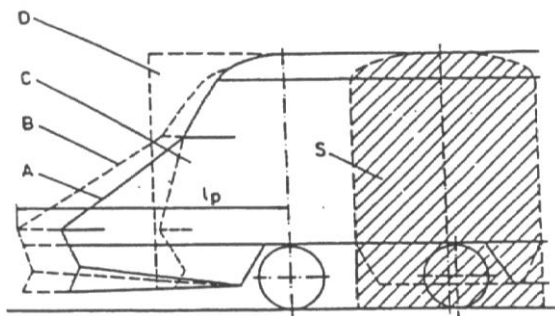
4.2.1 pav. Karmano “sūkurių kelias”

Karmanas išvedė formulę, pagal kurią apskaičiuojama pasipriešinimo koeficiento reikšmė:

$$C_x = \frac{l}{d} \left[ 1,59 \frac{v}{V_\infty} - 0,63 \left( \frac{v}{V_\infty} \right)^2 \right], \quad (19)$$

čia  $l$  – atstumas tarp sūkurių;  $d$  – kūno skersmuo;  $v$  – sūkurių judėjimo išilgai “kelio” greitis;  $V_\infty$  - nesugadinto srauto judėjimo greitis.

Tam, kad būtų išaiškinta priekinės ir galinės sąstato dalies įtaką aerodinaminiam pasipriešinimui, atlikta daug eksperimentų. Buvo bandomi skirtingų formų vagonai (4.2.2 pav.) ir gauti skirtingi aerodinaminio pasipriešinimo koeficientai  $C_x$  (1 lentelė).



4.2.2 pav. Bandomų profilių įvairovė. Pastaba:  $L_p$  – prailgintos dalies ilgis;  $S$  – traukinio skersinio pjūvio plotis

1 lentelė

Aerodinaminio pasipriešinimo koeficientų lentelė

| Modelio schema | Tiriamasis objektas        | $C_x$ |
|----------------|----------------------------|-------|
|                | A formos priekinis vagonas | 0,085 |
|                | B formos priekinis vagonas | 0,090 |
|                | C formos priekinis vagonas | 0,105 |
|                | D formos priekinis vagonas | 0,435 |

|   |  |                                  |
|---|--|----------------------------------|
|  | A formos galinis vagonas<br>B formos galinis vagonas<br>C formos galinis vagonas<br>D formos galinis vagonas | 0,225<br>0,220<br>0,205<br>0,180 |
|---|--|----------------------------------|

Tyrimo rezultatai rodo, kad didžiausias pasipriešinimo koeficiento  $C_x$  sumažėjimas yra tada, kai vidutiniškai prailgintą priekinio vagono profilį A. Tolimesnis profilio prailginimas neturi ypač didelės reikšmės pasipriešinimo koeficientui  $C_x$ .

Galinio vagono suapvalinimas ir prailginimas turi įtakos pasipriešinimo koeficiento padidėjimui (nuo  $C_x=0,180$  iki  $C_x=0,225$ ). Tolimesnis profilio prailginimas taip pat neturi didelės reikšmės pasipriešinimo koeficiento pakeitimui.

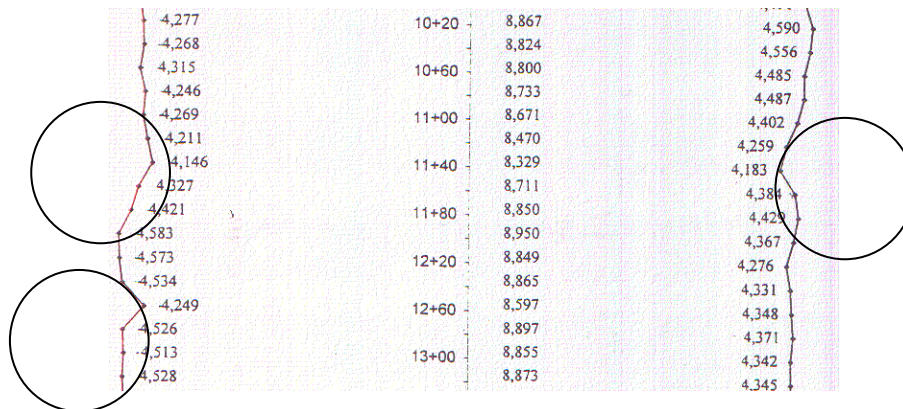
Taip pat paaiškėjo, kad, esant galinio vagono profiliui D formos, sukuriai yra didesnės reikšmės negu profilių A, B ir C, tačiau srautas už vagono išsilygina žymiai greičiau. Sąstate, aptekant paskutinį vagoną, srautas yra atitrūkęs ir galinio vagono forma negali atstatyti srautą. Todėl aišku, kad pasipriešinimas nepriklauso nuo galinio vagono formos.

### 4.3 Tunelio geometrija

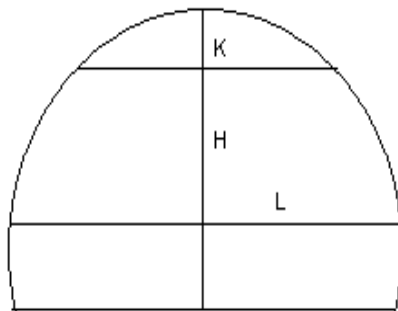
Taigi, tam, kad galėtume palyginti atskirų traukinių geometrijos formos įtaką susidarančiam oro pasipriešinimui turime pasirinkti tam tikrus tunelio parametrus. Mūsų atveju kaip tyrimų objektą priimsime Kauno tunelio geometrinius parametrus.

Kauno tunelis tai pirmasis tunelis, kuris buvo pastatytas tuometinėje Rusijoje. Vidinė tunelio geometrija turėjo atitikti dviejų kelių reikalavimus. Kauno tunelis pastatytas 84-85 geležinkelio kilometre, kuris driekėsi nuo Lentvario link tuometinės Prūsijos. Dalis tunelio eina tiese, kita dalis kreive.

Žemiau pateiktoje 4.3.1 pav. matoma kaip kinta Kauno tunelio skerspjūvio geometrija įvairiose tunelio skerspjūviuose. Pagal turimus duomenis iš 4.3.1 paveikslo galime matyti, kad tunelio geometrija atskiruose taškuose yra nevienoda. Tai reiškia, kad ir aerodinaminis pasipriešinimas atskirose tunelio vietose bus nevienodas. Tunelio geometrijos kitimą 2,5 metro aukštyje nuo pagrindo mes matome pateiktame 4.3.2 paveiksle. Apskritimais pažymėti tunelio geometrijos nelygumai kurių kiekvieno spinduliai  $R$  apytikriai lygūs 50 cm, leidžia daryti prielaidą, kad tunelyje esantis oras traukiui įvažiavus į tunelį pradės subūriuoti, kas generuos papildomą garsą bei slėgio pokyčius tunelyje ir traukinio paviršiuje. Tokie nelygumai tunelio paviršiuje maža įtakoja traukinio dinamiką jam judant iki 60 km/h greičiu, tačiau greičiui padidėjus iki 150 -180 km/h ir daugiau, tokie palyginti maži geometriniai nelygumai turės didelės įtakos traukinio supimo atsiradimui.



4.3.1 pav. Tunelio pjūvis bei geometrijos kitimas tam tikrose tunelio vietose



| Pjūvis | L    | H    | K    |
|--------|------|------|------|
| 10+80  | 8,74 | 6,95 | 5,97 |
| 11+00  | 8,67 | 6,8  | 5,64 |
| 11+20  | 8,47 | 6,52 | 4,95 |
| 11+40  | 8,33 | 6,23 | 4,39 |
| 11+60  | 8,71 | 6,7  | 5,39 |
| 11+80  | 8,85 | 6,95 | 5,98 |
| 12+00  | 8,95 | 6,89 | 6,04 |

4.3.2 pav. Tunelio geometrijos kitimas

Kaip matyti iš esančių duomenų apie atskirų pjūvių geometriją, tunelis iš pradžių siaurėja po to staiga padidėja. Tokie staigūs geometrijos pasikeitimai gali lemti įvairių spaudimo bangų atsiradimą ir poveikį traukiniui. Daugiau informacijos pateikta 2 ir 3 prieduose.

#### 4.4 Traukinio pasipriešinimo komponentai atvira ore

Kai traukinys įvažiuoja į tunelį, atsiranda keletas komplikacijų, lyginant su tuo, kaip traukinys juda atviroje erdvėje. Tai sudaro:

- spaudimo dydis;
- žymus slėgio bangų pasikeitimas, traukiniui įvažiuojant ir išvažiuojant iš tunelio;
- išilginiai slėgio gradientai formuojasi išilgai traukinio.

Traukiniui, kuris keliauja lauku, pasipriešinimą judėjimui kuria paviršiaus trintis ir vietinių oro srautų pasikeitimai ties traukinio priekiu ir galu [8].

Paviršiaus trintis yra viena iš svarbiausių traukinio pasipriešinimo sudedamųjų. Kad ir pats mažiausias dydis, kuris gali egzistuoti teoriškai, turės labai didelę įtaką, kad ir koks bebūtų traukinio paviršius: lygus ar slidus, jis vis viena sudarys pagrindą trinties sluoksniui susidarymui.

Taigi galima teigti, kad bendra trintis yra ekvivalenti visame traukinio paviršiuje, nepaisant to, kad ji nėra pastovi. Taip teigdami galime priimti, kad paviršiaus trintis veikia visame traukinyje

vienodai ir sukuria vienodą pasipriešinimo lauką. Taip pat priimame, kad slėgis nesikeičia išilgai traukinio.

Kita pagrindinė sudedamoji yra aerodinaminis pasipriešinimas, kartais vadinamas slėgio pasipriešinimu. Šis pasipriešinimas yra skirtumas tarp išilginių spaudimo jėgų komponentų priekio ir galo dalyje.

Kai oro klampa yra maža (vakuumas), jėgos, veikiančios ant identiškos priekinės ir galinės traukinio dalies, yra vienodos, taigi rezultatas - išvis slėgio pasipriešinimo nėra. Praktiškai didelis srauto plotas yra už traukinio galo ir spaudimas ant važiuojamosios dalies yra mažesnis, nei tai būtų idealiu atveju.

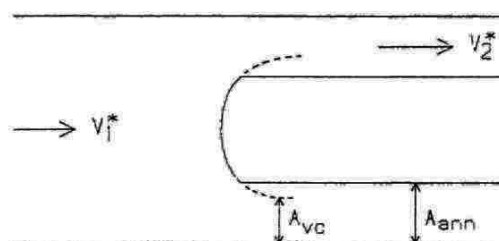
Tunelio prieigose, vietinį spaudimo nuostolį gali būti išreikštas formule:

$$\Delta p_0 = k \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \quad , \quad (20)$$

čia  $k$  - vietinio pastovaus slėgio nuostolio koeficientas.

Paprastai nuostolių koeficientas srautams į portalą ir iš portalo yra apie 0,6 ir 1,0. Tai yra nuostoliai pastovaus slėgio srautams įvažiuojant į tunelį ir išvažiuojant iš jo ir yra paprastai tokiais formulėmis:  $0.6 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$  ir  $1.0 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$ . Priimant šiuos dydžius atitinkamai gauname pasikeitimus ir statiniame slėgyje. Panašūs koeficientai gali būti nustatyti ir tunelio nelygumuose kaip sujungimai ar pjūvio pasikeitimai. Daugelyje tokių atvejų nėra griežtai apibrėžto sutarimo dėl paminėtų dydžių pasirinkimo. Skirtingi dydžiai pasirenkami skirtingose publikacijose, todėl būtina labai gerai išnagrinėti įvairius apibrėžimus prieš naudojantis jais.

Nuostolių koeficientai traukinio priekyje ir gale yra nustatomi panašiai kaip ir tunelio prieigų koeficientai. Tam tikslui ašys pasirenkamos tokios kaip ir traukinio, priimant, kad oro srautai yra pastovūs didžiojoje dalyje traukinio kelionės.



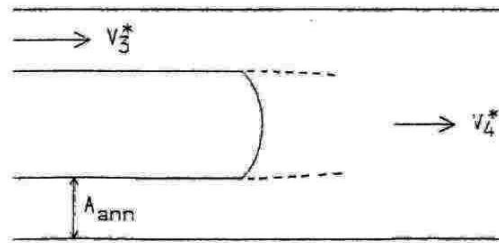
4.4.1 pav. Oro srautas ties nosimi

Atsižvelgiant į sąlygas prie traukinio nosies (pav.), galime matyti, kad yra keletas greičio charakteristikų pasirinkimo variantų, pavadintų  $V_1^*$  ir  $V_2^*$  kuriose žvaigždutė reiškia ašis tas pačias kaip ir traukinio. Bet kuris kitas greitis yra iš principo priimtinas, bet paprastai yra priimami šie žymėjimai. Tai yra pastovus greičio charakteristikų pasirinkimas įeinantiems srautams tunelio portale.

Priimant šį pasirinkimą, nosies nuostolių koeficientas  $k_n$  patvirtina, kad vietinio spaudimo nuostolis bus :

$$(\Delta p_0)_{priek} = k_n * \frac{1}{2} \rho V_2^{*2} \quad . \quad (21)$$

Nekintančio slėgio nuostoliai už galo pav. 4.4.2, gali būti traktuojami taip pat.



4.4.2 pav. Oro srautas traukinio gale

Priešinis greitis  $V_3^*$  turi pirmumą lyginant su pasroviniu greičiu  $V_4^*$ , kuris yra pastovus su pasirinkta greičio charakteristika išeinantiems srautams iš tunelio. Šiuo atveju traukinio galo nuostolių koeficientas  $k_T$  patvirtina pastovaus slėgio nuostolius, bei apibrėžia juos formule:

$$(\Delta p_0)_{galo} = k_T * \frac{1}{2} \rho V_3^{*3} \quad . \quad (22)$$

## 5 K-EPSILON TURBULENCINIS MODELIS

K- epsilon turbulencijos modelis yra labiausiai paplitęs modelis, naudojamas skaičiuojamosios skysčių dinamikos uždaviniui spręsti (CFD), kad būtų imituota aptekėjimo charakteristika turbulentinio srauto tekėjimo sąlygomis. Tai dviejų lygčių modelis, kuris pateikia bendrą turbulentiškumo aprašymą, panaudojant dviejų dalinių diferencialų lygtis. Tikroji K-epsilon skaičiavimo metodo postūmis buvo pagerinti maišymosi ilgyje modelyje (vamzdyje), taip pat rasti alternatyvą algebriškai suskaičiuoti nurodytu turbulencijos ilgiu pagal skalę, nuo vidutinio iki didelio sudėtingumo srautus [19].

- Pirmasis įvedamas kintamasis nustato turbulencijos energiją ir ši yra vadinama turbulencijos kinetine energija;
- Antras įvedamas kintamasis- turbulencinis išsisklaidymas, kuris lemia turbulencijos kinetinės energijos išsisklaidymą.

Skirtingai nuo ankstesnių turbulencijos modelių, k-ε modelis daugiausiai skiria dėmesio į mechanizmus, kurie įtakoja turbulencinę kinetinę energiją. Darant prielaidą, šio modelio turbulencinis klampumas yra izotropinis, kitaip tariant, reikšmė tarp Reinoldso įtempio ir deformacijos skaičiaus normos yra visomis kryptimis vienodas. Tikslios k-ε lygties užrašyti neįmanoma, nes lygtyje yra labai daug nežinomųjų ir sąlygų, kurių neįmanoma išmatuoti. Daugiausia yra naudojamas standartinis k-ε



turbulencijos modelis, kurį 1974 m. aprašė Launder ir Spalding [20]. Šis modelis paremtas geriausiu supratimu apie aktualius procesus, kurie sumažina nežinomuosius ir atsiranda lygtys, kurios gali būti taikomos daugeliui turbulencijos programų. Turbulencijos kinetinė energija k:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (23)$$

Pasileidimas, eikvojimas, išsklaidymas  $\varepsilon$ :

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (24)$$

čia  $u_i$  - greičio dedamoji atitinkama kryptimi;  $E_{ij}$  - santykinės deformacijos dedamoji;  $\mu_t$  - „Eddy” klampumas.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (25)$$

Į lygtį taip pat įeina reguliuojamos konstantos. Šių konstantų reikšmės buvo gautos atliekant daugybę matavimų duomenims gauti turbulenciniame sraute. Konstatntų reikšmės:  $C_\mu = 0.09$ ;  $\sigma_k = 1$ ;  $\sigma_\varepsilon = 1.30$ ;  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ;  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ .

## 6 KUTTA- JOUKOWSKI TEOREMA

Kutta- Joukowski teorema yra pagrindinė aerodinamikos teorema, kuri naudojama apskaičiuoti lėktuvo sparno profilio keliamąją jėgą, ar plokščių kūnų (dviejų koordinačių ašių) pvz. apvalaus apskritimo, srauto aptekėjimą aplink paviršių, kai kūnas nejuda, o srauto greitis yra toks, kad reikia vertinti aptekėjimą. Šia teorema galima išanalizuoti srauto greitį aplink profilį, srauto sutankėjimą- išretėjimą aplink profilį, srauto aptekėjimą. Srauto aptekėjimas yra paremtas linijiniu vaizdavimu aplink uždara profilį skersinėje plokštumoje, kur srauto linijų liestinė yra greičio tangentas. Ši teorema buvo aprašyta 20 amžiaus pradžioje. Ši teorema atskleidžia, kad keliamoji jėga atsiranda dėl srauto aptekėjimo skersinėje plokštumoje, taip pat kaip ir šoninė jėga priverčia kūną sukintis išilginėje plokštumoje. Tačiau cirkuliacija neturi įtakos sukimosi jėgai. Srauto aptekėjimas apie sparną gali būti sprendžiamas superpozicijos principu. Šoninis srautas sukelia bendrą poveikį išvirtimui, sparno profilio atakos kampui ir galinio briauno aerodinamikai, bet tai nėra tas pats, kaip aptekėjimas aplink cilindą ar apie lėktuvo sparną skridimo metu. Jutta- Joukowski teorema yra išvesta sparno profilio aerodinamikai, bet pagrindas yra susijęs su apvalaus cilindro aptekėjimu [21]. Ši teorema remiasi dviejų koordinačių ašių (plokštumos) srauto tekėjimą aplink sparno profilį ir sukelia keliamąją jėgą per

vienetinę laiko tarpą. Kai cirkuliacija  $\Gamma$  yra žinoma, sparno profilio keliamoji  $L$  (arba  $L'$ ) per laiko tarpą gali būti suskaičiuota:

$$L' = -\rho_{\infty} V_{\infty} \Gamma . \quad (26)$$

kur  $\rho_{\infty}$  - oro (skysčio) tankis;  $V_{\infty}$  -oro (skysčio) greitis prieš kūną, kur oras yra tvarkingas, nesudrumstas. Kūnas yra pritvirtintas, nejudantis. Cirkuliacija  $\Gamma$  yra aprašoma linijiniu integravimu:

$$\Gamma = \oint_C \mathbf{V} \cdot d\mathbf{s} = \oint_C V \cos \theta ds . \quad (27)$$

Aplink apie uždara kreivę  $C$  ar sparno profilį toli nuo paviršiaus ir yra teigiama (prieš laikrodžio ėjimo kryptį). Ji turi reikšmę toliau nuo paviršiaus, bet ne paviršiaus sluoksnyje. Integruojamasis narys  $V \cos \theta$  yra tam tikrame taške srauto greičio komponentas nukreipta tangentine kreive  $C$  ir  $ds$  tam tam atitinkame kreivės ilgyje  $C$ . Pirma formulė yra Kutta- Jaukowski teoremos išraiška.

Vienetinio ilgio jėga veikianti statmenai paviršiui ar skersmeniui lygi  $-\rho_{\infty} V_{\infty} \Gamma$  ir yra stamena  $V_{\infty}$ . Naudojant Kutta- Jaukowski teoremą, reikia atsargiai įvertinti cirkuliaciją  $\Gamma$ . Šiai teoremai gauti yra 2 būdai:

- Euristinis. Šis būdas grindžiamas fizikinėmis įžvalgomis;
- Formali ir techninė viename, reikalaujanti pagrindinės vektoriaus ir kompleksinės analizės.

Dėl euristinio būdo, svarstant ploną sparno profilio liniją  $c$  ir bendrą atstumą tarp sparno galų, juda masė su tankiu  $\rho$ . Tada nuožulniai keiskime sparno profilio padėtį, kurio aplinkoje yra srauto greitis. Tada iš vienos sparno pusės prie paviršiaus greitis bus  $V$ , o kitoje sparno pusėje srauto greitis bus  $V+v$ . Cirkuliacija bus aprašoma lygtimi:

$$\Gamma = Vc - (V + v)c = -vc . \quad (28)$$

Slėgio skirtumą  $\Delta P$  tarp abiejų sparno profilio pusių (viršaus ir apačios) galime gauti taikydami Bernulio lygtį:

$$\frac{\rho}{2}(V)^2 + (P + \Delta P) = \frac{\rho}{2}(V + v)^2 + P , \quad (29)$$

$$\frac{\rho}{2}(V)^2 + \Delta P = \frac{\rho}{2}(V + 2Vv + v)^2 , \quad (30)$$

$$\Delta P = \rho Vv , \quad \text{priimdami } \frac{\rho}{2}v^2 = 0 .$$

Gauname keliamąją jėgą vienetinei ilgio atkarpai:

$$L' = c\Delta P = \rho Vvc = -\rho VT . \quad (31)$$

## 7 AERODINAMINIO BANDYMO METODIKA

Šiuolaikinis aerodinaminis eksperimentas yra pravedamas dviem skirtingais būdais: važiavimo bandymų dėka arba aerodinaminiuose vamzdžiuose. Važiavimo bandymų metu yra gaunami tikslesni rezultatai, nes gali būti įvertinti pašaliniai faktoriai (pvz.: šoninis vėjas, ir t.t.). Tačiau tokie eksperimentai yra brangūs, nes klaidos, kurie buvo neįvertinti projektavimo stadijose bus sunkiai pataisomi. Todėl labiausiai paplitęs yra antras būdas, kai transporto priemonių sumažinti modeliai arba jų atskiros dalys yra bandomos aerodinaminiuose vamzdžiuose, prapučiant juos oro srautu aerodinamiame vamzdyje [23]. Taip pat vienas iš aerodinaminių bandymų gali būti skaičiavimas kompiuterinėmis programomis.

### 7.1.1 Bandymo priemonės ir įranga

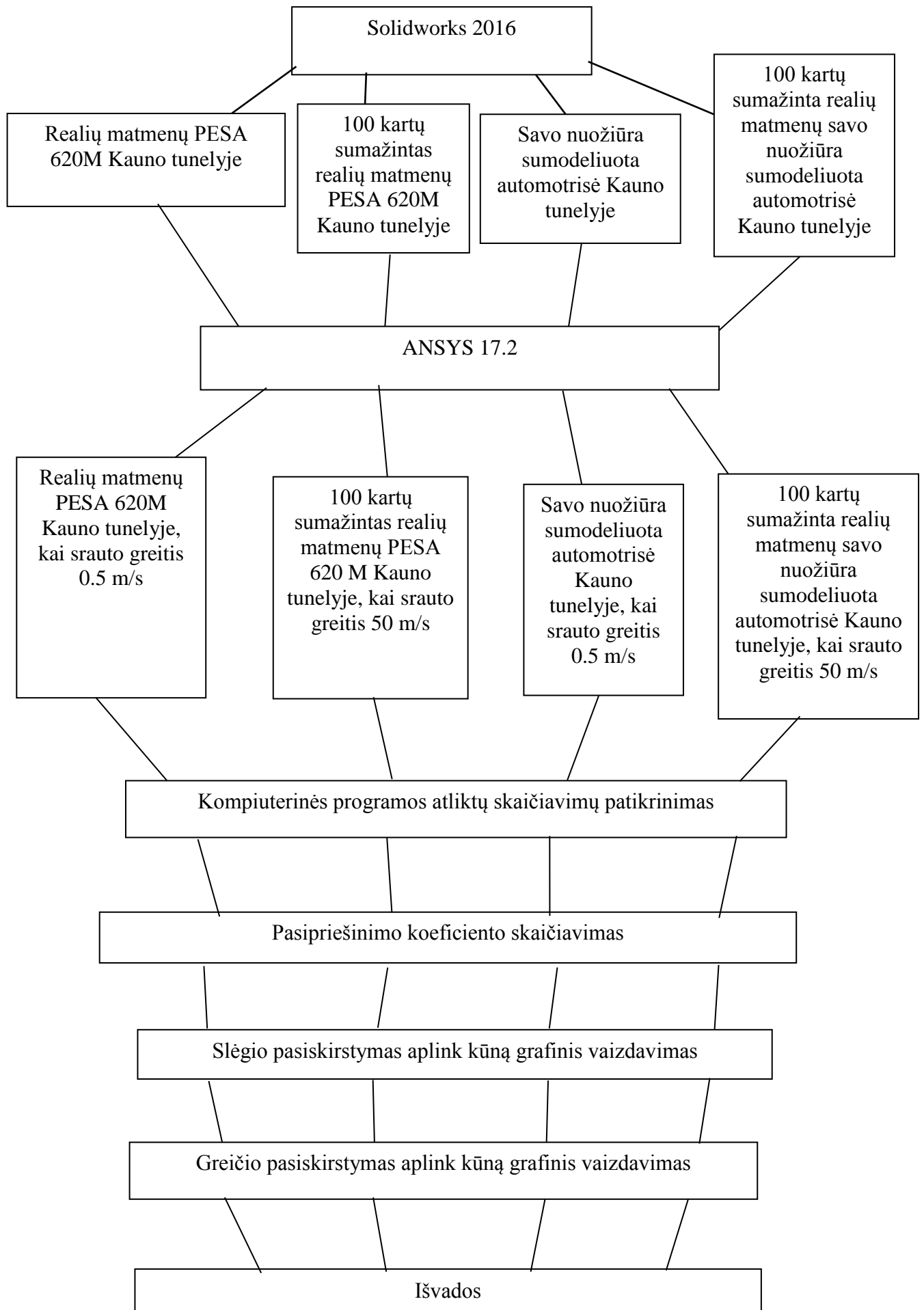
Savo darbe atlikdamas eksperimentą, aš nutariau pasinaudoti bandymu aerodinamiame vamzdyje ir skaičiavimu kompiuterine programa. Bandymas važiavimu traukiniu tunelyje reikalauja labai didelių lėšų ir reikia gauti daug leidimų bandymui.

Mano eksperimento tikslas buvo eksperimentiškai nustatyti srautų, esančių pasienio sluoksnyje kryptį, storį ir apytikslį greičio lygį. Bandymui buvo pasirinkta automotrisė PESA 620M, kuris gaminamas nuo 2008 metų iki 2011 metų, ir vienas savo nuožiūra sukurtas modelis.

PESA 620M keleivinis traukinys buvo pasirinktas todėl, kad aš šiuo važinėju kiekvieną darbo dieną, o atlikdamas bandymą su AB „Lietuvos geležinkeliai“ eksploatuojamais riedmenimis, aš neturėčiau galimybės vizualiai stebėti srautų pasiskirstymą paviršiuje.

Atlikdamas eksperimentą aš nutariau sekti traukinio formos pasikeitimo pobūdį. Tam tikslui bandinio šonuose, ant priekyje buvo priklijuoti siūleliai. Priklijuotas siūlas sraute visada bus nukreiptas išilgai srauto ir pagal siūlelio kryptį galima nustatyti srauto tekėjimo kryptį.

Bandymas buvo atliktas esant srauto greičiui 50 m/s aerodinamiame vamzdyje. Prieš tai remiantis teorinėmis žiniomis apie Reinoldso skaičių buvo atliktas skaičiavimas kompiuterine programa, kurio tikslas buvo nustatyti srauto greitį esant realaus dydžio traukiniui, laikydamas, kad tekėjimas yra turbulencinis ir 100 kartų sumažintam traukiniui. Kompiuterinės programos braižymo ir nagrinėjimo schema:



7.1.1 Kompiuterinės analizės struktūrinė schema

### 7.1.2 Modeliavimas su kompiuterine programa

Modeliuodamas su kompiuterinėmis programomis „Solidworks 2016” ir „ANSYS 17.2” visų pirma reikia nustatyti kriterijus, pagal ką bus vystomas tyrimas. Pagrindiniai kriterijai būtų šie:

- Aerodinamiame vamzdyje srauto greitis lygus 50 m/s. Išlaikant Reinoldso skaičių, realių matmenų traukinys Kauno tunelyje turės suskaičiuotą srauto greitį;
- Suprojektuotas modelis turės skirtumą su realybėje naudojama automotrise. Šių elementų atsisakyta, lyginant šių elementų dydžius su visu dydžiu;
- Aerodinamiame vamzdyje neturime galimybės sudaryti pilnos uždavinio sąlygos- sukonstruoti tunelį, nes tai yra labai sudėtinga, ir nebūtų pasiektas reikiamas greitis tunelyje.

Pasitelkdami programinę įrangą nagrinėjame dviejų tipų traukinių judėjimą Kauno tuneliu. Taipogi tyrimui bus panaudoti Kauno tunelio išmatavimai. Traukinio modelio judėjimas simuliuojamas kompiuterine programa.

### 7.1.3 Braižymas su Solidworks

Traukinio modelio braižymui pasitelksime kompiuterinę programą „Solidworks 2016”. Braižant šį modelį reikia priimti šiuos svarbius aspektus, norint, kad šis nubraižytas modelis būtų atpažintas kompiuterinėje programoje „ANSYS 17.2”. Šie kriterijai yra būtini:

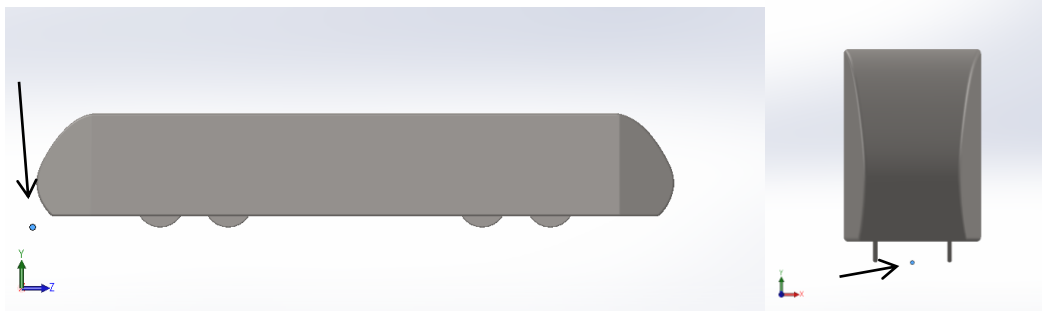
- Visas nubraižytas kūnas, turi būti pilnaviduris ir vientisas;
- Koordinačių ašis turi sutapti su ašimis, kurios bus naudojamos pasirenkant kompiuterinėje programoje „ANSYS 17.2”;
- Nubraižytas kuo paprastesnis kūnas- mažus elementus viso kūno atžvilgiu galime pašalinti.

Nubraižytas realių matmenų automotrisės PESA 620M modelis, kuris parodytas 7.1.3.1 pav., o jo techninės charakteristikos pateiktos 1 priede:



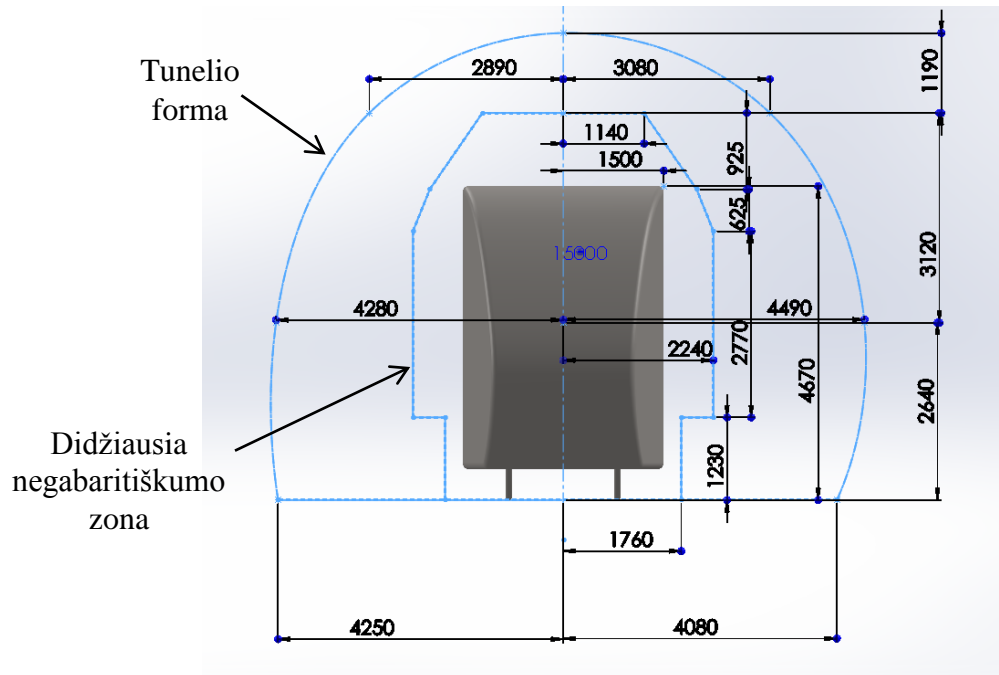
7.1.3.1 pav. Automotrisė PESA 620M

Braižant šį modelį reikia atkreipti dėmesį į koordinačių ašis, kaip pavaizduota sekančiame puslapyje pateiktame 7.1.3.2 paveikslėlyje:



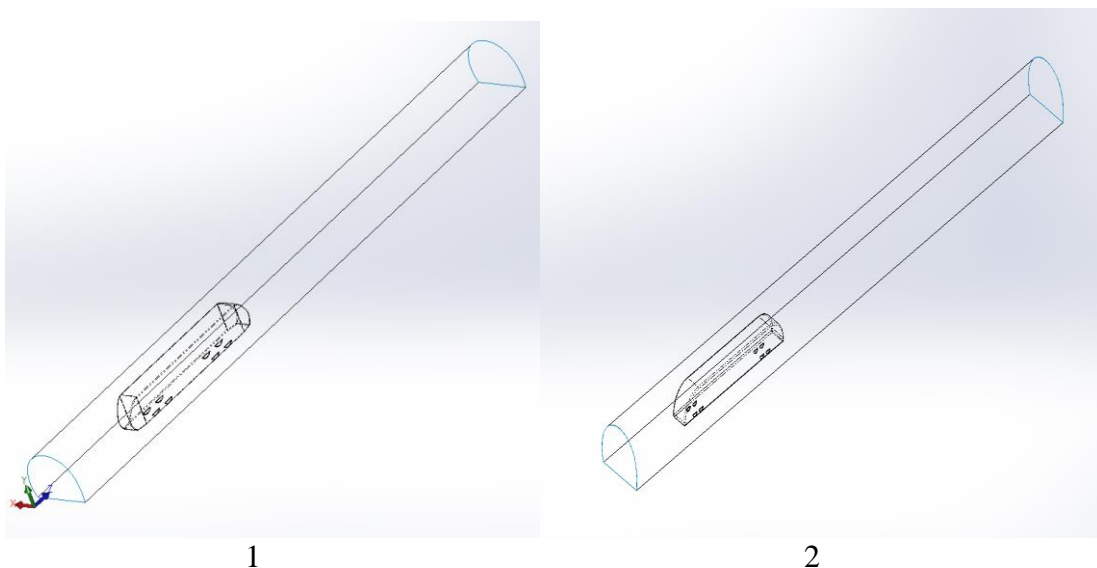
7.1.3.2 pav. Nubraižyta automotrisė ir koordinacių ašis

Taip pat nubrėžiame Kauno tunelio profilį:



7.1.3.2 pav. Kauno tunelio profilis

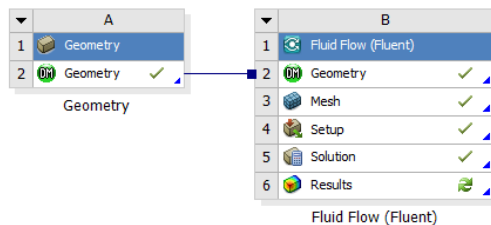
7.1.3.3 paveikslėlyje pavaizduoti du modeliai Kauno tunelyje.



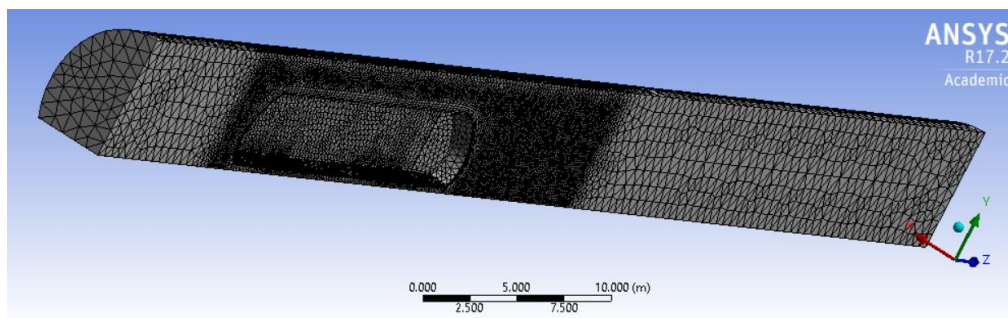
7.1.3.3 pav. PESA 620M galutinis modelis Kauno tunelyje (1) ir savo nuožiūra sumodeliuotas modelis Kauno tunelyje (2)

## 7.1.4 Uždavinio modeliavimas su ANSYS 17.2

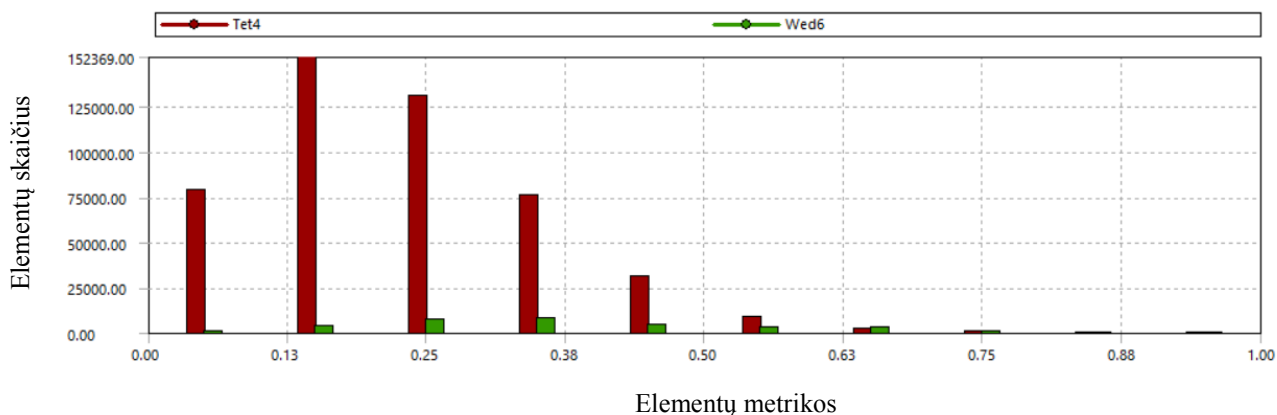
Į projekto shemos darbinį lauką įkeliame „Geometry”- čia bus redaguojamas mūsų uždavinio kūnas, greta jos- aerodinaminio uždavinio analizės sistemą „Fluid Flow (Fluent)” [24] (7.1.4.1 pav.).



7.1.4.1 Skaičiuojamojo uždavinio struktūra



7.1.4.2 pav. „Mesh” aplinkoje sumodeliuotas realių matmenų PESA 620M modelis



7.1.4.3 pav. Elementų dydžių pasiskirstymo grafikas

Bendroji Reinoldso skaičiaus formulė:

$$Re_{Pmaz} = \frac{\rho v_1 l_1}{\mu}, \quad (32)$$

čia  $\rho$  - aplinkos tankis,  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ;  $v_1$  - srauto greitis,  $\text{m/s}$ ;  $l_1$  - charakteringas ilgis,  $\text{m}$ ;  $\mu$  - dinaminis klampumo koeficientas,  $\text{kg/m} \cdot \text{s}$ .

Suskaičiuojame Reinoldso skaičių mažam kūnui:

$$Re_{Pmaz} = \frac{\rho v_1 l_1}{\mu} = \frac{1.225 \cdot 50 \cdot 0.264}{1.79 \cdot 10^{-5}} = 903351.9553 \approx 903352 \text{ vnt.}$$

Reikia išlaikyti vienodą Reinoldso skaičių, norint įvertinti tas pačias sąlygas:

$$Re_{P_{ma\check{z}}} = Re_{P_{did}} .$$

Reinoldso skaičius realių matmenų kūnui:

$$Re_{P_{did}} = \frac{\rho v_2 l_2}{\mu} .$$

čia  $v_2$  - srauto greitis, m/s;  $l_2$  - tikrų matmenų kūno charakteringas ilgis.

Iš čia išsireiškiame  $v_2$  :

$$v_2 = \frac{Re_{P_{ma\check{z}}} \cdot \mu}{\rho \cdot l_2} .$$

Suskaičiuojame realių matmenų kūno greitį Kauno tunelyje:

$$v_2 = \frac{903352 \cdot 1.79 \cdot 10^{-5}}{1.225 \cdot 26.4} = 0.5 \text{ m/s} .$$

### 7.1.5 Traukinio judėjimo tunelyje rezultatai

Analizuojame visų 4 sumodeliuotų uždavinių rezultatus, gautus kompiuterine programa. Sumodeliuoti modeliai yra šie:

- Realių matmenų PESA 620M Kauno tunelyje, kai srauto greitis 0.50 m/s;
- 100 kartų sumažintas realių matmenų PESA 620M Kauno tunelyje, kai srauto greitis 50 m/s;
- Savo nuožiūra sumodeliuotas realių matmenų modelis Kauno tunelyje, kai srauto greitis 0.5 m/s;
- 100 kartų sumažintas savo nuožiūra sumodeliuotas realių matmenų modelis Kauno tunelyje, kai srauto greitis 50 m/s.

Pirmiausia patikriname ar kompiuterinė programa suskaičiavo teisingai. Tai patikriname pagal šią formulę ir turi būti tenkinama sąlyga:

$$\Delta v = v_1 - v_2 \approx 0 , \quad (33)$$

čia  $v_1$  - oro masės srauto greitis tunelio pradžioje;  $v_2$  - oro masės srauto greitis tunelio pabaigoje.

Pateikę užklausą kompiuterinei programai, gauname rezultatus kiekvienu atveju, pateiktus paveikslėliuose.

2 lentelė

Oro masės srauto greičio reikšmės

| Nr.                  | 1              | 2           | 3              | 4             |
|----------------------|----------------|-------------|----------------|---------------|
| Pavadinimas          |                |             |                |               |
| Išėjimo slėgis, kg/s | -16.276438     | -0.16264158 | -15.612908     | -0.15686581   |
| Įėjimo greitis, kg/s | 16.276436      | 0.16264158  | 15.612906      | 0.15686585    |
| Skirtumas, kg/s      | -1.9073486e-06 | 0           | -1.9073486e-06 | 4.4703483e-08 |



čia 1- Realių matmenų PESA 620M Kauno tunelyje, kai srauto greitis 0.5 m/s; 2- 100 kartų sumažintas realių matmenų PESA 620M Kauno tunelyje, kai srauto greitis 50 m/s; 3- Savo nuožiūra sumodeliuotas realių matmenų modelis Kauno tunelyje, kai srauto greitis 0.5 m/s; 4- 100 kartų sumažintas savo nuožiūra sumodeliuotas realių matmenų modelis Kauno tunelyje, kai srauto greitis 50 m/s.

Iš visų uždavinių rezultatų matome, kad didžiausias skirtumas yra  $-1.9074686e-06$  kg/s, o mažiausias skirtumas- 0. Galime daryti išvadą, kad keikvienu uždavinio atveju sąlyga yra tenkinama, tai yra, kad tunelio pradžioje ir tunelio pabaigoje oro masės srauto greičio skirtumas yra apylygus nuliui. Toliau suskaičiuojame pasipriešinimo koeficientą pagal formulę 34 formulę:

$$D = C_D \frac{\rho v^2}{2} S \quad , \quad (34)$$

čia  $D$  - pasipriešinimo jėga, N;  $C_D$  - pasipriešinimo koeficientas;  $\rho$  - aplinkos tankis,  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ;  $v$  - srauto greitis, m/s;  $S$  - skerspjūvio plotas,  $\text{m}^2$ .

Pasipriešinimo jėgos reikšmę kiekvienam atvejui pasirenkame iš kompiuterinės programos gautų rezultatų, kurie surašyti lentelėje.

3 lentelė

Pasipriešinimo jėgos ir koeficientų reikšmės

| Nr.                         | 1          | 2          | 3          | 4          |
|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Pavadinimas                 |            |            |            |            |
| Pasipriešinimas, N          |            |            |            |            |
| Slėgio pasipriešinimas      | 0.40291941 | 0.40994015 | 0.58535355 | 0.57941628 |
| Klampos pasipriešinimas     | 0.18475184 | 0.18277064 | 0.16267483 | 0.15969033 |
| Suminis pasipriešinimas     | 0.58767125 | 0.59271079 | 0.74802838 | 0.73910721 |
| Pasipriešinimo koeficientas |            |            |            |            |
| Slėgio pasipriešinimas      | 0.41332697 | 0.41961737 | 0.62921407 | 0.62497993 |
| Klampos pasipriešinimas     | 0.18952405 | 0.1870852  | 0.17486405 | 0.17224857 |
| Suminis pasipriešinimas     | 0.60285102 | 0.60670257 | 0.80407811 | 0.7972285  |

čia 1- Realių matmenų PESA 620M Kauno tunelyje, kai srauto greitis 0.5 m/s; 2- 100 kartų sumažintas realių matmenų PESA 620M Kauno tunelyje, kai srauto greitis 50 m/s; 3- Savo nuožiūra

sumodeliuotas realių matmenų modelis Kauno tunelyje, kai srauto greitis 0.5 m/s; 4- 100 kartų sumažintas savo nuožiūra sumodeliuotas realių matmenų modelis Kauno tunelyje, kai srauto greitis 50 m/s.

Iš 34 formulės išsireiškiame pasipriešinimo koeficientą ir suskaičiuojame realių matmenų PESA 620M Kauno tunelyje, kai srauto greitis 0.5 m/s,  $C_{D1}$ :

$$C_{D1} = \frac{2 \cdot D_1}{\rho \cdot v_1^2 \cdot S_1} = \frac{2 \cdot 0.587}{1.225 \cdot 0.5^2 \cdot 6.366} = 0.602 \text{ .}$$

Kompiuterinės programos suskaičiuotas pasipriešinimo koeficientas lygus 0.602. Rezultatas vienodas. Suskaičiuojame 100 kartų sumažinto realių matmenų PESA 620M Kauno tunelyje, kai srauto greitis 50 m/s, pasipriešinimo koeficientą:

$$C_{D2} = \frac{2 \cdot D_2}{\rho \cdot v_2^2 \cdot S_2} = \frac{2 \cdot 0.592}{1.225 \cdot 50^2 \cdot 0.000636} = 0.607 \text{ .}$$

Kompiuterinės programos suskaičiuotas pasipriešinimo lygus 0.606, o pagal formulę- 0.607. Galime teigti kad rezultatai vienodi.

Suskaičiuojame savo nuožiūra sumodeliuoto realių matmenų modelio Kauno tunelyje, kai srauto greitis 0.5 m/s,  $C_{D3}$ :

$$C_{D3} = \frac{2 \cdot D_3}{\rho \cdot v_3^2 \cdot S_3} = \frac{2 \cdot 0.748}{1.225 \cdot 0.5^2 \cdot 6.075} = 0.804 \text{ .}$$

Kompiuterinės programos suskaičiuotas pasipriešinimo lygus 0.804, o pagal formulę- 0.804. Išvada- rezultatai vienodi.

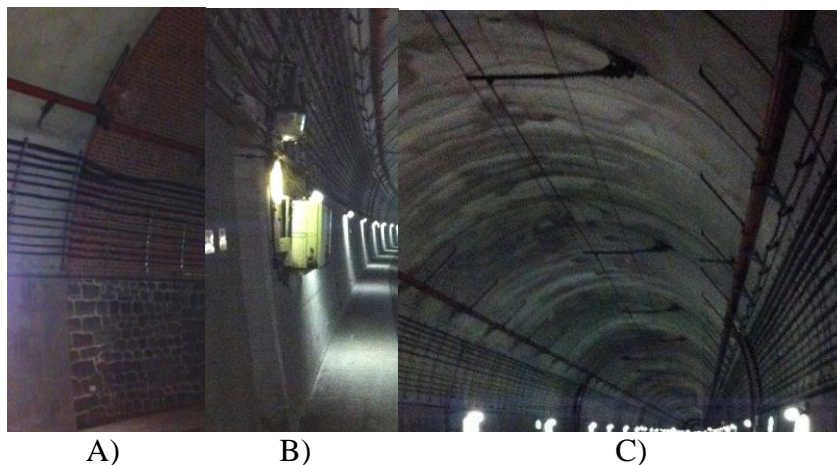
Suskaičiuojame 100 kartų sumažinto savo nuožiūra sumodeliuoto realių matmenų modelio Kauno tunelyje, kai srauto greitis 50 m/s, pasipriešinimo koeficientą;

$$C_{D4} = \frac{2 \cdot D_4}{\rho \cdot v_4^2 \cdot S_4} = \frac{2 \cdot 0.739}{1.225 \cdot 50^2 \cdot 0.000606} = 0.796 \text{ .}$$

Kompiuterinės programos suskaičiuotas pasipriešinimo lygus 0.797, o pagal formulę- 0.796. Išvada- rezultatai vienodi. Reinoldso skaičius įvertintas teisingai. Suskaičiuokime, keliais procentais padidėjo pasipriešinimas, lyginant realių matmenų automotrisės Kauno tunelyje:

$$\begin{aligned} &1 - 0.602 \\ &x - 0.804 \\ &x = \frac{0.804 \cdot 1}{0.602} = 1.33 \end{aligned}$$

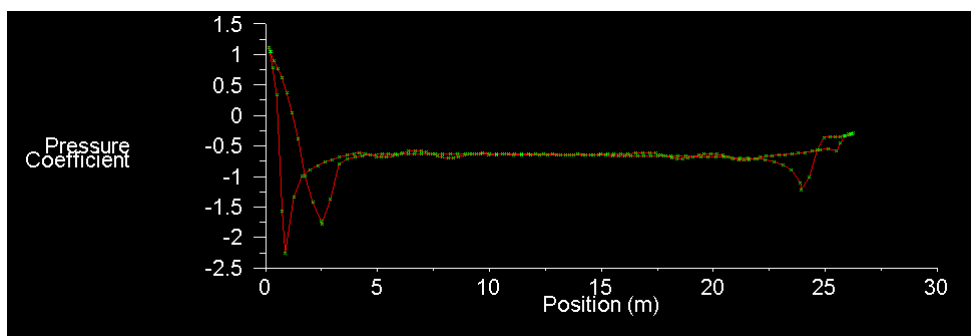
Kaip matome, lyginant savo nuožiūra sumodeliuotą modelį su PESA 620M, pirmojo pasipriešinimo jėga padidėjo 33%. Išvada- PESA 620M pasižymi geresnėmis aerodinaminėmis savybėmis.



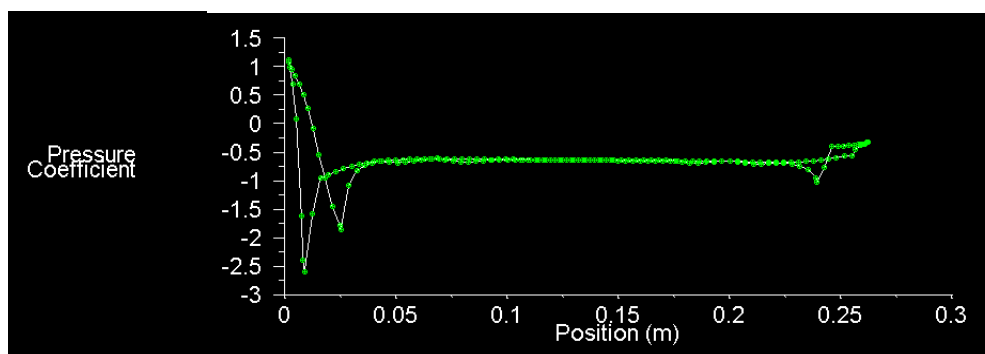
7.1.5.1 pav. Kauno tunelyje esantys išsikišimai: A- tunelio praplatėjimas; B- elektros saugikliai; C- elektros laidų laikikliai

Iš 7.1.5.28 paveikslėlio matome, kad Kauno tunelyje yra daug nepageidaujamų išsikišimų, kurių mes neįtraukėm į nagrinėjimą, ir jie labai įtakoja bendrajam pasipriešinimui. Todėl bendras pasipriešinimas bus didesnis už suskaičiuotą pasipriešinimą nagrinėjamosiomis sąlygomis. Netolimoje ateityje planuojama didinti traukinių greitį tuneliu, todėl šiuos išsikišimus reikės pašalinti, paslėpti tunelio konstrukcijoje.

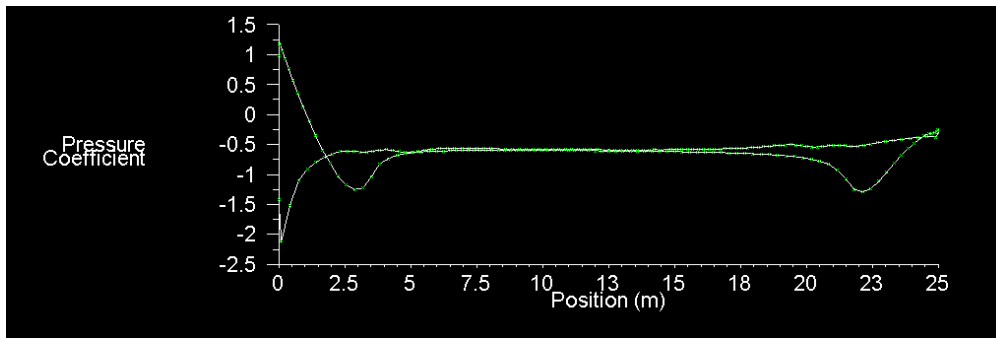
Toliau analizuosime slėgio (slėgis yra bedimensinis slėgio koeficientas [2]) pasiskirstymo grafikus.



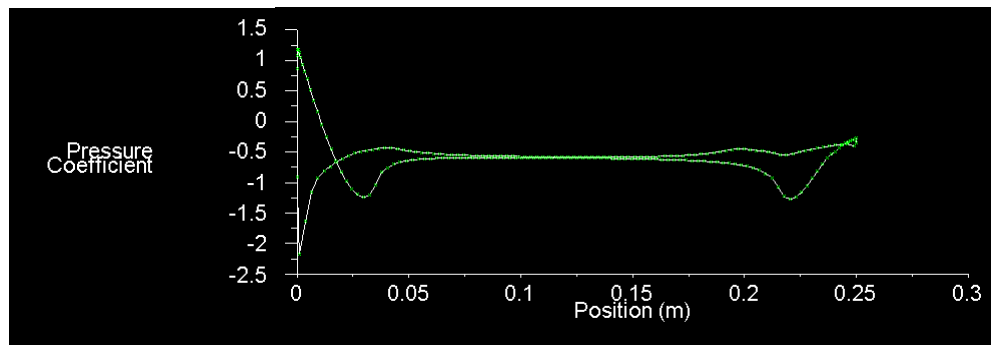
7.1.5.2 pav. Realių matmenų PESA 620M Kauno tunelyje, kai srauto greitis 0.5 m/s, slėgio koeficiento grafikas



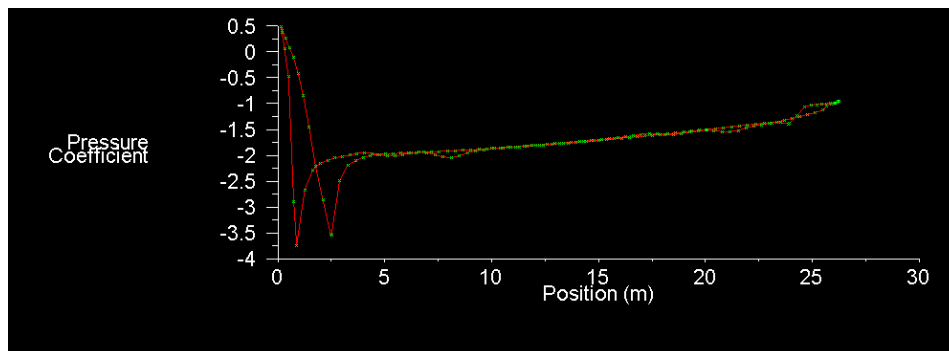
7.1.5.3 pav. 100 kartų sumažinto realių matmenų PESA 620M Kauno tunelyje, kai srauto greitis 50 m/s, slėgio koeficiento grafikas



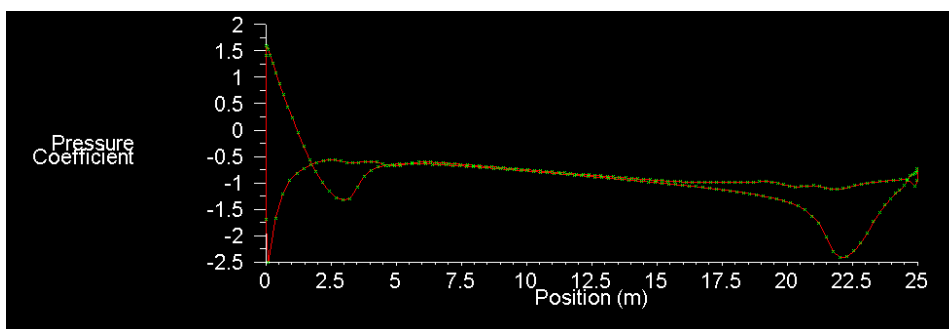
7.1.5.4 pav. Savo nuožiūra sumodeliuoto realių matmenų modelio Kauno tunelyje, kai srauto greitis 0.5 m/s, slėgio koeficiento grafikas



7.1.5.5 pav. 100 kartų sumažinto savo nuožiūra sumodeliuoto realių matmenų modelio Kauno tunelyje, kai srauto greitis 50 m/s, slėgio koeficiento grafikas



7.1.5.6 pav. Realių matmenų PESA 620M Kauno tunelio kreivėje, kai srauto greitis 0.5 m/s, slėgio koeficiento grafikas

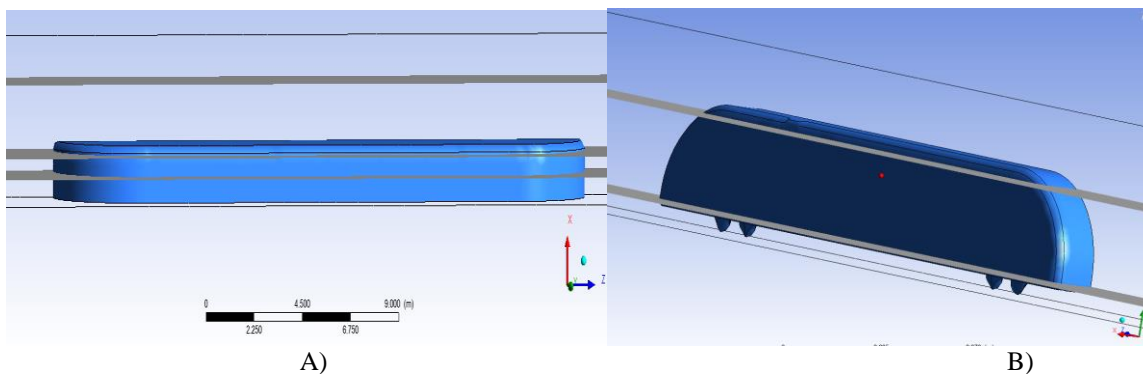


7.1.5.7 pav. Savo nuožiūra sumodeliuoto realių matmenų modelio Kauno tunelio kreivėje, kai srauto greitis 0.5 m/s, slėgio koeficiento grafikas

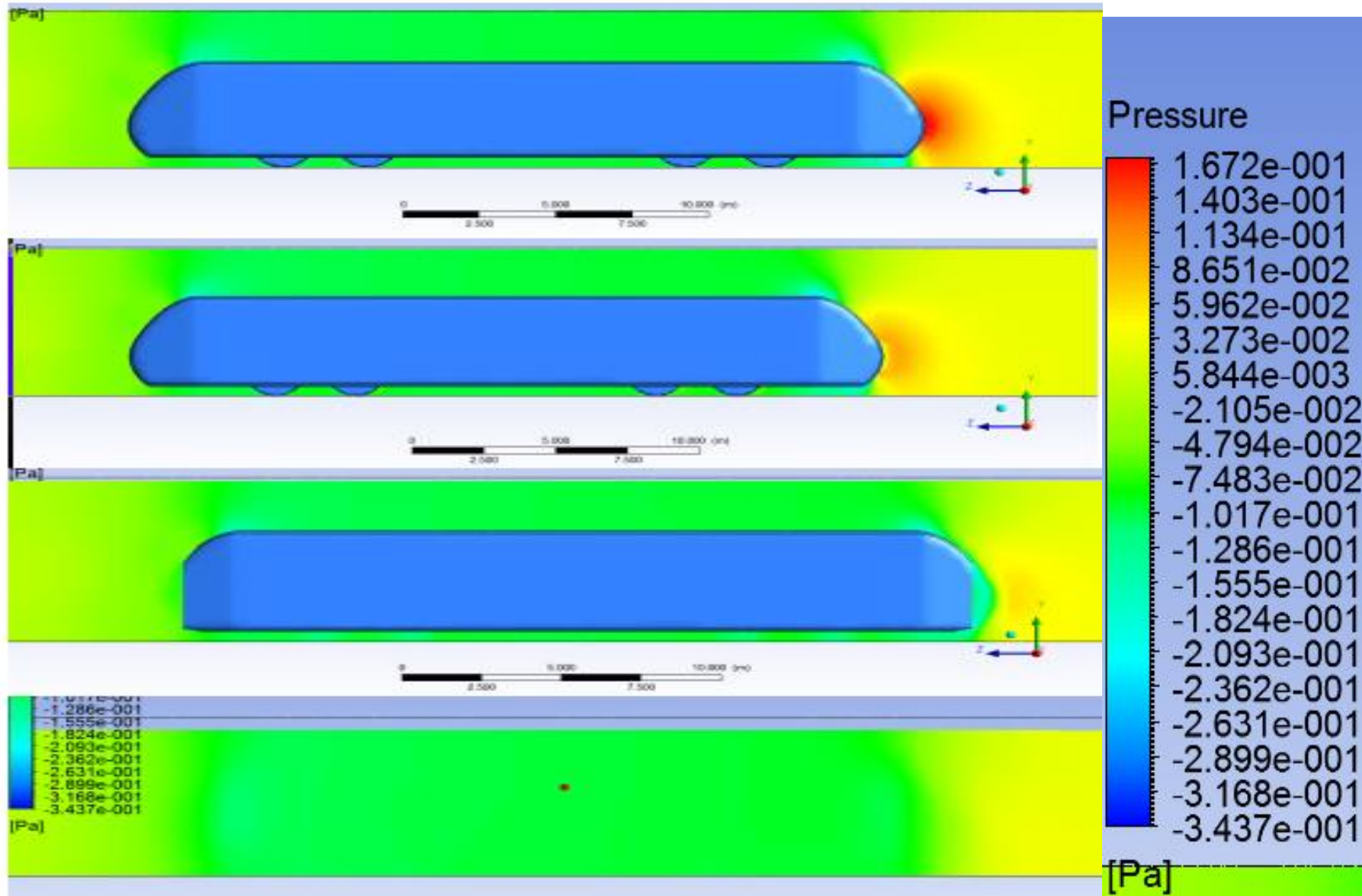
Iš paveikslėlių matome, kad kai PESA 620M ir savo nuožiūra sumodeliuoto modelio išilginės ašys sutampa su tunelio ašimi, pasipriešinimo koeficiento reikšmė 1 yra sąstato pradžioje, nes šioje vietoje oro srautas atsimuša į sąstato priekinę dalį, vyksta srauto sustabdymas. Čia pat sparčiai

padidėja srauto greitis ir vėliau tekėdamas palei traukinio paviršių pasipriešinimo koeficiento reikšmė nusistovi neigiamu 0.5 pasipriešinimo koeficientu abiejose pusėse. Sąstato pabaigoje tai pat yra pasipriešinimo koeficiento pakitimas, bet šioje dalyje srautas yra nesustabdomas. Analizuojant traukinio judėjimą tunelyje esančiame kreivėje, grafikas pakinta- pasipriešinimo koeficiento reikšmė tai kyla arba leidžiasi artėjant link sąstato galo- greitis tai sumažėja arba padidėja.

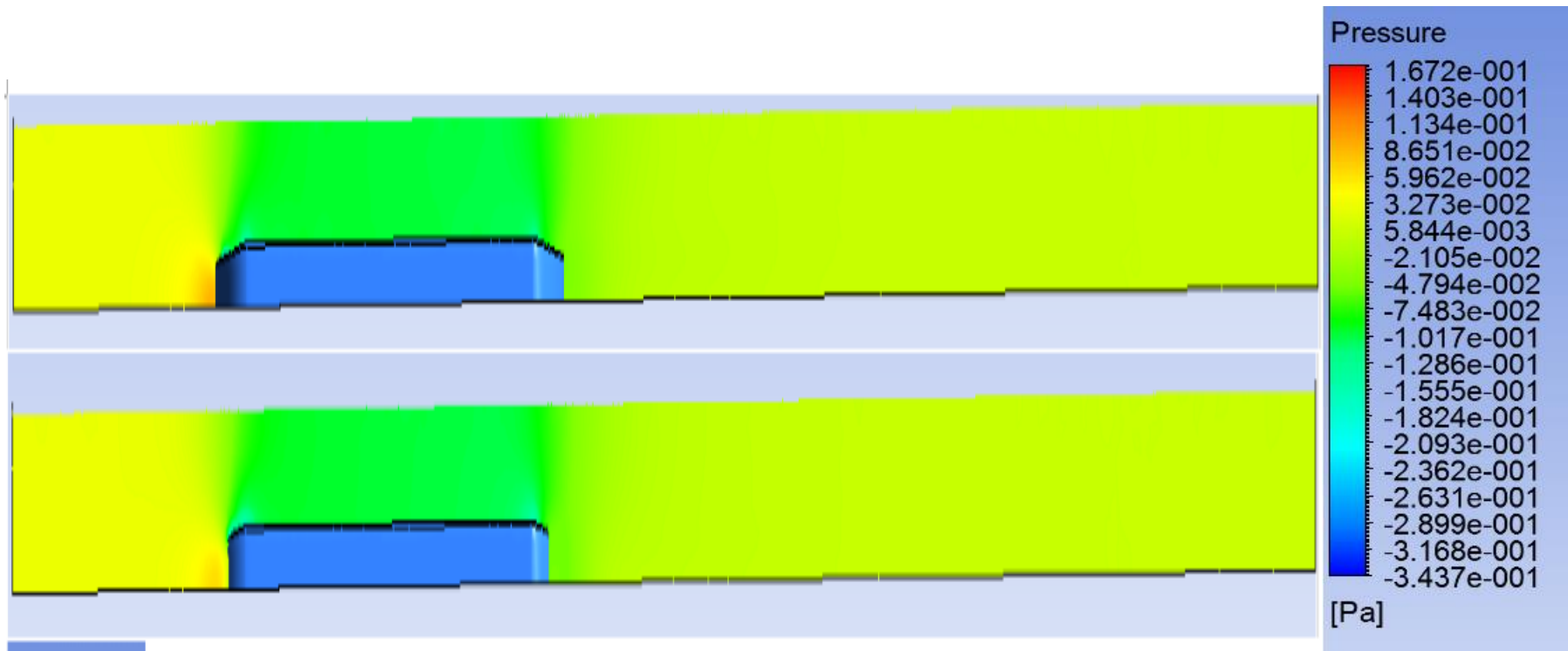
Toliau vaizduojame grafinius kompiuterinės analizės rezultatus. Analizuojame slėgio ir greičio pasiskirstymą tunelyje keturiose horizontaliose ir dviejose vertikaliose plokštumose. Plokštumų vietas parodytos 7.1.5.7 paveikslėlyje.



7.1.5.8 pav. Grafinio vaizdavimo vietos: A- vertikalios plokštumos; B- horizontalios plokštumos.

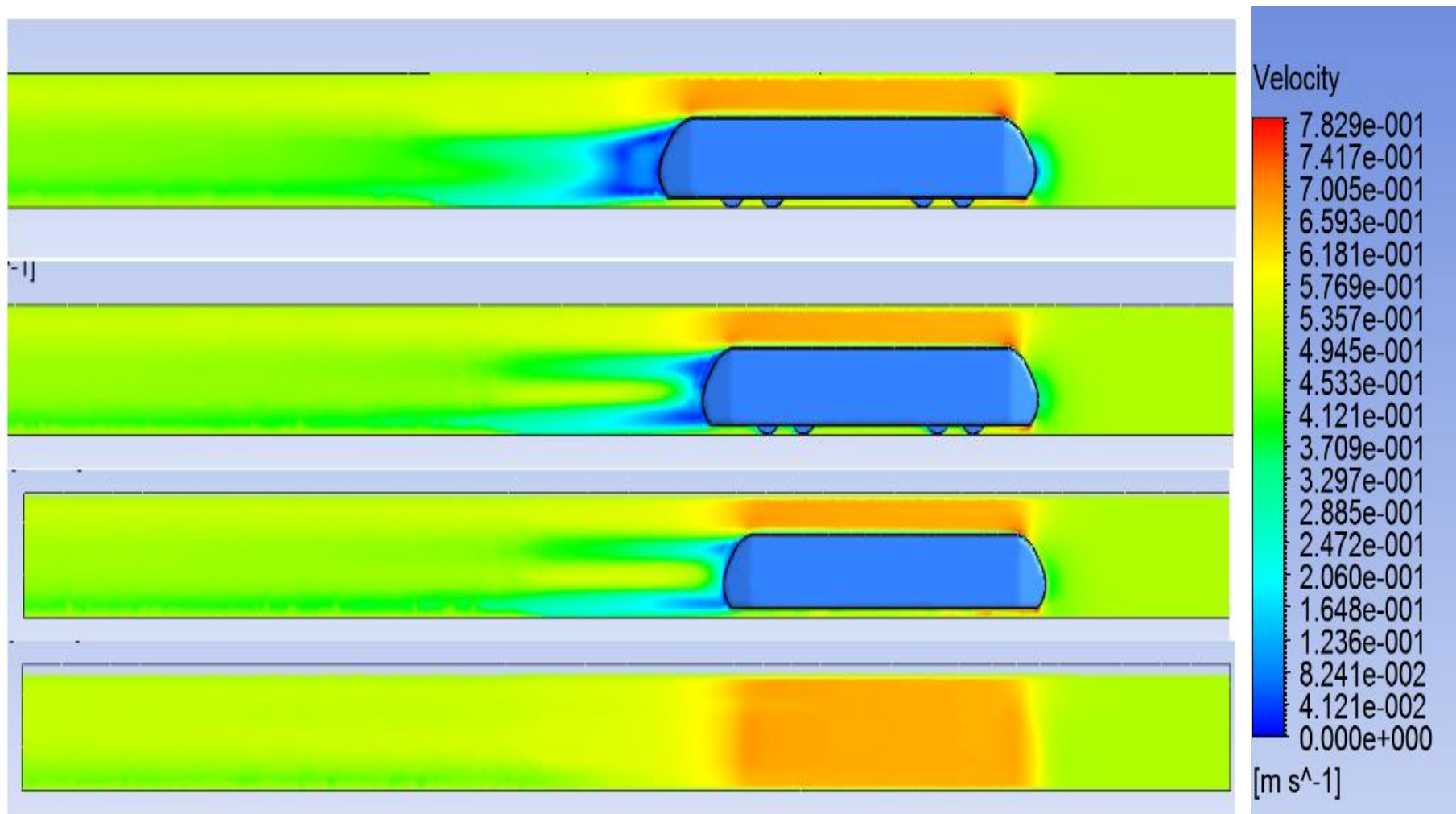


7.1.5.9 pav. Realių matmenų PESA 620M Kauno tunelyje, kai srauto greitis 0.5 m/s, slėgio pasiskirstymo vertikaliose plokštumose vaizdavimas



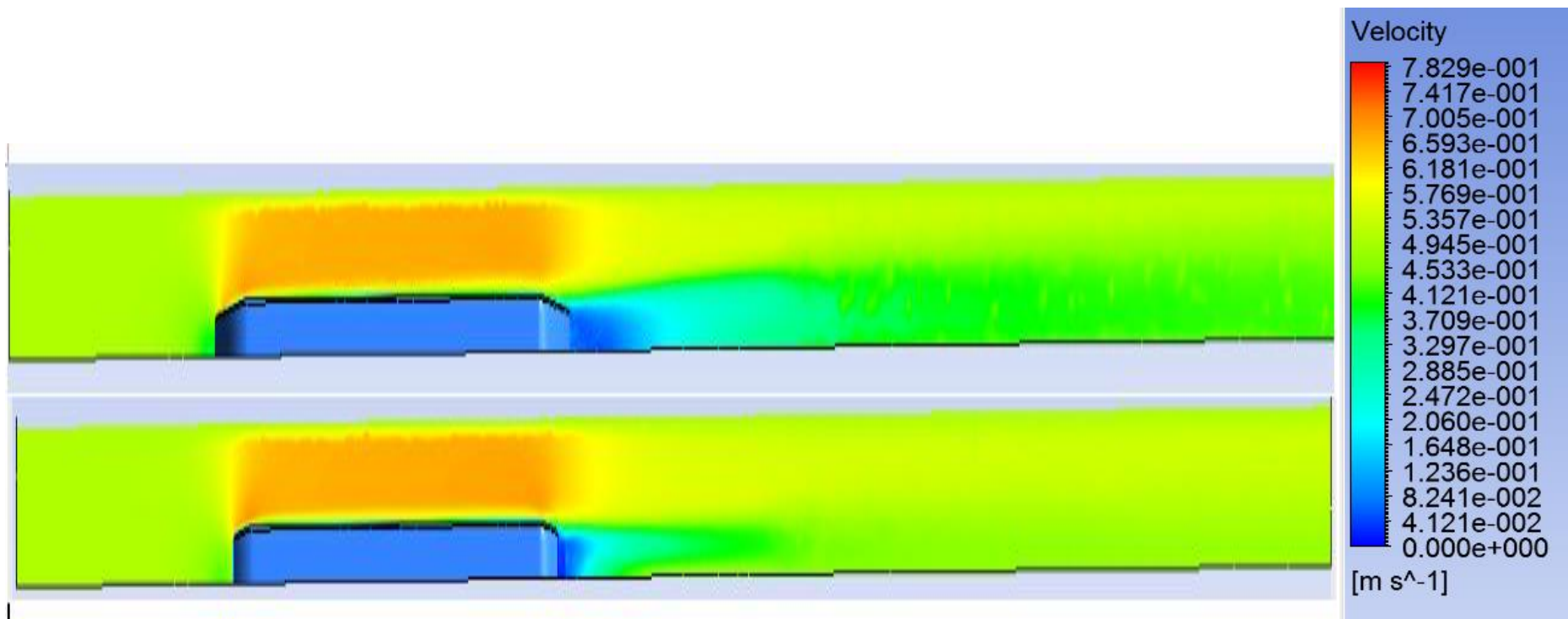
7.1.5.10 pav. Realių matmenų PESA 620M Kauno tunelyje, kai srauto greitis 0.5 m/s, slėgio pasiskirstymo horizontaliose plokštumose vaizdavimas



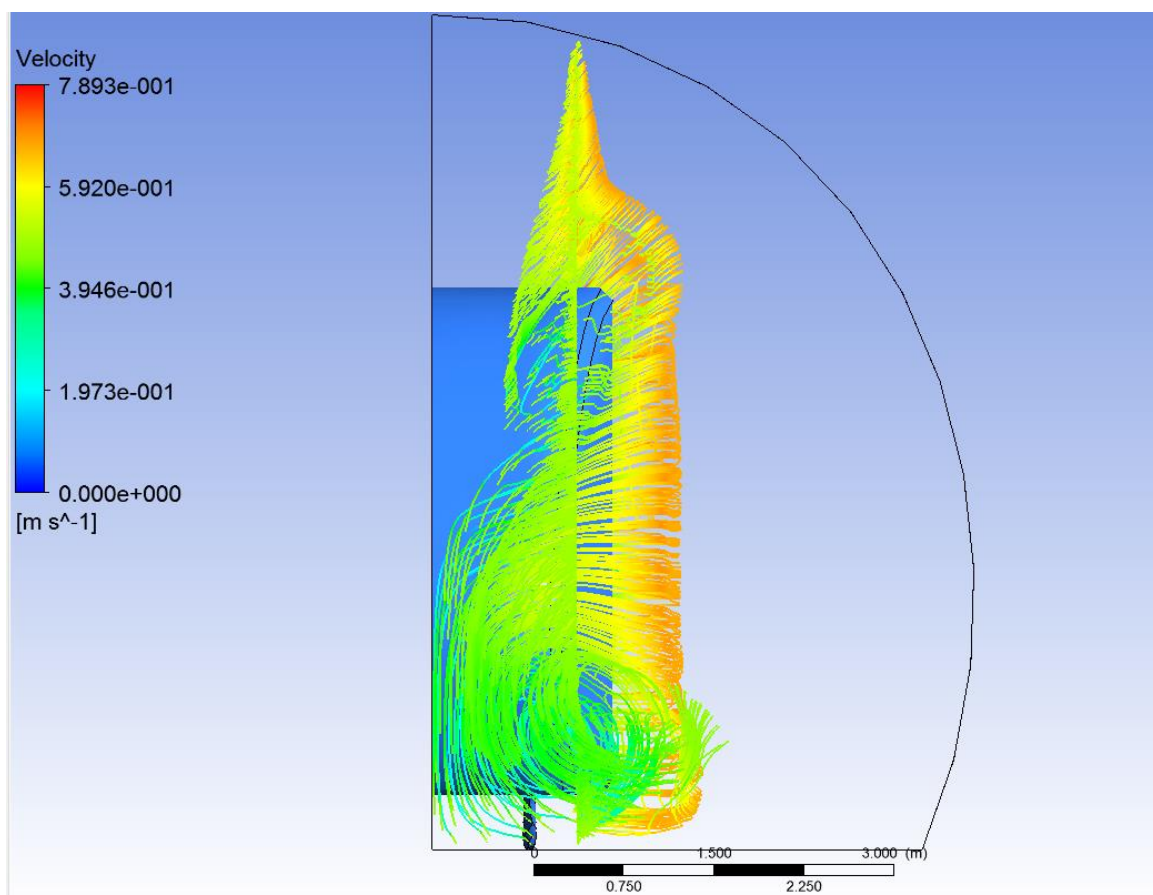


7.1.5.11 pav. Realių matmenų PESA 620M Kauno tunelyje, kai srauto greitis 0.5 m/s, oro srauto greičio pasiskirstymo vertikaliose polokštumose vaizdavimas

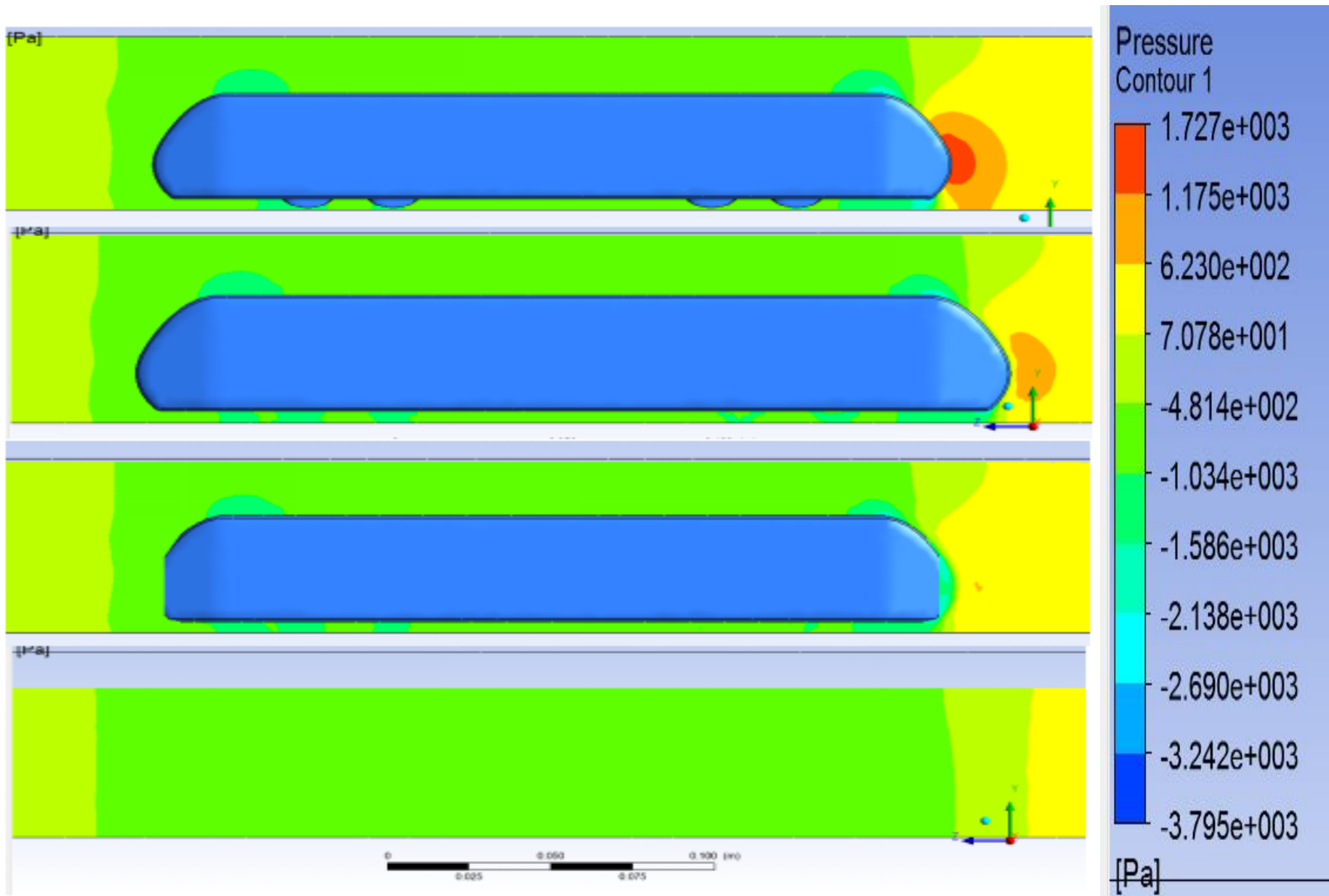




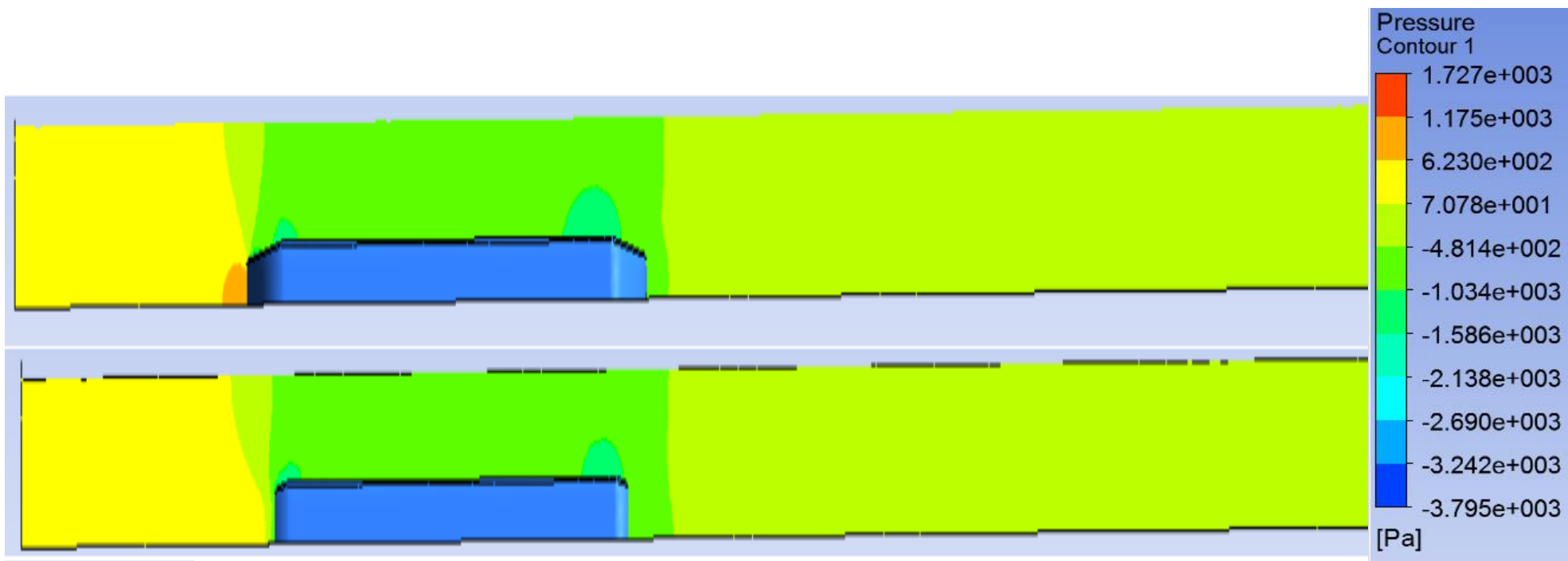
7.1.5.12 pav. Realių matmenų PESA 620M Kauno tunelyje, kai srauto greitis 0.5 m/s, srauto greičio pasiskirstymo horizontaliose plokštumose vaizdavimas



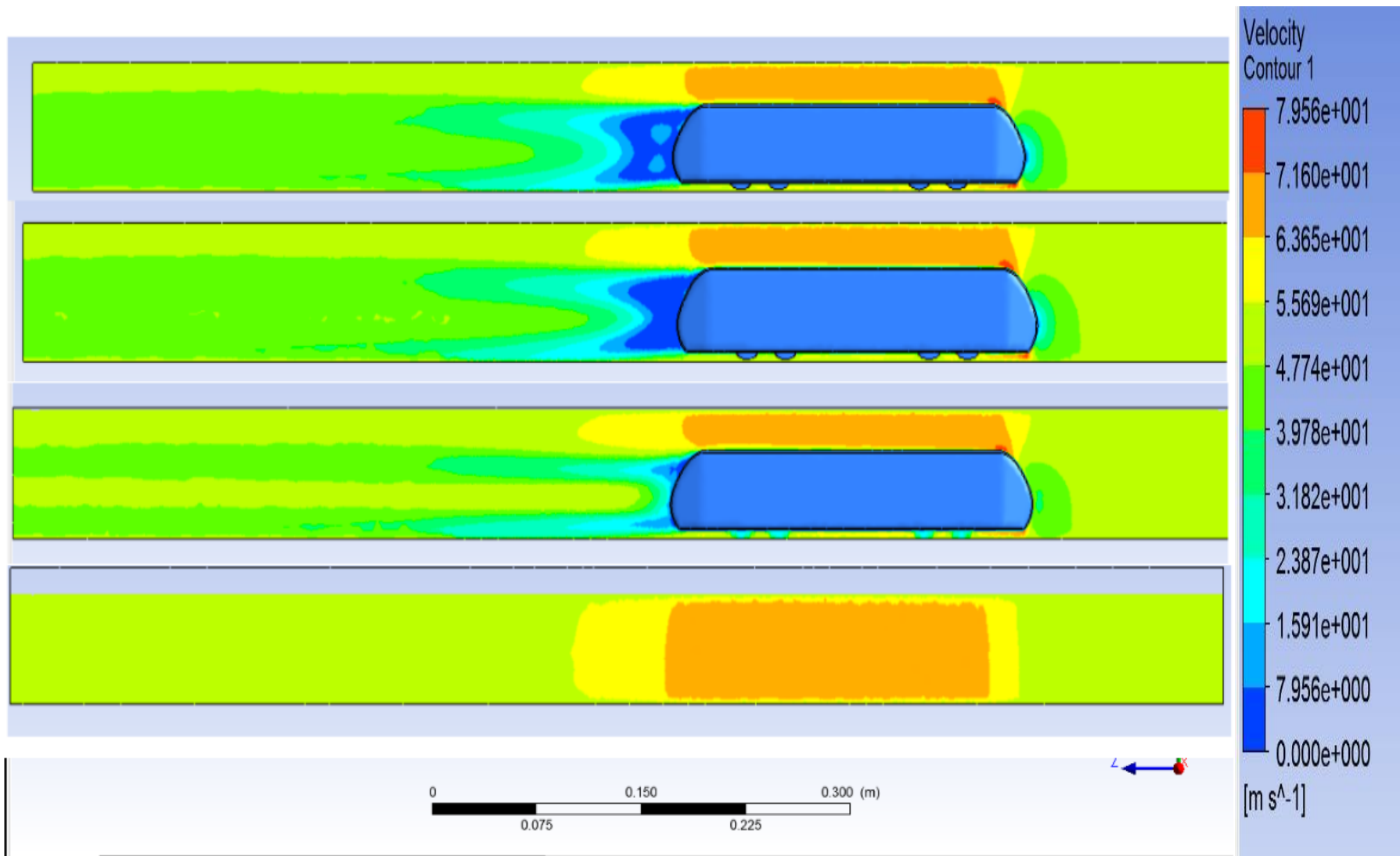
7.1.5.13 pav. Realių matmenų PESA 620M Kauno tunelyje, kai srauto greitis 0.5 m/s, oro srauto sukurių vaizdavimas



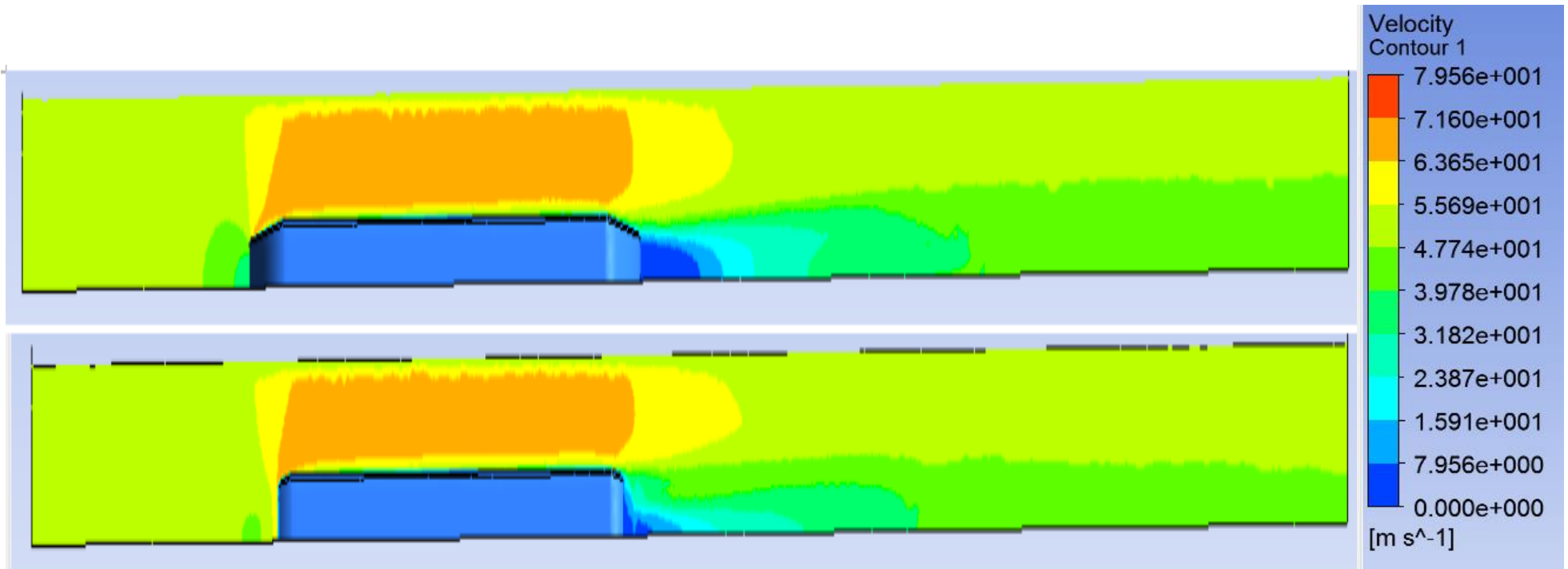
7.1.5.14 pav. 100 kartų sumažinto realių matmenų PESA 620M Kauno tunelyje, kai srauto greitis 50 m/s, slėgio pasiskirstymo vertikaliuose plokštumose vaizdavimas



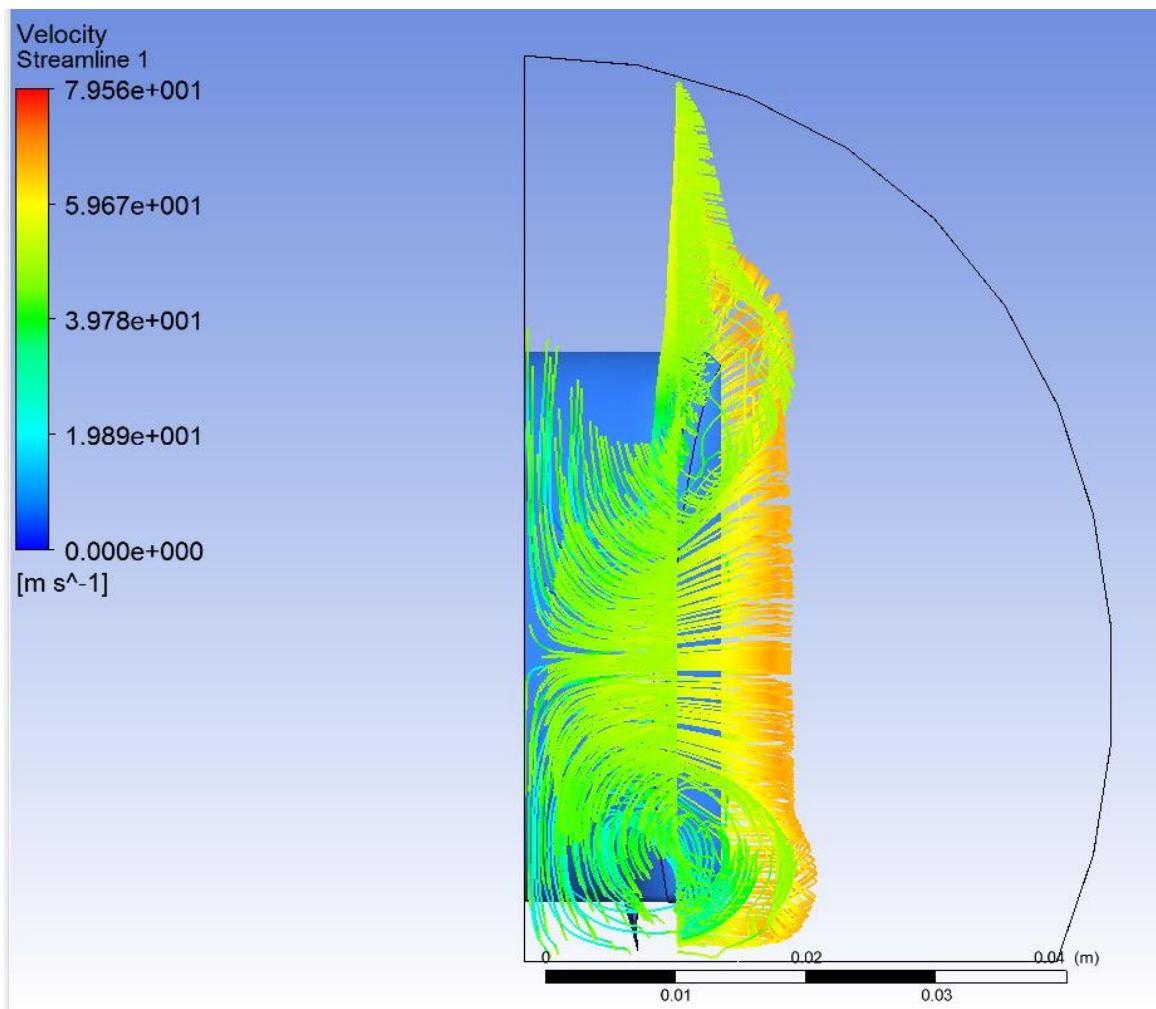
7.1.5.15 pav. 100 kartų sumažinto realių matmenų PESA 620M Kauno tunelyje, kai srauto greitis 50 m/s, slėgio pasiskirstymo horizontaliose plokštumose vaizdavimas



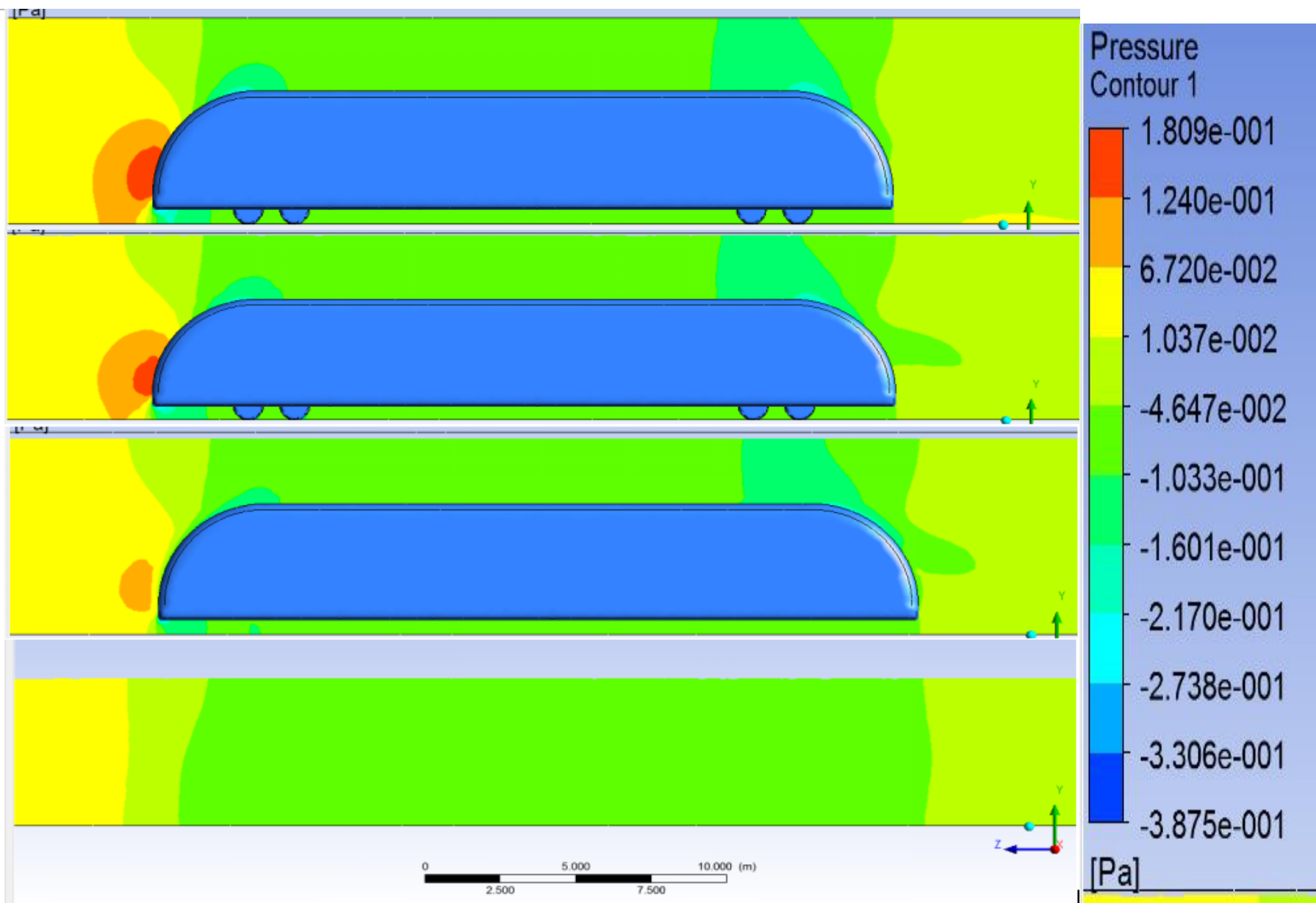
7.1.5.16 pav. 100 kartų sumažinto realių matmenų PESA 620M Kauno tunelyje, kai srauto greitis 50 m/s, greičio pasiskirstymo vertikaliose plokštumose vaizdavimas



7.1.5.17 pav. 100 kartų sumažinto realių matmenų PESA 620M Kauno tunelyje, kai srauto greitis 50 m/s, greičio pasiskirstymo horizontaliose plokštumose vaizdavimas

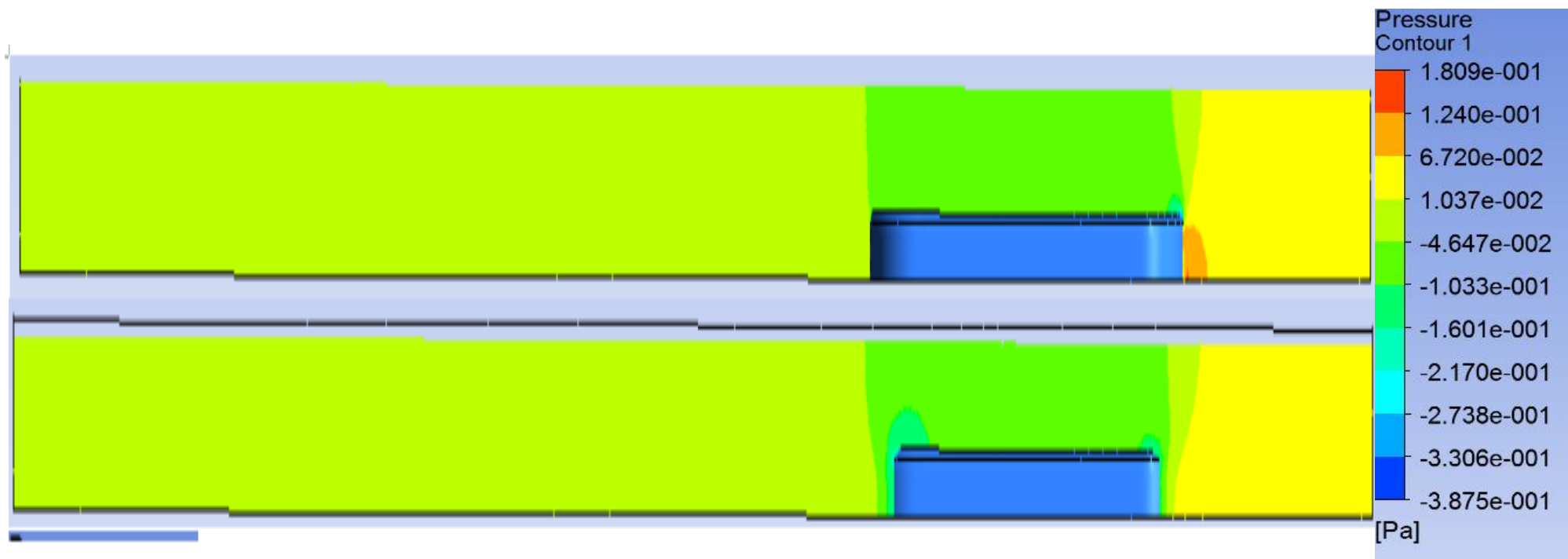


7.1.5.18 pav. 100 kartų sumažinto realių matmenų PESA 620M Kauno tunelyje, kai srauto greitis 50 m/s, oro srauto sūkurių vaizdavimas

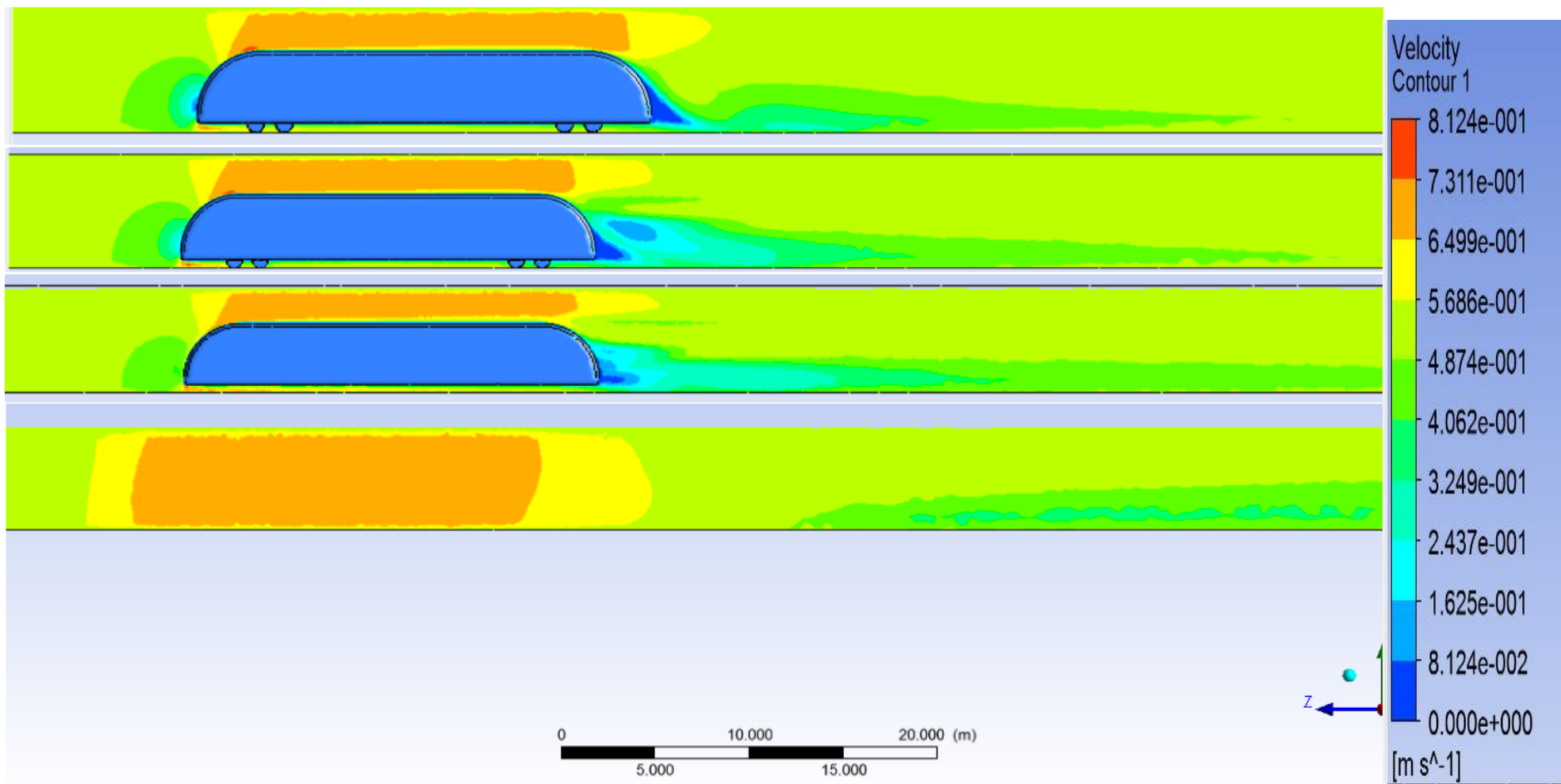


7.1.5.19 pav. Savo nuožiūra sumodeliuoto realių matmenų modelio Kauno tunelyje, kai srauto greitis 0.5 m/s, slėgio pasiskirstymo vertkaliaiose plokštumose vaizdavimas

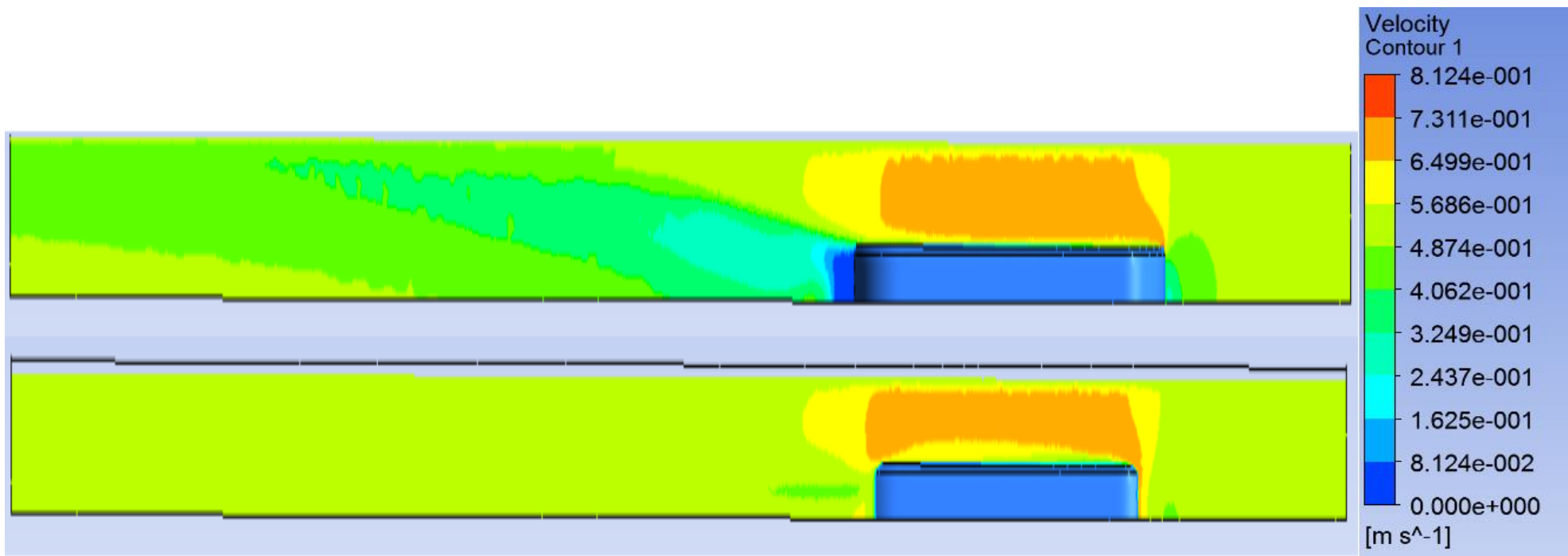




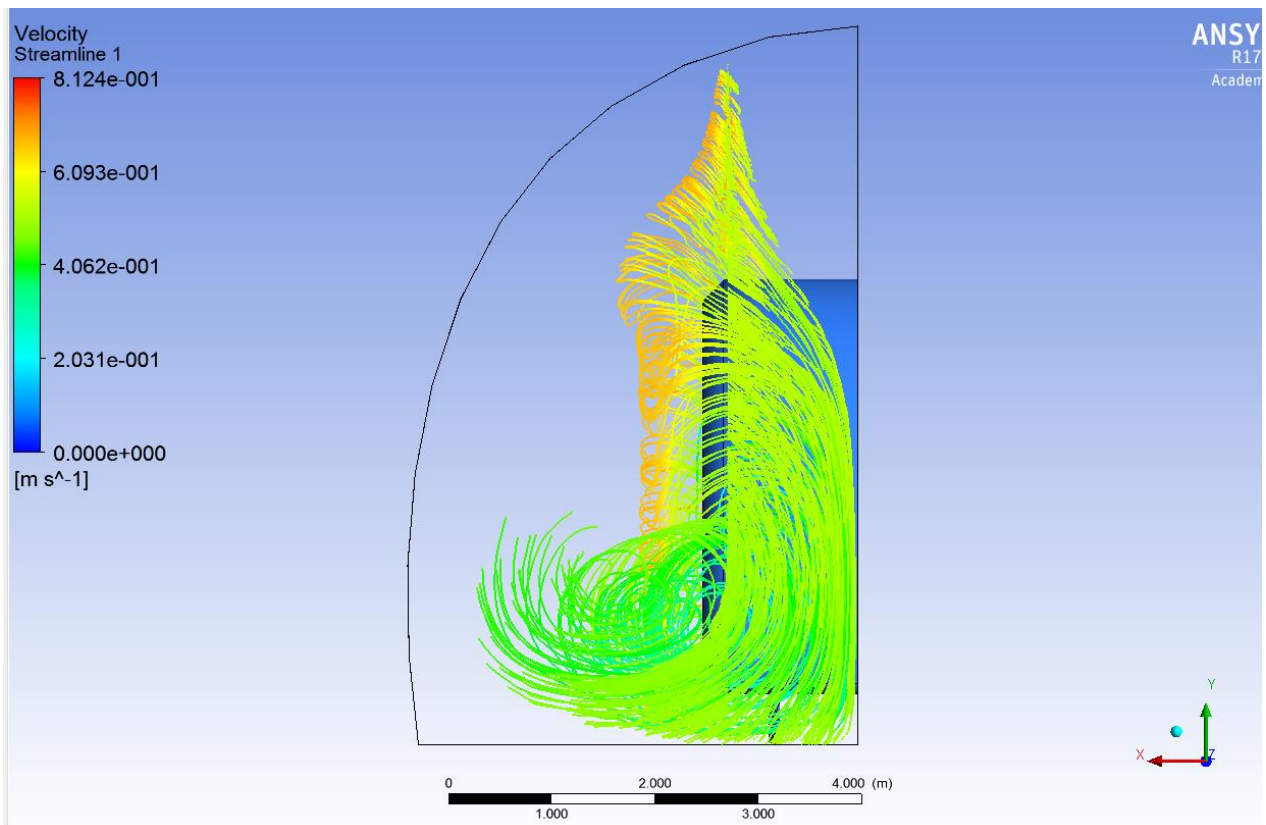
7.1.5.20 pav. Savo nuožiūra sumodeliuoto realių matmenų modelio Kauno tunelyje, kai srauto greitis 0.5 m/s, slėgio pasiskirstymo horizontaliose plokštumose vaizdavimas



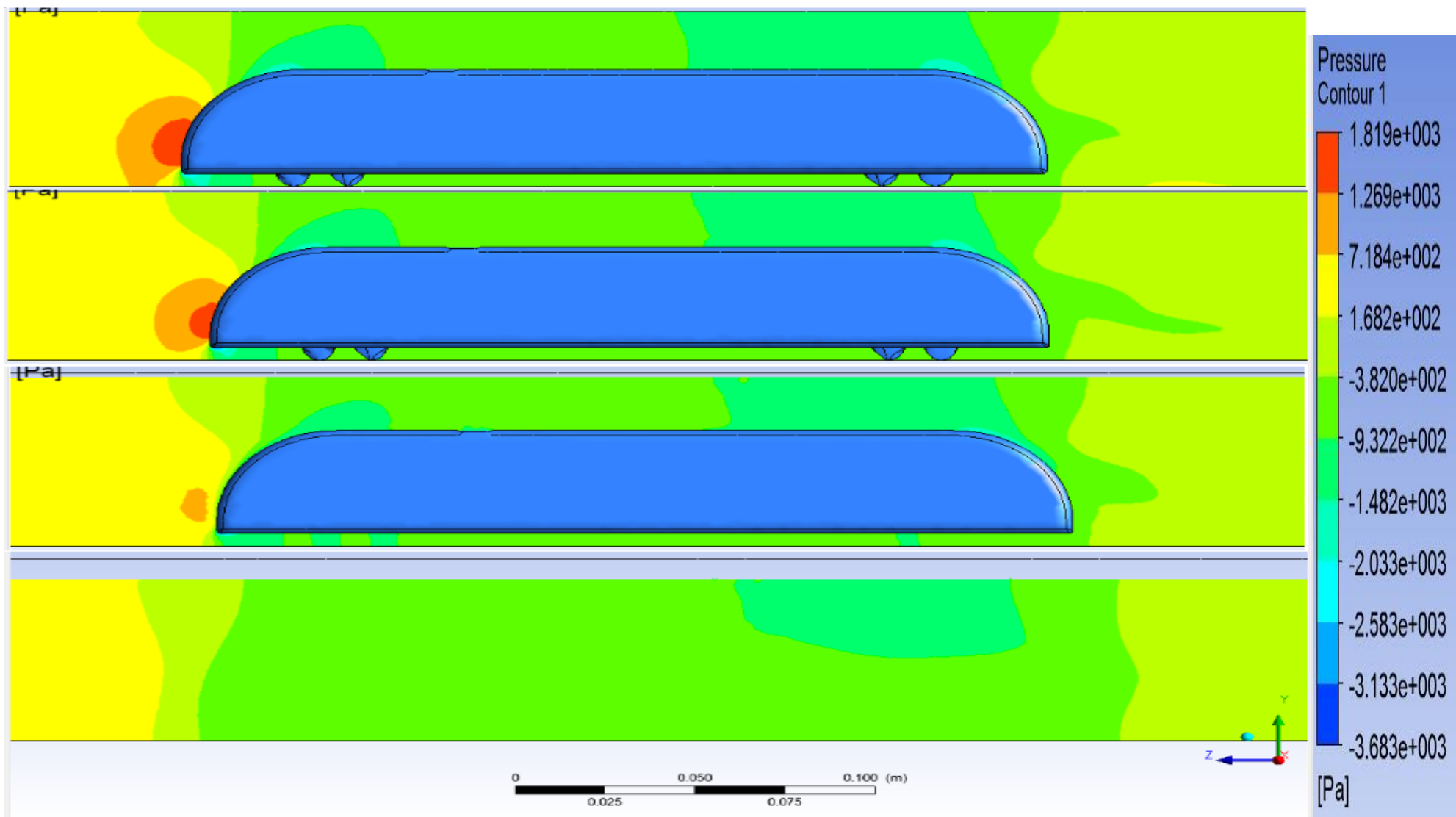
7.1.5.21 pav. Savo nuožiūra sumodeliuoto realių matmenų modelio Kauno tunelyje, kai srauto greitis 0.5 m/s, greičio pasiskirstymo vertkaliaiose plokštumose vaizdavimas



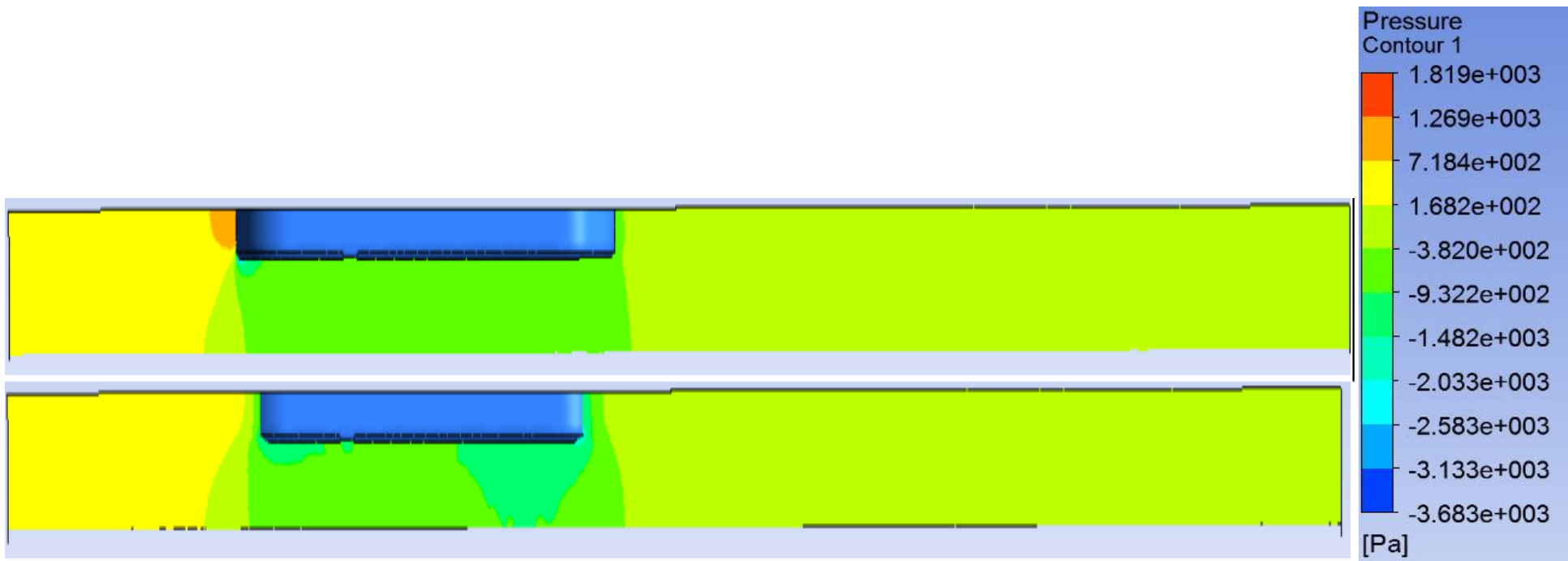
7.1.5.22 pav. Savo nuožiūra sumodeliuoto realių matmenų modelio Kauno tunelyje, kai srauto greitis 0.5 m/s, greičio pasiskirstymo horizontaliose plokštumose vaizdavimas



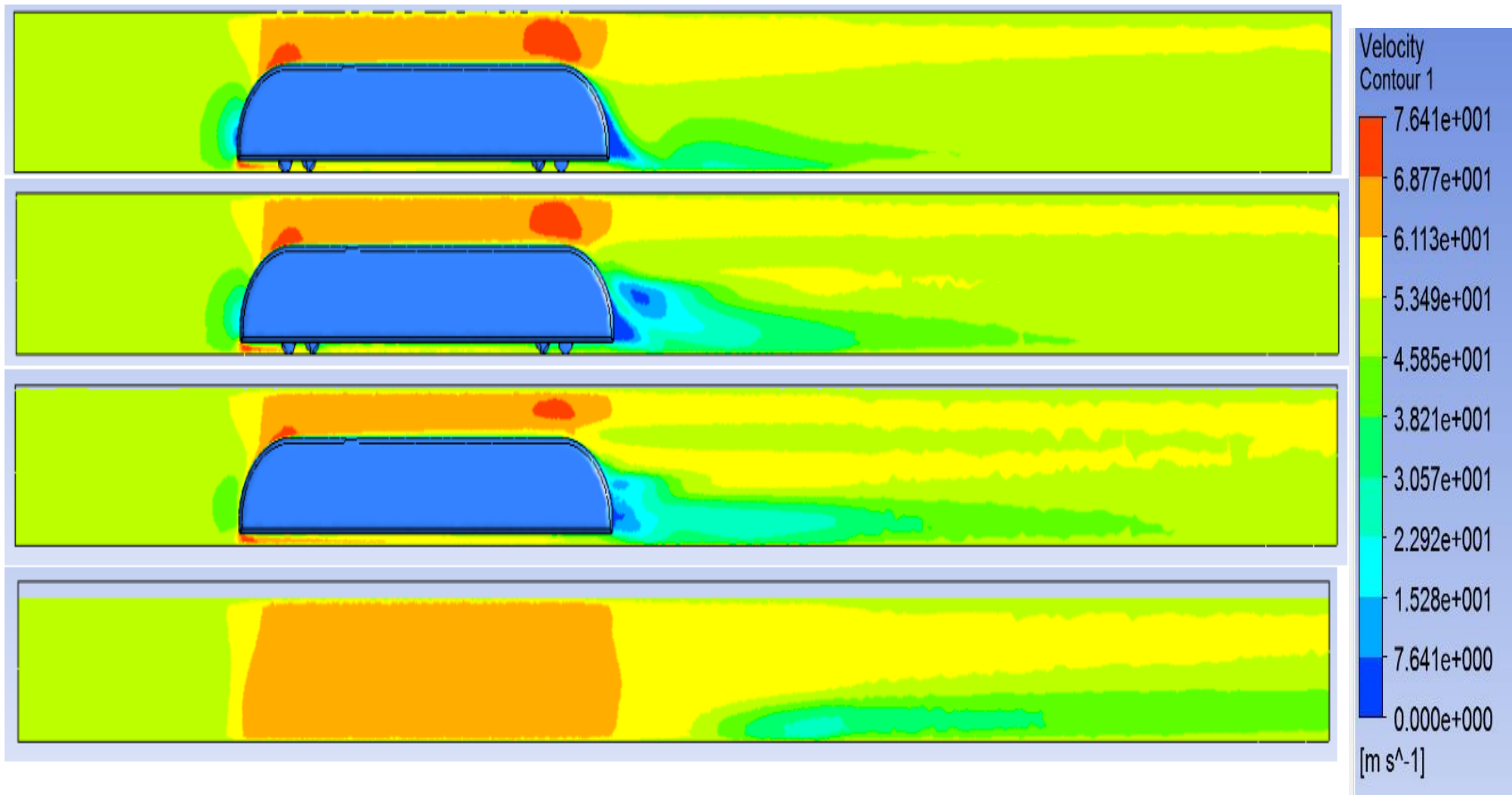
7.1.5.23 pav. Savo nuožiūra sumodeliuoto realių matmenų modelio Kauno tunelyje, kai srauto greitis 0.5 m/s, oro srauto linijų vaizdavimas



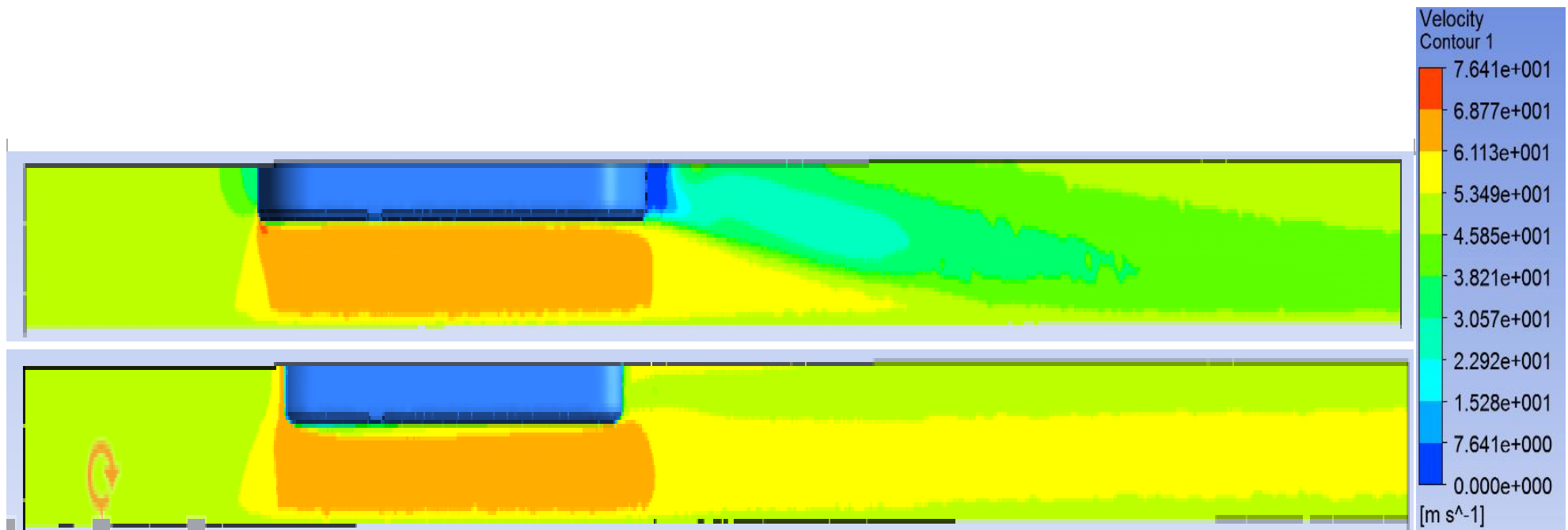
7.1.5.24 pav. 100 kartų sumažinto savo nuožiūra sumodeliuoto realių matmenų modelio Kauno tunelyje, kai srauto greitis 50 m/s, slėgio pasiskirstymo vertikaliose plokštumose vaizdavimas



7.1.5.25 pav. 100 kartų sumažinto savo nuožiūra sumodeliuoto realių matmenų modelio Kauno tunelyje, kai srauto greitis 50 m/s, slėgio pasiskirstymo horizontaliose plokštumose vaizdavimas

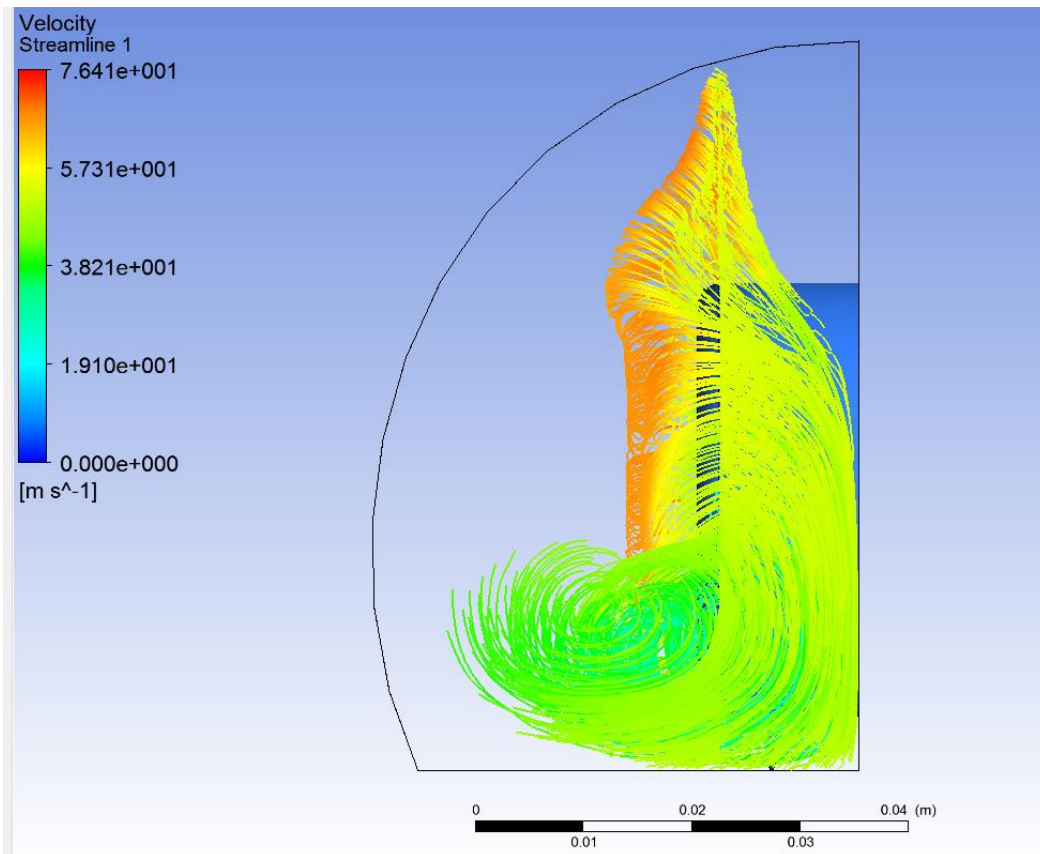


7.1.5.26 pav. 100 kartų sumažinto savo nuožiūra sumodeliuoto realių matmenų modelio Kauno tunelyje, kai srauto greitis 50 m/s, greičio pasiskirstymo vertikaliose plokštumose vaizdavimas



7.1.5.27 pav. 100 kartų sumažinto savo nuožiūra sumodeliuoto realių matmenų modelio Kauno tunelyje, kai srauto greitis 50 m/s, greičio pasiskirstymo horizontaliosealiose plokštumose vaizdavimas





7.1.5.28 pav. 100 kartų sumažinto savo nuožiūra sumodeliuoto realių matmenų modelio Kauno tunelyje, kai srauto greitis 50 m/s, oro srauto linijų vaizdavimas

Gautas didžiausias greičio ir slėgio reikšmes surašome į 4 lentelę.

4 lentelė

Didžiausio greičio ir slėgių rezultatai

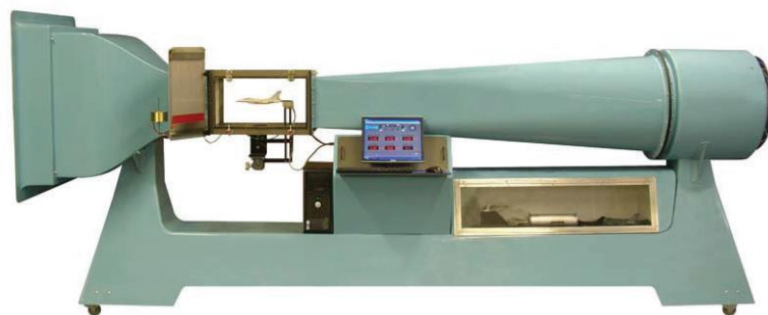
| Nr.   | 1       | 2     | 3       | 4     |
|---|---------|-------|---------|-------|
| Pavadinimas                                   |         |       |         |       |
| Didžiausias greitis<br>$v_{max}$ , m/s        | 0.7829  | 79.56 | 0.8124  | 76.41 |
| Didžiausias teigiamas slėgis $p_{max}$ , Pa   | 0.1672  | 1727  | 0.1809  | 1819  |
| Mažiausias neigiamas slėgis<br>$p_{min}$ , Pa | -0.3437 | -3795 | -0.3875 | -3683 |

čia 1- Realių matmenų PESA 620M Kauno tunelyje, kai srauto greitis 0.5 m/s; 2- 100 kartų sumažintas realių matmenų PESA 620M Kauno tunelyje, kai srauto greitis 50 m/s; 3- Savo nuožiūra sumodeliuotas realių matmenų modelis Kauno tunelyje, kai srauto greitis 0.5 m/s; 4- 100 kartų sumažintas savo nuožiūra sumodeliuotas realių matmenų modelis Kauno tunelyje, kai srauto greitis 50 m/s.

Išanalizavę visus aerodinamikos oro srauto dėsnius, rezultatus, kiekvienu atveju sąstato gale atsiranda sūkuriai, kurie sukasi tam tikra kryptimi. PESA 620M sąstato gale sūkuriai skiriasi į dvi dalis, ir vienas sukurs suaksi palei laikrodžio rodyklę, kitas prieš laikrodžio rodyklę. Savo nuožiūra sumodeliuoto modelio sukurs yra vienas ir sukasi palei laikrodžio rodyklę. Nagrinėjant realaus ir sumažinto modelio oro srauto aptekėjimo greitį matome, jog oro srauto greitis yra 62 % didesnis už aplinkos oro srauto greitį- jis lygus 81 m/s. Didžiausias greitis yra tuose taškuose, kur yra sąstato priekis. Sąstato priekyje vyksta greičiausi oro srauto aptekėjimai. Kai oro srautas atsimuša į traukinį-oro srauto laminarinis tekėjimas virsta į turbulencinį. Pasipriešinimą didina mažas atstumas tarp tunelio ir traukinio išorinių sienų- sutankėjęs oras. Taip pat įtakoja oro srauto savybės- klampa. Slėgis kinta pagal savo dėsnius. Didžiausias sutankėjimas yra tose zonose, kur oro srautas atsimuša į traukinį, čia yra srauto grūstis. Nagrinėjant sąstatą kreivėje, aerodinaminis pasipriešinimas padidėja 33 %. Norint sumažinti aerodinaminį pasipriešinimą tunelyje, pirmiausia reikia atsižvelgti į tunelio geometriją ir įvažiuojamąją dalį. Pirmiausia reikia pašalinti visus išsikišimus tunelyje. Lyginant 1 su 2 ir 3 su 4 užduotimi, didžiausi greičiai yra apytiksliai lygūs. Palyginus didžiausius slėgius, reikšmės panašios- Reinoldso skaičius išlaikytas.

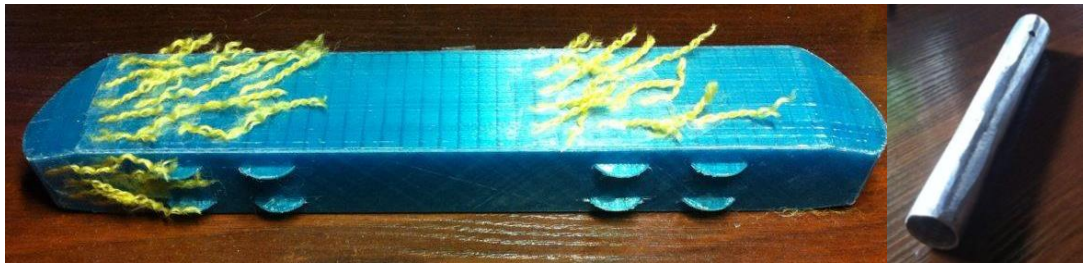
#### 7.1.6 Bandymas vėjo tunelyje

Praktinį darbą turėjome atlikti AEROLAB mokomajame aerodinamiame vamzdyje (7.1.6.1 pav. ), tačiau dėl techninių problemų, bandymo atlikti nepavyko. Aerodinaminio vamzdžio techniniai duomenys pateikti 5 priede.



7.1.6.1 Pav. AEROLAB aerodinaminis vamzdis

Prieš pagaminant 100 kartų sumažintą realių matmenų PESA 620M, pirmiausia reikia ištekinti įdėklą, kuris yra įstatomas į viduje esantį 0.02 m spindulio įleidžiamąją skylę. Bandinį apklijuojame siūlais, kad galėtume ištirti oro srauto aptekėjimą. Tai pateikta 7.1.6.2 pav.



A)  
7.1.6.2 pav. 3D PESA 620M modelis (A) ir įdėklas (B)

Spausdinimui buvo parinkta PLA medžiaga, jos savybės išvardytos žemiau:

- Netoksiškas, nekenkiantis aplinkai, biodeguojantis;
- Bekvapis, mažai deformuojasi spausdinant;
- Žemesnė spausdinimo temperatūra;
- Stiprus, atsparus trinčiams bet trapesnis už kitus plastikus;
- Puikiai sulimpa sluoksniai;
- Spindulys: 0.00175 m;
- Rekomenduojama spausdinimo temperatūra: 190~220 °C;
- Platformos temperatūra: 20~60 °C;
- Rekomenduojamas spausdinimo greitis: 0.03-0.1 m/s.

Šio modelio pasipriešinimo koeficientas vėjo tunelyje būtų lygus apytiksliai  $C_d \approx 0.389$  (suskaiciuotas kompiuterine programa). Tačiau apklijuoti siūlai ant modelio sienelių padidins pasipriešinimo koeficientą. Jei būtų išpildyta uždavinio sąlyga aerodinamiame vamzdyje- įrengtas sumažintas Kauno tunelis ir 100 kartų sumažintas realių matmenų PESA 620M, pasipriešinimo koeficientas būtų lygus 0.6320.

## 8 IŠVADOS

- Sąstato aerodinaminiam pasipriešinimui labiausiai įtakoja pirmojo traukos riedmens ir paskutiniojo traukos riedmens arba vagono geometrinė forma;
- Darbe sumodeliuoti dviejų geometrijos tipų modeliai- du realių matmenų Kauno tunelyje, ir du tie patys 100 kartų sumažinti modeliai;
- Kompiuterine programa „ANSYS 17.2” pavaizduotas oro srauto aptekėjimas apie modelį, apskaičiuotas aerodinaminis pasipriešinimas- realių matmenų PESA 620M Kauno tunelyje, kai srauto greitis 0.5 m/s, pasipriešinimo koeficientas 0.602; 100 kartų sumažintas realių matmenų PESA 620M Kauno tunelyje, kai srauto greitis 50 m/s, pasipriešinimo koeficientas 0.606; Savo nuožiūra sumodeliuotas realių matmenų modelis Kauno tunelyje, kai srauto greitis 0.5 m/s, pasipriešinimo koeficientas 0.804; 100 kartų sumažintas savo nuožiūra sumodeliuotas realių matmenų modelis Kauno tunelyje, kai srauto greitis 50 m/s, pasipriešinimo koeficientas 0.797. Pasipriešinimo koeficientas tarp realaus ir to paties sumažinto modelio skiriasi 33 %;
- Didžiausias oro srauto greitis lygus 81.24 m/s, kai toli nuo modelio paviršiaus oro srauto greitis 50 m/s. Oro srauto greitis padidėjo 62 %;
- Traukinio pasipriešinimą didina išsikišę elementai- veidrodėliai, priekinio lango valytuvas, kameros išsikišimai, ventiliacinės angos, priekinės dalies apsauginis bortas, sankaba, o Kauno tunelyje, kurio ilgis 1280 m., pasipriešinimą didina sienos geometrijos nelygumai, kurių išsikišimas svyruoja nuo 0.10 iki 0.45 m;
- Norint padidinti važiavimo greitį Kauno tuneliu- kai bus integruojama europinė vėžė (1.435 m) kartu su rusiška vėže (1.520 m), tuo pačiu reikia keisti tunelio įvažiuojamąją/išvažiuojamąją dalį, pašalinti visus išsikišusius elementus atsižvelgiant į naujos kartos traukinių ir tunelio geometrines formas- taip bus sumažintas aerodinaminis pasipriešinimas.

## 9 LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. John D. Anderson, Jr. Introduction to Flight. McGraw-Hill. Inc, 1978, p. 630;
2. Paknys L. Transporto priemonių aerodinamikos pagrindai. Mokomoji knyga. Kaunas. Technologija, 1999, p.119;
3. <https://en.wikipedia.org/wiki/Turbulence> [Žiūrėta 2017.05.17];
4. <https://esfsciencenew.wordpress.com/2012/10/26/turbulent-flow-and-viscosity/> [Žiūrėta 2017.05.14];
5. [https://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds\\_number](https://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds_number) [Žiūrėta 2017.05.17];
6. [https://en.wikipedia.org/wiki/Drag\\_coefficient](https://en.wikipedia.org/wiki/Drag_coefficient) [Žiūrėta 2017.05.17];
7. <https://en.wikipedia.org/wiki/Maglev> [Žiūrėta 2017.05.19];
8. Horwarth F & Sockel H. Unsteady flow due to trains passing a tunnel. Published by BHRA Fluid Engg, Cranfield, UK, 1979, p. 55;
9. Piechna, J. Podstawy aerodynamiki pjazdow. Warszawa, 2000. p. 261-267;
10. [https://www.mech.kth.se/courses/5C1211/Orellano\\_2010.pdf](https://www.mech.kth.se/courses/5C1211/Orellano_2010.pdf) [Žiūrėta 2017.05.17];
11. T. Maeda, Micro-Pressure Wave Radiating from Tunnel Portal and Pressure Variation due to Train Passage. Quarterly Report of RTRI, Vol. 37, No. 4, Railway Technical Research Institute, Tokyo, Japan, December 1996, p. 147;
12. Григолюк Э.И. Аэродинамика автомобиля.-М. Машиностроение, 1973, p. 78;
13. <http://www.birmingham.ac.uk/research/activity/railway/research/aerodynamics/cfd/dominic-flynn-numerical-flow.aspx> [Žiūrėta 2017.05.18];
14. Gawthorpe R.G. and Pope C.W. Aerodynamic Aspects of Train Design for Operation Through the Channel Tunnel, 1992, p. 26;
15. David Sopoer. The aerodynamics of a container freight train. Springer, 2016, p. 287;
16. Neppert H., Sanderson R., Untersuchungen zur Schnellbahn-Aerodynamik, Z. Flugwiss 22 (1974), p. 347;
17. <http://devblog.foxworks.cz/?p=239> [Žiūrėta 2017.05.17];
18. [https://en.wikipedia.org/wiki/K-epsilon\\_turbulence\\_model](https://en.wikipedia.org/wiki/K-epsilon_turbulence_model) [Žiūrėta 2017.05.15];
19. Launder, B.E., Spalding, D.B. The numerical computation of turbulent flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1974 m. 269–289 p.;
20. [https://en.wikipedia.org/wiki/Kutta%E2%80%93Joukowski\\_theorem](https://en.wikipedia.org/wiki/Kutta%E2%80%93Joukowski_theorem) [Žiūrėta 2017.05.15];
21. W. Seibert, M. Lanfrit, B. Hupertz and L. Krüger. 4th MIRA International Vehicle Aerodynamics Conference in Warwick, UK, October 16-17, 2002, p. 25 ;
22. [https://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_tunnel](https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_tunnel) [Žiūrėta 2017.05.17];
23. <https://drive.google.com/file/d/0B9wOrrFpsUb3VXpYWjBOZzFaVXc/edit>; [Žiūrėta 2017.05.16];

24. W. Seibert. CFD in Aerodynamic Design Process of Road and Race Cars European Automotive Congress, Bratislava, Slovakia, June 18-20, 2001, p. 65;
25. Butkus G. Trauminio aerodinaminio pasipriešinimo modeliavimas tunelyje. Transporto priemonės – 2003. Tarptautinės konferencijos pranešimų medžiaga. Kaunas, 2003. p. 53 – 57.;
26. Butkus G. Pasipriešinimas sąstato judesiui tunelyje. Mechanikos inžinerija 2004. Pranešimų medžiaga. Kaunas, 2004. p. 81 – 84.;
27. Žukauskas N. Aerodinaminių profilių tyrimo priemonės/transporto priemonės-98. Konf. pranešimų medžiaga. Kaunas. Technologija, 1998-p.347-351;
28. <http://www.ms.t.kanazawa-u.ac.jp/~fluid/staff/yang/train.html> [Žiūrėta 2017.05.08];
29. Barrow, H. and Pope, C. W. A simple analysis of flow and heat transfer in railway tunnels. J. Heat and Fluid Flow, 1987, 8(2), p. 119-123.;
30. Iwainsky H. Eisenbahningenieur, 1999, N8, p.43- 46;
31. Hucho W.H. Einfluss der Vorderwagenform aus Winderstand, Giermoment und Sietenkraft von Kastenwagen. ZfW, Bd.20,1972.-s.341-351;
32. O. Giel, Ch. Studnicka. Glaisers Annalen. 1994, Nr79,s.403-406;
33. <http://mdn0r3kvarr35bepm3komzo4.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/2014/08/AEROLAB-EWT-Brochure-4.pdf> [Žiūrėta 2017.05.12];
34. <http://3dkalve.eu/> [Žiūrėta 2017.05.13].

## **10 PRIEDAI**

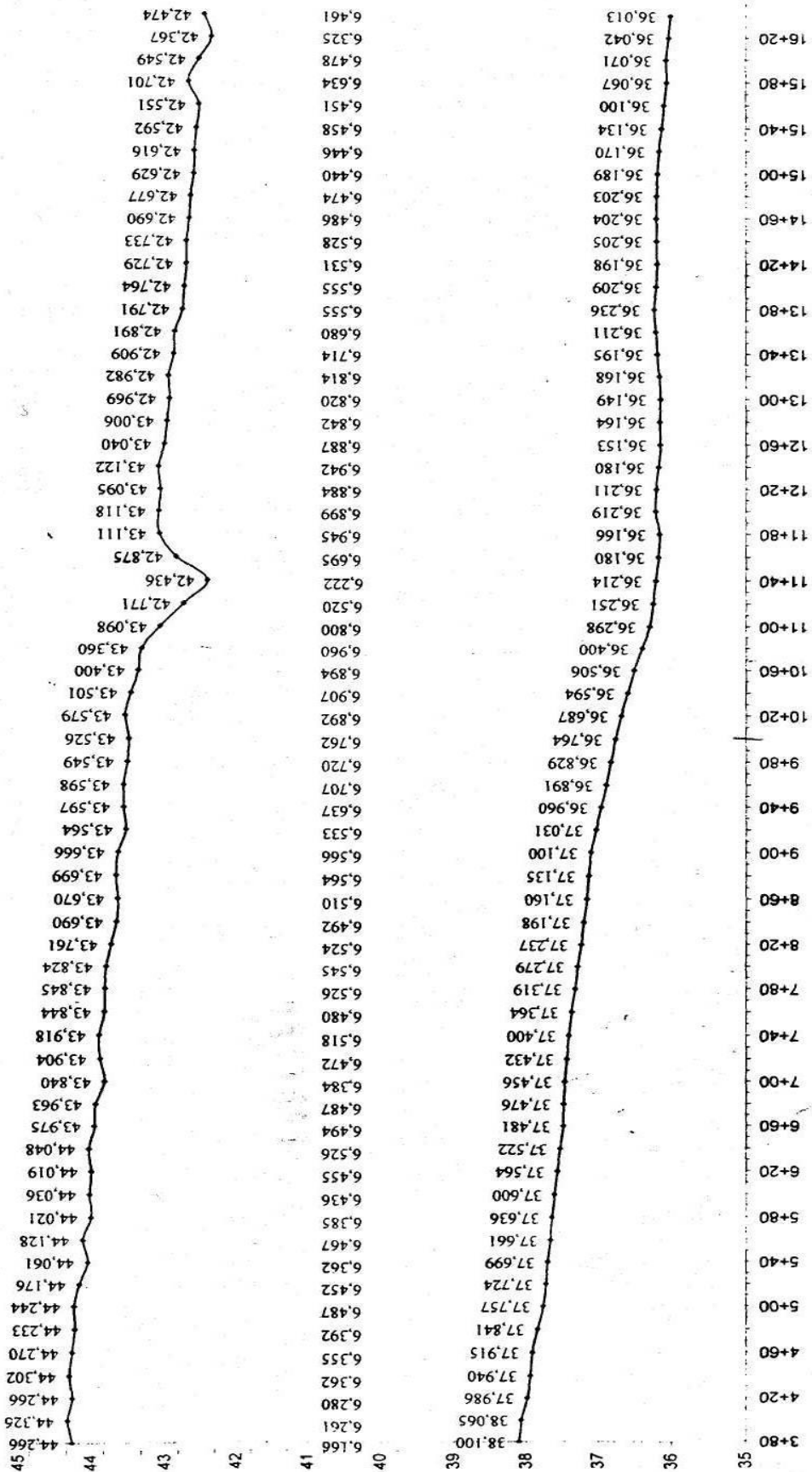
**P-1. PESA 620M techninės charakteristikos**

|                              |                                |
|------------------------------|--------------------------------|
| Gamintojas                   | PESA Bydgoszcz, Lenkija        |
| Gaminimo metai               | 2008-2010                      |
| Ašinė formulė                | B'2                            |
| Masė, kg                     | 57000                          |
| Didžiausia ašinė apkrova, kg | 14000                          |
| Atstumas tarp sankabų, m     | 26,4                           |
| Konstruktinis greitis, km/h  | 120                            |
| Pavaros tipas                | Hidrodinaminė VOITH T211 re. 3 |
| Dyzelinio variklio tipas     | MAN D2876LUE623                |
| Dyzelinio variklio galia, kW | 382                            |
| Sėdimų vietų skaičius        | 93                             |

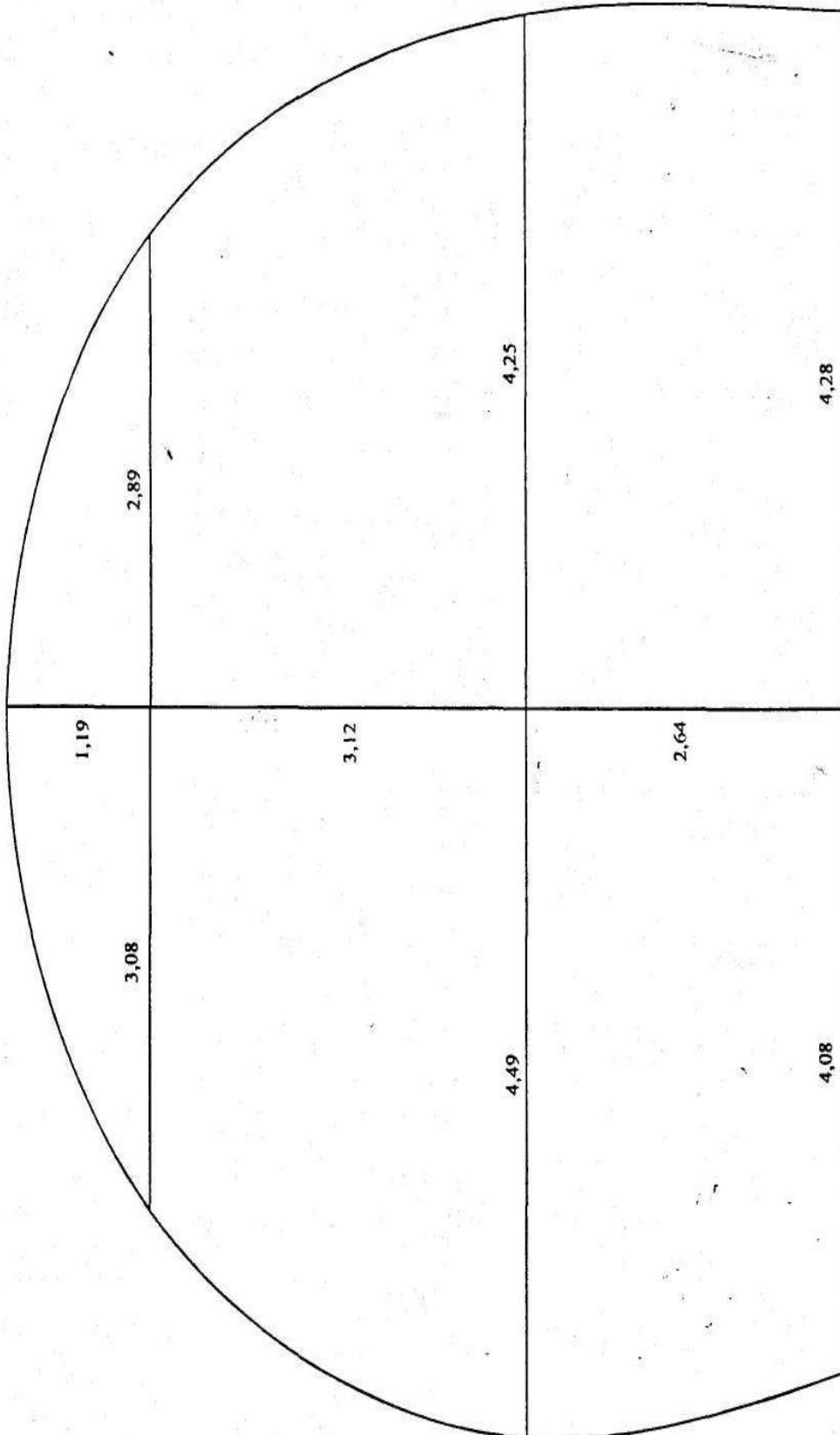


# P-2. Kauno tunelio viršaus ir bėgių išilginis profilis

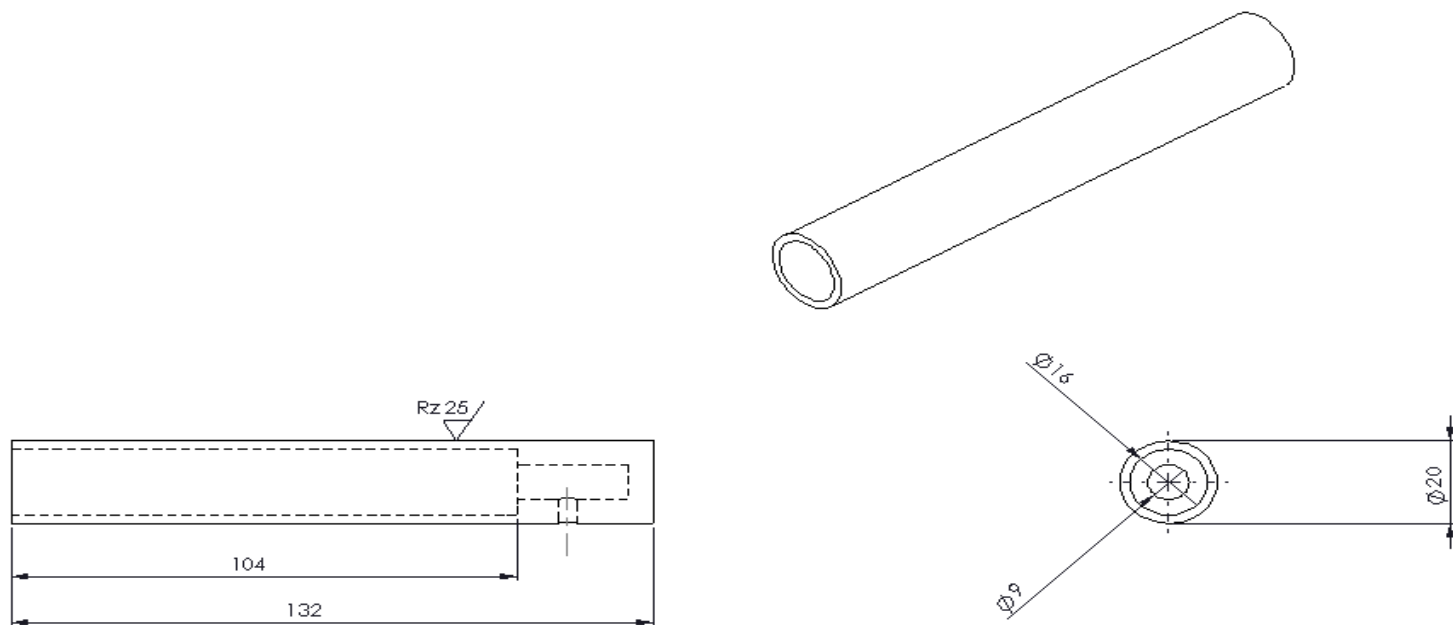
Tunelio viršaus ir bėgių išilginis profilis



**P-3. Kauno tunelio skersinis profilis**



**P-4. Įdėklo brėžinys**



|                            |                         |   |                       |                                  |                    |
|----------------------------|-------------------------|---|-----------------------|----------------------------------|--------------------|
|                            |                         | Dydis, laikmena                                       | Papildoma informacija | Medžiaga<br>7075-O, Aliuminis    | Mastelis<br>1:1    |
| Padalinys<br>Inž. grafikos | Techninis vadovas       | Dokumento tipas                                       |                       | Dokumento statusas<br>Mokomas is |                    |
| Organizacija<br>KTU        | Ruošė<br>L. Adomavičius | Pažadėtinys, papildomas pažadėtinys<br><b>Įdėklas</b> |                       | Perži<br>A                       | Data<br>2017.05.17 |
|                            | Tvirtino<br>Ž. Bazaras  |   |                       | Kalba<br>lt                      | Lapas<br>1         |

**P-5. EUROLAB mokomojo vėjo tunelio techninės charakteristikos**

|                                |                      |
|--------------------------------|----------------------|
| Testavimo aplinkos matmenys, m | 0.305 x 0.305 x 0.61 |
| Oro srauto greitis, m/s        | 4.5 ÷ 65             |
| Turbulencijos lygis, %         | > 0.2                |
| Bendras ilgis, m               | 4.6                  |
| Plotis, m                      | 1.1                  |
| Aukštis, m                     | 1.8                  |
| Masė, kg                       | 272                  |
| Elektrinio variklio galia, kW  | 7.5                  |

## 6 priedas. 3D spausdinimo kainų palyginimas

| Pavadinimas | Eurai už gramą |
|-------------|----------------|
| 3Dgamyba    | 0.30           |
| 3Dpro       | 0.35           |
| Art3D       | 0.40           |
| 3Dcreative  | 0.42           |
| 3Dkalvė     | 0.25           |