VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Andrius RUŽINSKAS

AUTOMOBILIO RATO SĄVEIKOS SU SNIEGU IR LEDU PADENGTA KELIO DANGA MODELIAVIMAS IR EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
TRANSPORTO INŽINERIJA (03T)

VGTU
LEIDYKLA
TECHNIKA
Vilnius 2018

Disertacija rengta 2013–2018 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

prof. habil. dr. Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – 03T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Transporto inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

doc. dr. Edgar SOKOLOVSKIJ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – 03T).

Nariai:

prof. dr. Donatas ČYGAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T),
doc. dr. Algirdas JANULEVIČIUS (Aleksandro Stulginskio universitetas, transporto inžinerija – 03T),
doc. dr. Artūras KERŠYS (Kauno technologijos universitetas, transporto inžinerija – 03T),
prof. dr. Juris SMIRNOVS (Rygos technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija bus ginama viešame Transporto inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2018 m. birželio 7 d. 10 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.
Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2018 m. gegužės 4 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje http://dspace.vgtu.lt ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva), Klaipėdos universiteto (K. Donelaičio g. 3, LT-92144 Klaipėda, Lietuva), Aleksandro Stulginskio universiteto (Studentų g. 11, LT-53361 Akademija, Kauno raj., Lietuva), Kauno technologijos universiteto (K. Donelaičio g. 20, LT-44239 Kaunas, Lietuva) bibliotekose.

VGTU leidyklos TECHNIKA 2018-018-M mokslo literatūros knyga
http://leidykla.vgtu.lt

ISBN 978-609-476-106-5
© VGTU leidykla TECHNIKA, 2018
© Andrius Ružinskas, 2018
andrius.ruzinskas@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Andrius RUŽINSKAS

SIMULATION AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF TIRE INTERACTION WITH SNOW AND ICE COVERED PAVEMENT

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
TRANSPORT ENGINEERING (03T)

VGTU
LEIDYKLA TECHNIKA
Vilnius 2018

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2013–2018.

Supervisor

Prof. Dr Habil. Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – 03T).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Transport Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Assoc. Prof. Dr Edgar SOKOLOVSKIJ (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – 03T).

Members:

Prof. Dr Donatas ČYGAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T),
Assoc. Prof. Dr Algirdas JANULEVIČIUS (Aleksandras Stulginskis University, Transport Engineering – 03T),
Assoc. Prof. Dr Artūras KERŠYS (Kaunas University of Technology, Transport Engineering – 03T),
Prof. Dr Juris SMIRNOVS (Riga Technical University, Civil Engineering – 02T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Transport Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **10 a. m. on 7 June 2018**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.
Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 4 May 2018.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository http://dspace.vgtu.lt, at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania), at the library of Klaipėda University (K. Donelaičio st. 3, LT-92144 Klaipėda, Lithuania), at the library of Aleksandras Stulginskis University (Studentų st. 11, LT-53361 Akademija, Kaunas r., Lithuania) and at the library of Kaunas University of Technology (K. Donelaičio st. 20, LT-44239 Kaunas, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjama padangos sąveika su sniegu ir ledu padengta kelio danga. Esminis sąveiką apibūdinantis parametras yra padangos ir kelio kontaktiniame paviršiuje veikiančios trinties jėgos, lemiančios automobilio stabilumą ir manevringumą kelyje. Šių jėgų reikšmės labai priklauso nuo aplinkos oro temperatūros ir terpės, esančios tarp padangos ir kelio, parametrų. Darbe tyrinėjama lengvojo automobilio žieminės padangos sąveika su sniegu ir ledu padengta kelio danga ir analizuojami ją lemiantys veiksniai.

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai ir šeši priedai.

Įvadiniame skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, pateikiama tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmajame skyriuje apžvelgiama mokslinė literatūra disertacijos tema. Nagrinėjamos padangą veikiančios jėgos, kitų autorių atlikti padangų ar jų protektoriaus elementų sąveikos su sniegu ir ledu padengta kelio danga eksperimentiniai tyrimai ir gauti rezultatai, padangos sąveikos su sniego ir ledo sluoksniais matematiniai modeliai ir šių sluoksnių tirpinimo cheminių medžiagų veiksmingumo tyrimų analizė.

Antrajame skyriuje pateikta padangos protektoriaus elementų sąveikos su sniego ir ledo sluoksniais bei šių sluoksnių tirpinimo teorinė analizė.

Trečiajame skyriuje pateiktos eksperimentinių tyrimų metodikos ir naudojama įranga.

Ketvirtajame skyriuje analizuojami ir lyginami matematinio modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų rezultatai. Gauti eksperimentiniai rezultatai palyginti su kitų mokslininkų tyrimų rezultatais.

Disertacijos tema paskelbti 6 straipsniai: vienas – straipsnių rinkinyje, įtrauktame į *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazę, du – recenzuojamame mokslo žurnale, du – tarptautinių konferencijų leidiniuose, referuojamuose *Clarivate Analytics* duomenų bazėje Proceedings, vienas – tarptautinės konferencijos leidinyje. Disertacijos tema perskaityti 3 pranešimai tarptautinėse konferencijose.

Abstract

The dissertation investigates the tire interaction with snow and ice covered pavement. The key parameter describing the interaction are forces generated in the contact of the road and tire influencing stability and maneuverability of the vehicle. The values of these forces are strongly dependent on ambient temperature and road pavement condition. An interaction and its influencing factors of passenger car tire with snow and ice covered pavement are analysed in the thesis.

The thesis includes the introduction, four chapters, general conclusions, the list of references, the list of publications of the author on the subject of the thesis and six annexes.

The introduction reveals the investigated problem, importance of the thesis and the object of research and describes the purpose and tasks of the paper, research methodology, scientific novelty, the practical significance of results examined in the paper and defended statements. The introduction ends in presenting the author's publications on the subject of the defended dissertation, offering the material of made presentations in conferences and defining the structure of the dissertation.

In the first chapter, sources of scientific literature on the subject of the thesis are reviewed. An analysis of tire forces, experimental research on tire force transmission on snow and ice performed by other authors, mathematical models of tire interaction with snow and ice and efficiency of chemical materias used for winter road maintenance are presented.

In the second chapter, the theoretical analysis of tire tread block interaction with snow and ice and melting of these layers are presented.

In chapter three, the methodologies of experimental research and the used equipment are presented.

In the chapter four, the results of the mathematical modeling and experimental research are analyzed. The obtained experimental results are compared to other authors research results.

On the topic of the dissertation, 6 scientific articles were published: one – in scientific journal included in the *Clarivate Analytics Web of Science*, two – in reviewed scientifical journal, two – in the *Clarivate Analytics Proceedings* data base publications, one – in the scientific conference material. Three presentations on the subject have been given in conferences at international level.

Žymėjimai

Simboliai

α – skersridės kampas, °;
γ – rato išvirtimo kampas, °;
η – dinaminė klampa, Pa·s;
λ – šilumos laidumo koeficientas, W/m·K;
μ – trinties koeficientas;
τ – tangentiniai įtempiai, Pa;
ω – rato kampinis greitis, s^{-1};
C_α – šoninis padangos standumas, N/°;
C_p – specifinė šiluma, J/kg·K;
F_y – skersinė trinties jėga, N;
F_x, F_{tr} – išilginė trinties jėga, N;
F_z – vertikalioji rato apkrova, N;
h – vandens sluoksnio storis, m;
l_c – padangos kontaktinio paviršiaus ilgis, m;
q – šilumos srautas, W/m^2;
p – slėgis, Pa;

r_{dyn} – rato dinaminis spindulys, m;
S_x – išilginis slydimas, %;
T_a – aplinkos oro temperatūra, °C;
T_L – ledo temperatūra, °C;
T_m – ledo tirpimo temperatūra, °C;
v_b – būgno tiesinis greitis, km/h;
v_s – slydimo greitis, m/s.

Santrumpos

ABS – stabdžių antiblokavimo sistema (angl. *Anti-lock Braking System*);
BE – baigtiniai elementai;
$CaCl_2$ – kalcio chloridas;
DSC – dinaminė stabilumo kontrolė (angl. *Dynamic Stability Control*);
ESP – elektroninė stabilumo sistema (angl. *Electronic Stability Program)*;
Icemelt – natrio ir kalcio modifikuotų chloridų mišinys;
IML – ledo masės sumažėjimo procentinis pokytis;
KGM – kietas gumos mišinys;
LTM – ledą tirpinanti cheminė medžiaga;
MGM – minkštas gumos mišinys;
$MgCl_2$ – magnio chloridas;
MPU – cheminė medžiaga, naudojama prieš užšalimą;
NaCl – natrio chloridas;
Nordway – natrio acetato ir natrio formiato mišinys;
PTFE – politetrafluoretilenas;
RSDK – rato su danga sukibimo koeficientas;
SLVM – susmulkinto ledo ir vandens mišinys;
SVM – sniego ir vandens mišinys;
TCS – praslydimo kontrolės sistema (angl. *Traction Control System*);
TYDEX – padangos eksperimentinių duomenų apsikeitimo protokolas;
TP – transporto priemonė.

Sąvokos

Adhezija – paviršių tarpusavio sankiba dėl tarpmolekulinio ryšio.
Atodrėkis – šiltasis metų laikotarpis kuomet tirpsta ledas ir sniegas.

Histerezė – padarinio atsilikimas nuo jį sukėlusios priežasties arba ankstesnių sąlygų vėlesnis veikimas (mechaninės energijos virsmas šiluma deformuojantis gumai).

Juodasis ledas – plonas ką tik susiformavusio ledo sluoksnis, kuris dėl savo skaidrumo įgauna tamsų atspalvį.

Gumos kietumas – medžiagos savybė priešintis įspaudimui, matuojama durometru.

Krituliai – kieti ar skysti įvairaus pobūdžio lietaus arba sniego pavidalo vandens garų kondensacijos produktai, krintantys iš debesų arba iš oro tiesiogiai nusėdantys ant žemės paviršiaus bei daiktų rasos, šarmos, šerkšno, plikledžio pavidalu.

Laisvai riedanti padanga – padanga, riedanti neveikiama greitinimo ar lėtinimo momentų, ir veikiama tik vertikaliosios prispaudimo jėgos.

Lamelės – padangos protektoriaus blokų įpjovos.

Lijundra – tankaus ledo sluoksnis ant žemės, važiuojamosios kelio dalies, medžių, ryšio ir elektros perdavimo linijų laidų, daiktų ir statinių.

Oro temperatūra – dydis, apibūdinantis oro įšilimą arba jo šiluminę būseną.

Padangos protektoriaus elementai – protektoriaus raštą sudarantys elementai (grioveliai, juostos, blokai, lamelės, dygliai).

Plikledis – kelio paviršiaus apledėjimas temperatūrai nukritus žemiau 0 °C esant dideliam oro drėgnumui.

Prispaustas (sutankintas) sniegas – važiuojamojoje automobilių kelio dalyje susidaręs sniego sluoksnis, suplūktas pravažiuojančių automobilio ratų.

Protektoriaus blokas – protektoriaus elementai, atskirti grioveliais.

Protektoriaus blokų elementai – lamelėmis atskirtos protektoriaus blokų dalys.

Skersridės kampas – kampas tarp rato greičio vektoriaus ir rato pasukimo apie vertikaliąją ašį plokštumos.

Sniegas – iš įvairios formos kristalų sudaryti kietieji krituliai, krintantys iš debesų, kai oro temperatūra žemesnė kaip 0 °C.

Snygis – kietieji krituliai, krintantys iš debesų ant žemės, vejo nepernašami ir nepučiami.

Sublimacija – perėjimas iš kietojo (sniego) į dujinį būvį aplenkiant skystąjį, ir atvirkščiai.

Šarma – kietos, smulkios, kristalinės baltos spalvos nuosėdos, panašios į sniego dangą, susidarančios ant žemės paviršiaus, žolės, lapų ir stogų sublimuojantis vandens garams.

Tižė – sniego arba ledo krituliai ant žemės paviršiaus arba ant kelio dangos, pavirtę į minkštą, skystą terpę dėl lietaus arba aukštos temperatūros.

Žieminė padanga – žiemos laikotarpiui skirta lengvojo automobilio padanga, pasižyminti specialiu protektoriaus raštu ir pagaminta iš minkštos gumos.

Žiemos kelias – ledu ar sniegu padengta kelio danga.

Žiemos laikotarpis – metų laikas, kurio pastovi oro temepratūra yra žemesnė kaip 0 °C.

Turinys

ĮVADAS 1
Problemos formulavimas 1
Darbo aktualumas 2
Tyrimų objektas 2
Darbo tikslas 2
Darbo uždaviniai 2
Tyrimų metodika 3
Darbo mokslinis naujumas 3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė 4
Ginamieji teiginiai 4
Darbo rezultatų aprobavimas 5
Disertacijos struktūra 5
Padėka 5

1. AUTOMOBILIO RATO SĄVEIKOS SU SNIEGU IR LEDU PADENGTA KELIO DANGA MOKSLINIŲ TYRIMŲ ANALIZĖ 7
1.1. Automobilio padangos įtaka eismo saugumui ir ją veikiančių jėgų analizė 7
1.2. Padangos sąveikos su sniegu ir ledu padengta kelio danga eksperimentinių tyrimų apžvalga 14
1.2.1. Padangos protektoriaus elementų sąveikos eksperimentiniai tyrimai 14
1.2.2. Padangų sąveikos eksperimentiniai tyrimai 18

1.3. Padangos sąveikos su sniegu ir ledu padengta kelio danga matematinių modelių apžvalga 25
1.3.1. Fiziniai ir empiriniai modeliai 25
1.3.2. Baigtinių elementų analizės modeliai 30
1.4. Ledą ir sniegą tirpinančių medžiagų veiksmingumo tyrimų analizė 31
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas 33

2. PADANGOS SĄVEIKOS SU SNIEGU IR LEDU PADENGTA KELIO DANGA TEORINĖ ANALIZĖ 35
2.1. Padangos protektoriaus bloko kontaktinis modelis 35
2.2. Padangos protektoriaus bloko termodinamis modelis 38
2.3. Padangos sąveikos su sniego arba ledo ir vandens terpe jėgų modelis 40
2.4. Ledo ir sniego sluoksnių tirpinimo teorinė analizė 41
2.5. Antrojo skyriaus išvados 45

3. PADANGOS SĄVEIKOS SU SNIEGU IR LEDU PADENGTA KELIO DANGA EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ PLANAVIMAS 47
3.1. Padangų sąveikos su sniego ir ledo sluoksniais eksperimentiniams tyrimams naudota įranga 47
3.2. Būgninio stendo paruošimas padangos sąveikos eksperimentams 50
3.2.1. Būgno paviršiaus padengimas ledo sluoksniu 50
3.2.2. Būgno paviršiaus padengimas sniego, ledo ir vandens mišinio sluoksniu 51
3.2.3. Būgno paviršiaus padengimas puraus sniego sluoksniu 55
3.3. Ledą tirpinančių medžiagų veiksmingumo eksperimentiniai tyrimai 56
3.4. Eksperimentinių duomenų apdorojimo metodai 57
3.5. Trečiojo skyriaus išvados 59

4. MATEMATINIO MODELIAVIMO IR EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATŲ ANALIZĖ 61
4.1. Matematinio modeliavimo rezultatų analizė 61
4.2. Padangų sąveikos su ledo sluoksniu eksperimentinių tyrimų rezultatų analizė 68
4.2.1. Aplinkos temperatūros įtaka padangos išilginei ir skersinei sąveikai 68
4.2.2. Padangos ir ledo paviršių temperatūrų matavimo rezultatų analizė 72
4.2.3. Skirtingų padangų išilginės ir skersinės dinamikos palyginimas 73
4.3. Padangos sąveikos su sniego, ledo ir vandens mišinių sluoksniais eksperimentinių tyrimų rezultatų analizė 75
4.4. Padangos sąveikos su sniegu eksperimentinių tyrimų rezultatų analizė 80
4.5. Maksimalių rato sukibimo su danga koeficiento reikšmių palyginimas 82
4.6. Ledą tirpinančių medžiagų veiksmingumo eksperimentinių tyrimų rezultatų analizė 83
4.7. Ketvirtojo skyriaus išvados 88

BENDROSIOS IŠVADOS 91

LITERATŪRA IR ŠALTINIAI 93

AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS .. 103

SUMMARY IN ENGLISH 105

PRIEDAI[1] 121
A priedas. Padangos sąveikos laboratorinių bandymų pradinės sąlygos 123
B priedas. Protektoriaus blokų sąveikos matematinio modeliavimo rezultatai 125
C priedas. Protektoriaus bloko elemento sąveikos matematinio modeliavimo rezultatai 135
D priedas. Autoriaus sąžiningumo deklaracija 141
E priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą daktaro disertacijoje 142
F priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos 143

[1] Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Contents

INTRODUCTION 1
Problem of formulation 1
Relevance of the thesis 2
The object of the thesis 2
The aim of the thesis 2
The tasks of the thesis 2
The research methodology 3
Scientific novelty of the thesis 3
Practical value of the research findings 4
Defended statements 4
Approval of the research findings 5
The structure of the thesis 5
Acknowledgements 5

1. ANALYSIS OF SCIENTIFIC RESEARCH ON TIRE INTERACTION WITH SNOW AND ICE COVERED PAVEMENT 7
1.1. Analysis of tire role on traffic safety and force transmission 7
1.2. Review of experimental research on tire interaction with snow and ice 14
1.2.1. Experimental research on interaction of tire tread parts 14
1.2.2. Experimental research on interaction of full tire 18
1.3. Review of mathematical models describing the tire interaction with snow and ice 25

1.3.1. Physical and empirical models 25
1.3.2. Finite element analysis models 30
1.4. Analysis of efficiency of snow and ice chemical melting materials 31
1.5. Conclusions of the first chapter and formulation of the tasks of the thesis 33

2. THEORETICAL ANALYSIS OF THE TIRE INTERACTION WITH SNOW AND ICE COVERED PAVEMENT 35
2.1. Tire tread block model 35
2.2. Thermodynamic model of tire tread block 38
2.3. Tire force model with snow or ice and water mixture 40
2.4. Theoretical analysis of ice and snow melting 41
2.5. Conclusions of the second chapter 45

3. DESIGN OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF TIRE INTERACTION WITH SNOW AND ICE 47
3.1. Measuring equipment for resarch on tire force transmission with snow and ice 47
3.2. Preparation of the drum test rig for the research of tire interaction 50
3.2.1. Coverage of drum surface with ice layer 50
3.2.2. Coverage of drum surface with snow, ice and water mixtures 51
3.2.3. Coverage of drum surface with loose snow 55
3.3. Experimental research on efficiency of deicing materials 56
3.4. Methods for experimental data evaluation 57
3.5. Conclusions of the third chapter 59

4. ANALYSIS OF THE RESULTS OF THE MATHEMATICAL MODELING AND EXPERIMENTAL RESEARCH 61
4.1. Analysis of the mathematical modeling results 61
4.2. Analysis of experimental research results on tire interaction with ice 68
4.2.1. Ambient temperature influence on lateral and longitudinal tire performance 68
4.2.2. Analysis of tire and ice surface temperature measurements 72
4.2.3. Comparison of different tires longitudinal and lateral performance 73
4.3. Analysis of experimental research results on tire interaction with snow, ice and water mixtures 75
4.4. Analysis of experimental research results on tire interaction with snow 80
4.5. Comparison of peak force coefficient values 82
4.6. Analysis of experimental research results on deicing materials performance 83
4.7. Conclusions of the fourth chapter 88

GENERAL CONCLUSIONS 91

REFERENCES 93

LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE THESIS 103

SUMMARY IN ENGLISH 105

ANNEXES[2] 121
Annex A. Initial conditions of tire interaction laboratory measurements 123
Annex B. Results of tread blocks interaction simulation 125
Annex C. Results of thermodynamic tread block simulation 135
Annex D. Declaration of academic integrity 141
Annex E. The aggreement of co-authors to present publications materiali n the dissertation defense 142
Annex F. Copies of scientific publications by the author on the topic of dissertation 143

[2] The annexes are supplied in the enclosed compact disc.

Įvadas

Problemos formulavimas

Žiemos eismo sąlygų skirtumai juos lyginant su vasaros laikotarpiu yra akivaizdūs. Šalyse, pasižyminčiose aiškiu klimato sezoniškumu (Baltijos, Skandinavijos šalys), krituliai, dengiantys kelio dangą žiemos laikotarpiu virsta ledu, laisvu arba prispaustu sniegu, neleidžiančiu automobilio ratui tiesiogiai kontaktuoti su kelio dangos paviršiumi. Šių terpių savybės kinta priklausomai nuo kritulių kiekio, intesyvumo, temperatūros ir blogina rato sankibos su kelio danga parametrus. Daugumoje šalių, tarp jų ir Lietuvoje, svarbiausių kelių dangos turi būti mechaniškai nuvalytos arba sniegas ir ledas ištirpintas druskomis. Nespėjus laiku to padaryti, padanga tampa esminiu automobilio važiuoklės sąveikos su keliu elementu, nuo kurio būklės ir išorinių veiksnių (vertikaliosios apkrovos, slėgio joje, temperatūros, važiavimo greičio) priklauso padangos ir kelio kontakte veikiančių išilginių ir skersinių trinties jėgų didumas.

Automobilio padangos turi užtikrinti ne tik kuo mažesnį ratų pasipriešinimą riedėjimui, bet ir turi garantuoti pakankamai gerą sankibą su kelio danga. Sankibos su keliu koeficientas yra lemiantis automobilio dinamiškumą veiksnys. Didelės sankibos koeficiento reikšmės garantuoja spartų automobilio įsibėgėjimą, gerą manevringumą ir efektyvų stabdymą, o tai lemia eismo saugumą keliuose žiemos laikotarpiu.

Darbo aktualumas

Žiemos metu daug eismo įvykių įvyksta dėl slidžios kelio dangos, kuomet padangoms praradus reikiamą sankibą su keliu, automobiliai tampa sunkiai valdomi. Didelį pavojų eismui kelia ir tai, kad esant slidžiai dangai, stabdymo kelias gali padidėti iki kelių kartų. Neigiama slidžios dangos įtaka būna ir įsibėgėjant automobiliui, kuomet praslystant ar buksuojant ratams sumažėja automobilio dinamiškumas. Todėl kritiškai sumažėja įsibėgėjimo pagreitis jam pajudant iš vietos, lenkiant ar manveruojant. Dėl ratų buksavimo patiriami ir dideli energijos nuostoliai: ženkliai padidėja degalų arba elektros energijos sąnaudos, taip pat labiau teršiamas aplinkos oras.

Nežiūrint į sparčiai tobulėjančias ir vis plačiau automobiliuose diegiamas aktyviojo saugumo sistemas (ABS, TCS, ESP, DSC, EBD), būtina toliau nagrinėti padangų sankibos su keliu užtikrinimo bet kokiomis oro sąlygomis galimybes. Daug racionaliau ir saugiau išvengti padangų praslydimo pradžios, negu įvairiomis techninėmis sistemomis arba dėl puikių vairavimo įgūdžių suvaldyti automobilį. Mūsų šalis yra klimatinėje zonoje, kurioje žiemos metu oro temperatūrai dažnai svyruojant apie 0 °C, ant kelių susidaro mišrūs sniego–ledo–vandens sluoksniai. Rato sąveikos su šiais sluoksniais fiziniai procesai, lemiantys automobilio stabilumą, valdomumą ir stabdymą, nėra iki galo ištyrinėti, dėl to turi mokslinio naujumo ir praktinės reikšmės elementų.

Tyrimų objektas

Tyrimų objektas – lengvojo automobilio žieminės padangos ir jos protektoriaus elementų sąveika su sniegu ir ledu padengta kelio danga.

Darbo tikslas

Sukurti automobilio padangos sąveikos su sniegu ir ledu padengta kelio danga tyrimų metodiką, leisiančią nustatyti padangos sankibos koeficiento priklausomybę nuo slydimo, skersridės kampo ir papildomos terpės kintančių parametrų.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Išanalizuoti ratą veikiančias trinties jėgas, kai kelio danga yra padengta sniego arba ledo sluoksniais, jų nustatymo eksperimentinius ir matematinius metodus.
2. Sukurti padangos protektoriaus elemento sąveikos modelį, kuriame būtų įvertintos gumos tamprumo savybės, kontakto plotas su kelio danga ir jame išsiskiriantis šilumos kiekis.
3. Eksperimentiškai nustatyti aplinkos oro temperatūros poveikį padangos skersinės ir išilginės sankibos su ledo danga charakteristikoms.
4. Sudaryti padangos sąveikos su sniego ir vandens, taip pat ledo ir vandens mišinių sluoksniais eksperimentinių tyrimų metodiką bei nustatyti padangos išilginio ir skersinio slydimo charakteristikas. Tyrimų metodiką pritaikyti padangos sąveikos su puriu sniegu eksperimentiniams tyrimams.
5. Ištirti žiemos kelių priežiūros tarnybų naudojamų sniegą ir ledą tirpinančių medžiagų veiksmingumą bei nustatyti aplinkos oro temperatūros ir medžiagų veikimo trukmės įtaką tirpsmo dinamikai.

Tyrimų metodika

Matematiniam modeliavimui taikytas baigtinių elementų metodas. Eksperimentinių duomenų apdorojimui taikyti statistinės analizės metodai. Darbe naudota ši matematinio modeliavimo ir rezultatų apdorojimo programinė įranga: *Ansys Workbench*, *Matlab, Optris Pi Connect, Microsoft Office*. Padangos sąveikos tyrimams naudotas Karlsrūjės technologijų instituto (Vokietija) būgninis padangų tyrimo stendas. Temperatūrų matavimams pasitelkta *Optris PI 160* terminė kamera. Ledą tirpinančių medžiagų eksperimentiniams tyrimams naudota *Weiss WK11* šaldymo kamera (AB „Problematika“).

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie transporto inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Sukurta originali padangos sąveikos su sniego ir vandens, taip pat ledo ir vandens mišiniais laboratorinių tyrimų metodika, kuri leidžia nustatyti padangą veikiančias skersines ir išilgines trinties jėgas.

2. Nustatytos padangos greitinimo, lėtinimo ir skersinės sankibos charakteristikos su sniego ir vandens mišinio sluoksniu aiškiai apibrėžiant mišinio konsistenciją.
3. Gautos padangos greitinimo charakteristikos su ledo ir vandens mišinio sluoksniu buvo nustatytos skirtingos konsistencijos terpei.
4. Nustatyta sniego ir vandens, taip pat ledo ir vandens mišinių kiekio įtaka padangos greitinimo charakteristikoms.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Gautos padangos skersinės ir išilginės sankibos charakteristikos leidžia tiksliai atskirti, kai padanga sukimba su kelio danga, ir kai ji praranda sankibą bei pradeda slysti. Taip pat iš šių charakteristikų nustatytos maksimalios sankibos koeficiento reikšmės gali būti panaudotos žiemos kelių priežiūros tarnybų planuojant ir atliekant kelių priežiūros žiemą darbus. Jos gali būti naudojamos patikslinant esamus norminius kelių priežiūros žiemą lygius. Šie rezultatai gali būti naudojami ir saugaus eismo specialistų ar eismo įvykių ekspertų, tiriančių eismo įvykių priežastis žiemos laikotarpiu.

Ginamieji teiginiai

1. Minkštesnio padangos protektoriaus blokų gumos mišinio padanga pasižymi didesniu sankibos koeficientu su ledo danga, kurį lemia didesnės bloko deformacijos, didinančios sąlyčio su kelio danga plotą.
2. Padangos su ledu kontakto plote atsirandantis vandens sluoksnis sumažina padangos sankibą, o esant šlapio ledo sluoksniui eismo sąlygos tampa kritinės, nes žymiai sumažėja padangos sankibos koeficientas. Šis ledo sluoksnis turėtų būti nedelsiant šalinamas kelių priežiūros tarnybų.
3. Padangai sąveikaujant su sniego ir vandens mišinio sluoksniu, didesnis šio mišinio kiekis mažina padangos sankibos koeficientą, o padangai sąveikaujant su ledo ir vandens mišiniu pastebima atvirkštinė tendecija – didesnis mišinio kiekis didina sankibos koeficientą.
4. Kelių priežiūrai žiemą naudojamos druskos yra skirtingo veiksmingumo ir jų cheminės reakcijos sparta priklauso nuo aplinkos oro temperatūros ir sąveikos su ledu trukmės.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra atspausdinti 6 moksliniai straipsniai: vienas – mokslo žurnale, įtrauktame į *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazę (Ružinskas *et al.* 2016); du – recenzuojamuose periodiniuose mokslo žurnaluose (Ružinskas 2016; Ružinskas 2017), trys – recenzuojamoje tarptautinės konferencijos medžiagoje (Ružinskas ir Sivilevičius 2014; 2017a; 2017b).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti trijose mokslinėse konferencijose Lietuvoje:

- Tarptautinėje konferencijoje „*Environmental Engineering*“ 2014 ir 2017 Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Transbaltica*“ 2017 m. Vilniuje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, 4 skyriai ir bendrosios išvados. Pabaigoje pateikiami šeši priedai.

Darbo apimtis yra 122 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudotos 48 numeruotos formulės, 60 paveikslų ir 8 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudoti 128 literatūros šaltiniai.

Padėka

Norėčiau padėkoti savo moksliniam vadovui prof. habi. dr. Henrikui Sivilevičiui už kantrybę, vertingas mokslines konsultacijas ir patarimus bei visokeriopą pagalbą. Taip pat esu labai dėkingas savo mokslinės stažuotės Vokietijoje vadovui dr. inž. Martin Gießler ir visiems TP sistemų ir technologijų instituto darbuotojams už šiltą priėmimą, vertingus patarimus ir galimybę atlikti eksperimentinius tyrimus. Nuoširdžiai dėkoju visiems Mobiliųjų mašinų ir geležinkelių transporto katedros darbuotojams už visokeriopą palaikymą ir vertingus patarimus. Ypatingos padėkos nusipelno doc. dr. Raimundas Junevičius. Ne mažiau dėkingas esu šeimai už palaikymą, supratingumą ir kantrybę.

1

Automobilio rato sąveikos su sniegu ir ledu padengta kelio danga mokslinių tyrimų analizė

Šiame skyriuje apžvelgiami moksliniai darbai, kuriuose nagrinėjama automobilio rato sąveika su sniegu ir ledu padengta kelio danga. Analizuojamos automobilio padangą ir jos protektoriaus elementus veikiančios jėgos, jų nustatymo eksperimentiniai ir matematiniai metodai. Pateikiama ledą ir sniegą tirpinančių medžiagų veiksmingumo analizė .

Skyriaus tematika paskelbtos trys publikacijos (Ružinskas *et al.* 2016; Ružinskas 2016; Ružinskas 2017).

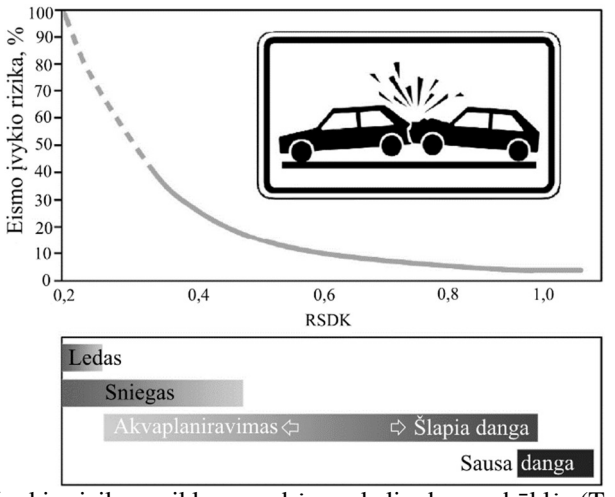
1.1. Automobilio padangos įtaka eismo saugumui ir ją veikiančių jėgų analizė

Transporto sektorius išlieka vienas iš pagrindinių valstybių ekonomikos varomųjų jėgų, ir Lietuva nėra išimtis (Sivilevičius 2011). Dėl eismo įvykių Lietuvos valstybė kasmet patiria apie 3,78 mlrd. eurų nuostolių (Pukalskas *et al.* 2015). Eismo saugumas keliuose priklauso nuo klimato sezoniškumo (Mamčic, Sivilevičius

2014). Oro sąlygų įtakos eismo saugumui tyrimai yra būtini siekiant išvengti eismo įvykių ar analizuojant jų priežastis (Hayat *et al.* 2013). Usman *et al.* (2012) išanalizavę statistinius avaringumo duomenis 31 Kanados greitkelyje, nustatė pagrindinius veiksnius, turinčius pastebimą įtaką eismo saugumui žiemos laikotarpiu. Šie veiksniai – tai kelio matomumas, kritulių intensyvumas, oro temperatūra, vėjo greitis, žiemos laikotarpio mėnuo ir audros trukmė. Theofilatos ir Yannis (2008) pastebėjo, jog žiemos oro sąlygos turi didesnę reikšmę eismo saugumui nei TP eismas.

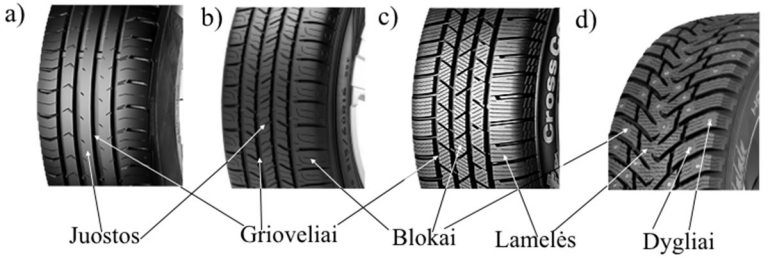
Andreescu ir Frost (1998) nustatė neigiamą ryšį tarp snygio ir eismo įvykių. Sningant eismo įvykių skaičius pastebimai padidėjo. Eisenberg ir Warner (2005) pastebėjo, jog sningant įvyksta mažiau mirtinų eismo įvykių lyginant su įvykiais, kuriuose nėra žuvusiųjų. Taip pat buvo pastebėta, jog iškritus pirmajam sniegui metuose, tą dieną įvyksta daugiau eismo įvykių lyginant su paprastomis žiemos dienomis. Seeherman ir Liu (2015) analizavo sniego storio įtaką avaringumui sningant. Buvo nagrinėtas 55 km kelio ruožas, kuriame per 5 metus įvyko 75 sniego audros. Nustatyta, jog sniego kiekis turėjo didelę reikšmę avaringumui. Taip pat buvo pastebėtas nežymus avaringumo mažėjimas mažėjant sniego dangos storiui.

Qiu ir Nixon (2008) nagrinėjo 1967–2005 metų avaringumo duomenis bei analizavo nepalankių oro sąlygų įtaką. Autoriai nustatė, jog sniego danga turi didesnę reikšmę avaringumo rodikliui (eismo įvykių skaičius tenkantis 1 mln. TP) ir sužalojimų rodikliui lyginant su šlapia kelio danga. Esant sniego dangai, minėti rodikliai padidėja atitinkamai 84 % ir 75 %. Taip pat pastebėta, jog didėjant kritulių intensyvumui, eismo įvykio rizika didėja. Kelių dangos padengtos ledu ar sniegu turi dar didesnę reikšmę eismo įvykio rizikai (1.1 pav.).



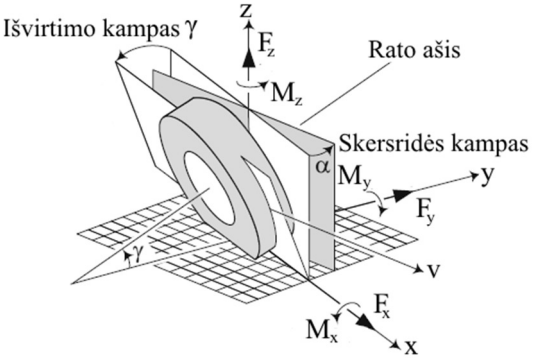
1.1 pav. Eismo įvykio rizikos priklausomybė nuo kelių dangos būklės (Topp *et al.* 2008)
Fig. 1.1. Accident probability depending on road conditions (Topp *et al.* 2008)

Siekiant užtikrint saugų eismą keliuose, TP valdomumas yra vienas iš svarbiausių veiksnių (Sapragonas *et al.* 2014). Žiemos laikotarpiu sankiba tarp automobilio padangos ir kelio paviršiaus dažnai būna ženkliai mažesnė lyginant su sausa danga, o tai lemia padidėjusią eismo įvykių riziką (Usman *et al.* 2010). Kelių priežiūros tarnyboms laiku nespėjus pašalinti ledo ir sniego sluoksnių, automoblio padanga tampa pagrindiniu važiuoklės komponentu. Dėl to žiemos laikotarpiu daugelyje šalių privaloma arba rekomenduojama naudoti žiemines padangas, pasižyminčias specialiu gumos mišiniu bei protektoriaus raštu (1.2 pav. c, d).



1.2 pav. Skirtingų padangų protektoriaus rašto struktūra ir jo elementai: a) vasarinė; b) universalioji; c) žieminė; d) dygliuotoji.
Fig. 1.2 The structure of tread pattern and it's components of different tires: a) summer; b) all season; c) winter; d) studded.

Padangų gamintojai, kurdami naujas žiemines padangas, ypatingą dėmesį skiria eismo saugumui. Dėl to TP stabdymo, greitėjimo ir valdomumo charakteristkos yra labiausiai dominantys veiksniai ne tik padangų gamintojus, bet ir kelių priežiūros tarnybas ar eismo įvykių ekspertizę atliekančius tyrėjus. Šias charakteristikas lemia padangos ir kelio kontakto zonoje veikiančios jėgos ir momentai, kurių veikimo kryptys pavaizduotos 1.3 paveiksle.



1.3 pav. Padangos ir kelio kontakto zonoje veikiančios jėgos ir momentai (Jazar, 2014)
Fig. 1.3. Forces and moments acting between the tire and road (Jazar, 2014)

Padangą išilgine kryptimi veikianti jėga F_x paprasčiausiai gali būti išreiškiama kaip trinties jėga, kurią pirmasis XVII a. suformulavo Ch. A. Kolumbas:

$$F_x = \mu F_z , \tag{1.1}$$

čia μ – trinties koeficientas; F_z – vertikalioji (prispaudimo) jėga.

Esant mažiems skersridės kampams ($\alpha < 4°$), skersinė jėga F_y gali būti išreikšta (Meywerk, 2015):

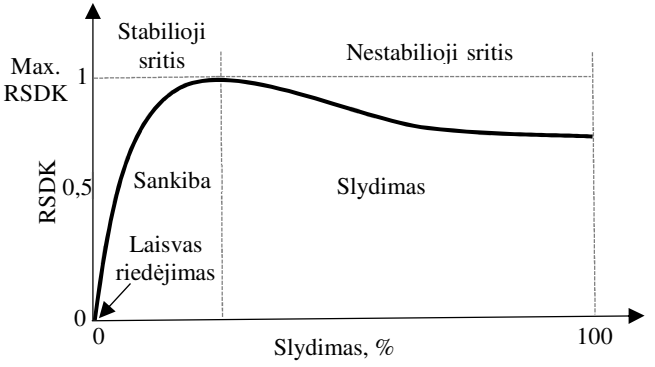
$$F_y = C_\alpha \alpha , \tag{1.2}$$

čia C_α – šoninis padangos standumas; α – skersridės kampas.

Išilginės F_x arba skersinės F_y jėgų santykis su vertikaliąją jėga F_z yra vadinamas rato su danga sukibimo koeficientu (RSDK), kurį aprašo Asfaltas 08 taisyklės:

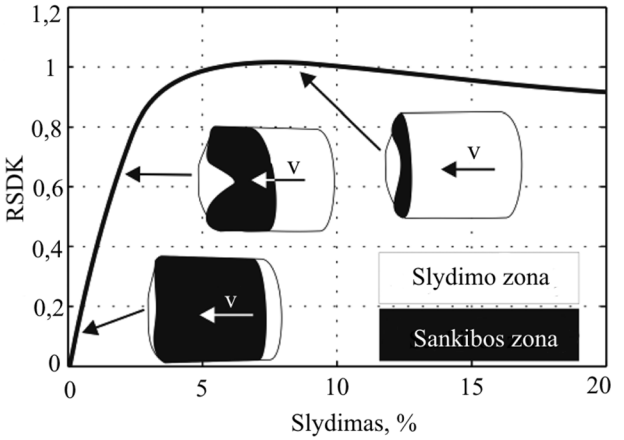
$$RSDK_x = \frac{F_x}{F_z}, \; RSDK_y = \frac{F_y}{F_z}. \tag{1.3}$$

Maksimalios RSDK reikšmės padangai pagreitėjant ir stabdant gali būti nustatomos iš slydimo kreivių (1.4 pav.). Iš šių kreivių galima gauti ne tik maksimalias reikšmes, bet ir įvardinti padangos sankibos sritį, kurioje padanga sukimba su kelio danga ir slydimo sritį, kurioje prarandama sankiba ir padangos protektoriaus elementai slysta kelio paviršiumi. Šios sritys taip pat gali būti įvardijamos atitinkamai stabiliąja ir nestabiliąja.



1.4 pav. Slydimo kreivės sritys
Fig. 1.4 The regions of slip curve

Iš 1.5 paveikslo matyti, jog sankibos zona padangos kontakte su keliu mažėja didėjant slydimui, o slydimo sritis nuosekliai didėja.



1.5 pav. Sankibos ir slydimo zonų kitimas nuo slydimo (Ripka *et al.* 2009)
Fig. 1.5. Sticking and sliding areas depending on slip (Ripka *et al.* 2009)

Slydimo reikšmę, kuomet padanga pagreitėja ($v < \omega r_{dyn}$) arba stabdoma ($v > \omega r_{dyn}$), bendru atveju galima išeikšti (Schramm *et al.* 2014):

$$S_{P,S} = \frac{\left| v - \omega r_{dyn} \right|}{\max\left(v, \omega r_{dyn} \right)} \cdot 100\ \%\ , \tag{1.4}$$

čia v – važiavimo greitis; ω – rato kampinis greitis; r_{dyn} – rato dinaminis spindulys.

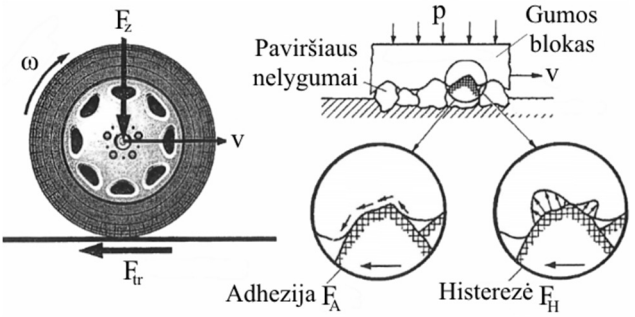
Nagrinėjant gumos medžiagų sąveiką su įvairias paviršiais, trinties jėgą F_{tr} galima išskaidyti į 4 komponentes (Ripka 2012; Ignatyev *et al.* 2015):

Histerezė F_H. Histerezės jėga F_H veikia, kuomet gumos elementas slysta nelygiu kelio paviršiumi (1.6 pav.). Kelio paviršiaus nelygumai priverčia gumą deformuotis. Dėl to išsiskyrusi vidinė energija virsta šiluma. Histerezė priklauso nuo medžiagos savybių, paviršiaus šiurkštumo, slydimo greičio, vertikaliosios apkrovos ir temperatūros (Persson 2001; 2006; 2011).

Adhezija F_A. Ši jėga atsiranda dėl gumos ir kelio paviršiaus tarpmolėkulinio ryšio (1.6 pav.). Gumos elementas priešinasi slydimui, nes adhezijos jėga jį priverčia sukibti su kelio paviršiumi. Adhezijos jėga gali būti įvardijama ir kaip energija, kurios reikia nutraukti molekulinį ryšį tarp gumos ir kelio paviršiaus. Adhezijos jėga dominuoja sausame ir lygiame kelio paviršiuje.

Skysčio trinties jėga F_v. Ši jėga pasireiškia sąveikoje su skysta terpe. Gumos elementui judant skysta terpe, atsiranda skysčio pasipriešinimo jėga. Veikiant tik šiai jėgai, vyksta akvaplaniravimo reiškinys, kuomet padanga praranda kontaktą su kelio paviršiumi, ir vienintele ratą veikiančia trinties jėga tampa skysčio trintis F_v.

Kohezijos jėga F_{koh}. Ši jėga atsiranda dėl gumos elemento sąveikos metu išiskiriančių dalelių (atplaišų) ar elemento paviršiaus įtrūkimų.



1.6 pav. Trinties jėgos komponentės esant sausai kelio dangai (Chen *et al.* 2016)
Fig. 1.6. Components of friction force on a dry road (Chen *et al.* 2016)

Nagrinėjant padangos sąveiką su sniego sluoksniu, dažnai naudojama traukos jėgos (angl. *traction*) sąvoka. Nakajima (2003) ir Seta *et al.* (2003) nagrinėdami padangos traukos jėgos komponentes ant sniego sluoksnio, išskiria 4 jėgas, kurios parodytos 1.7 paveiksle.

Sniego pasipriešinimo jėga F_B. Ši jėga atsiranda dėl sniego pasipriešinimo ir suspaudimo padangai riedant. Padangai grimztant į sniegą, jos priekyje atsiranda laiptelis. Padangai užriedėjus ant jo, dėl sniego suspaudimo pradeda veikti reakcijos jėga.

Sniego kirpimo jėga F_S. Tai tangentine kryptimi veikianti jėga padangos protektoriaus ertmėse (grioveliuose). Riedanti padanga sutankina sniegą ertmėse, o veikiančios radialiės jėgos jį suspaudžia. Dėl to sniegas gali atlaikyti didesnę kirpimo jėgą, nes padidėja kirpimo riba (angl. *shear strength*). Maksimali kirpimo jėga F_S protektoriaus ertmėse gali būti apskaičiuojama (Nakajima 2003):

$$F_S = \int_{A_y} \tau_s \rho dA_y , \tag{1.5}$$

čia τ_s – sniego stiprumas kirpimui; ρ – sniego tankis; A_y – kirpimo plotas protektoriaus ertmėje.

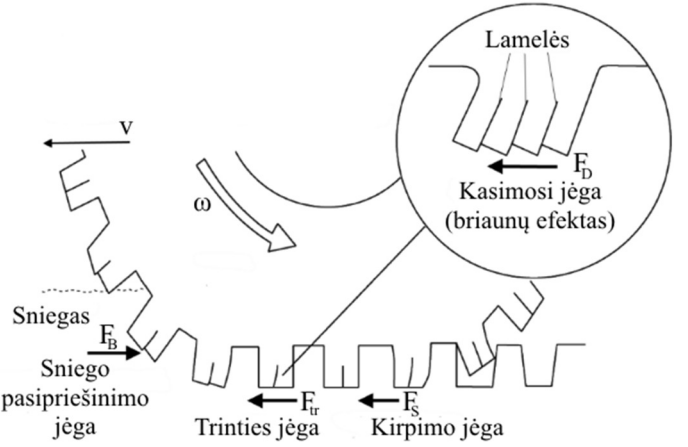
Protektoriaus grioveliuose veikiančius maksimalius tangentinius įtempimus, atsirandančius dėl kirpimo jėgos, galima apskaičiuoti (Giessler *et al.* 2007):

$$\tau_{xy\max} = \frac{3 \cdot F_x}{2 \cdot B \cdot L} , \tag{1.6}$$

čia B – kerpamos srities plotis; L – kerpamos srities ilgis.

Trinties jėga F_{tr}. Tai trinties jėga tarp padangos ir sniego paviršių. Ji priklauso nuo trinties koeficiento ir realaus padangos kontaktinio ploto.

Kasimosi jėga F_D. Ši jėga, dar vadinama briaunų efektu, atsiranda dėl protektoriaus blokų briaunų smigimo į sniego paviršių padangai riedant. Kasimosi jėga priklauso nuo protektoriaus blokų lamelių skaičiaus ir sniego sutankinimo.



1.7 pav. Jėgos, veikiančios padangą, riedančią sniego danga (Nakajima 2003)
Fig. 1.7. Forces acting on the tire rolling the snow covered road (Nakajima 2003)

Tuomet suminė traukos jėga išreiškiama (Choi *et al.* 2012):

$$\sum F = F_{tr} + F_D + F_S - F_B \,. \tag{1.7}$$

Pasipriešinimo F_B ir kirpimo F_S jėgos mažėja didėjant padangos slydimui, o pasiekus 100 % slydimo reikšmę šios jėgos išnyksta. Padangą stabdant, suminė stabdymo jėga išreiškiama apkeitus 1.7 formulės dešinėje pusėje esančių narių ± ženklus.

Iš 1.7 paveikslo matyti, jog slystantys sniego paviršiumi protektoriaus blokai yra lenkiami ir jų briaunos sminga į sniegą. Esant standiems gumos elementams, briaunos neįsiskverbia į sniegą tinkamai. Esant per minkštai gumos medžiagai, elementai yra klupdomi ir dėl to slysta savo šoniniu paviršiumi (Mundl *et al.* 1997).

Nagrinėjant padangos sąveiką su ledo sluoksniu, paprastai išskiriamos jau aptartos 3 trinties jėgos komponentės: histerezė, adhezija ir klampos trintis. Anot Ripka *et al.* (2012), gumos ir ledo trinčiai didelę įtaką turi plonas vandens sluoksnis. Jis išnyksta arba negali būti aptinkamas esant pakankamai žemai aplinkos temperatūrai. Šio sluoksnio susidarymui įtakos turi trinties jėgos galia, kuri gali būti apskaičiuojama:

$$P_{tr} = \mu p A v_s , \tag{1.8}$$

čia v_s – slydimo greitis; A – kontakto plotas; p – slėgis normaline kryptimi.

Autoriai pasiūlė išskirti dvi protektoriaus bloko sąveikos su ledu kontakto zonas: drėgnąją ir sausąją. Drėgnojoje zonoje dominuojanti jėga yra skysčio trintis, sausojoje – mechaninė trinties jėga. Tuomet bendrąją trinties jėgą galima apskaičiuoti:

$$F_{tr} = \mu_s p A_s + \eta v_s \frac{A_d}{h} , \tag{1.9}$$

čia μ_s – sausosios zonos trinties koeficientas; A_s, A_d – atitinkamai sausosios ir drėgnosios zonos kontakto plotas; η – vandens klampa; h – vandens sluoksnio aukštis.

Padangos sąveikos su keliu jėgų arba RSDK reikšmės nustatomos dviem būdais: eksperimentiniais bandymais arba pasitelkiant matematinį modeliavimą. Šiuos būdus nagrinėjančių mokslinių darbų analizė pateikiama tolesniuose poskyriuose.

1.2. Padangos sąveikos su sniegu ir ledu padengta kelio danga eksperimentinių tyrimų apžvalga

1.2.1. Padangos protektoriaus elementų sąveikos eksperimentiniai tyrimai

Padangų sąveikos su žiemos kelių dangomis laboratoriniai ir lauko tyrimai yra pakankamai sudėtingi. Reikalinga speciali matavimų įranga, o laboratorijos turi būti įrengtos, jog būtų galima palaikyti pastovią aplinkos oro temperatūrą bei suformuoti norimą tyrinėti žiemos kelių dangą. Padangos sąveikos su sniegu ir ledu padengta kelio danga eksperimentinių tyrimų laboratorijų nėra daug, o atlikti tyrimus lauke galima tik ribotu laikotarpiu.

Nemažai mokslininkų, siekdami palengvinti šiuos tyrimus, nagrinėja atskirus padangos protektoriaus elementus arba tiesiog gumos bandinius. Šis būdas leidžia atlikti sąveikos su keliu tyrimus, kai padanga yra akstyvame kūrimo etape. Dėl to pakankamai efektyviai galima nagrinėti padangos protektoriaus bloko medžiagas, geometriją, dizainą ir kitus parametrus (Wallaschek, Wies 2013). Gumos medžiagų trintis ženkliai skiriasi lyginant su kitais kietais kūnais. Tą lemia gerokai mažesnis gumos tamprumo modulis ir didelė vidinė trintis (Persson 1999).

Nagrinėjant gumos su ledo sluoksniu sąveiką, pastebima aiški trinties koeficiento mažėjimo tendencija aplinkos oro temperatūrai artėjant link 0 °C. Dauguma autorių tą aiškina trinties šilumos išsiskyrimu gumos su ledu kontaktiniame paviršiuje, dėl kurios ledas yra aptirpdomas ir gali atsirasti plonas vandens sluoksnis.

Pirmieji šį reiškinį išskyrė Bowden ir Hughes (1939), nagrinėdami kietų kūnų sąveiką su ledu. Iki tol buvo manyta, jog vandens sluoksnio atsiradimą lemia tik bandinio prispaudimo slėgis. Taip pat autoriai pastebėjo, jog aplinkos oro temperatūrai mažėjant, trintis tarp bandinių ir ledo padidėja, nes vandens plėvelės formavimosi sąlygos tampa nepalankesnės. Venkatesh (1975), Roberts (1981), Roberts ir Richardson (1981) patvirtino Bowden ir Hughes (1939) hipotezę, atlikę gumos bandinių sąveikos su ledu eksperimentinius tyrimus. Buvo pastebėtas trinties mažėjimas didėjant aplinkos temperatūrai. Taip pat pastebėta, jog didėjant vertikaliajai apkrovai, trintis mažėja, o minkštesnio mišinio guma pasižymi didesne trintimi.

Oksanen ir Keinonen (1982) ir Huemer *et al.* (2001) nustatė, jog gumos medžiagų frikcinės savybės ant ledo labai priklauso nuo kontaktinio slėgio, slydimo greičio ir aplinkos temperatūros.

Higgins *et al.* (2008) pristatė metodą, leidžiantį nustatyti gumos su ledu trinties koeficientą panaudojant mikroskopiją, kuri paremta elektronų skenavimu žemose temperatūrose. Buvo nagrinėjami 5 gumos blokai (–33 °C)–(–0.5 °C) temperatūrose ir 0,005–2,6 m/s slydimo greičių reikšmėse. Maža trintis buvo pastebėta esant dideliems slydimo greičiams. Pagrindine to priežastimi autoriai išskyrė vandens sluoksnio atsiradimą dėl trinties šilumos. Šią prielaidą taip pat sustiprino ir atlikti šilumos srauto skaičiavimai. Analogiška tendencija buvo pastebėta ir prie mažų slydimo greičių aukštoje temperatūroje. Šiuo atveju priežastimi buvo nurodytas druskos kiekio buvimas lede, lemiantis skystos būsenos atsiradimą. Tai pat nustatyta, jog esant dideliems slydimo greičiams ir aukštoms temperatūroms ledo sluoksnis turi didesnę reikšmę trinties koeficientui negu guma. Trinties koeficiento maksimali reikšmė buvo nustatyta esant labai mažam slydimo greičiui (0,005 m/s) ~ –25 °C temperatūroje, kuri atitinka gumos stiklėjimo temperatūrą. Žemesnėje už pastarąją temperatūrą, trintis mažėja, nes guma praranda tamprumo savybes, nebegali deformuotis bei elgiasi kaip kietas kūnas.

Klein–Paste ir Sinha (2010) atliko gumos su gryno ledo bei ledo ir smėlio sluoksniais trinties eksperimentinius matavimus panaudodami slydimo matavimo švytuoklę. Matavimai buvo atlikti –22–0 °C temperatūroje ir švytuoklės skaitinės vertės buvo perskaičiuotos į trinties koeficiento reikšmes. Pastebėta, jog artimoje ledo tirpimo temperatūroje trinties koeficientas buvo nedidelis ir ėmė didėti temperatūrai žemėjant. Žemesnėje negu –5 °C temperatūroje, trinties koeficiento reikšmės kito 0,2–0,5 rėžiuose, tačiau atsiradęs nedidelis sniego sluoksnis ant ledo šias reikšmes gerokai sumažino. Ledo ir smėlio sluoksnio trintis buvo mažiau priklausoma nuo temperatūros ir sniego poveikis taip pat buvo gerokai mažesnis lyginant su grynu ledu.

Rantonen *et al.* (2012) nagrinėjo gumos blokų su dygliais trintį ant ledo. Tyrimams buvo naudotas tiesinis trinties stendas, o rezultatai parodė tiesinę priklau-

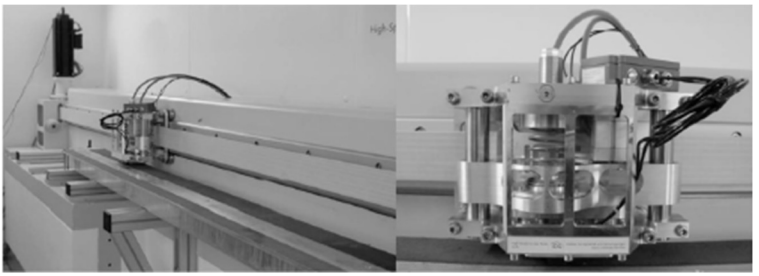
somybę tarp trinties koeficiento ir aplinkos oro temperatūros, kuriai didėjant, trinties koeficiento reikšmės mažėjo. Didesnis dyglių skaičius lėmė didesnį trinties koeficientą. Taip pat pastebėta, jog didėjant slydimo greičiui ir vertikaliajai apkrovai, trintis tarp blokų ir ledo mažėjo. Atlikus temperatūrų matavimus su greitaeige termine kamera, pastebėta, jog gumos paviršius aplink dyglį įšyla labiau lyginant su lygiu paviršiumi. Anot autorių, tą lemia didesnės gumos deformacijos aplink dyglį, kurios atsiranda dėl jo judėjimo.

Skouvaklis *et al.* (2012) atliko gumos bandinių slydimo ant ledo tyrimus panaudodami specialiai tam sukurtą tiesinį tribometrą. Buvo nagrinėjami trys skirtingi bandiniai su skirtinga stiklėjimo temperatūra (–50 °C, –25 °C ir –9 °C) esant skirtingoms vertikaliosioms apkrovoms (0,45–1,5 kN), slydimo greičiui (0,1 ir 1 m/s) ir aplinkos temperatūrai (nuo –13 °C iki –3,5 °C). Pastebėta, jog didėjant slydimo greičiui ir aplinkos oro temperatūrai trinties koeficiento reikšmės mažėjo su visais trimis bandiniais. Šis mažėjimas buvo paaiškintas padidėjusiu ledo paviršiaus tirpimu dėl išsiskiriančios trinties šilumos kontakte. Viskoelastinių gumos savybių įtaka labiau pastebima žemesnėse temperatūrose ir esant mažesniems slydimo greičiams. Minkščiausias gumos bandinys (žemiausios stiklėjimo temperatūros) pasižymėjo didžiausia trinties koeficiento reikšme. Anot autorių, tą lėmė didesnis minkšto bandinio realusis kontaktinis plotas. Padidėjusi vertikalioji apkrova lėmė visų tirtų bandinių trinties sumažėjimą. Didžiausias skirtumas buvo pastebėtas esant mažiausiai apkrovai (0,45 kN). Tai buvo paaiškinta skirtingu bandinių tamprumu, kuris lėmė realaus kontaktinio ploto dydį.

Ella *et al.* (2013) atliko protektoriaus blokų sąveikos su sniegu matavimus su linijiniu tribometru ir rezultatai buvo palyginti su tyrimais lauke. Nagrinėjant vientisą bloką, nustatyta, jog didėjant slydimo greičiui, trinties koeficientas mažėja. Pagrindine to priežastimi nurodomas didesnis šilumos trinties išsiskyrimas, dėl ko aptirpinamas sniego sluoksnis. Tai pat buvo atliekami eksperimentai su skirtinga blokų gumos mišinio stiklėjimo temperatūra (–32 °C, –27 °C ir –15 °C) ir pastebėta, jog žemėjant šiai temperatūrai, trinties koeficientas padidėja. Tai paaiškinama padidėjusiu realiuoju kontaktiniu plotu dėl mažesnio gumos standumo. Lyginant vientisą bloką ir su lamelėmis, nustatyta, jog pastarasis pasižymi didesniu trinties koeficientu prie didesnių slydimo greičių, tačiau vientisas blokas geriau sukimba su sniegu esant mažam slydimo greičiui (0,01 m/s). Toliau buvo nagrinėjamas bloko elementų atsilenkimas, kuomet bloko elementai sminga į sniegą. Buvo nagrinėjama stūmimo jėga (angl. *ploughing force*). Nustatyta, jog stūmimo jėgos reikšmė didėja didėjant slydimo greičiui. Tai paaiškina, kodėl blokai su lamelėmis pasižymi didesne trintimi prie didesnių slydimo greičių. Bloko su lamelėmis elementų įlinkis turi įtakos mažesniam realiojo kontakto plotui ir dėl to padidėja vidutinė kontaktinio slėgio reikšmė. Atlikus papildomus tyrimus, pas-

tebėta, jog didėjant kontaktiniam slėgiui, trinties koeficientas mažėja. Tai paaiškina, kodėl vientisas blokas pasižymėjo didesne sankiba esant mažam slydimo greičiui.

Ripka *et al.* (2012) nagrinėjo gumos blokų su lamelėmis trinties jėgas ant sniego ir ledo sluoksnių. Sąveikos matavimams buvo naudojamas greitaeigis tiesinis stendas (1.8 pav.). Pastebėta, jog trinties koeficientas sumažėja ant kietesnės sniego dangos. Autoriai tai aiškina kasimosi efekto sumažėjimu. Pagrindiniu veiksniu, lemiančiu gumos trinties savybes ant ledo yra išskiriamas vandens sluoksnio aukštis. Jis pranyksta arba negali būti aptinkamas žemose aplinkos temperatūrose, kuomet dominuoja sausoji trintis. Vandens sluoksnio storis paprastai padidėja blokui slystant ledu dėl trinties jėgos galingumo. Tai pat pastebėta, jog ilgesni gumos blokai pasižymi didesne skysčio trinties jėga, todėl pastebimas nežymus trinties jėgos padidėjimas. Lyginant vientisą gumos bloką ir su lamelėmis, pastarasis pasižymi mažesniu trinties koeficientu esant mažiems slydimo greičiams. Tai paaiškinama bloko įlinkiu jam deformuojantis.



1.8 pav. Greitaeigis tiesinis gumos blokų tyrimo stendas (Ripka *et al.* 2009)
Fig. 1.8. High speed linear test rig (Ripka *et al.* 2009)

Lahayne *et al.* (2016) atliko trijų skirtingų gumos bandinių sąveikos tyrimus su 4 skirtingo šiurkštumo ledo sluoksniais. Eksperimentai buvo atlikti (–13 °C)–(–5 °C) temperatūroje, esant 0,15–0,45 MPa prispaudimo slėgiui bei 0,65 m/s slydimo greičiui. Ledo paviršiaus topografija buvo matuojama optiniu būdu. Nustatyta, jog didžiausią įtaką trinties jėgai turi viskoelastinės gumos deformacijos, atsirandančios dėl ledo paviršiaus nelygumų. Taip pat pastebėta, jog gumos su ledu kontakto zonoje atsiranda kelių nanometrų aukščio ištirpusio vandens sluoksnis.

Klapproth et al. (2016) nagrinėjo tris skirtingo kietumo gumos bandinius esant skirtingoms aplinkos oro temperatūroms ir prie skirtingų nominalių prispaudimo slėgių. Pastebėta, jog didėjant slėgiui, trinties koeficientas mažėja visame temperatūrų diapazone (nuo –8 °C iki –1 °C). Tokia pati tendencija pastebėta ir nagrinėjant temperatūrų įtaką. Anot autorių, minkštesnio mišinio guma pasižymi didesniu trinties koeficientu ant ledo dėl didesnio kontaktinio ploto. Autorių atliktame tyrime šį teiginį patvirtino tik tyrimai su mažiausiu prispaudimo slėgiu.

Esant didžiausiai apkrovai, buvo pastebėta atvirkštinė tendencija – kiečiausio mišinio gumos bandinys turėjo didžiausią trinties koeficientą, minkščiausio mišinio – mažiausią. Ši tendencija buvo paaiškinta užpildymo efektu: žinant, jog laisvasis kontaktinio paviršiaus tūris yra tiesiogiai proporcingas gumos standumui, kieto mišinio gumos kontaktinis plotas yra užpildomas vandeniu praėjus ilgesniam laiko tarpui. Todėl buvo padaryta esminė išvada, jog trinties koeficiento sumažėjimas dėl užpildymo efekto labiau pasireiškia nagrinėjant minkšto mišinio gumą.

Linke *et al.* (2017) nagrinėjo sniego stūmimo reiškinį, kuomet slysdami protektoriaus bloko elementai sminga į sniego paviršių. Nagrinėti protektoriaus blokai pagaminti iš politetrafluoretileno (PTFE) siekiant eliminuoti adhezijos ir histerezės jėgas. Eksperimentiniai bandymai atlikti panaudojant tiesinį tyrimų stendą (1.8 pav.) ant sutankinto sniego, kurio tankis ~ 500 kg/m^3. Tyrimų rezultatai parodė, jog egzistuoja optimalus protektoriaus bloko elementų atsilenkimo kampas, kuriam esant perduodamos didesnės trinties jėgos ant sniego dangos. Trinties jėga savo maksimalią reikšmę pasiekia greičiau didėjant atsilenkimo kampui, dėl to bloko elementų slydimo atstumas gali būti sumažintas. Taip pat nustatyta, jog trinties jėgos išsiskyrimas priklauso nuo slydimo atstumo, tačiau nepriklauso nuo slydimo greičio. Pastebėta, jog papildomas bloko elementų skaičius padidina trintį dėl pradinio elementų smigimo į sniego paviršių. Pasiekus nusistovėjusią trintį, elementų smigimo įtaka ženkliai sumažėja, nes tik priekiniai bloko elementai sąveikauja su sniego paviršiumi. Antrasis ir trečiasis elementai surenka pirmojo elemento suardytą sniegą į lameles ir dėl to atsiranda trintis tarp sniego dangos ir sniego, esančio lamelėse.

1.2.2. Padangų sąveikos eksperimentiniai tyrimai

Šiame poskyryje apžvelgiami padangų sąveikos su sniegu ir ledu padengta kelio danga eksperimentinių tyrimų rezultatai. Šie eksperimentiniai tyrimai paprastai atliekami specialiose laboratorijose arba realiomis oro sąlygomis lauke. Bhoopalam *et al.* (2014) savo apžvalginiame darbe išskyrė tris veiksnių grupes, turinčias įtakos padangų sankibos savybėms ant ledo. Tai aplinkos oro sąlygos ir ledo dangos būklė, padangos charakteristikos, TP charakteristikos ir tipas. Taip pat pat autoriai nagrinėjo padangų sąveikos su ledu tyrimų laboratorinę ir lauko įrangą bei padangos ir ledo sąveikos matematinius modelius. Autoriai pabrėžė, jog padangų bandymai ant ledo dangos turi būti atliekami vienodomis sąlygomis: ledas turi būti vienodos tekstūros, paviršiaus šiurkštumo ir temperatūros.

Shoop *et al.* (1994) matavo padangų sankibą ant sniego ir ledo panaudodami tris specialias TP su skirtingomis padangomis. RSDK priklausomybės nuo išilginio slydimo buvo pateiktos kaip matavimų rezultatai. Autoriai pastebėjo, jog kreivių forma yra skirtinga esant skirtingoms kelio dangoms. Taip pat pastebėta, jog

nedidelis sniego kiekis ant lygaus ledo padidina padangų sankibą. Apibendrindami tyrimų rezultatus, autoriai padarė vieningą išvadą, jog padangos slydimo kreivės suteikia pakankamai informacijos apie padangų sankibumo savybes ant sniego ir ledo sluoksnių.

Eddie (1994) ir Macnabb *et al.* (1996) atliko stabdymo, greitėjimo ir skersinės sankibos eksperimentus su skirtingomis padangomis ant lygaus ir šiurkštaus ledo paviršių. Stabdymo pagreičių reikšmės buvo perskaičiuotos į RSDK reikšmes, kurios kito 0,04–0,19. Nežymus RSDK reikšmių pokytis buvo stebimas kintant temperatūrai, tačiau ant ledo esantis santykinis drėgmės kiekis ženkliai sumažino koeficiento reikšmę. TP su stabdžių antiblokavimo sistema (ABS) pasižymėjo 30 % didesniu RSDK lyginant su užblokuotu ir slystančiu ratu. Taip pat pastebėta, jog kai kurių padangų protektoriaus raštas geriau sukibo su danga lyginant su kitais raštais. Dygliuotos padangos pasižymėjo didžiausia RSDK reikšme, o padangos slėgio įtakos nebuvo pastebėta. Nustatyta, jog sunkvežimiai turėjo mažesnes stabdymo, greitėjimo ir skersinio RSDK reikšmes lyginant su lengvaisiais automobiliais. Anot autorių, RSDK reikšmių parinkimas tiriant eismo įvykius turi būti atliktas labai atidžiai, įvertinant kelio dangos ir padangos būklę bei aplinkos veiksnius. Teigiama ABS įtaka stabdant ant ledo dangos buvo pastebėta ir Sokolovskij (2007). Autorius nustatė, jog automobilio su ABS stabdymo efektyvumas yra ~ 10 % didesnis.

Navin *et al.* (1996) atliko eksperimentinius lengvųjų automobilių ir sunkvežimių padangų sąveikos su sniegu ir ledu tyrimus. Tyrimai atlikti (–35 °C)–(–2 °C) oro temperatūrose ir nustatytos maksimalios RSDK reikšmės. Lengvajam automobiliui maksimalios stabdymo, greitėjimo ir skersinės RSDK reikšmės atitinkamai siekė 0,35, 0,20 ir 0,38 esant suspausto sniego dangai. Sunkvežimiams šios reikšmės atitinkamai buvo 0,23, 0,15 ir 0,35. Esant ledo dangai, maksimalūs RSDK lengvajam automobiliui buvo atitinkamai 0,09, 0,08 ir 0,09, o sunkvežimiams – 0,06, 0,04 ir 0,06.

Yamazaki *et al.* (2000) matavo RSDK su ledu reikšmes panaudodami būgninį matavimo įrenginį bei nagrinėjo padangos protektoriaus bloko lamelių skaičiaus įtaką. Labai nežymi lamelių skaičiaus įtaka buvo pastebėta esant mažiems slydimo greičiams –1 °C temperatūroje. Didesnė įtaka pastebėta didėjant slydimo greičiui. –3 °C temperatūroje lamelių skaičiaus įtaka jau buvo pastebima ir prie mažų slydimo greičių dėl mažesnio vandens sluoksnio ant ledo. –6 °C temperatūroje pastebėta, jog padanga su 2 lamelių protektoriaus blokais pasižymėjo didesniu RSDK esant mažiems slydimo greičiams už likusias padangas (3, 4, 5 ir 6 lamelės). Autoriai padarė išvadą, jog labai mažas vandens sluoksnis yra išskiriamas žemesnėse temperatūrose ir padanga, turinti didesnį protektoriaus mišinio standumą ir didesnį kontakto plotą pasižymi geresniu sukibimu. Pažymėtina, jog esant didesniems slydimo greičiams, padangos su didesniu lamelių skaičiumi pasižymi didesne RSDK reikšme.

Martin ir Shaefer (1996) pristatė apibendrintą RSDK reikšmių ant įvairių žiemos kelių analizę. Minėtos dangos buvo sugrupuotos bei pateikiamos 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. RSDK reikšmių kitimas esant skirtingiems žiemos keliams
Table 1.1. Values of force coefficient at different winter road conditions

Sluoksnis	Aprašymas	RSDK reikšmės kitimas
1	2	3
Ledas	Kietas užšąlusio vandens sluoksnis, pakankamai stiprus, jog nebūtų sulaužytas padangos dyglių ar grandinių. Tirpimo temperatūroje pasidengia vandens sluoksniu.	0,054–0,19
Storas „juodasis“ ledas	Ištisinis ledo sluoksnis ant asfalto dangos, sunkiai pastebimas vairuotojų. Yra pakankamai stiprus, jog nesuirtų veikiamas slystančio užblokuoto rato.	0,12–0,26
Plonas „juodasis“ ledas	Ištisinis ledo sluoksnis ant asfalto dangos, sunkiai pastebimas vairuotojų. Nėra pakankamai stiprus, ir paprastai suyra veikiamas slystančio užblokuoto rato.	0,17–0,49
Sniegas ir ledas	Ištisinis suvažinėto sniego sluoksnis, ant kurio paviršiaus susidaro ledas.	0,12–0,39
Sniegas ir ledas su smėliu	Suvažinėto sniego ir ledo sluoksnis su pasklidusiais 3–6 mm skersmens smėlio grūdeliais.	0,15–0,45
Sniegas ir ledas su smėliu provėžose	Suvažinėto sniego ir ledo su provėžomis sluoksnis, kuriame smėlio grūdeliai susitelkia provėžose.	0,20–0,29
Sniegas ir ledas su šviežio sniego sluoksniu	Suspausto sniego ir ledo sluoksnis, ant kurio iškrito 3–100 mm aukščio nesuvažinėtas šviežio sniego sluoksnis.	0,18–0,45
Sniegas ir ledas su seno sniego sluoksniu	Suspausto sniego ir ledo sluoksnis, ant kurio susidarė 100–200 mm aukščio grublėtas, seno traškaus nesuvažinėto sniego sluoksnis.	0,43–0,45
Suvažinėtas sniegas	Sniegas, iškritęs ant sausos dangos ir suvažinėtas TP.	0,24–0,37

1.1 lentelės pabaiga
Table 1.1. ending

1	2	3
Nesuvažinėtas sniegas	Šviežio sniego sluoksnis, dar nei karto nepervažiuotas TP.	0,15–0,42
Stipri šarma	Gausus baltos spalvos sluoksnis, puikiai matomas vairuotojams.	0,37–0,48
Šarma	Baltos spalvos sluoksnis, padengiantis visą eismo juostą. Gerai matomas vairuotojams ir atpažįstamas kaip šarma.	0,48–0,58
Dalinė šarma	Negausi arba dalinė šarma ant kelio paviršiaus, matoma su pertrūkiais.	0,61–0,64
Sausa danga	Visiškai sausa asfalto danga žemoje aplinkos temperatūroje.	0,59–0,72

Visi 1.1 lentelėje pateikti RSDK buvo nustatyti lengvojo automobilio padangoms ir, anot autorių, turėtų būti naudojami kaip orientacinės reikšmės siekiant susidaryti bendras tendencijas ar palyginimus. Taip pat autorių atlikti tyrimai parodė, jog jų pateiktos RSDK reikšmės yra tinkamos naudoti ekspertams, tiriantiems eismo įvykius, tačiau turi būti atsižvelgta į eismo įvykio vietovės būklę ir jo aplinkybes.

Phettaplace *et al.* (2007) nagrinėjo skersinę padangų sąveiką su ledo, sutankinto ir išsklaidyto sniego sluoksniais. Tyrimai atlikti su dviem skirtingomis TP ir trimis padangomis: dvi LT235/75 R15 ir viena 37 × 12,50 R16,5. Išnagrinėjus gautus rezultatus, pastebėta, jog ant sniego sluoksnių maksimalios skersinio RSDK reikšmės su tirtomis padangomis pasiekiamos esant vidutiniam 15° skersridės kampui. Ant ledo dangų maksimalus RSDK pasiekiamas esant 2–4°. Toliau didėjant skersridės kampui, RSDK reikšmės pastebimai sumažėja.

Coutermarsh ir Shoop (2009) pristatė padangos skersinės jėgos priklausomybės nuo skersridės kampo matavimo rezultatus, gautus panaudojant specialią TP, gebančią matuoti padangos išilginę, skersinę ir vertikaliąją jėgas bei kitus padangos parametrus. Matavimai buvo atlikti ant ledo, sutankinto ir šviežiai iškritusio sniego sluoksnių (–14 °C)–(+1.6 °C) lauko temperatūroje. Rezultatai parodė, jog maksimali skersinio RSDK reikšmė ir šio koeficiento priklausomybės nuo skersridės kampo kreivės forma priklauso nuo sniego sluoksnio savybių bei aukščio. Taip pat nustatyta, jog iš visų nagrinėtų sluoksnių, didžiausiu skersiniu RSDK pasižymėjo sutankintas sniegas.

Bachman ir McIntyre (2012) atliko bandymus su 27 padangomis ant sniego nagrinėdami jų sankibos savybes bei riedėjimo pasipriešinimą. Padangos buvo suskirstytos į 2 grupes: didelio sankibumo (8 padangos, pasižyminčios stambiu

protektoriaus raštu) ir standartinės (19 padangų su paprastu ir pakankamai lygiu protektoriumi). Akivaizdu, jog pirmoji grupė padangų pasižymėjo gerokai didesniu sankibumu, tačiau lyginant riedėjimo pasipriešinimo reikšmes, žymaus skirtumo nebuvo pastebėta tarp šių dviejų grupių padangų. Taip pat nenustatyta ir ženkli priklausomybė tarp sankibumo ir riedėjimo pasipriešinimo reikšmių, tačiau pastebėta koreliacija tarp sankibumo ir bendro kontaktinio ploto, ir riedėjimo pasipriešinimo bei protektoriaus gylio reikšmių.

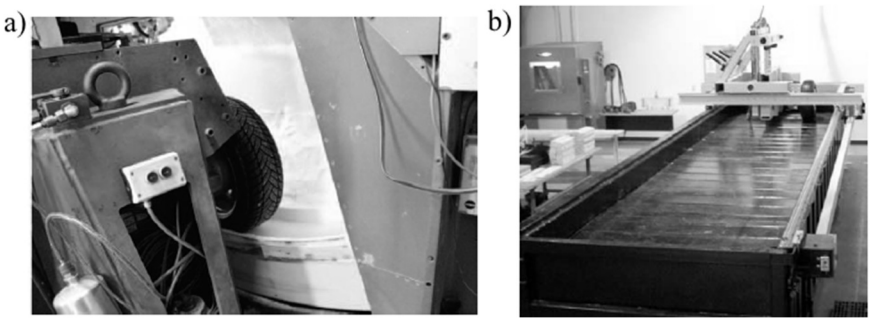
Lee *et al.* (2012) atliko padangų ir sniego sąveikos eksperimentus su specialia TP. Eksperimentai atlikti ant natūralios sniego dangos ir trinties jėgų, riedėjimo pasipriešinimo ir padangos standumo reikšmės buvo nagrinėjamos kaip funkcijos nuo slydimo. Padangos įgrimzdimas į sniegą buvo išmatuotas profiliometru, o sniego stiprumo riba ir sniego gylis nustatyti panaudojant mikropenetrometrą. Nustatyta, jog galinė padanga pasižymėjo mažesniu riedėjimo pasipriešinimu, didesne išilgine trinties jėga ir didesniu išilginiu standumu lyginant su TP priekyje sumontuota padanga. Šį skirtumą lėmė tai, jog galinė padanga riedėjo priekinės padangos sutankintu sniego paviršiumi. Atliktų eksperimentų maksimali RSDK reikšmė siekė 0,47.

Mokslininkai Giessler *et al.* (2007); Giessler *et al.* (2010a); Giessler *et al.* (2010b) ir Giessler (2012) atliko padangų sąveikos su ledo ir sniego sluoksniais eksperimentinius tyrimus. Tyrimams buvo naudojamas būgninis padangų stendas (1.9 a pav.) ir greitaeigė terminė kamera. Buvo nagrinėjama aplinkos oro temperatūros įtaka padangų išilginio ir skersinio sankibumo savybėms. Pastebėta, jog mažėjant aplinkos oro temperatūrai, trinties jėgos mažėjimo gradientas yra didesnis išilginės sąveikos atveju. RSDK reikšmė taip pat didesnė už skersinio RSDK reikšmę. Anot autorių, šį skirtumą lemia optimizuotas padangos protektoriaus raštas išilgine kryptimi bei skirtumas tarp išilginio ir skersinio padangos standumo reikšmių. Aplinkos oro temperatūros įtaka išilginiam ir skersiniam RSDK yra mažesnė ant sniego sluoksnio. Tai pat nustatyta, jog padangos paviršiaus temperatūra padidėja išsiskiriant trinties šilumai. Protektoriaus griovelių temperatūra išlieka beveik nekintanti žemose aplinkos oro temperatūrose lyginant su padangos paviršiaus temperatūra. Padidėjęs trinties šilumos kiekis nepadidina sniego paviršiaus temperatūros, nes išsiskyrusi šilumos energija sunaudojama sniego būsenos virsmui į vandenį. Tarpsnyje tarp laisvojo padangos riedėjimo ir kuomet pasiekiama maksimali išilginės jėgos reikšmė, nepastebėta ženklaus dangos paviršiaus temperatūros kitimo. Šis kitimas trumpam pastebimas iškart pasiekus maksimalią išilginę jėgą, padangai pradėjus slysti. Išsiskyręs trinties šilumos kiekis nepadidina padangos paviršiaus temperatūros aukštesnėje negu 0 °C aplinkos oro temperatūroje, nes energija sunaudojama sniego virsmui į vandenį. Likusi šilumos dalis pasilieka sniego dalelėse, kurios yra išsviedžiamos padangos protektoriumi.

Bhoopalam *et al.* (2014) ir Bhoopalam *et al.* (2015a) pristatė laboratorinį padangų sąveikos su ledu tyrimų metodą, susidedantį iš ledo sluoksnio paruošimo,

eksperimento eigos aprašymo ir rezultatų, gautų iš išilginių slydimo kreivių, analizės. Tyrimams buvo naudotas teramechaninis tiesinis stendas (1.9 b pav.) bei tirtos dvi standartizuotos SRTT P225/60 R16 97S padangos su skirtingu protektoriaus gyliu: 1,6 mm ir 8 mm. Nagrinėta šių parametrų įtaka: vertikaliosios apkrovos, padangos slėgio, protektoriaus gylio, išvirtimo ir suvedimo kampų, ledo paviršiaus ir aplinkos oro temperatūrų. Pastebėtas abiejų padangų RSDK mažėjimas didėjant vertikaliajai apkrovai. Mažėjant padangos slėgiui, RSDK padidėjo. Autoriai pabrėžė, jog padangą eksploatuojant su mažesniu slėgiu, padidėja kontakto plotas, o tai lemia padidėjusią sankibą prie mažų padangos slydimo reikšmių. Esant didesniam slydimui, padidėjęs kontakto plotas padidina ir šilumos kiekio išsiskyrimą, kuris tirpina ledo paviršių, todėl prie didesnio slydimo buvo pastebėtas sankibumo sumažėjimas. Taip pat autoriai pastebėjo, jog padangos protektoriaus gylis turi didelę įtaką sankibumui, tačiau esant didesnėms slydimo reikšmėms ši įtaka yra neesminė. RSDK didėjimas buvo stebimas didėjant aplinkos temperatūrai

Tie patys autoriai atliko eksperimentinius bandymus ir lauko sąlygomis bei palygino rezultatus su laboratoriniais matavimais. Skyrėsi tik vertikaliosios apkrovos įtaka RSDK prie mažų slydimo reikšmių, kuomet buvo pastebėta atvirkštinė tendencija lyginant su laboratoriniais rezultatais. Prie didesnio slydimo apkrovos įtakos nebuvo pastebėta. Taip pat nebuvo pastebėta ir padangos slėgio įtakos RSDK reikšmėms. Autoriai išskyrė du parametrus, anot jų, turėjusius didžiausią reikšmę minėtiems neatitikimams: nepastovi aplinkos oro temperatūra, lemianti padangos savybių kitimą ir skirtinga matavimų eiga (Bhoopalam *et al.* 2015b).



1.9 pav. Laboratoriniai padangų tyrimo stendai: a) būgninis (Wassertheurer, Gauterin 2015); b) tiesinis (Sandu *et al.* 2008)

Fig. 1.9. Labaratory tire test rigs: a) drum (Wassertheurer, Gauterin 2015); b) linear (Sandu *et al.* 2008)

Yokoyama *et al.* (2015) tyrinėjo padangų sankibumo savybes ant sniego esant mažam skersridės kampo kitimu. Autoriai išskyrė tris esminius parametrus, nusakančius padangos sankibumą ant sniego posūkyje: protektoriaus gumos mišinio

tamprumo modulis, protektoriaus blokų efektyvioji briauna ir kontakte esančių protektoriaus ertmių (griovelių) plotas. Atlikti tyrimai parodė, jog padangos skersinė jėga ant sniego priklauso nuo padangos protektoriaus rašto, gumos mišinio ir slėgio pasiskirstymo kontakte.

Salimi *et al.* (2015) atliko padangų skersinės sąveikos eksperimentus ant sauso asfalto, ledo ir sniego sluoksnių naudodami „RT3-Curve“ matavimo įrangą. Tyrimams buvo naudojamos naujos R15 ir 8 mm protektoriaus gylio „Bridgestone Insignia SE200“ žieminės padangos. Išanalizavę rezultatus, autoriai nenustatė jokios priklausomybės tarp važiavimo greičio (30, 50 ir 60 km/h) ir RSDK. Ledo sluoksnis pasižymėjo 55 % mažesne sankiba nei sausas asfaltas, tačiau ledo dalelėmis ir sutraiškytu ledu padengtos kelio dangos pasižymėjo didesne sankiba už sniegu padengtą kelio dangą. Mažo, vidutinio ir didelio storio sniego sluoksniai sumažino sankibą atitinkamai 69 %, 75 % ir 81 % lyginant su sausu asfaltu. Atlikta eismo intensyvumo analizė parodė, jog sniegas, storesnis negu 3 cm žemesnėje nei –15 °C aplinkos oro temperatūroje yra sutankinamas iki slidaus paviršiaus, ant kurio RSDK yra didesnis už ledo, bet mažesnis negu šviežiai iškritusio sniego. Autorių manymu, storesnė negu 3 cm sniego danga turėtų būti kaip įmanoma greičiau pašalinta nuo važiuojamosios kelio dalies.

Hjort *et al.* (2017) atliko išsamią žieminių padangų sąveikos su sniegu, ledu ir sausu asfaltu studiją. Buvo nagrinėjamos trijų tipų žieminės padangos: dygliuotos, šiaurinėms šalims ir europos šalims skirtos padangos. Iš viso buvo nagrinėta 77 padangos, iš kurių 27 buvo naujos ir 50 naudotų, o eksperimentiniai bandymai atlikti nadojant mobilųjį (sniego sluoksniui ir asfalto dangai) ir stacionarųjį (ledo sluoksniui) stendus. Tyrimų rezultatai parodė, jog ant ledo ir sniego sluoksnių, didžiausia sankiba pasižymėjo dygliuotos ir šiaurinėms šalims skirtos padangos. Lyginant naujas ir naudotas padangas, didžiausias skirtumas tarp maksimalių RSDK reikšmių ant ledo sluoksnio pastebėtas tarp dygliuotų padangų, o ant sniego sluoksnio – tarp europos rinkai skirtų padangų.

Savitsky *et. al.* (2017) nagrinėjo padangų praslydimo sistemos kontrolę ant ledo sluoksnio, skirtą elektrinei TP su atskirai ratuose sumontuotais elektros varikliais. Padangų eksperimentiniai bandymai buvo atlikti su tiesiniu tyrimo stendu (1.9 b pav.). Nustatyta, jog tinkamas greičio ir slydimo valdiklių komponavimas gali ženkliai padidinti TP manevringumą jai greitėjant ar važiuojant įkalne ledu padengta kelio danga.

Dörrie *et al.* (2010) nagrinėjo dviejų vienodo dydžio 205/55 R16 žieminių padangų, standartinės („ContiWinterContact TS 810 S“) ir SSR („ContiWinterContact TS 810 S SSR“), skersinę sąveiką ant sauso asfalto ir šaligatvio dangų esant teigiamai aplinkos temperatūrai. Nustatyta, jog SSR padanga pasižymėjo pastebimai didesne šoninio standumo reikšme, kurią lėmė papildomas medžiagos sluoksnis padangos šoninėse sienelėse, padidinantis jų standumą. Taip pat pastebėta, jog aukštesnėje nei 5 °C temperatūroje, šoninio standumo reikšmė pradeda

mažėti. Didžiausias pokytis matomas 5–15 °C temperatūroje. Šoninio standumo mažėjimas šiuo atveju nepriklausė nuo padangos slėgio (2,5 ir 3 bar). Slėgio įtaka nebuvo nustatyta ir lyginant abi padangas, nes jos buvo su standartiniu žieminiu protektoriaus raštu, kurio standumas mažėja didėjant temperatūrai. Taip pat autoriai palygino žieminės ir vasarinės padangų šoninio standumo priklausomybę nuo apkrovos, kur aiškiai matyti, jog vasarinė padanga pasižymi didesniu šoniniu standumu bei netiesine priklausomybe. Lyginant dvi skirtingas kelio dangas, pastebėta, jog didesnis padangų šoninis standumas buvo ant šaligatvio dangos. Autoriai tai paaiškino didesniu efektyviuoju kontaktiniu plotu tarp padangos ir kelio paviršiaus.

Iš eksperimentinių tyrimų apžvalgos matyti, jog padangos sąveika su ledo ir sniego dangomis yra mokslininkų plačiai nagrinėjama problema. Dėl klimato atšilimo didėjant vidutinei žiemos laikotarpio oro temperatūrai, pastebimas patižusio sniego (tižės) ar ledo dangų dažnesnis atsiradimas. Padangos sąveika su šiomis dangomis nėra pakankamai ištirta. Artimiausias mokslinis darbas (Lee, Huang 2016) nagrinėja padangos sąveiką su šlapiu sniegu. Autoriai šią sniego dangą apibrėžia remdamiesi tarptautiniu sniego klasifikavimu (Fierz *et al.* 2009). Jame šlapias sniegas įvardijamas kaip sniego danga, kurioje yra 3–8 % vandens. Remiantis šiuo klasifikavmu, patižusio sniego dangoje vandens kiekis yra didesnis nei 15 %.

1.3. Padangos sąveikos su sniegu ir ledu padengta kelio danga matematinių modelių apžvalga

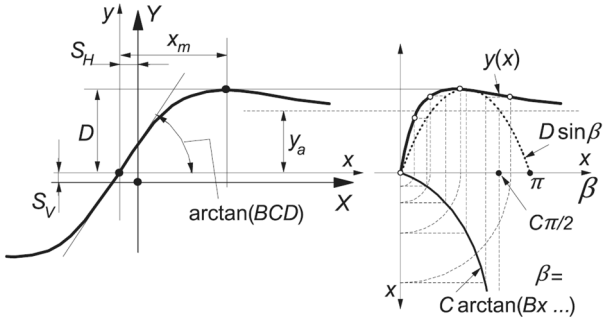
Padangos sąveikoje su sniegu ir ledu padengta kelio danga vykstantys sudėtingi fizikiniai procesai aprašomi matematiniais modeliais, kurie apžvelgiami šiame poskyryje. Modeliai išskirti į dvi grupes: fizinius ir empirinius bei bagtinių elementų (BE) analizės modelius.

1.3.1. Fiziniai ir empiriniai modeliai

Pacejkos modelis yra vienas iš plačiausiai taikomų padangų modelių mokslinuose padangos sąveikos tyrimuose. Pirminė šio modelio versija buvo pristatyta Bakker *et al.* (1987). Modelį sudarė empirinė formulė, įvertinanti šoninės ir stabdymo jėgų bei lygiavimosi momento charakteristikas. Pacejka ir Bakker (1992) pristatė naujesnę modelio versiją, kurią pavadino „Magiškąja formule“. Modeliu galima tiksliai aprašyti nusistovėjusią (angl. *steady-state*) padangos elgseną. Tinkamai parenkant koeficientų reikšmes, galima gauti šoninės jėgos arba momento apie z ašį priklausomybę nuo skersridės kampo bei išilginės jėgos priklausomybę nuo slydimo. Bendroji Pacejkos modelio išraiška (Pacejka 2012):

$$y(x) = D\sin\{C\tan^{-1}[B(x+S_h) - E[B(x+S_h) - \\ -\tan^{-1}(B(x+S_h))]]\} + S_v \quad , \tag{1.10}$$

čia *B, C, D, E* – atitinkamai standumo, formos, maksimalios reikšmės ir kreivės įlinkio koeficientai; S_h ir S_v – perstūmos koeficientai atitinkamai horizontalia ir vertikalia kryptimis; *x* – įvesties parametras: (skersridės kampo α arba išilginio slydimo S_x reikšmė); *y* – išvesties parametras (F_x, F_y arba M_z). Koeficientų grafinės reikšmės pateiktos 1.10 paveiksle.



1.10 pav. Pacejkos modelio koeficientų grafinės reikšmės (Pacejka 2012)
Fig 1.10. Meaning of Pacejka model curve parameters (Pacejka 2012)

Pacejkos modelis labai dažnai naudojamas aproksimuoti eksperimentiškai arba modeliuojant gautas slydimo kreives. Paprasčiausiai modelį aproksimuoti galima naudojant mažiausiųjų kvadratų skirtumo metodą, kurį pirmieji pasiūlė Van Oosten ir Bakker (1992). Wassertheurer ir Gauterin (2015) pritaikė šį modelį savo gautiems eksperimentiniams duomenims su trimis skirtingomis žieminėmis padangomis ant sniego ir ledo sluoksnių. Naudojant šį modelį buvo gautos charakteristikos, kurios panaudotos statistinėje analizėje išvedant maksimalių RSDK empirines formules kiekvienai padangai esant skirtingiems sluoksniams. Buvo nustatytos maksimalių skersinio ir išilginio RSDK mažėjimo tendencijos priklausomai nuo didėjančio skersridės kampo ir vertikaliosios apkrovos.

Padangos sąveikos su keliu moksliniuose tyrimuose taip pat dažnai naudojamas šepetėlių (angl. *brush*) modelis. Jį sudaro išilgai išdėstyti tamprūs šeriai, judantys padangos su keliu kontakto plote. Esant padangos šoniniam arba išilginiam slydimui, šeriai deformuojami įlinksta ir pradeda veikti šoninės arba išilginės jėgos. Esant maksimaliam šerių įlinkiui, adhezijos jėga pasikeičia į slydimo jėgą (Gomez *et. al.* 2017). Panaudojant šį modelį, skersinė jėga esant simetriškam kontaktinio slėgio pasiskirstymui, apskaičiuojama:

$$F_y = -C_\alpha \tan(\alpha) f(\lambda) \, . \tag{1.11}$$

Tuomet funkcija $f(\lambda)$ lygi:

$$f(\lambda) = \begin{cases} \lambda(2-\lambda), \lambda \le 1 \\ 1, \lambda > 1 \end{cases}. \tag{1.12}$$

Parametras λ apskaičiuojamas pagal:

$$\lambda = \frac{F_z \mu}{2 C_\alpha |\tan \alpha|}. \tag{1.13}$$

Detalesnis modelio matematinis aprašymas pateiktas Pacejka (2012). Autoriai Svendenius *et al.* (2009) ir Ella *et al.* (2013) šį modelį pritaikė padangos sąveikai su sniegu ir ledu, validuodami jį eksperimentiniais tyrimais.

Toliau nagrinėjami fiziniai ir empiriniai modeliai, aprašantys padangos arba gumos elementų sąveiką su ledu ir sniegu.

Evans *et al.* (1976) pirmasis teoriškai susiejo slystančių kūnų ledo paviršiumi trinties koeficiento priklausomybę su trinties šilumos išsiskyrimu. Trinties jėgą galima išreikšti šilumos kiekių suma:

$$F_{tr} = Q_{sl} + Q_I + Q_m, \tag{1.14}$$

čia Q_{sl} – šilumos kiekis, tenkantis slystančiam kūnui; Q_I – šilumos kiekis, tenkantis ledo paviršiui; Q_m – šilumos kiekis, reikalingas tirpinti ledą.

Tuomet trinties koeficientą tarp slystančio kūno ir ledo paviršiaus galima išreikšti:

$$\mu = \frac{A\lambda(T_m - T_a)}{F_z v_s} + \frac{B(T_m - T_a)}{F_z \sqrt{v_s}} + \mu_m, \tag{1.15}$$

čia *A, B* – koeficientai, įvertinantys slystančio kūno geometriją, matmenis ir kontakto plotą; λ – šilumos laidumo koeficientas; T_a – aplinkos oro temperatūra; T_m – ledo tirpimo temperatūra; F_z – vertikalioji apkrova; μ_m – koeficientas, nustatytas iš eksperimentų ($\mu_m = 0{,}005$).

Hayhoe ir Shapley (1989) pristatė padangos su ledu sąveikos modelį, kuris geba nustatyti padangos kontakte veikiančias trinties jėgas. Modelyje priimama prielaida, jog slydimo trinties jėga susideda iš sausosios ir klampos trinties komponenčių. Klampos trintis atsiranda dėl ant ledo atsiradusio vandens sluoksnio. Modelyje nevertinamas pereinamasis procesas tarp sausosios ir tirpimo zonų ir padangos protektoriaus raštas.

Peng *et al.* (1999) sukūrė padangos sąveikos su ledu modelį, paremtą trimis pagrindinėmis mechanikos lygtimis ir trinties šilumos teorija. Kontakto plotas buvo padalintas į dvi zonas: skysčio trinties ir sausąją. Modelyje buvo priimtos šios esminės prielaidos: padangos protektorius buvo nagrinėjamas kaip visiškai

lygaus paviršiaus kietas kūnas; trinties koeficientas sausojo kontakto zonoje yra pastovus; skystis nagrinėjimas kaip nespūdus Niutoninis, tekėjimas yra laminarinis; kontakte išsiskyręs šilumos kiekis yra perduodamas padangos ir ledo paviršiams. Modelis nagrinėja stačiakampio ir elipsės formos kontakto formas. Autoriai nustatė, jog stačiakampio forma pasižymi geresne sankiba ant ledo.

Po metų tie patys autoriai (Peng *et al.* 2000) pristatė paprastesnį padangos sąveikos modelį, kuris šįkart buvo paremtas šilumos balanso ir ledo tirpimo dėl trinties teorija. Trinties koeficientas stačiakampio formos padangos kontaktui gali būti išreiškiamas:

$$\mu = \mu_d \left(\frac{x_m}{l_c} \right)^2 + \left(C_i + C_t \right) \Delta T_m \left(1 - \frac{x_m}{l_c} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{l_c}{v} \right)^{\frac{1}{2}} \left(p_{av} v_s \right)^{-1}. \qquad (1.16)$$

Elipsės formos kontakto trinties koeficientas apskaičiuojamas:

$$\mu = \mu_d \left(\frac{x_m}{l_c} \right) y_{1m} + \left(C_i + C_t \right) \Delta T_m \left(1 - \frac{x_m}{l_c} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{l_c}{v} \right)^{\frac{1}{2}} \left(p_{av} v_s \right)^{-1} y_{2m}, \qquad (1.17)$$

čia x_m – sausosios zonos kontakto ilgis; l_c – bendras kontakto ilgis; p_{av} – vidutinis kontaktinis slėgis; ΔT_m – temperatūros, kurioje prasideda ledo tirpimas ir ledo arba padangos paviršiaus temperatūrų skirtumas; v_s – padangos slydimo greitis. C_i, C_t – ledo ir padangos koeficientai apskaičiuojami pagal formulę: $C = 2k/\sqrt{\pi\alpha}$; y_{1m}, y_{2m} – geometriniai kontakto ploto parametrai.

Atlikę modelio validavimą, autoriai pastebėjo, jog sankibumas mažėja didėjant ledo paviršiaus temperatūrai ir padangos slydimo greičiui.

Giessler *et al.* (2010a) pristatė išilginio RSDK priklausomybės nuo slydimo modelį, kuriuo buvo vertinamos ribinės slydimo kreivės reikšmės ant ledo ir sutankinto sniego sluoksnių:

$$\mu_x \left(s \right) = -T_o \frac{b_T}{2} \left(x_I \, p_{av} S_x v \right)^{-1} \sqrt{\frac{\pi}{t_c}}, \qquad (1.18)$$

čia b_T – šiluminis penetracijos koeficientas; x_I – šilumos kiekio, tenkančio ledo arba sniego sluoksniui, santykis; t_c – kontakto trukmė.

Skouvaklis *et al.* (2012) ir Ella *et al.* (2013) modifikavo Giessler *et al.* (2010a) modelį pritaikydami jį gumos bandinių sąveikos su ledu ir sniegu sluoksniams. Modelis paremtas kintamo šilumos srauto tekėjimu kietame kūne ir apjungia trinties koeficiento reikšmę su šilumine energija, kuri perduodama ledo paviršiui slydimo metu. Priimama prielaida, jog ledo paviršius sugeria visą išsiskiriančią šilumos energiją dėl didesnio šilumos laidumo koeficiento. Tuomet trinties koeficientas išreiškiamas:

$$\mu = \frac{\Delta T}{2 v_s \sigma_n} \sqrt{\lambda C_p \rho} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{t_c}}, \tag{1.19}$$

čia ΔT – pradinės ir ledo tirpimo temperatūrų skirtumas; σ_n – normaliniai įtempiai; C_p – specifinė šiluma.

Wiese *et al.* (2012) pasiūlė analitinį termodinaminį ledo ir gumos sąveikos modelį, kuriame guma nagrinėjama įvertinant jos paviršiaus šiurkštumą, o ledas nagrinėjamas kaip visiškai lygus paviršius. Taip pat priimta prielaida, jog vienintelė jėga, veikianti slystantį gumos bandinį yra skysčio trintis. Vandens sluoksnio aukštis išreiškiamas iš pusiausvyros lygties, kurioje aprašoma šiluma, išsiskirianti dėl skysčio trinties jėgų, energija, reikalinga iš kietos ledo būsenos pereiti į skystąją (ledo tirpimas) ir šilumos srautas, tenkantis ledo paviršiui. Tai pat įvertintas vandens išspaudimo reiškinys, kuris įvyksta dėl gumos nelygaus kontaktinio paviršiaus. Gumos paviršiaus mikronelygumų dydis ir realaus kontakto plotas gautas panaudojant Grynvudo–Wiljamsono kontakto teoriją ir palygintas su realiu eksperimentu. Gautoji vandens sluoksnio aukščio diferencialinė lygtis sprendžiama esant nusistovėjusiam gumos slydimui panaudojant analitinį aproksimavimą. Apskaičiuotos šlyties jėgos suintegruojamos kontaktiniame plote ir nustatoma vidutinė trinties koeficiento reikšmė, kurios galutinė išraiška:

$$\mu = \frac{2\mu_\infty}{\xi_a^2}\left(I_1 + I_2 + I_3\right), \tag{1.20}$$

čia ζ_a – bedimensinė koordinatė; μ_∞, I_1, I_2, I_3 – koeficientai, gauti atlikus papildomus skaičiavimus.

Persson (2015) sukūrė gumos bloko su ledu sąveikos modelį, kuriuo nagrinėjo netolygų trinties šilumos išsiskyrimą kontaktiniame paviršiuje. Bloko kontaktinis paviršius buvo nagrinėjamas kaip lygus, o ledo paviršiuje buvo įvertinti makro nelygumai:

$$\mu = \sqrt{\frac{\pi \rho C_p \lambda}{v_s L_x}} \cdot \frac{T_c - T_o}{\sigma_y}, \tag{1.21}$$

čia L_x – makro nelygumo ilgis; σ_y – ledo penetracijos kietumas; T_c – kritinė temperatūra, artima ledo tirpimo temperatūrai.

Gauti rezultatai parodė, jog dėl netolygaus trinties šilumos išsiskyrimo, ledo tirpinimas visoje kontakto srityje vyksta ne vienodai. Ledo būsenos perėjimas iš kietos į skystąją neįvyksta staiga, bet yra pakankamai spartus.

Klapproth *et al.* (2016) pristatė teorinį gumos bloko sąveikos su ledu modelį, kuriame įvertinami bloko kontaktinio paviršiaus mikronelygumai ir dominuoja skysčio trintis. Ledas nagrinėjamas kaip lygus paviršius. Modelyje sprendžiamos

termodinamikos ir hidrodinamikos lygtys. Taip pat nagrinėjamas užpildymo efektas, kuris pasireiškia visišku kontaktinio paviršiaus mikronelygumų užpildymu vandeniu po tam tikro slydimo laiko. Galutinė modelio išraiška:

$$\mu(t) = \frac{\kappa \eta v}{p_{nom}} \cdot \frac{1}{h(t)}, \tag{1.22}$$

čia κ – santykinis kontaktinis plotas; $h(t)$ – vidutinis vandens aukštis apskaičiuojamas iš diferencialinių lygčių; p_{nom} – nominalus kontakto slėgis.

Bhoopalam *et al.* (2016) pristatė padangos ir ledo sąveikos modelį, paremtą temperatūros padidėjimu padangos kontakte. Šis padidėjimas yra paremtas slėgio pasiskirstymu kontakte ir šiluminėmis protektoriaus mišinio ir ledo paviršiaus charakteristikomis. Kontakto plotas sugrupuojamas į sausąją ir šlapiąją sritis. Tuomet panaudojamas šilumos balanso principas nustatant vidutines trinties koeficiento reikšmes padangos kontakte.

Lee *et al.* (2005) sukūrė pusiau analitinį sniego ir padangos sąveikos modelį. Sniego deformacijos ir padangos su sniegu sąveikos jėgos yra susietos su Drukerio-Pragerio takumo riba. Trinties koeficientas tarp padangos, kuri nagrinėjama kaip standus kūnas, ir sniego gali būti išreiškiamas:

$$\mu = \mu_o \left(1 - \exp\left(-0{,}1 N_{mob}\right)\right) + f_r, \tag{1.23}$$

čia μ_o – pradinis trinties koeficientas; N_{mob} – mobilumo numeris; f_r – išilginis riedėjimo pasipriešinimo koeficientas.

Remdamasis šiuo modeliu, mokslininkas J. Lee toliau teoriškai nagrinėjo padangos ir sniego sąveiką (Lee *et al.* 2006; Lee 2011a; 2013). Visuose autoriaus darbuose sniegas buvo nagrinėjamas remiantis Drukerio-Pragerio plastiškumo teorija. Li *et al.* (2009) išplėtė šį modelį į stochastinį, panaudodami daugianarį chaoso metodą (angl. *polynomial chaos approach*). Modelyje padanga gali būti nagrinėjama kaip kietas arba deformuojamas kūnas. Autoriai sukūrė algoritmą, leidžiantį parinkti tinkamą padangos elgseną pagal kontaktinį slėgį.

1.3.2. Baigtinių elementų analizės modeliai

Baigtinių elemetų metodas padangų sąveikos tyrimuose pradėtas naudoti aštuntajame praeito amžiaus dešimtmetyje (Nakajima 2011).

Seta *et al.* (2003) pristatė trimatį padangos sąveikos su sniegu modelį, kuriame įvertinamas protektoriaus raštas. Padanga aprašoma BE, o sniegas baigtinių tūrių metodu. Sniegas nagrinėjamas kaip homogeniška ir tampriai plastiška medžiaga. Tam naudojamas Moro–Kolumbo takumo modelis. Trintis tarp padangos ir sniego paviršiaus modelyje nebuvo vertinama.

Shoop *et al.* (2006) sukūrė trimatį BE padangos modelį, kuriuo buvo nagrinėjamas padangos riedėjimas sniego sluoksniu. Sniegas buvo aprašomas kaip labai deformuojama ir spūdi medžiaga panaudojant Drukerio–Pragerio plastiškumo teoriją. Trintis tarp padangos ir sniego aprašoma trinties koeficiento reikšme, kuri lygi 0,3. Buvo pastebėta, jog esant mažoms vertikaliosioms apkrovoms ir minkštam sniego sluoksniui padangos deformacijos yra labai mažos. Dėl to autoriai linkę daryti išvadą, jog modeliuojant padangos sąveiką su minkštu (šviežiu) sniegu, kai kuriais atvejais padanga gali būti vertinama kaip standus kūnas.

Lee (2008; 2011) pristatė sniego ir padangos BE modelį, sukurtą „Abaqus Explicit“ programa. Buvo nagrinėjamos lygaus paviršiaus ir su protektoriumi padangos. Sniego deformacijoms aprašyti panaudotas Drukerio-Pragerio plastiškumo modelis, sukurtas 200 kg/m^3 tankio sniegui. Trinties koeficiento reikšmė atliekant simuliaciją buvo lygi 0,3. Iš modeliavimo rezultatų autorius nustatė, jog padangos grimzdimas į sniegą didėjo didėjant vertikaliajai apkrovai ir skersridės kampui.

Choi *et al.* (2012) pristatė skaitinį metodą, skirtą padangos ir sniego sąveikai aprašyti. Tam buvo naudojami BE ir baigtinių tūrių metodai, kurie tarpusavyje sujungti Oilerio–Lagranžo metodu. Sukurti 4 padangų trimačiai modeliai, tiksliai aprašant protektoriaus raštą. Sniegas, kurio tankis 200 kg/m^3, 350 kg/m^3 ir 500 kg/m^3, aprašytas panaudojant Drukerio–Pragerio plastiškumo teoriją. Padangos gumos elementai aprašomi Mooney–Rivlin hiperelastinių medžiagų modeliu. Modeliavimo rezultatai parodė, jog padangos protektoriaus gyliui padidėjus nuo 5 mm iki 8 mm, traukos jėgos efektyvumas (angl. *traction efficiency*) padidėjo 2,5 karto.

Wu *et al.* (2014) sukūrė protektoriaus bloko BE sąveikos modelį su įvairiomis kelių dangomis, taip pat ir ledo sluoksniu. Gumos deformacijos aprašomos Mooney–Rivlin hyperelastiniu modeliu. Kelio danga aprašoma kaip lygus ir nedeformuojamas kūnas, o bloko kontaktas su kelio danga aprašomas trinties koeficientu.

1.4. Ledą ir sniegą tirpinančių medžiagų veiksmingumo tyrimų analizė

Padangos sąveikos su sniegu ir ledu padengta kelio danga mokslinių darbų analizė parodė, jog padangos sankiba su šiais sluoksniais yra ženkliai mažesnė lyginant su sausa kelio danga. Dėl to, spartus šių sluoksnių tirpinimas ir šalinimas yra ypač aktualus eismo saugumui žiemos laikotarpiu.

Efektyviausias būdas šalinti sniego ir ledo dangą yra ją tirpinant cheminėmis medžiagomis. Šių medžiagų efektyvumo ir veiksmingumo tyrimai dažniausiai atliekami laboratorijose. Chappelow et al. (1992) pateikia dažniausiai naudojamų eksperimentinių tyrimų metodus. Išskiriami 3 pagrindiniai metodai tirti kietų ir

skystų ledą tirpinančių medžiagų (LTM) efektyvumą: ledo tirpinimo, ledo penetracijos ir ledo nupjovimo.

NaCl yra dažniausiai kelių priežiūros tarnybų naudojama LTM, todėl Nilssen *et al.* (2016) atliko ledo tirpinimo su šia medžiaga laboratorinių tyrimų rezultatų analizę. Buvo nagrinėjamas jau minėtasis ledo tirpinimo metodas. Autoriai pastebėjo, jog šis metodas pasižymi pakankamai didele rezultatų sklaida ir negali nustatyti visiško ledo ištirpimo. Didelę sklaidą lemia nevienodas užberiamos LTM kiekis, šaldymo įranga, matavimų kiekis, nevienodas LTM grūdelių dydis, šilumos įtaka ledo bandiniams ir sunkumai, iškylantis surenkant ištirpusį vandens kiekį.

Akin ir Shi (2012) atliko 4 skirtingų laboratorinių ledo tirpinimo testų bei skirtingų LTM efektyvumo įvertinimą. Tyrimai buvo atlikti esant –17 °C, –10 °C ir –1 °C aplinkos oro temperatūrai. Nustatyta, jog $CaCl_2$ ir $MgCl_2$ buvo efektyvesnės medžiagos negu NaCl. $MgCl_2$ tirpalas buvo nežymiai efektyvesnis už $CaCl_2$ tirpalą, tačiau modifikuotasis ledo tirpinimo testas parodė, jog $CaCl_2$ kietoje būsenoje yra veiksmingesnis už $MgCl_2$.

Shi *et al.* (2013) atliko žiemos kelių priežiūros tarnybų dažniausiai naudojamų LTM efektyvumo analizę. Nagrinėtų kietų ir skystų LTM efektyvumas buvo tiriamas –18 °C, –9 °C ir –1 °C aplinkos oro temperatūroje panaudojant ledo tirpinimo metodą. Autoriai nustatė, jog naudojant NaCl kietoje būsenoje, turi praeiti tam tikra laiko trukmė (~60 min), jog ši LTM galėtų pasiekti visą tirpinimo veiksmingumą. Esant –18 °C kitos tirtos LTM ($MgCl_2$ ir $CaCl_2$) veiksmingumo piką pasiekia praėjus perpus trumpesniam laikui. Panaudojat elektromechaninį metodą, buvo atlikti korozijos poveikio lengvajam plienui tyrimai. Nustatyta, jog NaCl turėjo didžiausią poveikį iš visų LTM.

Bulevičius *et al.* (2014) ir Laurinavičius *et al*. (2016) atliko kelių priežiūros tarnybų dažniausiai naudojamų LTM efektyvumo ir veiksmingumo studiją siekiant optimizuoti kelių priežiūrą žiemą. LTM buvo tiriamos laboratorijoje ir realiomis eismo sąlygomis lauke. Atlikus ledo tirpinimo laboratorinius bandymus su skirtingomis LTM, mokslininkai nustatė, jog –3 °C temperatūroje nagrinėtų LTM veiksmingumas gali tęstis iki 120 min, –6 °C temperatūroje nuo 50 iki 70 min, 9 °C temperatūroje nuo 15 iki 22 min, –15 °C temperatūroje nuo 30 iki 32 min ir –20 °C temperatūroje nuo 12 iki 14 min. Taip pat nustatyta, jog su visomis LTM ledo tirpimo intensyvumas sumažėja tarp 10 ir 20 min. Atlikus eksperimentinius tyrimus su optiniu trinties matavimo prietaisu, pastebėta, jog naudojant $CaCl_2$, gaunamos didesnės trinties reikšmės lyginant su NaCl.

Cheminių medžiagų prieš užšalimą (MPU) naudojimas yra taip pat efektyvus ledo sluoksnio šalinimo būdas. Cuelho ir Harwood (2012) ir Hossain et al. (2014) tyrė kelių priežiūros tarnybų dažniausiai naudojamų MPU efektyvumą atlikdami eksperimentus laboratorijoje ir lauke. Autoriai nustatė, jog tinkamai naudojant MPU, gali būti susilpninta adhezija tarp sutankinto sniego ir kelio paviršių. Taip

pat pastebėta, jog MPU naudojimas ant ne didelio iškritusio sniego sluoksnio yra žymiai efektyvesnis už LTM naudojimą. MPU efektyvumas priklauso nuo snygio intensyvumo ir jo trukmės. Esant pakankamai ilgam ir intensyviam snygiui, MPU naudojimas yra neefektyvus.

Giuliani *et al.* (2012) nagrinėjo MPU savo sudėtyje turinčios NaCl, efektyvumą ant skirtingų asfalto dangos mišinių. Nustatyta, jog medžiaga pastebimai sulaiko ledo formavimąsi ant tirtų asfalto paviršių. Taip pat pagreitina ledo tirpinimą ir sumažina adheziją tarp ledo ir asfalto paviršių.

Shi *et al.* (2014) išanalizavę atliktų laboratorinių ir lauko tyrimų duomenis, nustatė, jog NaCl tirpalas yra tinkamiausias naudoti ant palyginti šiltų paviršių siekiant apsaugoti juos nuo apledėjimo. $MgCl_2$ yra efektyvesnis ant šaltesnių paviršių, kuomet aplinkos oro temperatūra yra žemesnė nei –12 °C.

Wahlin *et al.* (2014) atlikę laboratorinius bandymus, nustatė, jog NaCl tirpalas turi didelę įtaką sutankinto sniego dangos silpnėjimui netgi tuomet, kai sniegas nėra tirpinamas. Tęsdami pradėtus tyrimus, Wahlin ir Klein-Paste (2015) tyrė skirtingų medžiagų poveikį sutankinto sniego ir kelio paviršiaus adhezijos jėgoms. Eksperimentiniams tyrimams buvo naudojamas mikropenetracinis kietumo matavimo metodas. Atlikus gautų rezultatų analizę, nustatyta, jog adhezija tarp sniego ir kelio paviršių priklauso ne tik nuo vandens kiekio, bet ir nuo naudojamų cheminių medžiagų rūšies. Taip pat pastebėta, jog įdėjus nedidelį cukraus kiekį į NaCl tirpalą, padidėja sniego su šiuo tirpalu mišinio kietumas. Efektyvesnių medžiagų (kalio formiato) naudojimo efektas buvo ženklus, lyginant su tradiciniu NaCl. Nustatyta, jog kalio formiato kiekis gali būti trečdaliu mažesnis, norint pasiekti tą patį rezultatą lyginant su NaCl.

Klein-Paste ir Potapova (2014) tyrinėjo adiabatinį ledo tirpimą, kai šilumos mainai tarp aplinkos ir naudotos LTM yra nevertinami. Buvo naudojamas NaCl tirpalas ir atlikti 54 eksperimentiniai matavimai specialioje laboratorijoje. Taip pat autoriai sukūrė šilumos mainų matematinį modelį, leidžiantį nustatyti ištirpusio ledo kiekį ir jo temperatūrą. Buvo nustatytas stiprus koreliacinis ryšys tarp modeliavimo ir eksperimentinių rezultatų.

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Atlikus mokslinės literatūros analizę, pastebėta:

1. Mokslinių darbų, nagrinėjančių padangos sąveiką su žiemos kelių dangomis analizė parodė, jog sniego ir ledo dangos yra pakankamai ištirtos. Mažai nagrinėjama sąveika su patižusio sniego ar ledo dangomis, kurių esminė susidarymo sąlyga yra teigiama aplinkos oro temperatūra.

2. Padangų sąveikos su sniego ir ledo dangomis eksperimentiniai tyrimai gali būti išskiriami į dvi grupes: kai nagrinėjama visa padanga arba kai nagrinėjami atskiri padangos protektoriaus elementai (blokai).

3. Padangos sąveiką su sniegu ir ledu nagrinėjančius matematinius modelius galima suskirstyti į fizinius ir BE analizės. Modeliuojant sąveiką su šlapia ledo danga, histerezės ir adhezijos jėgos yra nevertinamos, o pagrindine trinties jėgos komponente laikoma skysčio trintis. BE modeliuose padangos sluoksnių medžiagos deformacijos dažniausiai aprašomos hiperelastiniu Mooney–Rivlin medžiagos modeliu, o sniego deformacijoms aprašyti naudojama Drukerio–Pragerio plastiškumo teorija.

4. Kelių priežiūros tarnybų naudojamų medžiagų, skirtų tirpinti ledo ir sniego sluoksnius, veiksmingumas yra skirtingas ir priklauso nuo aplinkos oro temperatūros ir sąveikos su ledu trukmės.

Išanalizavus mokslinę literatūrą, formuluojami disertacijos uždaviniai:

1. Sukurti padangos protektoriaus elemento sąveikos modelį, kuriame būtų įvertintos gumos tamprumo savybės, kontakto plotas su kelio danga ir jame išsiskiriantis šilumos kiekis.

2. Eksperimentiškai nustatyti aplinkos oro temperatūros poveikį padangos skersinės ir išilginės sankibos su ledo danga charakteristikoms.

3. Sudaryti padangos sąveikos su sniego ir vandens, taip pat ledo ir vandens mišinių sluoksniais eksperimentinių tyrimų metodiką bei nustatyti padangos išilginio ir skersinio slydimo charakteristikas. Tyrimų metodiką pritaikyti padangos sąveikos su puriu sniegu eksperimentiniams tyrimams.

4. Ištirti žiemos kelių priežiūros tarnybų naudojamų sniegą ir ledą tirpinančių medžiagų veiksmingumą bei nustatyti aplinkos oro temperatūros ir medžiagų veikimo trukmės įtaką tirpsmo dinamikai.

2

Padangos sąveikos su sniegu ir ledu padengta kelio danga teorinė analizė

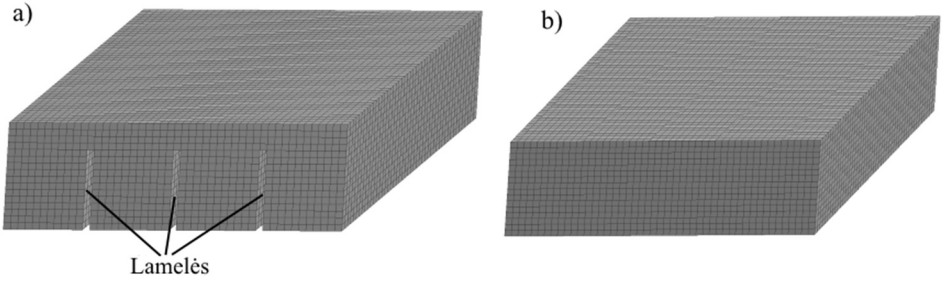
Šiame skyriuje pateikiami matematiniai modeliai, kuriuose nagrinėjama protektoriaus bloko ir jo elementų sąveika su keliu, įvertinant medžiagos tamprumo savybes, kontaktą su kelio paviršiumi ir trinties šilumos kiekio išsiskyrimą. Taip pat išskirtos padangą veikiančios jėgos ant sniego, ledo ir vandens terpių bei pateikta ledo ir sniego sluoksnių tirpinimo teorinė analizė.

Skyriaus tematika paskelbtas vienas straipsnis (Ružinskas 2017).

2.1. Padangos protektoriaus bloko kontaktinis modelis

Kontaktiniu modeliu siekiama įvertinti protektoriaus elementų tamprumo savybes. Modelyje nagrinėjami realios padangos protektoriaus su lamelėmis ir vientisos geometrijos gumos blokai. Sąveikos modelį sudaro du kūnai: protektoriaus bloko geometrija, kurį veikia vertikalioji prispaudimo jėga ir lygus kelio paviršius. Netiesinis modelis sudaromas ir aprašomas BE analizės programa Ansys Workbench bei sprendžiamas statinėje analizėje. Protektoriaus bloko su lamelėmis BE tinklelį (2.1 a pav.) sudaro 33652 elementai ir 39168 mazgai, o vientiso bloko

(2.1 b pav.) atitinkamai 35344 ir 39168. Naudojamas 8 mazgų šešiabriaunis erdvinis BE.



2.1 pav. Protektoriaus blokų baigtinių elementų tinklelis: a) blokas su lamelėmis; b) vientisas blokas

Fig. 2.1. Finite element mesh of tread blocks: a) siped block; b) solid block

Abu modelių BE tinkleliai pasižymi vienodomis ortogoniškumo ir asimetriškumo reikšmėmis, kurios atitinkamai yra 0,86 ir 0,33. Protektoriaus blokai nagrinėjami kaip ypač tampri hiperelastinė medžiaga, kurios deformacijų priklausomybė nuo įtempių yra netiesinė. Atlikta padangos sąveikos modelių analizė parodė, jog dažniausiai gumos deformacijoms aprašyti naudojamas 3 parametrų Mooney–Rivlin modelis. Bendroji šio modelio išraiška yra:

$$W = C_{10}\left(I_1 - 3\right) + C_{01}\left(I_2 - 3\right) + C\left(\frac{1}{I_3^2} - 1\right) + D\left(I_3 - 1\right)^2, \qquad (2.1)$$

čia W – deformacijos energija; I_1, I_2, I_3 – atitinkamai pirmasis, antrasis ir trečiasis deviatoriniai deformacijų invariantai; C_{10}, C_{01} – koeficientai, apibūdinantys deviatorines medžiagos deformacijas; C, D – medžiagos nespūdumo parametrai.

Parametras C yra apskaičiuojamas:

$$C = \frac{C_{10}}{2 + C_{01}}. \qquad (2.2)$$

Parametras D apskaičiuojamas:

$$D = \frac{C_{10}\left(5\nu - 2\right) + C_{01}\left(11\nu - 5\right)}{2\left(1 - 2\nu\right)}, \qquad (2.3)$$

čia ν – Puasono koeficientas. Koeficientai C_{10}, C_{01}, ir D paprastai nustatomi iš eksperimentinių tempimo ir gniuždymo bandymų. Gautoji deformacijų priklausomybė nuo įtempimų aproksimuojama Mooney–Rivlin modelio išraiška.

Gumos deformacijoms aprašyti naudojamo Mooney–Rivlin hiperelastinio modelio koeficientai parenkami iš Klapproth *et al.* (2016) minkštam ir kietam gumos mišiniams. Šių koeficientų reikšmės pateitkos 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Mooney–Rivlin modelio koeficientai skirtingiems gumos mišiniams
Table 2.1. Mooney–Rivlin parameters of different rubber compounds

Gumos mišinys	Koeficientai		
	C_{10}	C_{01}	D
Minkštas	0,127549	0,056259	0,109640
Kietas	0,195898	0,143179	0,059379

Kelio paviršius nagrinėjamas kaip visiškai lygus ir nedeformuojamas kūnas, imituojant modeliuojamo protektoriaus bloko sąveiką su ledu padengta kelio danga. Kontaktas tarp gumos bloko ir kelio paviršiaus aprašomas pastovia trinties koeficiento reikšme.

Bendroji lygčių sistema išreiškiama:

$$[K]\cdot\{q\}=\{F\}, \tag{2.4}$$

čia $[K]$ – sistemos standumo matrica; $\{q\}$ – sistemos mazgų poslinkių vektorius; $\{F\}$ – sistemos išorinių jėgų vektorius. Sistemos standumo matrica gali būti išreiškiama kaip visų BE standumo matricų suma: $[K]=\sum_{e=1}^{N}[k^{(e)}]$. Taip pat gali būti išreiškiamas ir jėgų vektorius: $\{F\}=\sum_{e=1}^{N}\{f^{(e)}\}$.

Tuomet priklausomybę tarp deformacijų (x, y, z kryptimis) ir poslinkių galima išreikšti panaudojant formos funkcijų išvestines:

$$\varepsilon_x=\frac{\partial U_x}{\partial x},\ \varepsilon_y=\frac{\partial U_y}{\partial y},\ \varepsilon_z=\frac{\partial U_z}{\partial z}. \tag{2.5}$$

BE poslinkių vektorius išreiškiamas panaudojant formos funkcijas:

$$U=[N]\left\{q^{(e)}\right\}, \tag{2.6}$$

čia $\{q^{(e)}\}$ – elemento poslinkių vektorius; $[N]$ – elemento mazgų formos fukcijos

Bendrąją formos funkcijų išraišką 8 mazgų erdviniam BE galima užrašyti:

$$N_i=\frac{1}{8}(1+\xi\xi_i)(1+\eta\eta_i)(1+\zeta\zeta_i), \tag{2.7}$$

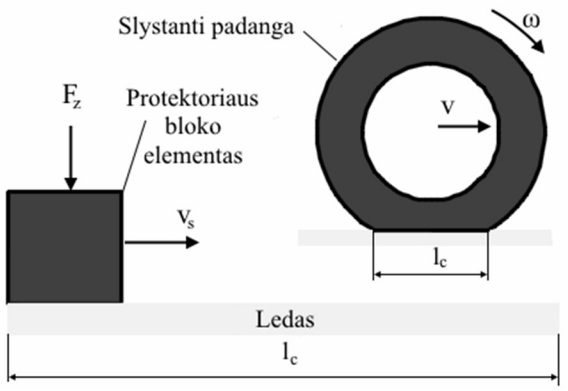
čia N_i – formos funkcija i-tajame mazge; ξ_i, η_i, ζ_i – i-tojo mazgo bedimensių koordinačių reikšmės.

Pateiktu modeliu galima gauti šiuos protektoriaus bloko parametrus: poslinkius x, y ir z kryptimis, deformacijas, įtempius, deformacijos energiją, slėgio ir tangentinių įtempių pasiskirstymą kontakto zonoje.

Modelyje nevertinami kelio ir protektoriaus bloko paviršių nelygumai. Taip pat priimama prielaida, jog ledo ir bloko kontakte pasireiškia tik sausoji trintis ir ledas nėra aptirpinamas išsiskiriančios trinties šilumos. Dėl to modelis gali būti naudojamas nagrinėjant gumos ir ledo sąveiką žemoje aplinkos temperatūroje.

2.2. Padangos protektoriaus bloko termodinamis modelis

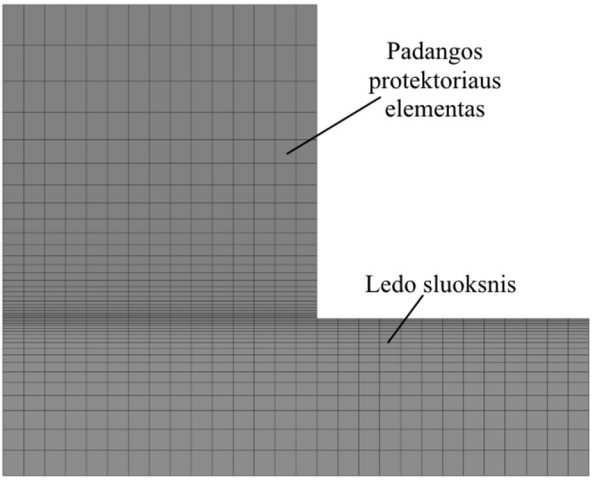
Pateiktu modeliu siekta įvertinti ledo dangos įšilimą slystant padangos protektoriaus bloko elementams. Kuriamas supaprastintas dvimatis protektoriaus bloko elemento modelis, pavaizduotas 2.2 paveiksle. Jį sudaro bloko elementas ir ledo paviršius. Priimama prielaida, jog protektoriaus bloko elementas slysta paviršiumi greičiu v_s realios padangos kontakto ilgiu l_c. Modelis aprašomas ir sprendžiamas Ansys Workbench programa.



2.2 pav. Slystančio padangos protektoriaus bloko elemento modelio schema
Fig. 2.2. Scheme of the sliding tread block element in length of the contact patch

Modelio geometrija skaidoma į 4 mazgų stačiakampius BE, o jų tinklelis parodytas 2.3 paveiksle. Modelį sudaro 9375 elementai ir 9887 mazgai.

Protektoriaus bloko elementas, skirtingai nei 2.1 poskyryje pateiktame modelyje, aprašomas tiesine medžiaga, siekiant sumažinti uždavinio sprendimo laiką.



2.3 pav. Modelio baigtinių elementų tinklelis
Fig. 2.3. Finite element mesh of the model

Parametrai, reikalingi aprašyti ledo ir bloko elemento fizines – mechanines savybes, pateikti 2.2 lentelėje (Petrenko ir Whithworth 1999; Petrovic 2003).

2.2 lentelė. Gumos ir ledo fizinės ir mechaninės savybės
Table 2.2. Physical and mechanical properties of rubber and ice

Medžiaga	Fizinės ir mechaninės savybės				
	Tankis, kg/m^3	Tamprumo modulis, MPa	Puasono koeficientas	Šilumos laidumo koeficientas, W/m·K	Specifinė šiluma, J/kg·K
Guma	1100	4	0,49	0,145	2100
Ledas	919	10000	0,3	2,4	1962

Šilumos srautas, išsiskiriantis kontakto plote slystant bloko elementui, apskaičuojamas:

$$q = X \cdot \tau_k \cdot v_s \,, \tag{2.8}$$

čia X – santykis, nusakantis kuri išsiskyrusios energijos dalis virsta šiluma; τ_k – tangentiniai įtempiai kontakte; v_s – slydimo greitis.

Modelyje priimama prielaida, jog visa kontakte išsiskyrusi energija virsta šiluma. Tuomet šilumos srautas, tenkantis ledo paviršiui, apskaičiuojamas:

$$q_L = x_I \cdot X \cdot \tau_k \cdot v_s \,. \tag{2.9}$$

Šilumos srautas, tenkantis gumos bloko elementui, apskaičiuojamas pagal:

$$q_B = (1 - x_I) \cdot X \cdot \tau_k \cdot v_s , \tag{2.10}$$

čia x_I – santykis, nusakantis kontakte išsiskiriančios šilumos perėjimą į ledo paviršių.

Priimant prielaidą, jog pradiniu laiko momentu bloko elementas ir ledo paviršius mažame gylyje yra vienodos temperatūros, šilumos perėjimo santykį x_I galima apskaičiuoti (Giessler *et al.* 2010a):

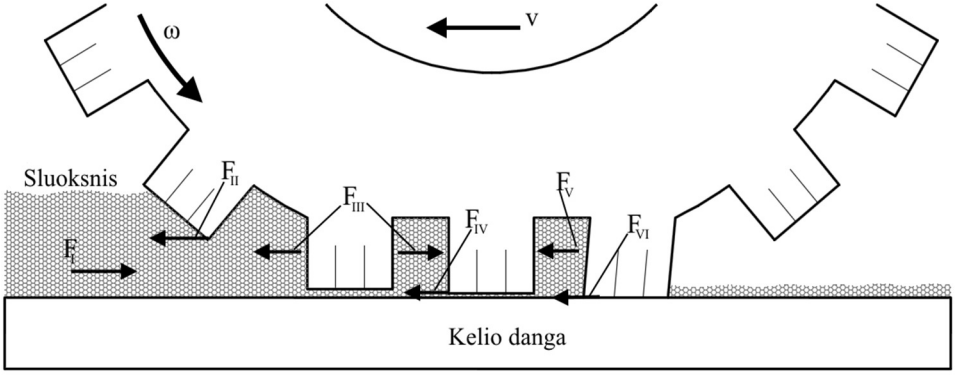
$$x_L = \frac{\lambda_L}{\lambda_L + \lambda_G} , \tag{2.11}$$

čia λ_L, λ_G – atitinkamai ledo ir gumos šilumos laidumo koeficientai.

Įstačius šilumos laidumo reikšmes, pateiktas 2.1 lentelėje į 2.11 formulę, gauname, jog šilumos srauto santykis, tenkantis ledo paviršiui lygus 0,94. Tai patvirtina kitų autorių darbuose (Skouvaklis *et al.* 2012 ir Ella *et al.* 2013) priimamą prielaidą, jog didžioji dalis kontakte išsiskyrusios šilumos tenka ledo paviršiui.

2.3. Padangos sąveikos su sniego arba ledo ir vandens terpe jėgų modelis

Pagal 1.1 poskyryje pateiktą padangą veikiančių jėgų analizę, sudarytas padangą veikiančių jėgų su sniego bei ledo ir vandens sluoksniais modelis. Padangą veikiančios jėgos su šiomis terpėmis parodytos 2.4 paveiksle.



2.4 pav. Padangą veikiančios jėgos, jai riedant sniego arba ledo ir vandens sluoksniu
Fig. 2.4. Forces acting on the rolling tire with the layer of snow or ice and water

Išskiriamos šios veikiančios jėgos:

F_I – terpės pasipriešinimo jėga. Ši jėga veikia priešinga padangos judėjimo kryptimi ir priklauso nuo terpės aukščio ir jos sutankinimo.

F_{II} – kasimosi jėga. Jėga veikia, kai protektoriaus blokų briaunos sminga į terpę. Bloko elementų briaunų efektas pasireiškia tuomet, kai terpė yra sutankinama riedančios padangos.

F_{III} – terpės suspaudimo jėga. Terpė yra išsspaudžiama riedančios padangos protektoriumi. Šios jėgos veikimo zonoje, gali pasireikšti akvaplaniravimo reiškinys, kai padanga pakyla nuo kelio paviršiaus prarasdama kontaktą su keliu. Šios jėgos veikimo būtinoji sąlyga, jog terpės aukštis turi būti ne mažesnis už protektoriaus griovelių aukštį.

F_{IV} – trinties jėga. Šią jėgą gali sudaryti dvi komponentės: mechaninė trinties jėga tarp padangos ir terpės paviršiaus; skysčio trinties jėga, atsirandanti dėl pasipriešinimo tekėjimui, kuomet terpė išspaudžiama padangos protektoriaus.

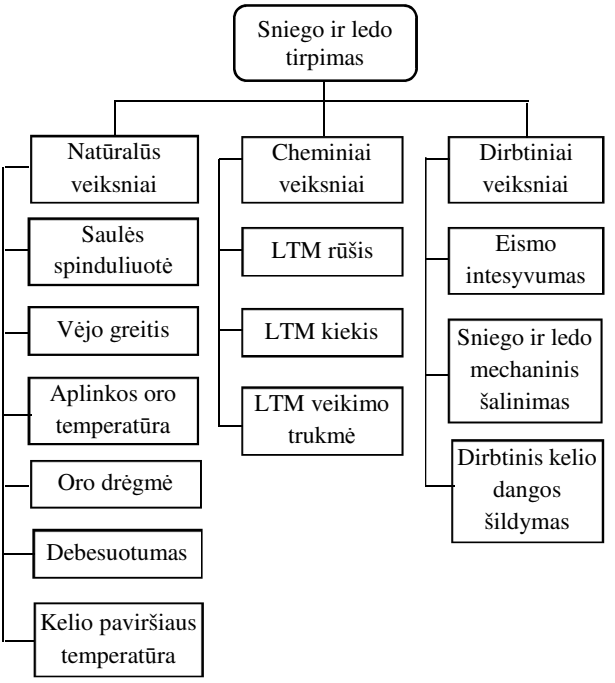
F_V – terpės kirpimo jėga. Dėl šios jėgos veikimo, terpė yra išsviedžiama padangos protektoriumi tangentine kryptimi ant kelio dangos.

F_{VI} – mechaninio kontakto trinties jėga. Šios jėgos veikimo zonoje padangos protektorius liečiasi su kelio paviršiumi, todėl gali būti perduodamos didelės trinties jėgos.

Padangų teorinė sąveika su SVM ir SLVM dangomis nėra plačiai nagrinėjama mokslinėje literatūroje, todėl pateiktas jėgų modelis yra pirminis etapas nagrinėjant padangų elgseną ant šių terpių. Kiti etapai turėtų būti padangos sąveikos su šiomis terpėmis eksperimentinių bandymų atlikimas ir matematinio sąveikos modelio kūrimas.

2.4. Ledo ir sniego sluoksnių tirpinimo teorinė analizė

Išskiriami trys sniego ir ledo tirpinimą lemiantys veiksniai (2.5 pav.). Natūralūs veiksniai, kuriems priskiriamos klimato ir orų sąlygos: aplinkos oro temperatūra, saulės spinduliuotės intensyvumas, debesuotumas, oro drėgmė bei vėjo greitis (Leonovich, Čygas 2006; Leonovič *et al.* 2014). Nemažą įtaką turi ir kelio paviršiaus temperatūra, kuri tiesiogiai priklauso nuo prieš tai išvardintų veiksnių. Cheminiams veiksniams priskiriamos ledo ir sniego tirpinimo cheminės priemonės. Šios grupės veiksmingumas priklauso nuo tirpinančios medžiagos rūšies (fizinių ir cheminių medžiagos savybių), jos išberto kiekio ant ledo dangos ir veikimo trukmės. Dirbtiniams veiksniams priskiriamas transporto priemonių eismo intensyvumas ir srauto sudėtis, mechaninis sniego ir ledo šalinimas naudojant specialią techniką (sniego valytuvus) bei dirbtinis kelio dangos šildymas.



2.5 pav. Veiksniai, lemiantys sniego ir ledo tirpimą ir šalinimą nuo kelio dangos
Fig. 2.5. Factors affecting ice and snow melting and removing from the road

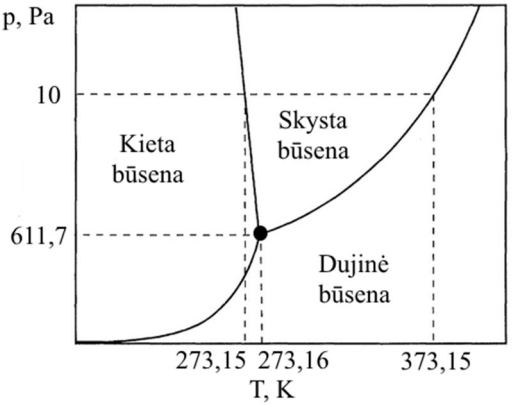
Ledo ir sniego tirpimui įtakos turi ir jų fizinės sąvybės, kurios labai priklauso nuo aplinkos oro temperatūros. Pagrindinės jų pateiktos 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Sniego, ledo ir vandens fizinės savybės (Haeberli *et al.* 2015)
Table 2.3. Physical properties of snow, ice and water (Haeberli *et al.* 2015)

Terpė	Fizinės savybės			
	Tankis, kg/m^3	Šilumos laidumo koeficientas, W/m·K	Specifinė šiluma, kJ/kg·K	Šiluminė difuzija, 10^{-7} m^2/s
Sniegas	100–830	0,04–1,0	2,09	1–8
Ledas	830–917	2,1–2,76	1,74–2,01	1
Vanduo	1000 (0 °C)	0,562	4,217	1,33

Sniego tankis kinta labai plačiame intervale ir labiausiai priklauso nuo sniego sutankimo, aplinkos oro temperatūros, vandens kiekio. Ką tik iškritusio šviežio sniego tankis paprastai būna 100–300 kg/m^3. Seno susigulėjusio sniego tankis gali kisti 200–650 kg/m^3, o ledynų sniego tankis gali svyruoti 550–830 kg/m^3. Ledo danga pasižymi geriausiu šilumos laidumu, lyginant su kitomis dviem terpėmis, o vanduo – didžiausia specifine šiluma.

Vanduo yra pagrindinis komponentas, lemiantis ledo ir sniego sluoksnių atsiradimą. Jis pasižymi kieta, skysta ir dujine būsenomis. Šių būsenų susikirtimo taškas, kuomet visos trys būsenos yra pusiausvyroje, pasiekiamas 273,16 K temperatūroje esant 611,7 Pa slėgiui. Iš 2.6 paveikslo matyti, jog ledo tirpimo kreivė kietojoje būsenoje turi neigiamą nuolydį, kuris atsiranda plečiantis užšalančiam vandeniui (Petrenko, Whitworth 1999).



2.6 pav. Vandens būsenų kitimas (Petrenko, Whitworth 1999)
Fig.2.6. Phase diagram of water (Petrenko, Whitworth 1999)

Ledo būsenos virsmas vandeniu yra endoterminis procesas, kuriam vykstant, ištirpinti 1 kg ledo reikia 334 kJ šilumos kiekio (Fujimoto *et al.* 2014).

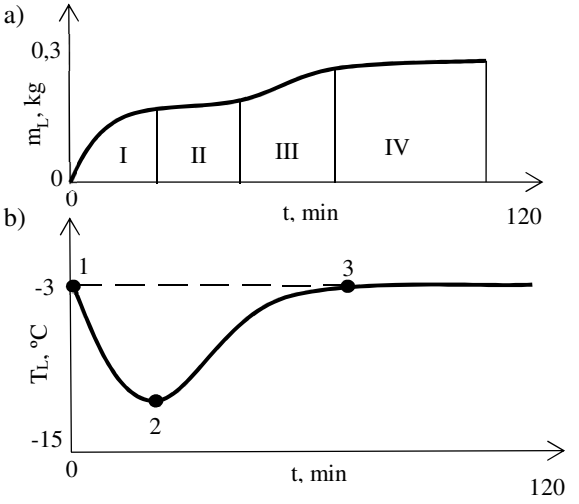
Ledo ir sniego dangos gali būti tirpinamos ir dėl išsiskiriančios trinties šilumos padangos kontakto zonoje. Trinties šiluma yra esminis veiksnys, lemiantis mažesnę gumos su ledo sluoksniu trintį (Kietzig *et al.* 2010). Trinties šilumos kiekį padangos kontakte galima apskaičiuoti:

$$Q = \mu_x F_z S_x v \,, \tag{2.12}$$

čia μ_x – išilginis RSDK; F_z – vertikalioji apkrova; S_x – išilginis slydimas; v – važiavimo greitis.

Ledo tirpinimo procesą veikiant LTM, galima išskirti 4 tirpimo zonas (2.7 a pav.). Pirmoji zona (I) – pradinio intensyvaus tirpimo, kai užbėrus LTM ant ledo, šis sparčiai tirpsta. Pasirodo pirmieji ištirpusio ledo ir LTM tirpalo lašai bei

pradeda vykti kietos ledo būsenos virsmas į vandenį. Šio tirpimo metu paprastai pastebimas ir ledo paviršiaus temperatūros kritimas (2.7 b pav.).



2.7 pav. Ledo tirpimo procesas veikiant tirpinančiai medžiagai: a) ledo tirpimo zonos; b) ledo paviršiaus temperatūros pokytis

Fig. 2.7. Ice melting process when deicing material is applied: a) ice melting zones; b) change of ice surface temperature

Susidariusio tirpalo temperatūra mažėja, kol pasiekiama sistemos pusiausvyra (2.7 b pav. antras taškas): šąlančio ištirpusio ledo (vandens) molekulių skaičius tampa lygus tirpstančio ledo molekulių skaičiui. Pereinama į antrąją (II) mažo tirpumo zoną, kurioje ledo tirpimas sparčiai sumažėja arba visai nevyksta. Šis reiškinys tęsiasi, kol ledo tirpalo temperatūra paprastai pasiekia aplinkos oro temperatūrą (2.7 b pav. trečiasis taškas), procesas pereina į trečiąją (III) vidutinio tirpumo zoną. Ledo tirpimo intensyvumas padidėja dėl padidėjusio ištirpusio ledo (vandens) molekulių skaičiaus išsiskyrimo. Paprastai tirpimo intensyvumas tęsiasi, kol LTM ištirpina visą ledo sluoksnį arba pati visiškai ištirpsta. Pabaigoje įvyksta tirpimo proceso perėjimas į ketvirtąją (IV) zoną, kurioje ledas yra visiškai netirpinamas dėl išsekusių arba pasibaigusių DM tirpinimo resursų.

Nustatytoje temperatūroje tam tikram kiekiui ledo ištirpinti reikia tam tikro kiekio LTM. Išbėrus ant kelio dangos, padengtos ledu arba sniegu, per mažai druskos, ne visas ledo sluoksnis ištirpsta. Išbėrus per daug LTM į kvadratinį metrą, visas ledas ištirpsta, bet bereikalingai eikvojama perteklinė LTM dalis.

2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Sukurtas kontaktinis padangos protektoriaus blokų sąveikos modelis, įvertinantis medžiagos tamprumo sąvybes ir kontaktą su kelio paviršiumi. Pateikas modelis leidžia apskaičiuoti bloko poslinkius, deformacijas, įtempius, deformacijos energiją, slėgio ir tangentinių įtempių pasiskirstymą kontakte.
2. Sukurtas padangos protektoriaus bloko elemento termodinaminis modelis, kuriame skaičiuojamas išsiskiriantis šilumos kiekis elementui slystant ledo dangos paviršiumi. Modelyje priimama prielaida, jog visa kontakte išsiskirianti energija virsta šiluma, o didžioji jos dalis pereina į ledo paviršių.
3. Remiantis padangą veikiančių jėgų ir sąveikos su sniegu ir ledu modelių analize, sudarytas padangą veikiančių jėgų, jai riedant sniego ir vandens bei ledo ir vandens sluoksniais, modelis. Jame išskiriamos 6 padangą veikiančios jėgos: terpės pasipriešinimo, kasimosi, terpės išspaudimo, trinties, terpės kirpimo ir mechaninio kontakto trinties jėgos.
4. Ledo ir sniego tirpimą lemiančius veiksnius galima išskirti į 3 grupes: natūralius, cheminius ir dirbtinius. Šių dangų tirpinimą cheminėmis priemonėmis siūloma išskirti į 4 zonas: intensyvaus, mažo, vidutinio ir nusistovėjusio tirpimo.

3

Padangos sąveikos su sniegu ir ledu padengta kelio danga eksperimentinių tyrimų planavimas

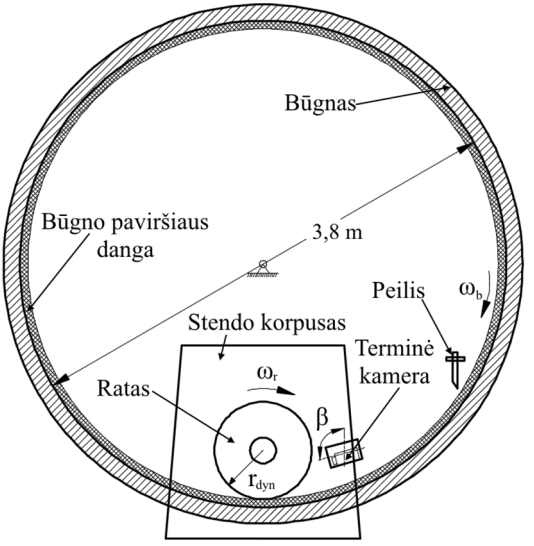
Trečiajame skyriuje pateikiama padangos sąveikos su sniego ir ledo sluoksniais eksperimentiniams tyrimams nadota įranga, sluoksnių paruošimo metodika, ledą tirpinančių medžiagų veiksmingumo eksperimentinių tyrimų aprašymas ir eksperimentinių duomenų apdorojimui naudoti metodai.

Skyriaus tematika paskelbtos trys publikacijos (Ružinskas *et al.* 2016; Ružinskas 2016; Ružinskas 2017).

3.1. Padangų sąveikos su sniego ir ledo sluoksniais eksperimentiniams tyrimams naudota įranga

Padangų sąveikos su sniego ir ledo sluoksniais eksperimentiniai bandymai buvo atlikti Karlsrūjės technologijų instituto (Vokietija) TP sistemų ir technologijų padalinyje. Buvo naudojamas būgninis padangų tyrimo stendas, kurio schema ir pagrindiniai komponentai parodyti 3.1 paveiksle. Stendą sudaro 3,8 m skersmens būgnas, kuriame padanga rieda vidiniu būgno paviršiumi. Pagrindinės kelių dan-

gos, kurias galima nagrinėti pasitelkiant šį stendą yra šios: sausas arba šlapias asfaltas, betono, šaligatvio dangos, taip pat žiemos kelių dangos – sniego arba ledo sluoksniai. Padanga būgne gali riedėti laisvai – kartu su būgnu, arba atskirai. Tuomet, esant nevienodiems būgno ir padangos tiesiniams greičiams, atsiranda slydimas tarp padangos ir būgno vidinio paviršiaus.



3.1 pav. Būgninio ratų tyrimo stendo pagrindiniai komponentai
Fig. 3.1. The main components of the drum test bench

Padangą greitinant, būgno tiesinis greitis yra mažesnis už padangos greitį, o lėtinant didesnis. Šiems greičiams sutampant vyksta laisvas padangos riedėjimas. Padangos slydimas išreiškiamas:

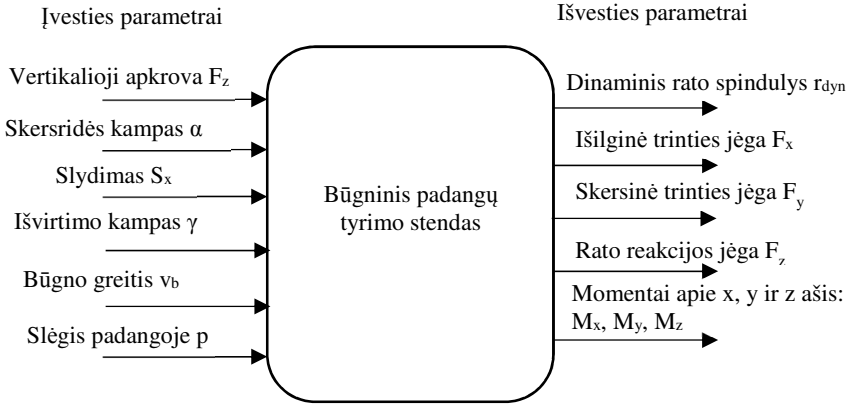
$$S_x = \frac{\omega \cdot r_{dyn} - v_b}{v_b}, \tag{3.1}$$

čia v_b – būgno tiesinis greitis, m/s.

Sukimosi momentas padangai perduodamas elektros varikliu per hidrostatinę transmisiją. Rato vertikalioji apkrova, skersridės ir išvirtimo kampai yra valdomi hidraulinės sistemos. Pagrindiniai padangos sąveikos parametrai (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z) pateikti 3.2 paveiksle, įrašinėjami jutikliais 100 Hz dažniu, įmontuotais rato stebulėje.

Stendas taip pat gali matuoti tiesinį būgno ir kampinį padangos greičius, dinaminį rato spindulį ir būgno aplinkos oro temperatūrą. Stendo konstrukcija įrengta specialioje izoliuotoje patalpoje, kurioje įmontuota vėdinimo sistema, todėl

būgno oro aplinką galima atvėsinti iki –20 °C. Ledo ar sniego sluoksnių paruošimui naudojamas specialus peilis ir dangos sutankinimo ratukas. Peilis reikalingas pašalinti nelygų ar aptirpintą sluoksnio paviršių. Ratukas paprastai naudojamas sniego sutankinimui, norint pasiekti norimą sniego kietumą, matuojamą penetrometru pagal ASTM F1805 standarte nurodytą metodiką.



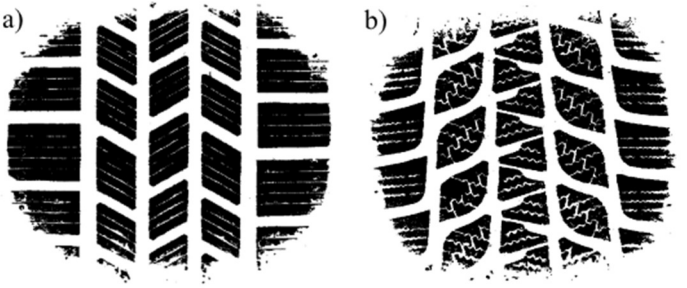
3.2 pav. Būgninio padangų tyrimo stendo įvesties ir išvesties parametrai
Fig. 3.2. Input and output parameters of drum test bench

Kartu su stendu buvo naudota terminė kamera Optris PI 160 temperatūrų matavimams ant ledo sluoksnio. 3.2 paveiksle pavaizduotas terminės kameros tvirtinimas leidžia kamerą nukreipti kampu β į bet kurį pageidaujamą padangos plotą. Kamera yra tvirtinama prie stendo korpuso, o tai leidžia matuoti padangų temperatūrą ir skersinės dinamikos metu, kuomet padanga pasukama skersridės kampu α. Kamera sukasi kartu su stendo korpusu, prie kurio montuojamas ratas. Tačiau toks kameros tvirtinimas turi vieną neigiamą savybę. Kamera tvirtinama pakankamai nedideliu atstumu nuo riedančios padangos, todėl jos optika gali būti aptaškoma kelio ar dylančios padangos atplaišomis. Dėl to naudojama speciali apsauginė dėžutė su paprasta apsaugine polietilenine plėvele. Todėl labai svarbu nustatyti plėvelės pralaidumo koeficientą, kuris turi didelę įtaką matavimų rezultatams (koeficiento skirtumas 0,1 vienetu paprastai padidina arba sumažina objekto temperatūrą daugiau nei vienu laipsniu). Tyrimų metu koeficiento reikšmė buvo nustatyta eksperimentiškai pamatuojant realią objekto temperatūrą. Gauta koeficiento reikšmė buvo lygi $T_p = 0,85$.

Kitas ne mažiau svarbus kameros parametras yra atspindžio koeficientas ε, pateikiamas literatūroje (Optris, 2014). Buvo matuota padangos ir ledo temperatūra, todėl gumos ir ledo atspindžio koeficientai atitinkamai lygūs 0,95 ir 0,98.

Pasirinktoji koeficiento reikšmė lygi ε = 0,95, nes didesnį matuojamą plotą užėmė padanga. Duomenys buvo įrašinėjami 10 Hz dažniu.

Tyrimams buvo naudotos dvi vienodo dydžio 205/55 R16 žieminės padangos, kurių protektoriaus rašto įspaudas, esant 4200 N apkrovai ir 2,2 bar slėgiui, parodytas 3.3 paveiksle.



3.3 pav. Tyrimams naudotų padangų protektoriaus raštų įspaudai: a) minkšta padanga; b) kieta padanga

Fig. 3.3. Tire footprints used for experiments: a) soft rubber tire; b) hard rubber tire

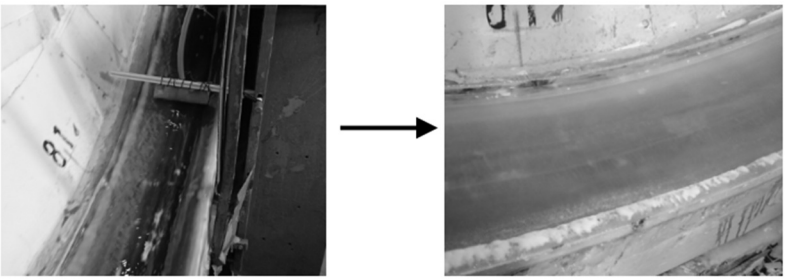
3.3 a paveiksle pavaizduota padanga yra speciali eksperimentiniams tyrimams skirta padanga su nesudėtinga protektoriaus rašto geometrija. 3.3 b paveiksle pavaizduota padanga yra skirta komerciniam naudojimui ir tyrimuose buvo naudota tik nagrinėjant sąveiką su ledu. Padangų kietumas buvo pamatuotas durometru –4 °C temperatūroje laikantis ASTM 2240 standarte pateiktų nurodymų. Vidutinės reikšmės 3.3 a ir b paveiksluose pavaizduotoms padangoms atitinkamai siekė 57 ir 65. Akivaizdu, jog pirmoji padanga yra minkštesnio mišinio, dėl to padangos tolesniems tyrimams įvardijamos kaip minkšta ir kieta. Abiejų padangų protektoriaus gylis buvo apytikriai vienodas ir siekė 8 mm minkštai padangai ir 7,8 mm kietai. Kiekvieno bandymo metu padangos buvo laikomos stendo patalpoje, siekiant suvienodinti jų temperatūras su aplinkos oro temperatūra.

3.2. Būgninio stendo paruošimas padangos sąveikos eksperimentams

3.2.1. Būgno paviršiaus padengimas ledo sluoksniu

Žiemos kelių dangos yra kritinės ne tik eismo saugumo, bet ir jų paruošimo eksperimentiniams tyrimams požiūriu. Turi būti užtikrinamas kaip įmanoma didesnis dangos vientisumas viso eksperimento metu, nes net menkas dangos pokytis gali

stipriai nulemti trinties jėgų dydžius. Kitas svarbus veiksnys yra aplinkos oro temperatūra, nuo kurios kitimo priklauso ne tik kelio paviršiaus, bet ir padangų savybės, todėl būtina užtikrinti kuo mažesnį temperatūros kitimą atliekant eksperimentą. Tą ypač sudėtinga užtikrinti lauko sąlygomis, tačiau šiuolaikinės modernios laboratorijos turi galingas vėdinimo sistemas. Pirmieji tyrimai buvo atlikti su ledo danga, kuria būgno paviršius padengiamas pilant vandenį ant besisukančio būgno žemoje temperatūroje (~ –10 °C). Būgno paviršiaus padengimas ledo sluoksnu parodytas 3.4 paveiksle. Norint užtikrinti, jog pilamas vanduo nenutekėtų nuo būgno paviršiaus, naudojami specialūs borteliai.



3.4 pav. Būgno paviršiaus padengimas ledo sluoksniu
Fig. 3.4. Drum surface covered with ice layer

Pradinis suformuotas ledo sluoksnis yra nelygus dėl netolygaus vandens kiekio pasiskirstymo ir užšalimo būgne, todėl sluoksnio išlyginimui naudojamas metalinis peilis (3.1 pav.), nuimant tam tikrą ledo dalį. Išlyginus ledo sluoksnį, šis nupoliruojamas specialiai tam skirta padanga, kurios protektorius padengtas daugybe lamelių. Po poliravimo ledo sluoksnis yra paruoštas tyrimams. Ledo sluoksnio storis paprastai būna 10–15 mm.

3.2.2. Būgno paviršiaus padengimas sniego, ledo ir vandens mišinio sluoksniu

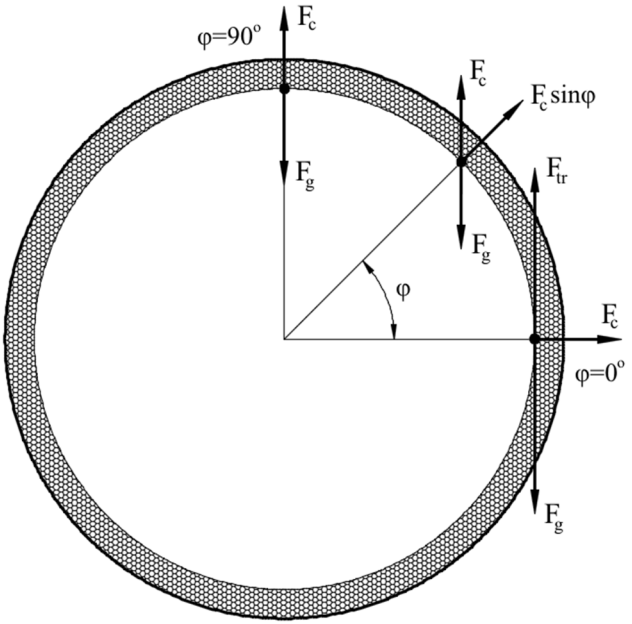
Norint atlikti padangos sąveikos eksperimentus su sniego ir vandens mišinio (SVM) sluoksniu, būtina tiksliai įvardinti šio mišinio sudėtį, nes literatūroje pasitaiko įvairių jo interpretacijų. Fierz *et al.* (2009) pateikia sniego klasifikavimą pagal jame esančio vandens kiekį (3.1 lentelė), kuriame aiškiai apibrėžiama permirkusio sniego, dar vadinamo tiže, sąvoka. Sniege esantis vandens kiekis turi būti didesnis nei 15 %. Šios būsenos mišiniui susidaryti būtina teigiama aplinkos oro temperatūra. Taip pat ši terpė pasižymi mažesniu už vandens tankiu, kuris priklauso nuo vandens kiekio. Tačiau klampa yra didesnė už vandens ir didėja mažėjant vandens kiekiui (Fristedt, Norrbom 1980). Tuo remiantis buvo ruošiamas SVM būgno paviršiui.

Norint atlikti padangos sąveikos eksperimentinius bandymus, reikia išlaikyti nagrinėjamą mišinį ant būgno paviršiaus. Visos prieš tai mokslininkų būgniniu stendu tirtos žiemos kelių dangos (ledas, vidutiniškai ir stipriai sutankinto sniegas) pasižymėjo pakankamai kieta ir tvirta būsena, kad išsilaikytų ant greitai besisukančio būgno. Atliekant padangų sąveikos su vandens sluoksniu tyrimus, vanduo ant besisukančio būgno yra pilamas nuolatos ir veikiant išcentrinėms jėgoms palaikomas pastovus vandens aukštis. Visgi šis būdas nėra tinkamas SVM sluoksniui, nes reikalautų labai didelių medžiagų sąnaudų sluoksnio formavimui ir taip pat specialios įrangos.

3.1 lentelė. Sniego klasifikavimas pagal jame esančio vandens kiekį
Table 3.1. Snow classification by liquid water content

Sniego būsena	Aprašymas
Sausas	Paviršiaus temperatūra būna žemiau 0 °C. Sniego grūdeliai nelinkę sulipti, kuomet yra suspaudžiami. Vandens kiekis lygus 0 %.
Drėgnas	Paviršiaus temperatūra būna ~ 0 °C. Vanduo nėra pastebimas net 10 kartų padidinus sniegą. Nestipriai suspaudus, sniegas linkęs sulipti. Vandens kiekis kinta 0–3 %.
Šlapias	Paviršiaus temperatūra būna ~ 0 °C. Vanduo gali būti pastebėtas padidinus sniegą 10 kartų, tačiau suspaudus rankoje, vandens lašai nėra išspaudžiami.Vandens kiekis kinta 3–8 %.
Labai šlapias	Paviršiaus temperatūra būna ~ 0 °C. Vanduo gali lašėti suspaudus sniegą rankoje, tačiau juntamas oro pasipriešinimas. Vandens kiekis kinta 8–15 %.
Permirkęs	Paviršiaus temperatūra būna ~ 0 °C. Sniegas yra permirkęs, kuriame yra nuo 20 % iki 40 % oro. Vandens kiekis yra > 15 %.

Buvo nuspręsta sumesti SVM ant besisukančio būgno, tikintis, jog išcentrinės ir adhezijos jėgos paskirstys jį tolygiai visame būgno vidiniame paviršiuje. Buvo sudaryta mišinį būgne veikiančių jėgų schema, kuri pateikta 3.5 paveiksle. Iš veikiančių jėgų apskaičiuojamas minimalus teorinis būgno greitis, kuriam esant turėtų būti sumetamas mišinys.



3.5 pav. Būgno paviršiaus sluoksnį veikiančių jėgų schema
Fig. 3.5. Forces actng on the drum pavement

Mišinio sluoksniui esant 90° būgno padėtyje ir sulyginus išcentrinę jėgą F_c su svorio jėga F_g, gauname:

$$mg = \frac{mv_b^2}{R}. \tag{3.2}$$

Tuomet būgno greitis yra lygus:

$$v_b = \sqrt{gR}\ . \tag{3.3}$$

Analogiškai jėgų pusiausvyrą galima užrašyti ir kampo padėties $0 < \varphi \leq 90°$ atžvilgiu bei išreikšti būgno greitį:

$$mg = \frac{mv_b^2}{R}\sin\varphi\,, \tag{3.4}$$

$$v_b = \sqrt{\frac{gR}{\sin\varphi}}\,, \tag{3.5}$$

Nulinio kampo atžvilgiu $\varphi = 0°$, atsiranda kohezijos jėgos F_{koh} dedamoji, todėl bendrą trinties jėgą sulyginus su svorio jėga, gauname:

$$\frac{mv_b^2}{R}\mu + F_{koh} = mg\ . \tag{3.6}$$

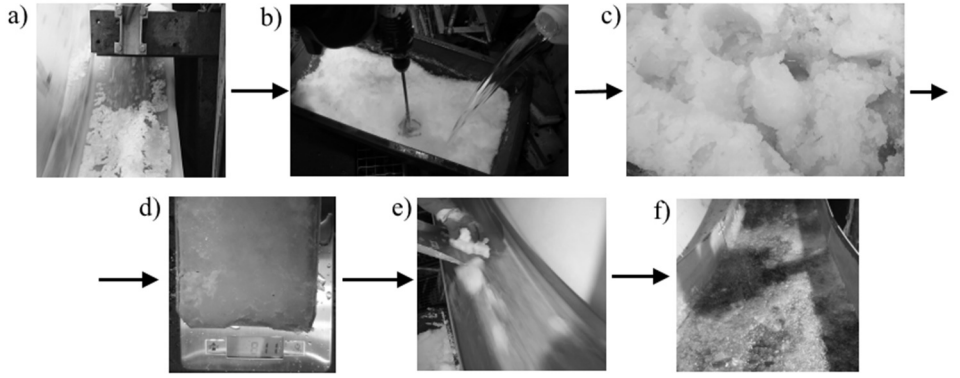
Tuomet iš lygties 3.6 išreiškiame trinties koeficientą μ ir greitį v:

$$\mu = \frac{R}{mv_b^2}(mg - F_{koh})\,, \tag{3.7}$$

$$v_b = \sqrt{\frac{R}{\mu m}(mg - F_{koh})}\ . \tag{3.8}$$

Priėmę, jog kohezijos jėga, kuri bendru atveju turėtų padidinti mišinio sankibą su būgno paviršiumi, lygi nuliui, gauname, jog minimali būgno tiesinio greičio reikšmė turėtų būti $v_b \approx 55$ km/h (kampinio greičio $\omega_b \approx 29$ s^{-1}). Ši reikšmė gauta apskaičiuotajai pagal 3.7 formulę trinties koeficiento reikšmei, kuri lygi 0,07. Skaičiuojant trinties koeficientą, kohezijos jėga nevertinama.

Sudauginę būgno paviršiaus plotą su aukščiu, gauname, jog 2 cm dangos storiui reikia 62 *l* mišinio. Mišinio gamybos ir sumetimo ant būgno paviršiaus procesas parodytas 3.6 paveiksle.



3.6 pav. SVM gamyba ir paruošimas: a) sniego gamyba; b) mišinio maišymas; c) paruoštas mišinys; d) mišinio tankio nustatymas; e) mišinio metimas ant besisukančio būgno; f) būgno paviršius sumetus mišinį.

Fig. 3.6. Production and preparation of the snow and water mixture: a) production of snow; b) mixing of mixture; c) prepared mixture; d) measurement of mixture density; e) throwing mixture on the rotating drum; f) pavement after throwing mixture

SVM dangai sniegas gaunamas pjaunant ledą specialiu metaliniu peiliu (3.1 pav.). Taip gaunamas purus ir minkštas sniegas, kurio tankio vidutinė reikšmė yra ~ 400 kg/m^3. Šiuo būdu gautas sniegas yra tinkamas SVM gamybai, nes yra lengvai išmaišomas su vandeniu, kuris pilamas pamažu. Taip gaunamas SVM santykiu

5,5:1, t.y. 55 *l* sniego ir 10 *l* vandens. Ši proporcija atitinka SVM sąvoką, kuri buvo pateikta 3.1 lentelėje. Mišinio tankis nustatomas pasveriant. Tuomet mišinys sumetamas ant ~55 km/h besisukančio būgno ir šį sustabdžius pamatuojamas mišinio sluoksnio storis. 55 *l* sniego ir 10 *l* vandens mišiniui gautas ~ 2 cm aukščio pradinis sluoksnis, matomas 3.6 f paveiksle, pasiskirsto tolygiai visame būgno paviršiuje. Analogiškas metodas pritaikytas ir kitam nagrinėjamam sluoksniui – susmulkinto ledo ir vandens mišiniui (SLVM). Šio mišinio gamyba ir paruošimas eksperimentiniams bandymams pavaizduoti 3.7 paveiksle.



3.7 pav. SLVM dangos gamyba ir paruošimas: a) ledo kubelių susmulkinimas; b) paruoštas mišinys; c) būgno paviršius sumetus mišinį.
Fig. 3.7. Production and preparation of the crushed ice and water mixture: a) crushing ice cubes; b) prepared mixture; c) pavement after throwing mixutre

SLVM danga ruošiama naudojant susmulkintus ledo kubelius. Gauti smulkūs ledo kristalai sumaišomi su vandeniu panašiu santykiu kaip ir SVM sluoksniui. Taip gaunamas panašus į šlapią sniegą mišinys.

3.2.3. Būgno paviršiaus padengimas puraus sniego sluoksniu

Tas pats metodas buvo pritaikytas ir puraus sniego sluoksniui, kuomet iš ledo dangos pagamintas purus sniegas buvo sumetamas ant besisukančio būgno. Eksperimentas buvo atliktas su 60 *l* sniego (~ 2 cm storio pradinis sluoksnis) siekiant patikrinti, jog SVM ir SLVM sluoksnių paruošimo metodas tinka ir puriam sniegui. Naudojant būgninį stendą, tokie bandymai iki tol nebuvo atlikti, nes buvo nagrinėjamos tik vidutiniškai ir stipriai sutankinto sniego dangos (Bolz 2006; Giessler 2012).

Sniego sutankimą apibūdina penetrometro rodmenys, pateikiami ASTM F1805 standarte. Šios reikšmės įvairiems sniego sluoksniams pateikiamos 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Ledo ir sniego sluoksnių klasifikavimas pagal ASTM F1805
Table 3.2. Snow and ice classification by ASTM F1805

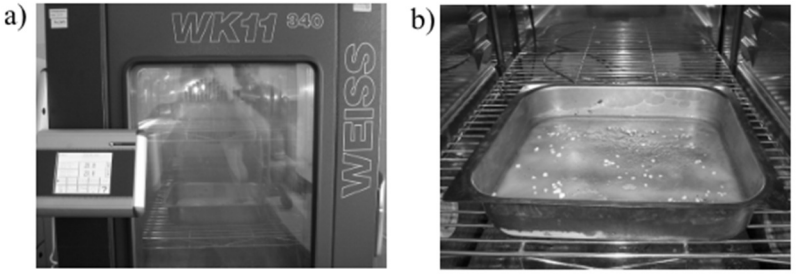
Sluoksnis	Temperatūra, °C			Penetrometro rodmuo	SRTT padangos RSDK reikšmės
	Aplinkos Max.	Paviršiaus			
		Min.	Max.		
Purus sniegas	+3	–15	–4	50–70	0,18–0,22
Silpnai sutankintas sniegas	+3	–15	–4	70–80	0,25–0,41
Vidutiniškai sutankintas sniegas	+3	–15	–4	80–84	0,20–0,25
Stipriai sutankintas sniegas	+3	–15	–4	84–93	0,15–0,20
Šlapias ledas	0	–8	0	93–98	0,06–0,12
Sausas ledas	0	–20	–7	93–98	0,06–0,12

RSDK reikšmės, pateiktos 3.2 lentelėje, nustatytos naudojant standartizuotą P195/75 R14 dydžio padangą, kurią aprašo ASTM E1136 standartas.

3.3. Ledą tirpinančių medžiagų veiksmingumo eksperimentiniai tyrimai

Šio eksperimento tikslas – ištirti kelių priežiūros tarnybų naudojamų cheminių ledo tirpinimo priemonių veiksmingumą esant skirtingai temperatūrai bei veikimo trukmei. Bandymams buvo naudojamos 5 medžiagos: NaCl, $CaCl_2$, $MgCl_2$, Ice-melt – natrio ir kalcio modifikuotų chloridų mišinys, Nordway – natrio acetato ir natrio formiato mišinys.

Laboratoriniu tyrimu siekta nustatyti, kokią ledo masės dalį ištirpdo tiriama LTM. Buvo paruošti vienodo storio (3 cm) ir ploto (887 cm^2) ledo bandiniai. Į vienodus nerūdijančio plieno padėklus 30 x 30 cm, parodytus 3.8 b paveiksle, buvo įpiltas vienodas kiekis vandens (apie 266 g), kuris užšaldomas ir laikomas klimatinėje kameroje (3.8 a pav.), kol pasiekiama ledo paviršiaus temperatūra (nuo –20 ºC iki –3 ºC). Sveriant nustatoma sausų padėklų masė ir, susiformavus ledui, padėklai dar kartą pasveriami 0,1 g tikslumu bei apskaičiuojama ledo masė.



3.8 pav. a – šaldymo kamera; b – ledo bandinys su užberta LTM
Fig. 3.8. a – climatic chamber; b – formed ice sample with applied deicing material

Padėklai su ledo bandiniu laikomi, kol ledo paviršiaus temperatūra pasiekia nustatytą bandymo trukmę. LTM veiksmingumas buvo tirtas esant 5 skirtingoms temperatūroms: –20 ºC, –15 ºC, –9 ºC, –6 ºC, –3 ºC. Siekiant užtikrinti vienodas bandymų sąlygas visoms tirtoms LTM, kiekviena LTM prasijojama per 1 mm ir 0,5 mm akučių dydžio sietus. Bandymui panaudojamos per 1 mm akučių sietą prabyrėjusios, bet ant 0,5 mm sieto likusios medžiagos dalelės. Pasiekus reikiamą temperatūrą, ant ledo paviršiaus rankomis užberiamas vienodas, apie 10 g, vienodo stambumo (fr. 0,5/1 mm) LTM kiekis bei tolygiai paskleidžiamas rankomis ledo bandinio plote. Ledo bandiniai su užberta LTM klimatinėje kameroje išlaikomi skirtingą, iš anksto nustatytą laiko trukmę. Siekiant kuo tiksliau įvertinti tirtų LTM ledo tirpinimo veiksmingumą, buvo pasirinktos šios veikimo trukmės: 4, 10, 20, 30, 60 ir 120 min. Po išlaikytos reikiamos trukmės klimatinėje kameroje, padėklai išimami ir nedelsiant pasveriami 0,1 g tikslumu. Pavertus bandinį, ištirpusio ledo ir LTM tirpalas nupilamas (palaukiama 10 s kol nulašės lašai) ir pasveriamas ledo ir LTM likutis.

Atlikus kiekvieną bandymą, apskaičiuojama ištirpinto ledo masė ir ledo masės sumažėjimo procentinis pokytis (IML) pagal formulę:

$$IML = \frac{m_{prieš} - m_{po}}{m_{prieš}} \cdot 100\ \%\,, \tag{3.9}$$

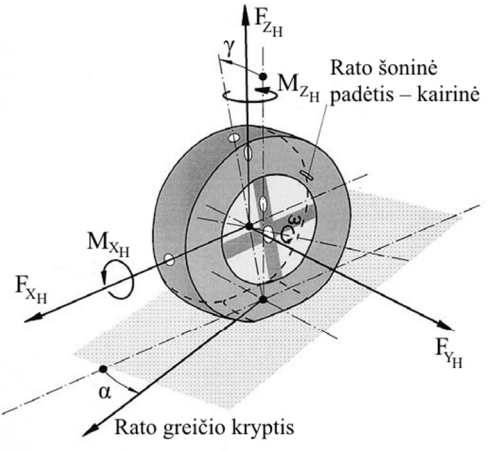
čia $m_{prieš}$ – ledo masė prieš LTM užbėrimą; m_{po} – ledo masė po LTM poveikio.

Iš viso buvo ištirta 450 bandinių (5 LTM x 5 temperatūros x 6 trukmės x 3 = 450 kartojimų).

3.4. Eksperimentinių duomenų apdorojimo metodai

Padangų sąveikos eksperimentų duomenys pateikiami išilginio RSDK priklausomybe nuo slydimo S_x ir skersinio RSDK priklausomybe nuo skersridės kampo α.

Šios priklausomybės vadinamos atitinkamai išilginio ir skersinio slydimo kreivėmis bei naudojamos kaip pagrindinis parametras vertinant padangos elgseną ant įvairių kelių dangų ar tiriant įvairių veiksnių (apkrovos, slėgio, temperatūros) įtaką. Padangą veikiančios jėgos ir momentai įrašomi TYDEX C (TYDEX – padangos eksperimentinių duomenų apsikeitimo protokolas) koordinačių sistemoje. Tolesnei duomenų analizei, jėgų ir momentų reikšmės turi atitikti TYDEX H koordinačių sistemą (3.9 pav.).



3.9 pav. TYDEX H jėgų ir momentų koordinačių sistema
Fig. 3.9. TYDEX H axis system

Matavimų duomenys įrašinėjami 100 Hz dažniu, o vienas matavimas paprastai trunka nuo 6 iki 40 s, todėl gaunama didelė duomenų sklaida.

Vidutinių reikšmių skaičiavimams naudojamas klasių metodas. Duomenų sritys yra dalijamos į intervalus ir juose skaičiuojamos vidutinės reikšmės. Išilginės sąveikos atveju buvo naudotos $\Delta S_x = 0{,}3$ %, o skersinės $\Delta\alpha = 0{,}5°$ intervalų reikšmės. Klasių metodu ne visuomet gaunamos tolygios vidutinės kreivės. Tai priklauso nuo eksperimento metu naudojamo matavimų protokolo, būgno paviršiaus būklės ir nelygumų. Padangos prispaudimas stende valdomas hidrauline sistema, kuri pakankamai jautriai reaguoja į būgno paviršiaus nelygumus. Tai atsispindi rato reakcijos jėgos F_z reikšmių kitime, nuo kurių priklauso ir RSDK reikšmės. Tokiu atveju naudojama Pacejkos „Magiškoji formulė“, aproksimuojant ja klasių metodu gautą kreivę. Aproksimavimui dažniausiai naudojamas mažiausių skirtumų kvadratų metodas sprendžiant minimizavimo funkciją (Alagappan *et al.* 2015):

$$\min \sum_{i=1}^{n} \left\{ RSDK_p\left(x_i\right) - RSDK_{\exp}\left(x_i\right) \right\}^2, \tag{3.10}$$

čia $RSDK_P$ – Pacejkos formule apskaičiuotoji reikšmė; $RSDK_{exp}$ – eksperimentiškai gauta reikšmė.

Pradinės Pacejkos formulės koeficientų reikšmės, būtinos minimizavimo funkcijos sprendimui, paimamos iš literatūros arba nustatomos analitiškai (Pacejka 2012).

3.5. Trečiojo skyriaus išvados

1. Sukurta eksperimentinių tyrimų metodika būgniniam padangų tyrimo stendui, leidžianti nustatyti padangos sąveikos su sniego ir vandens bei ledo ir vandens mišinių sluoksniais išilgines ir skersines trinties jėgas. Metodika tiksliai aprašo mišinių sudėtį, jų gamybos procesą bei paskleidimą ant būgno paviršiaus. Nustatyta, jog tinkamiausia aplinkos oro temperatūra eksperimentams atlikti yra tarp 0 °C ir +1 °C.
2. Pasirinktasis terminės kameros tvirtinimas leidžia išmatuoti padangos ir ledo paviršių temperatūras ir padangai pasisukant skersridės kampu α. Kiti autoriai temperatūrų kitimą nagrinėjo tik esant išilginei padangos dinamikai.
3. Eksperimentinių duomenų apdorojimui gali būti naudojamas statistinis klasių metodas. Padangos sąveikos su sniego ir vandens, ledo ir vandens mišinių sluoksniais ir puriu sniegu gautas vidutines išilginio slydimo kreives galima aproksimuoti Pacejkos „Magiškąja“ formule. Šis būdas leidžia gauti tikslesnes slydimo kreivių reikšmes.

4

Matematinio modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų rezultatų analizė

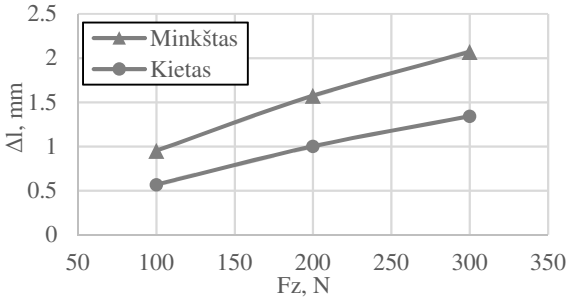
Ketvirtajame skyriuje pateikti padangos protektoriaus elementų sąveikos su ledo sluoksniu matematinio modeliavimo (2 skyrius), padangos sąveikos su ledo, SVM, SLVM ir sniego sluoksniais (3 skyrius) ir LTM veiksmingumo eksperimentinių tyrimų rezultatai.

Skyriaus tematika paskelbtos trys publikacijos (Ružinskas *et al.* 2016; Ružinskas 2016; Ružinskas 2017).

4.1. Matematinio modeliavimo rezultatų analizė

Matematiniu modeliu, pateiktu 2.1 poskyryje, buvo nagrinėjama apkrovos įtaka vertikaliajam poslinkiui Δl, kontaktiniam slėgiui P_K ir tangentiniams įtempiams τ_K MGM ir KGM protektoriaus blokams. Grafinėje dalyje pateikiamos maksimalios šių dydžių reikšmės. Pasirinktos 100 N, 200 N ir 300 N vertikaliosios apkrovos F_z reikšmės atitinka realios lengvojo automobilio padangos apkrovos reikšmes (atitinkamai 2 kN, 4 kN ir 6 kN), kurios buvo apytiksliai apskaičiuotos iš padangos kontakto ploto.

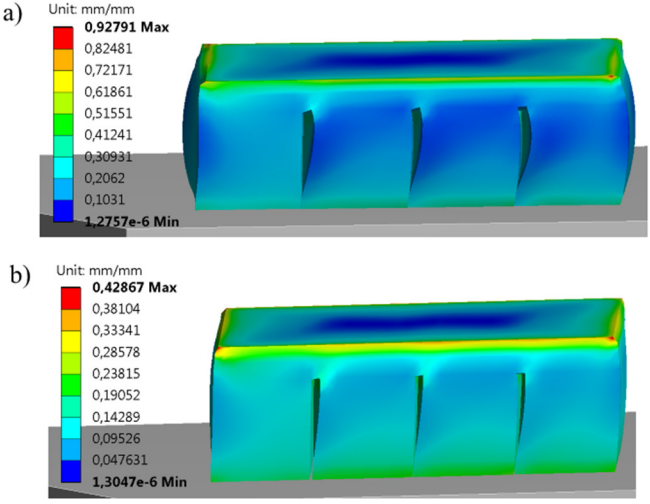
Trinties koeficiento reikšmė tarp protektoriaus elemento ir kelio dangos yra lygi 0,2. Ši reikšmė atitinka maksimalų RSDK su ledo sluoksniu žemoje (~ – 10 °C) temperatūroje, kurioje pasireiškia tik sausoji trintis padangos ir ledo kontakto zonoje.



4.1 pav. Vertikalios apkrovos įtaka skirtingų gumos mišinių protektoriaus bloko su lamelėmis vertikaliesiems poslinkiams

Fig. 4.1. Vertical load influence on vertical deflection of different rubber compound siped tread blocks

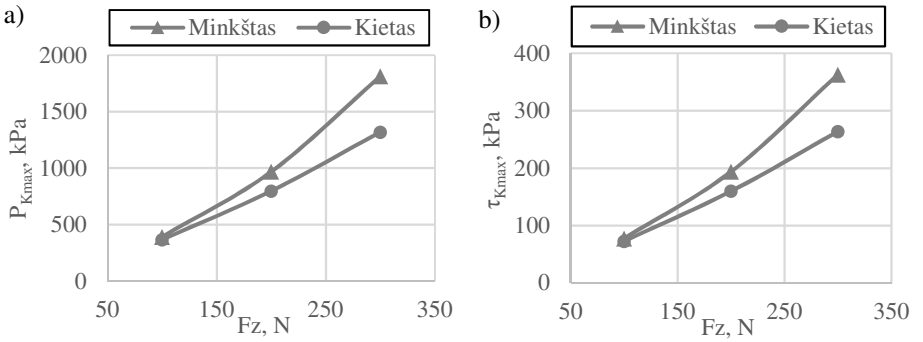
4.1 paveiksle pateiktame grafike matyti, jog MGM protektoriaus blokas yra labiau suspaudžiamas. Tai lemia ir didesnes MGM deformacijas, kurios matomos 4.2 paveiksle.



4.2 pav. Protektoriaus blokų su lamemėlis deformacijos esant 200 N apkrovai: a) minkštas gumos mišinys; b) kietas gumos mišinys

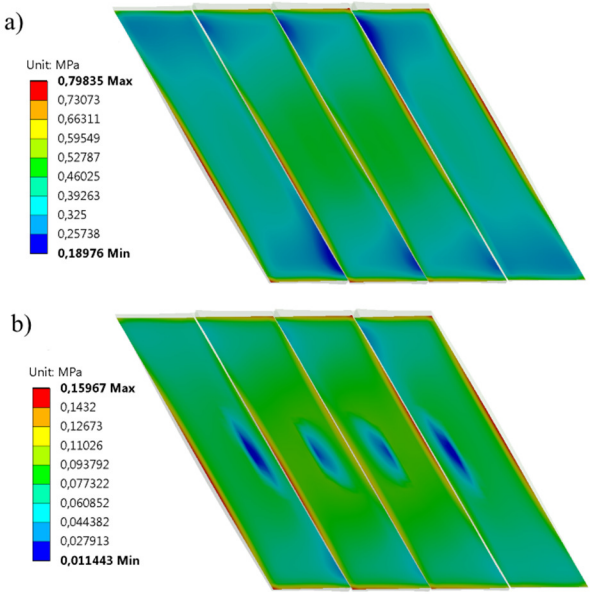
Fig. 4.2. Strain of a siped tread block when 200 N vertical load is applied: a) soft rubber compound; b) hard rubber compound

KGM elementas pasižymi mažesnėmis vertikaliųjų poslinkių reikšmėmis esant 100 N, 200 N ir 300 N apkrovoms, atitinkamai 40 %, 36 % ir 35 %. Didesnės deformacijos lemia didesnes kontaktinio slėgio ir tangentinių įtempių reikšmes. Šių dydžių reikšmės esant skirtingoms apkrovoms pateiktos 4.3 paveiksle.



4.3 pav. Protektoriaus bloko su lamelėmis vertikaliosios apkrovos įtaka kontaktiniam slėgiui (a) ir tangentiniams įtempiams (b)

Fig. 4.3. Vertical load influence on contact pressure (a) and shear stress (b) of a siped tread block



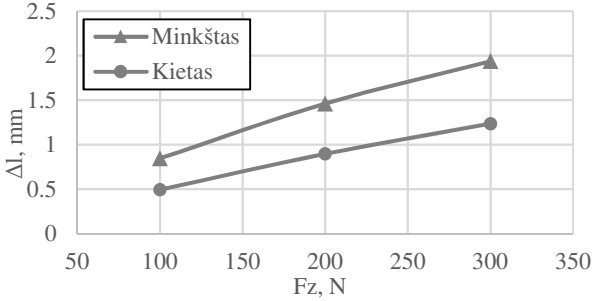
4.4 pav. Protektoriaus bloko su lamelėmis kontaktinio slėgio (a) ir tangentinių įtempių (b) pasiskirstymas

Fig. 4.4. Distribution of contact pressure (a) and shear stress (b) in a siped tread block

Iš 4.3 paveikslo matyti, jog skirtumas tarp MGM ir KGM kontaktinio slėgio reikšmių auga didėjant apkrovai. Esant 100 N apkrovai šis skirtumas yra labai ne nežymus ir siekia tik 6 %, apkrovoms pasiekus 200 N ir 300 N reikšmes, skirtumas atitinkamai padidėja iki 18 % ir 27 %. Analogiška tendencija pastebima ir su tangentinių įtempių reikšmėmis (4.3 b pav.).

Esant 100 N, 200 N ir 300 N apkrovoms, KGM protektoriaus blokas pasižymi aitinkamai 6 %, 18 % ir 27 % mažesnėmis tangentinių įtempių reikšmėmis negu MGM blokas. Iš 4.4 paveikslo matyti, jog tiek kontaktinio slėgio, tiek tangentinių įtempių reikšmės pasiskirsto pakankamai tolygiai visame protektoriaus kontaktiniame plote.

Nagrinėjant vientisą protektoriaus elementą, pastebimos tos pačios tendencijos kaip ir nagrinėjant bloką su lamelėmis.



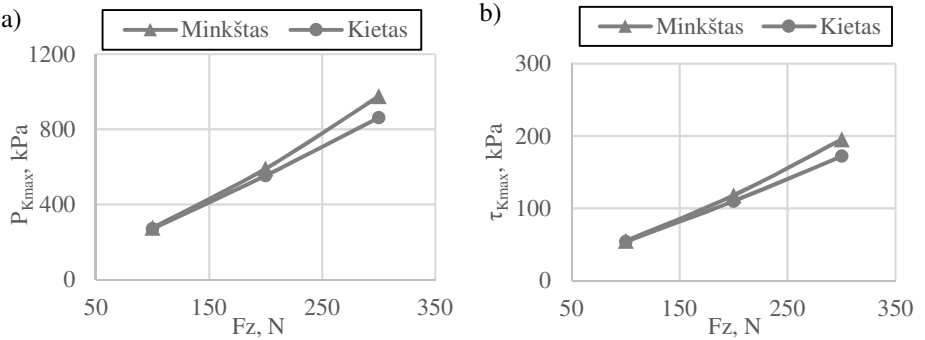
4.5 pav. Vertikalios apkrovos įtaka skirtingų gumos mišinių vientiso protektoriaus bloko vertikaliesiems poslinkiams

Fig. 4.5. Vertical load influence on vertical deflection of different rubber compound solid tread blocks

Iš 4.5 paveikslo matyti, jog esant 100 N, 200 N ir 300 N apkrovoms, KGM blokas pasižymi atitinkamai 42 %, 39 % ir 36 % mažesnėmis vertikalaus poslinkio reikšmėmis negu MGM blokas. Šios skirtumų reikšmės yra artimos bloko su lamelėmis analogiškoms reikšmėms.

Lyginant abiejų protektoriaus elementų vertkaliosios apkrovos įtaką poslinkių reikšmėms, pastebimos šiek tiek mažesnės vientiso bloko poslinkių reikšmės. Šis skirtumas esant nagrinėjamoms apkrovoms MGM blokui atitinkamai yra 11 %, 7 % ir 6 %, o KGM – 13 %, 10 % ir 8 %. Esminis skirtumas tarp šių protektoriaus blokų pastebimas nagrinėjant kontaktinio slėgio ir tangentinių įtempių reikšmes bei jų pasiskirstymą kontaktiniame plote. Šių dydžių priklausomybė nuo apkrovos pateikta 4.6 paveiksle, kuriame matyti akivaizdžiai mažesnės šių dydžių reikšmės lyginant su protektoriaus bloku su lamelėmis. Taip pat pastebima ir mažesnė apkrovos įtaka šioms reikšmėms lyginant MGM ir KGM vientisąjį bloką.

KGM elemento kontaktinio slėgio reikšmės atitinkamai yra mažesnės 1 %, 6 % ir 12 %, tangentinių įtempių – 2 %, 7 % ir 12 % lyginant su MGM vientisuoju bloku.



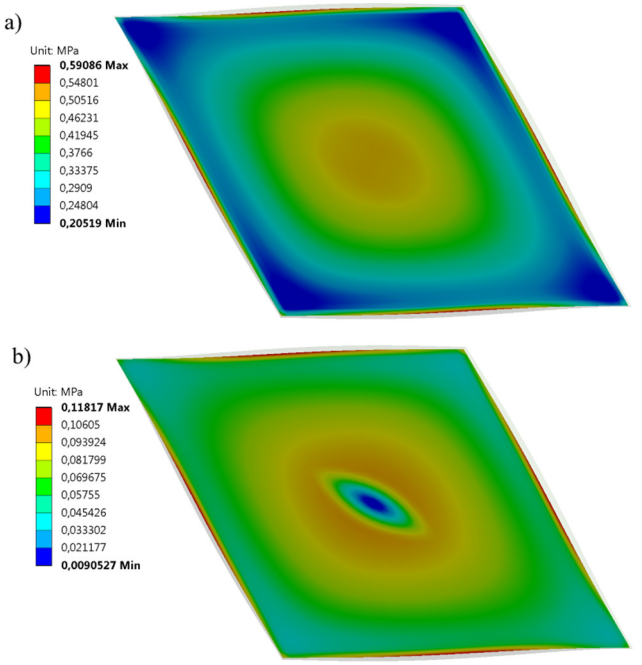
4.6 pav. Vientiso protektoriaus bloko kontaktinio slėgio (a) ir tangentinių įtempių (b) pasiskirstymas

Fig. 4.6. Relationship between vertical load and maximum contact pressure (a), and shear stress (b) in a solid tread block

Lyginant protektoriaus bloką, turintį lameles ir vientisąjį, pastarasis pasižymi mažesnėmis kontaktinio slėgio ir tangentinių įtempių reikšmėmis. Kontaktinio slėgio ir tangentinių įtempių reikšmių skirtumas MGM blokams yra beveik vienodas ir esant nagrinėjamoms apkrovoms atitinkamai yra 30 %, 39 % ir 46 %. Akivaizdu, jog kuo daugiau protektoriaus elementas deformuojamas, skirtumas tarp šių dydžių didėja. Ta pati tendencija pastebima ir KGM blokuose. Kontaktinio slėgio ir tangentinių įtempių reikšmės atitinkamai skiriasi 26 %, 31 % ir 35 %. Taip pat 4.7 paveiksle matyti, jog vientisajame bloke kontaktinio slėgio ir tangentinių įtempimų reikšmės pasiskirsto ne taip tolygiai, kaip bloke su lamelėmis (4.4 pav.). Skirtingą slėgio ir įtempių pasiskirstymą lemia protektoriaus elemento sudalijimas į atskirus elementus, kurių kiekvienas deformuojamas atskirai. Padangai slystant kelio paviršiumi, tai lemia protektoriaus bloko elementų, atskirtų lamelėmis, atsilenkimą, kuris yra priešingas slydimo krypčiai. Atsilenkiantys protektoriaus blokų elementai padidina briaunų efektą, dėl kurio elementų briaunos sminga į kelio paviršių.

Apibendrinant gautus modeliavimo rezultatus, galima teigti, jog didžiausiomis kontaktinio slėgio ir tangentinių įtempių reikšmėmis pasižymi MGM protektoriaus blokas su lamelėmis. Didėjant šioms reikšmėms, didėja ir trinties jėgos tarp elemento ir ledo sluoksnio paviršiaus. Tai lemia didesnį padangos sankibumą ir stabilumą. MGM blokas yra labiau deformuojamas ir dėl to padidėja kontaktinis plotas. Taip pat protektoriaus blokas su lamelėmis pasižymi tolygesniu kontaktinio slėgio ir tangentinių įtempių reikšmių pasiskirstymu kontakto plote lyginant

su vientisuoju bloku. Šių reikšmių skirtumas gali skirtis tarp minėtųjų elementų beveik dvigubai.



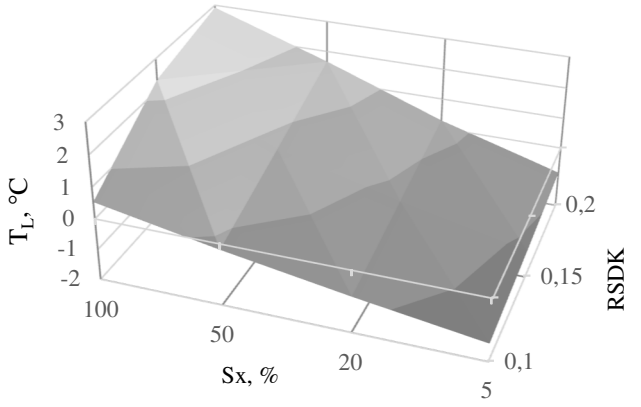
4.7 pav. Kontaktinio slėgio (a) ir tangentinių įtempių (b) pasiskirstymas vientisame protektoriaus bloke

Fig. 4.7. Distribution of contact pressure (a) and shear stress (b) in a solid tread block

Atliktasis palyginimas įrodo, kodėl daugumos šiuolaikinių žieminių padangų protektoriaus elementai turi lameles.

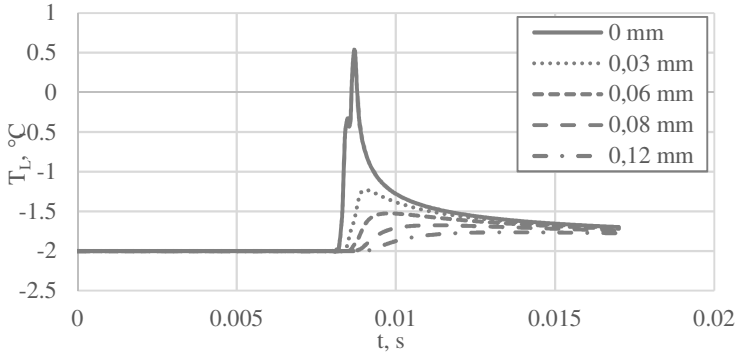
Šilumos kiekio išsiskyrimo modeliavimas panaudojant 2.2 poskyryje aprašytą modelį buvo atliktas esant skirtingiems slydimams (5 %, 20 %, 50 % ir 100 %) ir RSDK reikšmėms (0,1; 0,15 ir 0,2), tačiau pastoviajai vertikaliajai apkrovai, kuri buvo 50 N. Ši reikšmė atitinka realios padangos vertikaliąją prispaudimo jėgą, lygią 4000 N. Slydimo reikšmės apskaičiuojamos pagal padangos ir būgno tiesinių greičių skirtumą, naudojant 3.1 formulę. Bloko elemento slydimo greitis gaunamas parenkant atitinkamą skaičiavimo laiką, per kurį elementas turi praslysti padangos kontaktiniu ilgiu, kuris yra 145 mm ir atitinka realią padangą.

Pradiniu laiko momentu protektoriaus bloko elemento ir ledo paviršiaus temperatūros buvo vienodos (–2 °C). Buvo nagrinėjama vieno taško, nutolusio per pusę pradinio kontakto ilgio, kuriuo slysta bloko elementas, temperatūra. Jos maksimalių reikšmių priklausomybė nuo RSDK ir slydimo pavaizduota 4.8 paveiksle.



4.8 pav. Ledo temperatūros priklausomybė nuo slydimo ir RSDK
Fig. 4.8. Relationship between ice temperature, slip and force coefficient

Iš 4.8 paveikslo matyti, jog didžiausia temperatūra pasiekiama esant didžiausioms RSDK ir slydimo reikšmėms. Jos reikšmė pasiekia beveik +3 °C, o tai yra daugiau už ledo tirpimo temperatūrą, todėl teoriškai ledo paviršius turėtų būto tirpinamas. Mažiausias šilumos kiekis išsiskiria prie mažiausio slydimo ir RSDK reikšmių. Taip pat buvo nagrinėjamas ir ledo paviršiaus temperatūros kitimas bloko elementui slystant ir šilumos skvarba į ledo sluoksnio gylį. 4.9 paveiksle pateikti rezultatai buvo gauti esant 100 % slydimui ir 0,1 RSDK reikšmei.



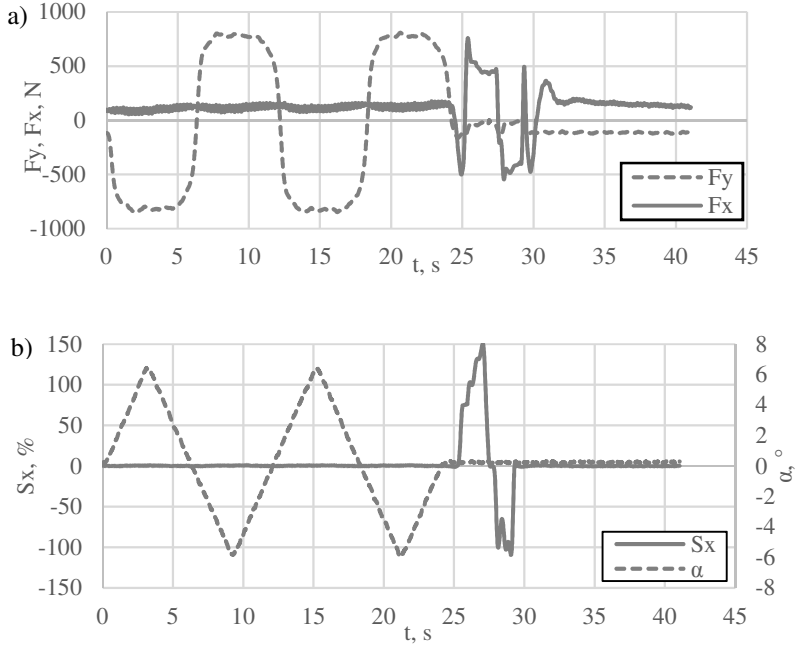
4.9 pav. Ledo temperatūros kitimas skirtinguose ledo sluoksnio gyliuose bloko elementui slystant ledo paviršiumi
Fig. 4.9. Ice temperature change at different ice depths when tread block element is sliding on ice

Iš 4.9 paveikslo matyti, jog ledo paviršiaus temperatūra ima didėti praėjus pusei skaičiavimo laiko, t. y. kuomet slystantis bloko elementas pasiekia nagrinėjamą tašką. Elementui praslydus tašką, temperatūra ima mažėti. Maksimali įšilimo temperatūra (+0,5 °C) pasiekiama ant ledo paviršiaus. Toliau, didėjant ledo gyliui, temperatūra mažėja.

4.2. Padangų sąveikos su ledo sluoksniu eksperimentinių tyrimų rezultatų analizė

4.2.1. Aplinkos temperatūros įtaka padangos išilginei ir skersinei sąveikai

Pagrindinių dydžių (F_z, F_x, F_y, ω, S_x ir α) matavimui buvo naudojamas specialus matavimų protokolas. Vieno matavimo dydžių F_x, F_y, S_x ir α priklausomybė nuo laiko pateikta 4.10 paveiksle.



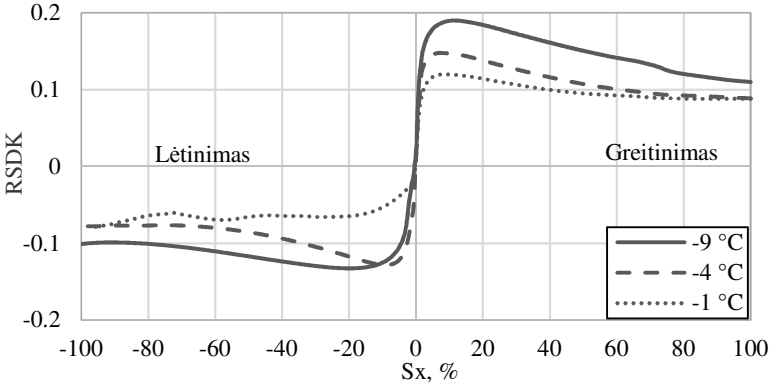
4.10 pav. Padangos sąveikos su ledo sluoksniu charakteristikų kitimas: a) išilginės ir skersinės jėgos; b) išilginis slydimas ir skersridės kampas

Fig. 4.10. Variation of tire parameters in interaction with ice: a) longitudinal and lateral forces; b) longitudinal slip and sideslip angle

Eksperimentams naudoto protokolo efektyvumas buvo įrodytas autoriaus Giessler (2012). Šis protokolas leidžia atlikti padangos sąveikos su ledo sluoksniu matavimus nenutrūkstamai, nes tarp matavimų yra 2 min trukmė, per kurią padanga laisvai rieda ledo sluoksniu neveikiama vertikaliosios apkrovos. Tai leidžia atvėsinti matavimo metu įšilusį padangos protektoriaus paviršių ir suviednodinti ledo ir protektoriaus paviršių temperatūras prieš kitą matavimą.

Iš 4.10 paveikslo matyti, jog iš pradžių matuojami padangos skersinės dinamikos parametrai. Padanga pasukama aplink vertikaliąją ašį skersridės kampu α po du kartus, taip užtikrinant pakankamą duomenų kiekį. Skersridės kampo reikšmės apytiksliai kinta nuo –6° iki +6°. Padangos tiesinis greitis šiuo atveju sutampa su būgno tiesiniu greičiu, o išilginis slydimas yra apytiksliai lygus 0. Baigus pasukimą, elektros varikliu padidinamas padangos kampinis greitis ir gaunamos greitinimo charakteristikos. Po to greitis yra mažinamas ir esant mažesniam už būgno greičiui, imituojamas padangos stabdymo procesas (lėtinimas). Iš 4.10 paveikslo matyti, jog padanga yra visiškai sustabdoma (užblokuojama), nes slydimo reikšmė pasiekia –100 %. Padangą greitinant išilginio slydimo reikšmė pasiekia net 150 %. Tuomet padanga praslysta. Pateikiant grafines išilginio RSDK priklausomybes, nagrinėjamos ±100 % slydimo reikšmės.

Pradiniai matavimų duomenys buvo šie: būgno greitis v_b = 30 km/h; padangos slėgis p = 2,2 bar; rato prispaudimo jėga F_z ~ 4200 N; rato išvirtimo kampas γ = 0°. Matavimai buvo atlikti skirtingose aplinkos temperatūrose: –9°C, –4°C ir –1°C su minkšto mišinio padanga. Kiekvienoje iš šių temperatūrų buvo atlikta po 5 matavimus. Matavimų vidutinės reikšmės pateikiamos 4.11 paveiksle išilginei padangos dinamikai, o 4.12 paveiksle – skersinei.



4.11 pav. Išilginio RSDK priklausomybė nuo slydimo esant skirtingai aplinkos oro temperatūrai

Fig. 4.11. Relationship between longitudinal force coefficient and slip at different ambient temperature

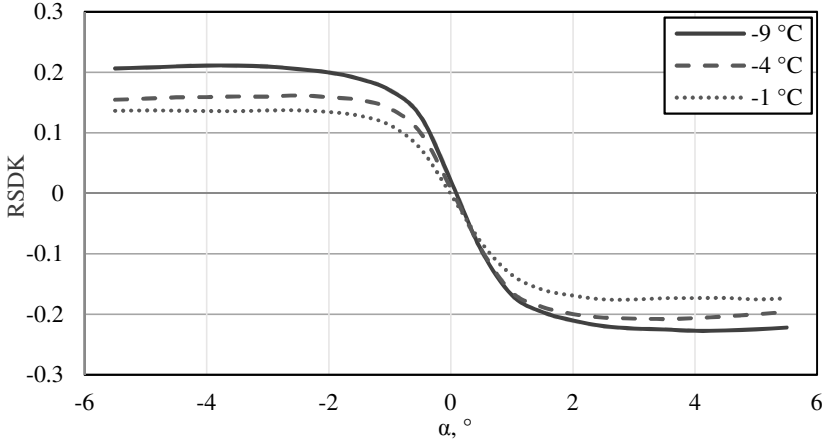
Iš 4.11 paveikslo matyti, jog išilginis RSDK mažėja didėjant aplinkos temperatūrai. Padangą greitinant maksimali RSDK reikšmė –9 °C temperatūroje yra 0,19, kuri pasiekiama esant 10 % slydimui. Maksimalios RSDK reikšmės –4 °C ir –1°C temperatūroje atitinkamai yra 0,15 ir 0,12, kurios pasiekiamos esant 8 % slydimui.

Padangos lėtėjimo metu RSDK reikšmės yra dar mažesnės. –9 °C temperatūroje maksimali RSDK reikšmė yra 0,13 ir pasiekiama esant 15 % slydimui, –4 °C temperatūroje – 0,12 ir pasiekiama esant 8 % slydimui. –1 °C temperatūroje maksimali RSDK tesiekia ~ 0,07. Skirtingas RSDK reikšmes padangai greitėjant ir lėtėjant lemia daug veiksnių. Padangai greitėjant veikia didesnės tangentinės jėgos kontakto su keliu plote. Taip pat šį skirtumą gali lemti nevienodas padangos protektoriaus blokų slydimo greitis, kurį lemia skirtingas blokų elementų atsilenkimas padangą greitinant ir lėtinant, padangos fizinės – mechaninės savybės bei eksperimentams naudojama matavimo įranga ir jų atlikimas.

Akivaizdu, jog didėjant aplinkos temperatūrai padangos sankiba mažėja. Dauguma mokslininkų, nagrinėjančių šią problemą, mažėjančią sankibą aiškina trinties šilumos išsiskyrimu, kuris tiesiogiai priklauso nuo išilginės trinties jėgos, vertikaliosios apkrovos, padangos slydimo greičio arba slydimo koeficiento. Dėl padangos kontakte su ledu išsiskiriančios trinties šilumos ledas yra aptirpinamas. Dėl to atsiradusi labai plona vandens plėvelė sumažina padangos sankibą. Šis reiškinys labiau pasireiškia didėjant aplinkos temperatūrai ir labiausiai pastebimas temperatūrai priartėjus prie 0 °C. Aukštose aplinkos temperatūrose ledo danga tiesiog nespėja aptirpti. Išsiskiriantis trinties šilumos kiekis yra nepakankamas aptirpinti ledo paviršių arba aptirpęs plotas yra labai mažas ir akimirksniu užšąla.

Didesnę padangos sankibą žemose temperatūrose gali lemti ir kitas veiksnys: riedant padangai ledo paviršiumi, jos elementai, pasižymintys viskoelastinėmis savybėmis, yra deformuojami. Dėl to išskiriama vidinė energija, kurios dalis virsta šiluma ir padanga įšyla. Šilta padanga geriau sukimba su šaltu ledo sluoksniu. Tą galima paaiškinti šilto ir šalto kūnų sąveika, kuomet šiltesnis kūnas dėl tarpusavio molekulių sąveikos linkęs prilipti prie šaltesnio.

Dar vienas veiksnys, lemiantis skirtingą padangų sankibą skirtingose neigiamose temperatūrose, yra padangos viskoelastinių savybių kitimas. Padangos protektoriaus gumos mišinio kietumas yra linkęs didėti arba mažėti skirtingose aplinkos oro temperatūrose. Tai priklauso nuo padangų tipo ir gumos mišinio sudėties. Šiuose tyrimuose naudotos padangos ženklaus kietumo reikšmių kitimo nebuvo pastebėta (kietumas kito 56–58 A skalėje) nagrinėjamose temperatūrose.



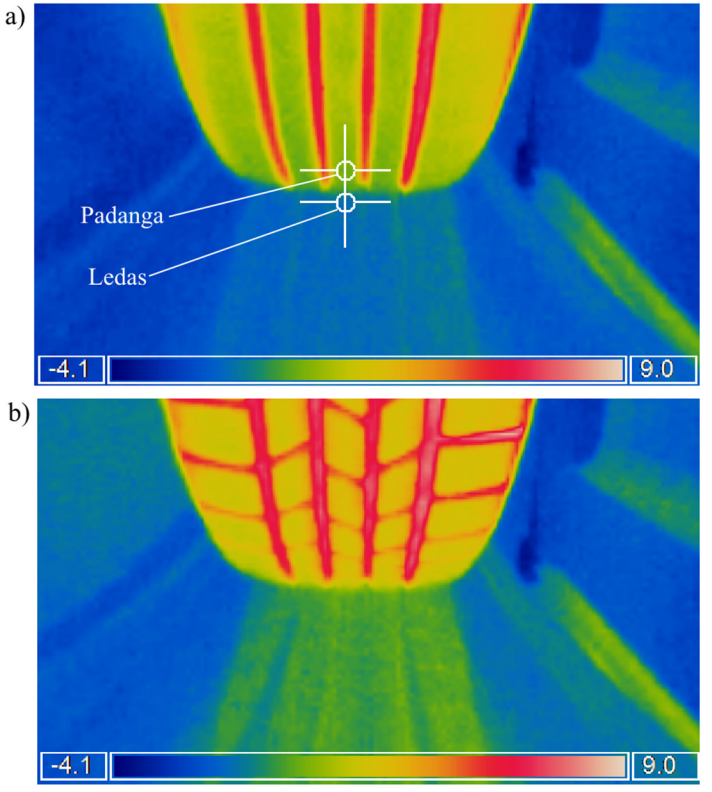
4.12 pav. Skersinio RSDK priklausomybė nuo skersridės kampo esant skirtingai aplinkos oro temperatūrai
Fig. 4.12. Relationship between lateral force coefficient and sideslip angle at different ambient temperature

Ta pati RSDK reikšmių mažėjimo tendencija pastebėta ir nagrinėjant skersinę padangos sąveiką. Iš 4.12 paveiksle pateiktos išilginio RSDK priklausomybės nuo skersridės kampo, matyti, jog didžiausia išlginė padangos sankiba pasiekiama – 9 °C aplinkos temperatūroje. Maksimali RSDK reikšmė yra 0,22 ir pasiekiama esant 3° skersridės kampui. Šioje ir kitose nagrinėjamose temperatūrose pastebimas nedidelis RSDK reikšmių pokytis esant teigiamiems ir neigiamiems skersridės kampams, todėl vertinama vidutinė maksimali RSDK reikšmė. Autoriaus manymu, šį pokytį galėjo lemti tyrimams naudotos padangos nesimetriškas protektoriaus raštas. Dėl to skiriasi prispaudimo jėga padangai sukantis skersridės kampu α, lemianti skirtingas trinties jėgas. Taip pat skiriasi ir protektoriaus blokų slydimo greitis. Maksimali RSDK reikšmė –4 °C temperatūroje yra 0,19 ir pasiekiama esant 2,5° skersridės kampui, o –1°C temperatūroje – 0,16, kuri pasiekiama esant taip pat 2,5° skersridės kampui.

Skersinio RSDK mažėjimą, kaip ir išilginės dinamikos atveju, galima paaiškinti išsiskiriančia trinties šiluma. Būtina pažymėti, jog nagrinėjant skersinę padangos dinamiką veikia tik skersinė trinties jėga. Padanga ledo paviršiumi rieda laisvai – be slydimo, todėl išsiskiriantis trinties šilumos kiekis yra labai mažas. Visgi šilumos išsiskyrimą gali padidinti skersinė trinties jėga, todėl buvo atlikti padangos ir ledo paviršių temperatūrų matavimai. Taip pat didesnes RSDK reikšmes žemesnėse temperatūrose gali lemti išilginės dinamikos rezultatus analizuojant jau minėtoji padangos vidinė šiluma, atsirandanti dėl padangos deformacijų.

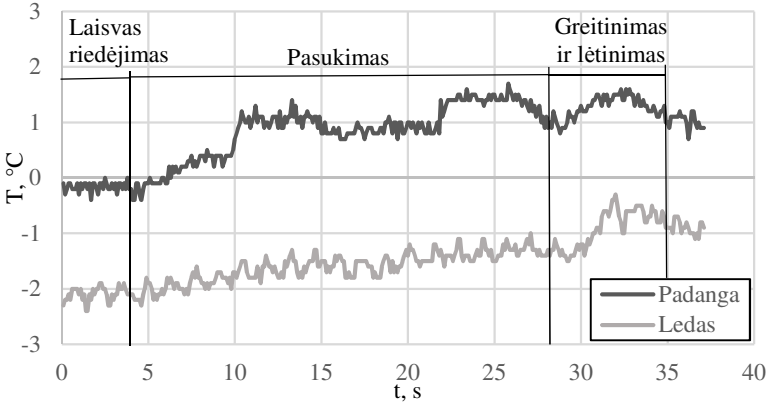
4.2.2. Padangos ir ledo paviršių temperatūrų matavimo rezultatų analizė

Padangos ir ledo temperatūrų matavimas termine kamera buvo atlikas esant šioms pradinėms sąlygoms: būgno greitis v_b = 30 km/h; padangos slėgis p = 2,2 bar; prispaudimo jėga $F_z \sim 4200$ N; rato išvirtimo kampas $\gamma = 0°$; aplinkos oro temperatūra $T_a = -2$ °C. Temperatūra buvo nagrinėjama padangos protektoriaus ir ledo taškuose, kurie parodyti 4.13 a paveiksle.



4.13 pav. Padangos ir ledo paviršių terminis vaizdas: a) esant laisvam padangos riedėjimuis; b) esant stabdymui, kai ratas visiškai užblokuojamas
Fig. 4.13. Thermal images of tire and ice surfaces: a) free rolling tire; b) fully braked tire

Temperatūros kitimas atliekant matavimą parodytas 4.14 paveiksle. Jame matyti, jog atliekant bandymą ledo ir padangos temperatūros padidėja. Temperatūra pradeda didėti padangai pradėjus pasukimą. Padangos temperatūra pasukimo metu vidutiniškai padidėja 1 °C ir yra teigiama, ledo – 0,5 °C, tačiau tirpimo temperatūros (0 °C) viso bandymo metu nepasiekia.



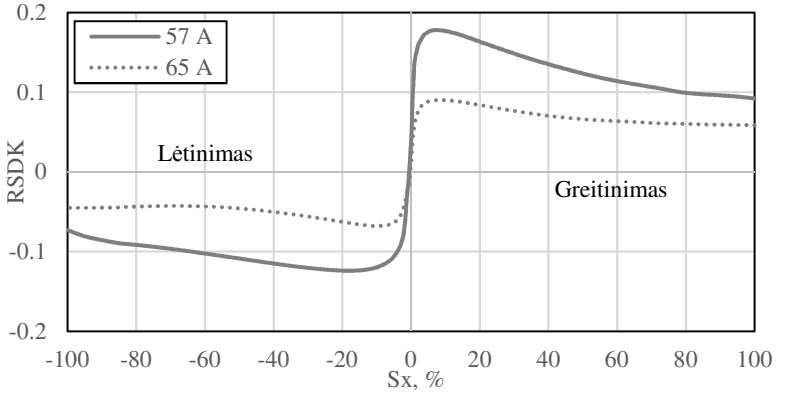
4.14 pav. Padangos ir ledo paviršių temperatūrų kitimas
Fig. 4.14. Change of the tire and ice surface temperature

Padangai pagreitėjant ledo ir padangos temperatūros šiek tiek sumažėja, tačiau pastebimas ryškus temperatūrų padidėjimas lėtinimo metu, nes ratas yra visiškai užblokuojamas. Dėl didelio padangos slydimo greičio išskiriamas didelis trinties šilumos kiekis. Tai iš dalies pagrindžia matematinio modeliavimo rezultatus, pateiktus 4.1 poskyryje, kuriais taip pat buvo nustatyta, jog didžiausia ledo temperatūra pasiekiama esant didžiausiam slydimui. Po stabdymo, esant laisvam riedėjimui, padangos ir ledo temperatūra sumažėja.

Iš terminių vaizdų 4.14 paveiksle matyti, jog labiausiai įšyla padangos protektoriaus grioveliai. Jie nėra aušinami šaltesnio ledo paviršiaus, o jų įšilimą lemia padangos deformacijos, išsiskirianti trinties šiluma ir kontakto plote suspaudžiama oro terpė.

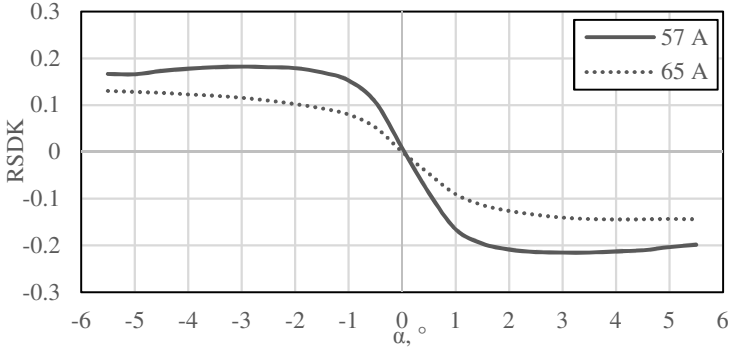
4.2.3. Skirtingų padangų išilginės ir skersinės dinamikos palyginimas

Atliktu eksperimentiniu tyrimų siekta palyginti dviejų skirtingo kietumo padangų išilginės ir skersinės sąveikos charakteristikas. Pradiniai matavimų duomenys: būgno greitis v_b = 30 km/h; padangos slėgis p = 2,2 bar; rato prispaudimo jėga F_z ~ 6300 N; rato išvirtimo kampas $\gamma = 0°$; aplinkos temperatūra $T_a = -4$ °C. Padangų protektoriaus mišinio kietumas A skalėje atitinkamai siekė 57 ir 65. Techninės padangų charakteristikos pateiktos 3 skyriuje. Su kiekviena padanga buvo atlikta po 5 bandymus ir vidutinių skersinio ir išilginio RSDK reikšmių kitimas pateiktas 4.15 ir 4.16 paveiksluose.



4.15 pav. Skirtingo kietumo padangų išilginio RSDK priklausomybė nuo slydimo
Fig. 4.15. Relationship between longitudinal force coefficient and slip for different tires

Akivaizdu, jog minkštesnio mišinio padanga pasižymi gerokai didesnėmis išilginio ir skersinio RSDK reikšmėmis ant ledo sluoksnio. Padangoms greitėjant maksimali RSDK reikšmė skiriasi dvigubai. Kietesnio mišinio padangos maksimalus RSDK siekia tik 0,09, o minkštesnės padangos – 0,18. Abi reikšmės pasiekiamos esant 8 % slydimui. Lėtėjimo metu, maksimalios RSDK reikšmės taip pat skiriasi du kartus. Kietesnė padanga 0,07 reikšmę pasiekia esant 8 % slydimui, o dvigubai didesnė minkštos padangos reikšmė pasiekiama esant 15 % slydimui. Taip pat iš 4.15 paveikslo galima matyti, jog kreivės, pasiekusios maksimalias išilginio RSDK reikšmes, kinta ne vienodai. Didesnis kreivės kritimas pastebimas minkštesnei padangai. Tam įtakos gali turėti skirtingas padangų protektoriaus raštas.



4.16 pav. Skirtingo kietumo padangų skersinio RSDK priklausomybė nuo skersridės kampo
Fig. 4.16. Relationship between lateral force coefficient and sideslip angle for different tires

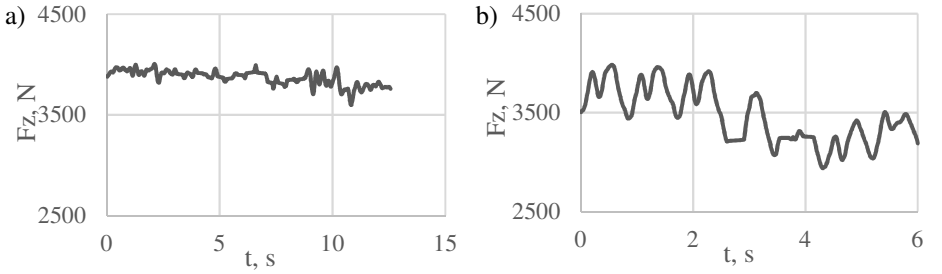
Nagrinėjant skersinę padangų dinamiką, minkštesnės padangos maksimalus RSDK siekia 0,19 ir pasiekiamas esant 2,5° skersridės kampui. Lyginant kietesnio mišinio padangą, galima palyginti tik reikšmes, esančias teigiamoje skersridės kampo pusėje. Šios reikšmės siekia 0,21 ir 0,14 atitinkamai minkšto ir kieto mišinio padangoms bei pasiekiamos esant 2,5° ir 4°. Neigiamoje skersridės kampo pusėje kreivė nepasiekia maksimalios išilginio RSDK reikšmės. Analogiška tendencija buvo pastebėta ir atlikus daugiau matavimų, todėl šios padangos tolimesniems tyrimams buvo nuspręsta nenaudoti.

Padangų palyginimo matavimai buvo atlikti su didesne vertikaliąja apkrova (~ 6300 N), todėl gautus rezultatus galima palyginti su prieš tai atliktu matavimu esant ~ 4260 N apkrovai –4 °C aplinkos temperatūroje. Padangos apkrovai padidėjus 34 %, maksimali RSDK reikšmė greitėjant padidėja 20 %, o padangą lėtinant – 25 %, pasukant padangą – nepasikeičia. Didesnes išilginio RSDK reikšmes lemia padidėjęs kontaktinis plotas. Padidėjus plotui, padidėja ir kontaktinio slėgio bei tangentinių įtempių reikšmės. Tuo galima paaiškinti ir minkštesnio mišinio padangos didesnes RSDK reikšmes lyginant su kieto mišinio padanga. Šie eksperimentiniai rezultatai iš dalies pagrindžia matematinio modeliavimo rezultatus, pateiktus 4.1 poskyryje.

4.3. Padangos sąveikos su sniego, ledo ir vandens mišinių sluoksniais eksperimentinių tyrimų rezultatų analizė

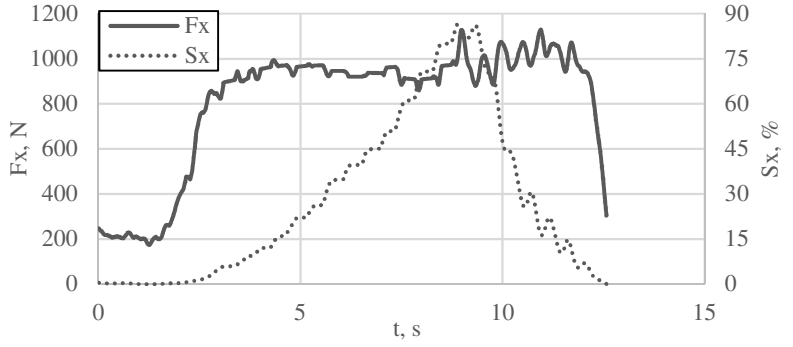
Atliekant padangų išilginės sąveikos parametrų matavimus, matavimų protokolas nebuvo naudojamas, duomenys buvo įrašomi stendą valdant rankiniu būdu. Vienas matavimas vidutiniškai truko 6 – 12 s. 4.16 paveiksle parodytas padangos reakcijos jėgos kitimas atliekant eksperimentą ir esant skirtingų mišinių sluoksniams, o 4.17 paveiksle – išilginės trinties jėgos ir slydimo reikšmių kitimas.

Lyginant padangos reakcijos jėgų kitimą su jau atliktais eksperimentais ant ledo dangos, pastebimas didesnis šių jėgų pulsavimas. Tą lemia pasikeitęs būgno paviršiaus sluoksnis, kuris yra ne vientisas ir nelygus. Iš 4.17 paveikslo matyti, jog atliekant matavimą, padanga, keičiant jos kampinį greitį, greitinama iki tam tikros maksimalios slydimo reikšmės ir po to greitis mažinamas, kol pasiekiamas laisvas riedėjimas.



4.16 pav. Padangos reakcijos jėgos kitimas vieno matavimo metu: a) sniego ir vandens mišinio sluoksnis; b) ledo ir vandens mišinio sluoksnis

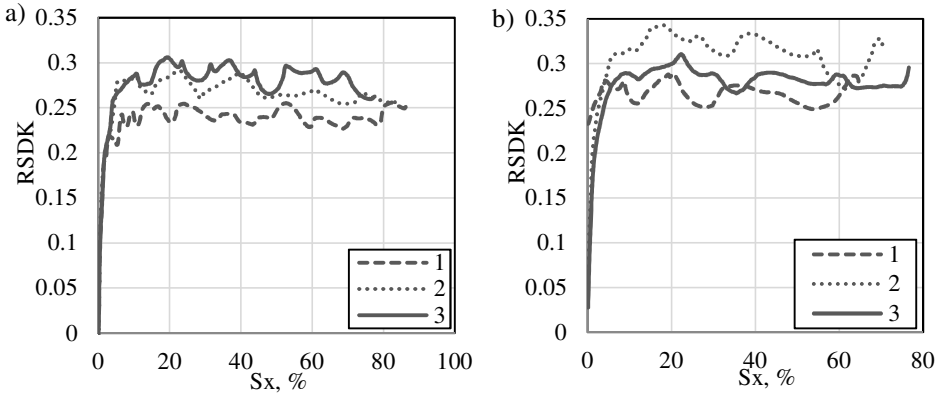
Fig. 4.16. Change of tire reaction force during the measurement: a – pavement of snow and water mixture; b – pavement of crushed ice and water mixture



4.17 pav. Išilginės trinties jėgos ir slydimo reikšmių kitimas atliekant matavimą

Fig. 4.17. Change of longitudinal force and slip during the measurement

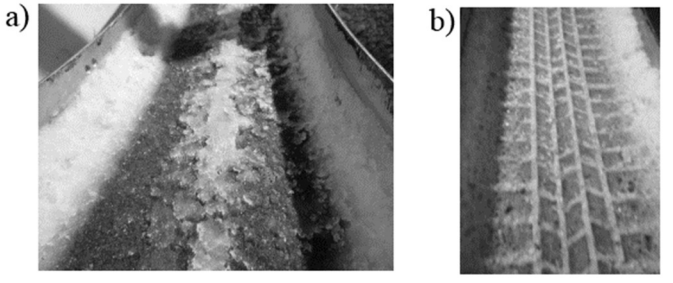
Atliktais padangos išilginės sąveikos parametrų su SVM ir SLVM sluoksniais matavimais siekta nustatyti sukurto metodo, pateikto 3 skyriuje, tinkamumą atlikti tokio pobūdžio eksperimentus ir įvertinti rezultatų sklaidą. Visi matavimai buvo atlikti su minkšto mišinio padanga, kurios techninės charakteristikos ir protektoriaus raštas pateiktas 3 skyriuje. Pradiniai matavimų duomenys: būgno greitis $v_b \sim 48$ km/h; rato prispaudimo jėga $F_z \sim 4000$ N; padangos slėgis $p = 2{,}2$ bar; išvirtimo kampas $\gamma = 0°$; aplinkos temperatūra kito nuo 0 °C iki +1 °C. Buvo keičiamas mišinių kiekis ir sudėtis bei nagrinėjamas tik rato greitinimas. Pirmieji matavimai buvo atlikti su SVM, kurio santykis 11:2,2 (110 *l* sniego ir 22 *l* vandens). Iš viso atlikti 3 matavimai, kurių kiekvieno vidutinės slydimo kreivių reikšmės pateiktos 4.18 a paveiksle.



4.18 pav. Matavimų vidutinių RSDK priklausomybė nuo slydimo skirtingo santykio sniego ir vandens mišinio sluoksniams: a) 11:2,2; b) 5,5:1

Fig. 4.18. Average values of longitudinal force coefficient for different ratios of snow and water mixture pavement: a) 11:2,2; b) 5,5:1

Pastebėta, jog padangai riedant būgno paviršiumi, mišinio sluoksnis yra sustumiamas į šonus (4.19 a pav.). Dėl to, atlikus du matavimus, buvo panaudotas specialus peilis (3.1 pav.) sluoksniui išlyginti ir atliktas trečiasis matavimas. Iš 4.18 a paveiksle pateiktų vidutinių slydimo reikšmių, galima pastebėti jų didėjimo tendenciją po kiekvieno matavimo. Tą lemia po kiekvieno matavimo mažėjantis mišinio kiekis, nes padangos protektorius dalį jo išsviedžia už būgno ribų. Pažymėtina, jog didžioji mišinio dalis išsviedžiama atgal ant būgno paviršiaus arba sustumiamia į šonus. Taip pat tam tikra mišinio dalis ištirpsta, nes matavimai atliekami teigiamoje temperatūroje.

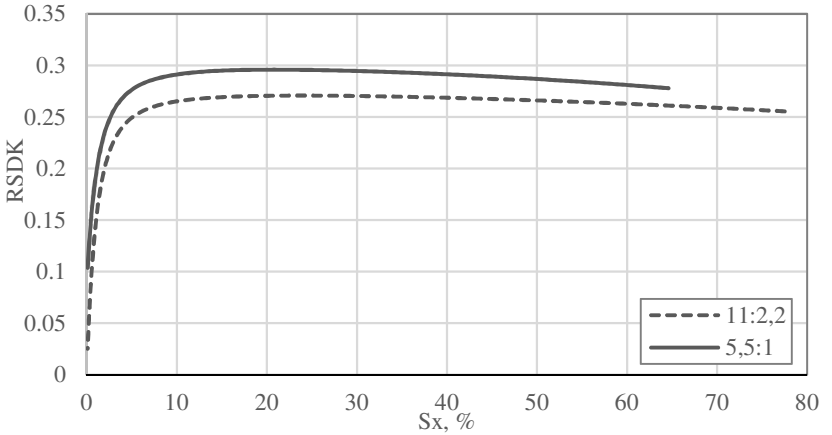


4.19 pav. Būgno paviršius po matavimų: a) sniego ir vandens mišinys; b) ledo ir vandens mišinys

Fig. 4.19. Drum track after the measurement: a) mixture of snow and water; b) mixture of crushed ice and water

Galutinis eksperimentų rezultatas yra visų trijų matavimų vidutinė slydimo kreivė, aproksimuota Pacejkos „Magiškąja“ formule. Šis būdas leidžia tiksliau nustatyti maksimalias kreivių reikšmes. Iš 4.20 paveiksle pateiktos kreivės matyti, jog maksimali RSDK reikšmė yra 0,27, kuri pasiekiama esant ~ 20 % slydimui.

Kiti 3 matavimai buvo atlikti su dvigubai mažesniu pradiniu mišinio kiekiu, kurio santykis buvo 5,5:1. Po dviejų matavimų sustumtas į šonus sluoksnis išlygintas peiliu. Vidutinės kiekvieno matavimo RSDK reikšmės pateiktos 4.18 b paveiksle, iš kurių matyti, jog po antro matavimo, reikšmės gerokai padidėja. Tai lemia sumažėjęs mišinio kiekis, kuris taip pat yra sustumiamias į šonus. Sustumtą sluoksnį išlyginus, RSDK reikšmės sumažėja, bet yra šiek tiek didesnės už pirmojo matavimo reikšmes. Šį padidėjimą gali lemti po pirmųjų dviejų matavimų sumažėjęs mišinio kiekis, kurio dalis yra išsviedžiama už būgno arba ištirpsta.



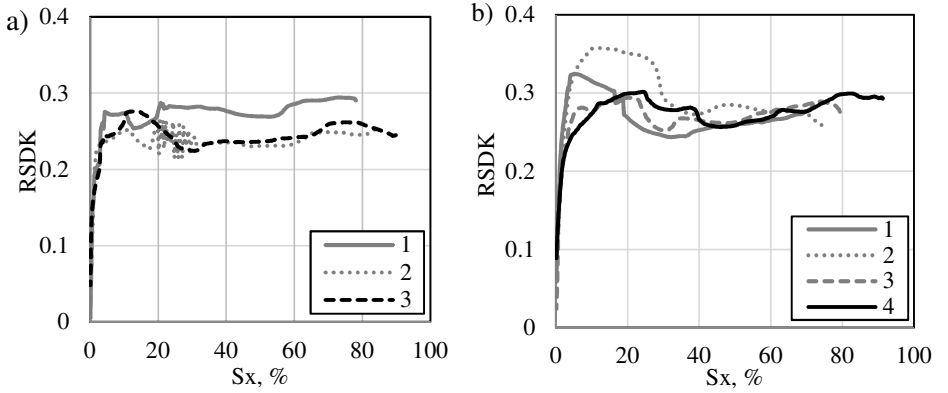
4.20 pav. Vidutinės išilginio slydimo kreivės skirtingo santykio sniego ir vandens mišiniams

Fig. 4.20. Average slip curves for different snow and water mixture ratios

Vidutinės kreivės maksimali RSDK reikšmė yra 0,3, kuri pasiekiama esant 20 % slydimui. Lyginant gautus abiejų eksperimentų su skirtingu SVM kiekiu rezultatus, pastebima akivaizdi RSDK reikšmių didėjimo tendencija mažėjant mišinio kiekiui. Tą galima paaiškinti didesniu padangos mechaninio kontakto plotu su būgno paviršiumi esant mažesniam mišinio kiekiui. Mišinio kiekiui didėjant, mechaninio kontakto plotas mažėja, dėl to perduodamos mažesnės išilginės trinties jėgos. Be to, mažesnis SVM kiekis yra lengviau išspaudžiamas padangos protektoriaus griovelių dėl mažesnio mišinio pasipriešinimo.

Tolesni matavimai buvo atlikti su SLVM sluoksniais, keičiant mišinio kiekį. Pirmieji matavimai atlikti su mišiniu, kurio santykis buvo 6:0,75 (60 *l* susmulkinto

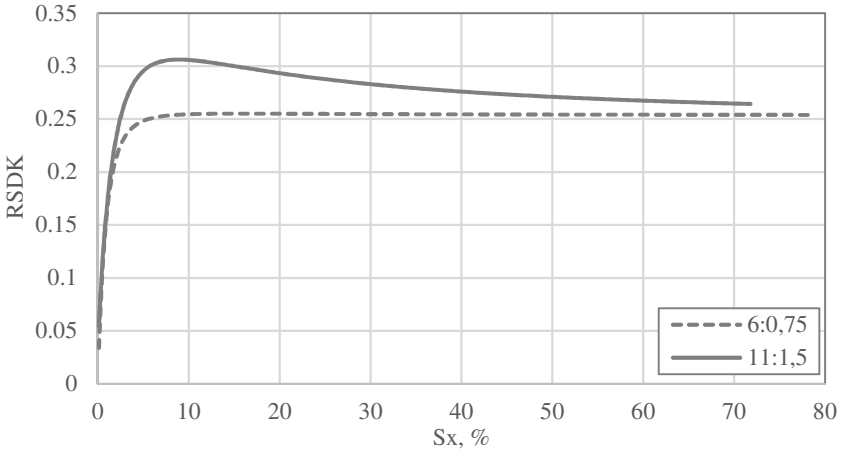
ledo ir 7,5 *l* vandens). Atlikti trys matavimai, o po dviejų sustumtas į šonus sluoksnis buvo išlygintas peiliu. Vidutinės kiekvieno matavimų RSDK reikšmės pateiktos 4.21 a paveiksle, iš kurių galima matyti, jog antrojo ir trečiojo matavimo reikšmės yra šiek tiek mažesnės lyginant su pirmuoju matavimu.



4.21 pav. Matavimų vidutinių RSDK priklausomybė nuo slydimo skirtingo santykio ledo ir vandens mišinio sluoksniams: a) 6:0,75; b) 11:1,5

Fig. 4.21. Average values of longitudinal force coefficient for different ratios of crushed ice and water mixture pavement: a) 6:0,75; b) 11:1,5

Vidutinės slydimo kreivės, pateiktos 4.22 paveiksle, maksimali RSDK reikšmė yra 0,25, kuri pasiekiama esant 15 % slydimui.



4.22 pav. Vidutinės išilginio slydimo kreivės skirtingo santykio ledo ir vandens mišiniams

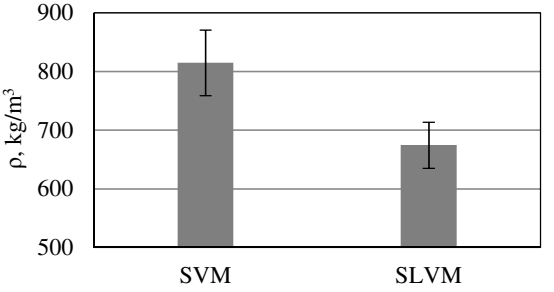
Fig. 4.22. Average slip curves for different crushed ice and water mixture ratios

Su dvigubai didesniu SLVM kiekiu, kurio santykis buvo 11:1,5, atlikti 4 matavimai. Sustumtas į šonus sluoksnis buvo išlygintas po dviejų matavimų ir po trečiojo. Iš 4.21 b paveiksle pateiktų vidutinių kiekvieno matavimo RSDK reikšmių matyti ženklus antrojo matavimo reikšmių padidėjimas. Išlyginus sustumtą sluoksnį ir atlikus trečiąjį ir ketvirtąjį matavimus, RSDK reikšmės sumažėjo.

Vidutinės kreivės maksimali RSDK reikšmė šiam sluoksniui yra 0,31 ir yra pasiekiama esant 10 % slydimui. Ši reikšmė yra 24 % didesnė negu prieš tai gauta maksimali RSDK esant dvigubai mažesniam SLVM kiekiui.

Didesnę maksimalią RSDK reikšmę esant didesniam mišinio kiekiui lemia didesnis jo sutankinimas, kuris matomas 4.19 b paveiksle. Dėl to padidėja šio sluoksnio pasipriešinimas kirpimo jėgoms.

Atliekant šiuos eksperimentus buvo matuojamas ir mišinių tankis. SVM sluoksniui atlikti 3 matavimai, o SLVM – 4. Vidutinės mišinių tankio reikšmės ir jų sklaida pateikti 4.23 paveiksle.



4.23 pav. Vidutinės mišinių tankio reikšmės ir jų sklaida
Fig. 4.23. Average density of different mixtures

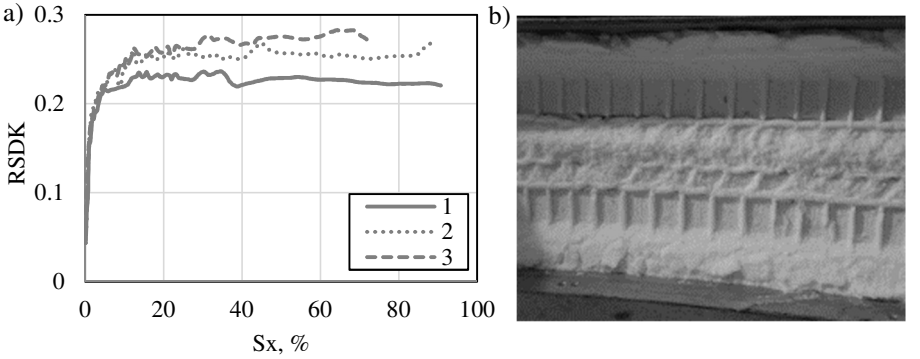
Pastebėta, jog mišinių tankis labai priklauso nuo vandens kiekio ir išmaišyto mišinio vientisumo. Vidutinis SVM tankis siekia 815 kg/m^3, o SLVM – 674 kg/m^3. SVM tankis yra artimesnis vandens tankiui, o SLVM – sniegui.

Atlikti padangos išilginės dinamikos tyrimai su SVM ir SLVM sluoksniais bei gautos RSDK priklausomybės nuo slydimo parodė, jog sukurta tyrimų metodika yra tinkama nagrinėti padangos sąveiką su minėtais sluoksniais.

4.4. Padangos sąveikos su sniegu eksperimentinių tyrimų rezultatų analizė

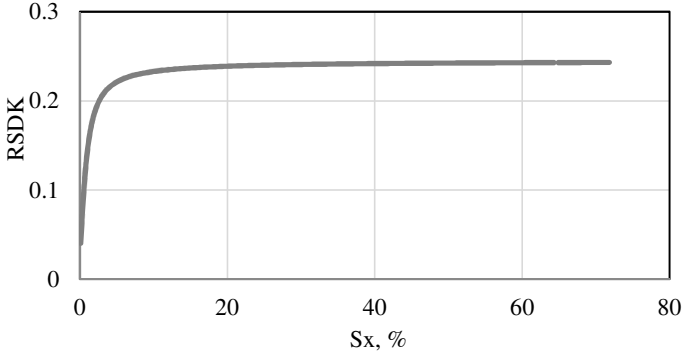
Nagrinėjant padangos išilginę sąveiką su puraus sniego sluoksniu, buvo atlikti 3 padangos greitinimo matavimai, kurių pradiniai duomenys: būgno greitis v_b = 30 km/h; padangos slėgis p = 2,2 bar; rato prispaudimo jėga F_z ~ 4200 N; rato

išvirtimo kampas $\gamma = 0°$. Matavimai atlikti vidutinėje –6 °C aplinkos oro temperatūroje. Eksperimentai atlikti su minkšta padanga. Duomenys įrašomi stendą valdant rankiniu būdu kaip ir atliekant padangos sąveikos matavimus su SVM ir SLVM sluoksniais. Vidutinės kiekvieno matavimo RSDK reikšmės pateiktos 4.26 a paveiksle., iš kurių matyti RSDK reikšmių didėjimas po kiekvieno matavimo. Tai lemia sniego dangos sutankinimas, matomas 4.26 b paveiksle. Tankėjant sniego dangai, didėja jos pasipriešinimas sniego kirpimo jėgoms. Sniego kirpimas labiausiai pasireiškia padangos protektoriaus grioveliuose.



4.26 pav. a) trijų matavimų vidutinių RSDK priklausomybė nuo slydimo; b) sniego sluoksnis po matavimų
Fig. 4.26. a) average longitudinal force coefficient values for every measurement; b) snow track after the measurement

Maksimali vidutinės kreivės, pateiktos 4.27 paveiksle, RSDK reikšmė yra 0,24, kuri pamažu kyla visame slydimo diapazone.



4.27 pav. Vidutinė išilginio slydimo kreivė
Fig. 4.27. Average longitudinal slip curve

Gautoji maksimali RSDK reikšmė yra artima pateiktajai ASTM F1805 standarte puraus sniego reikšmei, kuri kinta nuo 0,18 iki 0,22. Standarte pateiktos maksimalios RSDK reikšmės buvo gautos su skirtingo dydžio ir protektoriaus rašto padanga. Tiesišką RSDK reikšmių kitimą, pasiekus maksimalią reikšmę, lemia nuolat vykstantis sniego dangos kirpimas. Dėl to padanga geba perduoti dideles trinties jėgas esant didesniam slydimo greičiui. Ši tendencija pastebima ir su vidutiniškai sutankinto sniego danga Giessler *et al.* (2010a) atliktuose tyrimuose. Esant stipriai sutankinto sniego dangai, slydimo kreivės reikšmės, pasiekusios maksimumą, pastebimai mažėja.

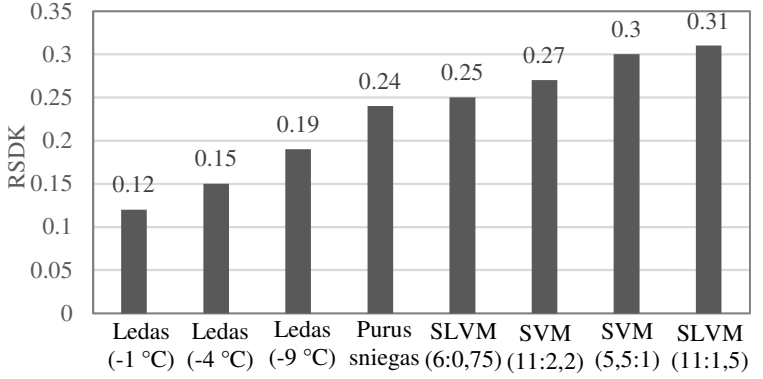
4.5. Maksimalių rato sukibimo su danga koeficiento reikšmių palyginimas

Maksimalios RSDK reikšmės, pateiktos 4.28 paveiksle, buvo palygintos išilginei sąveikai, nes šie eksperimentai buvo atlikti su visais nagrinėtais sluoksniais. Iš 4.28 paveikslo matyti, jog mažiausiu RSDK pasižymi ledo sluoksnis, esantis artimoje ledo tirpimui temperatūroje (–1 °C). Toliau RSDK reikšmės didėja, tačiau ledo sluoksnis išsiskiria mažesniu RSDK lyginant su kitais sluoksniais. Didžiausia RSDK buvo gauta SLVM sluoksniui, kurio mišinio santykis 11:1,5. Šio sluoksnio RSDK reikšmė yra daugiau nei 2,5 karto didesnė lyginant su gauta mažiausiąja.

Maksimalios RSDK reikšmės buvo palygintos su kituose moksliniuose darbuose publikuotomis reikšmėmis. Pažymėtina, jog rezultatų palyginimas daugeliu atvejų nėra tikslingas, nes skiriasi eksperimentų atlikimo eiga ir pradiniai parametrai (padangos dydis, jos protektoriaus raštas, slėgis, vertikalioji apkrova, aplinkos oro temperatūra), todėl buvo palyginti artimiausi eksperimentinių bandymų rezultatai. Gautoji RSDK reikšmė (0,12) ledo sluoksniui –1 °C temperatūroje yra artima Yamazaki *et al.* (2000) reikšmei (0,1), kuri buvo gauta toje pačioje temperatūroje naudojant 195/65 R15 dydžio padangą, kurios protektoriaus blokai turėjo 4 lameles. Važiavimo (būgno) greitis taip pat buvo identiškas – 30 km/h. Giessler *et al.* (2010a) maksimali RSDK reikšmė (0,17) ant ledo sluoksnio buvo gauta – 6 °C temperatūroje, esant tam pačiam būgno greičiui, vertikaliajai apkrovai ir slėgiui padangoje. Ši reikšmė patenka tarp –9 °C ir –4 °C temperatūroje gautų maksimalių RSDK, kurie atitinkamai yra 0,19 ir 0,15 (4.28 pav.).

Puraus sniego RSDK reikšmę galima palyginti tik su standarte pateiktąja. Tai buvo padaryta 4.4 poskyryje. Lyginant su Giessler *et al.* (2010a) pateiktomis maksimaliomis RSDK vidutiniškai sutankintam (0,4) ir stipriai sutankintam sniegui (0,42), gautoms –8 °C temperatūroje ir esant tai pačiai apkrovai ir slėgiui, puraus sniego RSDK (0,24) yra žymiai mažesnis. Šį skirtumą lemia didesnės pa-

sipriešinimo sniego kirpimui ir kasimosi jėgos. Lyginant su lauko tyrimais, kuriuos atliko Lee (2013) su TP, ant kurios sumontuotos P245/65 R17 padangos ir esant ne vienodam sauso sniego aukščiui, vidutinė RSDK reikšmė buvo 0,37 ir kito ±0,09 intervale.



4.28 pav. Maksimalių išilginių RSDK reikšmių palyginimas
Fig. 4.28. Comparison of peak values of longitudinal force coefficient

SVM ir SLVM maksimalias RSDK reikšmes galima palyginti tik su Lee ir Daisy (2016) darbe tirtomis RSDK šlapiam sniegui, kurios gautos atlikus tyrimus lauke su P245/65 R17 padangomis. Autorių gauta reikšmė lygi 0,22 ir kito ±0,05 intervale. Ši reikšmė artima SLVM dangai (0,25), kurios mišinio santykis 6:0,75 ir SVM dangai (0,27) su didesniu mišinio kiekiu (11:2,2).

Lyginant mažiausią gautąją RSDK (ledo sluoksnis esant –1 °C) su sauso asfalto danga (0,76), pateiktąja Pokorski *et al.* (2015) ir gautąja matuojant skidometru SRT–4 esant 30 km/h važiavimo greičiui, šių reikšmių skirtumas yra akivaizdus ir skiriasi daugiau nei 6 kartus. Lyginant sauso asfalto RSDK reikšmę su puriu sniegu, SVM (santykiu 11:2,2) ir SLVM (santykiu 11:1,5), šis skirtumas atitinkamai yra 3,2, 2,8 ir 2,5 karto.

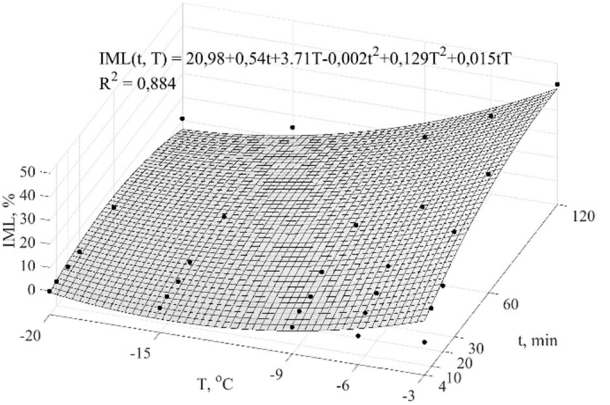
4.6. Ledą tirpinančių medžiagų veiksmingumo eksperimentinių tyrimų rezultatų analizė

Kiekvienos LTM laboratorinių tyrimų gauti rezultatai, kuriuos rodo taškų reikšmės (4.29–4.33 pav.) , buvo aproksimuoti antro laipsnio polinomine lygtimi:

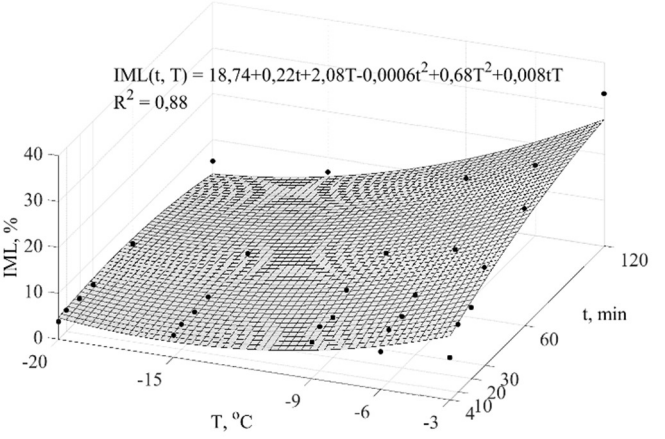
$$IML = A + Bt + CT + Dt^2 + ET^2 + FtT\ , \qquad (4.1)$$

čia *A, B, C, D, E, F* – regresijos koeficientai; *t* – LTM tirpinimo trukmė, min; *T* – tirpinamo ledo temperatūra.

Gautoms lygtims apskaičiuoti determinacijos koeficientai R^2, kintantys nuo 0,877 iki 0,91, rodo stiprią kintamųjų dydžių ir funkcijos koreliaciją.



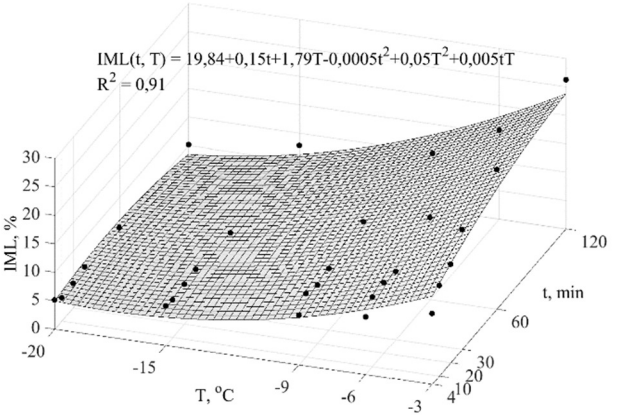
4.29 pav. Temperatūros ir tirpimo trukmės įtaka, kai naudojamas NaCl
Fig. 4.29. The influence of temperature and duration of melting action, when NaCl is applied



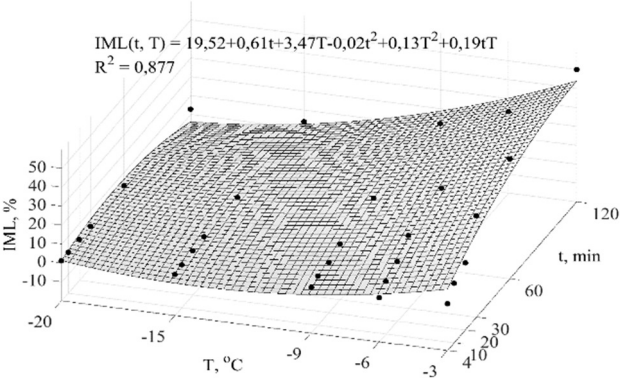
4.30 pav. Temperatūros ir tirpimo trukmės įtaka, kai naudojamas $CaCl_2$
Fig. 4.30. The influence of temperature and duration of melting action, when $CaCl_2$ is applied

Iš 4.29–4.33 paveiksluose pateiktų grafikų, galime matyti, jog visos tirtos LTM didžiausią ledo masės dalį ištirpina praėjus ilgiausiam laiko tarpui (120 min)

po LTM užbėrimo ir šios reikšmės pasiekiamos esant didžiausiai tirtai temperatūrai (–3 ºC).



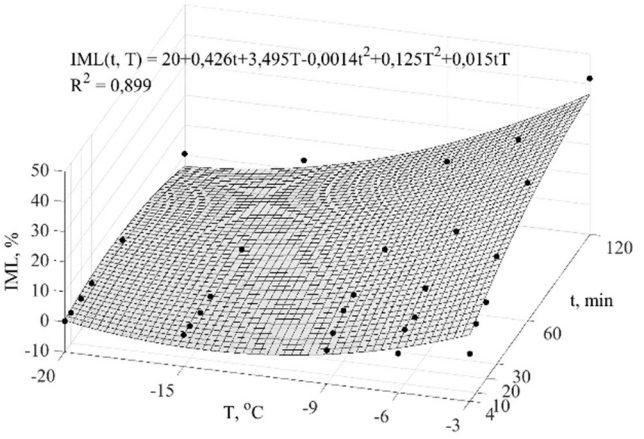
4.31 pav. Temperatūros ir tirpimo trukmės įtaka, kai naudojamas $MgCl_2$
Fig. 4.31. The influence of temperature and duration of melting action, when $CaCl_2$ is applied



4.32 pav. Temperatūros ir tirpimo trukmės įtaka, kai naudojamas Icemelt
Fig. 4.32. The influence of temperature and duration of melting action, when Icemelt is applied

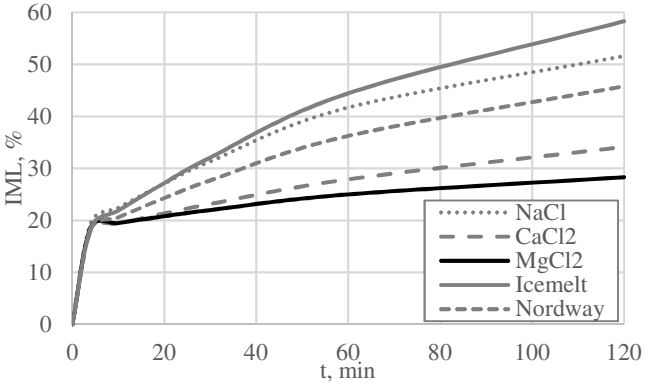
Žemėjant temperatūrai ištirpdyta ledo masės dalis mažėja. NaCl didžiausią ištirpdytą ledo masės dalį (40,9 %) pasiekia esant –3 ºC bei praėjus ilgiausiam

bandymo laikui (120 min). Esant –20 ºC temperatūrai, ši medžiaga praktiškai netirpdo ledo ir procentinis pokytis nesiekia 1 %. Panašiai elgiasi ir kitos tirtos LTM: $CaCl_2$ maksimali IML vertė siekė 33,2 %, o minimali (3,8 %) buvo –3 ºC temperatūroje prabėgus 4 min nuo užbėrimo. $MgCl_2$ maksimali IML vertė yra 26,2 %, o minimali (4,1 %) pasiekiama praėjus 10 min nuo užbėrimo. Nordway maksimali vertė gauta 41,9 %, o minimali taip pat buvo esant -20 ºC, tačiau ji neviršija net 0,5 %. Icemelt iš visų tirtų LTM ištirpdo didžiausią ledo masės dalį – apie 50 %, tačiau minimali IML reikšmė (1,1 %) pasiekiama -20 ºC temperatūroje praėjus 4 min nuo užbėrimo.



4.33 pav. Temperatūros ir tirpimo trukmės įtaka, kai naudojamas Nordway
Fig. 4.33. The influence of temperature and duration of melting action, when Nordway is applied

Padangų sąveikos su žiemos kelių dangomis eksperimentiniais tyrimais buvo nustatyta, jog mažiausiu RSDK pasižymi ledo danga esant –1 °C aplinkos oro temperatūrai. Kadangi LTM veiksmingumo tyrimų aukščiausia temperatūra buvo –3 °C, siekiant įvertinti LTM veiksmingumą –1 °C temperatūroje, buvo panaudotos išvestos polinominės lygtys ir perskaičiuotos IML reikšmės šiai temperatūrai kiekvienai LTM. Rezultatai pateikti 4.34 paveiksle.



4.34. pav. LTM veiksmingumo priklausomybė nuo tirpinimo trukmės –1 °C temperatūroje
Fig. 4.34. Dependency of the efficiency of different deicing materials at –1 °C temperature

Iš 4.34 paveikslo matyti, jog veiksmingiausiai –1 °C temperatūroje ledą tirpina Icemelt, kurio maksimali reikšmė 58 % pasiekiama praėjus maksimaliai nagrinėjamai trukmei. Antra pagal efektyvumą LTM yra NaCl, kurios maksimali IML reikšmė yra 52 %.

Taip pat siekta nustatyti ištirpinto 1 % ledo kainą, išbėrus vienodą LTM kiekį į 1 m^2. Visų tirtų LTM 2015 m. vidutinės rinkos kainos be PVM pateiktos 4 lentelėje. Ekonomiškai lyginant tirtas DM, apskaičiuojamas išberiamas druskos kiekis į 1 m^2 (10 g / 0.0867 m^2 =115 g/m^2).

4.1 lentelė Ledą tirpinančių medžiagų 2015 m. kainos
Table 4.1. Prices for all tested deicing materials in 2015

	Kaina	
LTM	1 tona, €	115 g/m^2, €·10^{-3}
NaCl	50	5,75
$CaCl_2$	360	41,4
$MgCl_2$	230	26,5
Icemelt	263	30,3
Nordway	1200	138

Apskaičiuojama kiekvienos medžiagos kainos dalis, atitinkanti ištirpinti 1 % ledo, kai LTM veikia 120 min., pagal formulę:

$$E = \frac{P_{kvad}}{IML}, \tag{4.2}$$

čia P_{kvad} – 1 m^2 ledui ištirpinti reikalingo LTM kiekio kaina; *IML* – ledo masės nuostoliai. Apskaičiuotos reikšmės pateiktos 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė Ištirpinto ledo vieno procento kaina po 120 min. išbėrus LTM, €·10^{-3}
Table 4.2. The price of one percent of melted ice, €·10^{-3}

LTM	Kaina esant skirtingoms temperatūroms, €·10^{-3}				
	-20 °C	-15 °C	-9 °C	-6 °C	-3 °C
NaCl	8,21	1,25	0,60	0,25	0,14
$CaCl_2$	7,81	6,09	4,10	2,71	1,25
$MgCl_2$	5,19	3,39	2,70	1,70	1,01
Icemelt	11,2	7,96	2,52	1,32	0,60
Nordway	345	46	16,6	7,42	3,29

Nustatyta, jog iki –15 ºC efektyviausia ledą tirpinti NaCl. Esant aukštesnei temperatūrai, efektyviausia LTM yra $MgCl_2$. Neefektyviai lyginant su kitomis LTM ledą tirpina Nordway. Esant –9 ºC, –6 ºC ir –3 ºC ledo temperatūroms, efektyvumų skirtumas yra atitinkamai 37, 28 ir 23 kartai lyginant su efektyviausia LTM – NaCl.

4.7. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Išanalizavus matematinio modeliavimo rezultatus, nustatyta, jog minkštesnio mišinio gumos blokas su lamelėmis pasižymi didesnėmis kontaktinio slėgio ir tangentinių įtempių reikšmėmis. Dėl to minkštesnio mišinio padanga gali perduoti didesnes trinties jėgas ant ledo sluoksnio, kurios buvo išmatuotos skirtingo protektoriaus kietumo padangoms. Modeliavimo rezultatai taip pat parodė, jog blokas su lamelėmis pasižymi tolygesniu slėgio pasiskirstymu kontakto zonoje lyginant su vientisu bloku.
2. Atlikus padangų sąveikos parametrų su ledo sluoksniu palyginamąją analizę esant skirtingoms aplinkos oro temperatūroms, pastebėtas išilginių ir skersinių RSDK reikšmių mažėjimas didėjant temperatūrai. Maksimali išilginė RSDK sumažėja nuo 0,19 iki 0,12 pagreitėjant, o stabdant kinta nuo 0,13 iki 0,07, kai aplinkos oro temperatūra sumažėja nuo –9 °C iki –1 °C. Atitinkamai skersinio RSDK maksimali reikšmė sumažėja nuo 0,22

iki 0,16. Atlikus padangos ir ledo paviršių temperatūrų matavimus, nustatyta, jog šiluma išsiskiria ir veikiant skersinei trinties jėgai. Taip pat pastebėta, jog labiausiai ledo paviršius įšyla esant maksimaliam slydimui. Tai buvo patvirtinta ir matematinio modeliavimo rezultatais, nagrinėjant slystantį protektoriaus bloko elementą.

3. Padangos išilginės sąveikos su SVM ir SLVM sluoksniais eksperimentinių rezultatų analizė parodė, jog didėjant SVM kiekiui, RSDK mažėja. Maksimali RSDK reikšmė sumažėjo nuo 0,3 iki 0,27, kai pradinis mišinio sluoksnio storis buvo padintas dvigubai. Su SLVM sluoksniu pastebėta atvirkštinė tendencija: didėjant mišinio sluoksnio kiekiui RSDK reikšmės didėjo. Maksimali RSDK reikšmė padidėjo nuo 0,25 iki 0,31 padidinus mišinio sluoksnio storį du kartus. Padangos sąveikos su SVM ir SLVM sluoksniais tyrimų metodas buvo pritaikytas puraus sniego sluoksniui. Gauta maksimali RSDK reikšmė 0,24 yra artima pateiktajai ASTM F1805 standarte.

4. Skirtingų LTM veiksmingumo analizė parodė, jog didžiausią ledo masės dalį (50 %) ištirpdo Icemelt. Žiemos kelių priežiūros tarnybų dažniausiai naudojama NaCl druska ištirpdo 41 % ledo. Abi šios reikšmės yra pasiekiamos –3 °C aplinkos oro temperatūroje ir praėjus didžiausiai nagrinėtai veikimo trukmei – 120 min. Žemėjant aplinkos temperatūrai, visų tirtų LTM ištirpdoma ledo masės dalis mažėja. Temperatūrai pasiekus –9 °C ir žemesnę, NaCl ištirpdomo ledo maksimali masės dalis nesiekia 10 %, o esant – 20 °C nesiekia nė 1 %. Esant labai žemoms aplinkos temperatūroms (–20 °C ir –15 °C), veiksmingiausios iš nagrinėtų LTM buvo $MgCl_2$ ir $CaCl_2$ druskos

5. Atlikus gautų maksimalių išilginių RSDK reikšmių palyginimą, nustatyta, jog mažiausia sankiba pasižymi ledo sluoksnis –1 °C aplinkos oro temperatūroje. Šio sluoksnio maksimalus RSDK yra daugiau nei 6 kartus mažesnis lyginant su sauso asfalto danga. Eksperimentiškai nustatyta, jog veiksmingiausia šį sluoksnį šalinti naudojant Icemelt ir NaCl druskas.

Bendrosios išvados

1. Iš matematinio modeliavimo rezultatų, nustatyta, jog didžiausiomis kontaktinio slėgio ir tangentinių įtempių reikšmėmis pasižymi minkštos gumos mišinio padangos protektoriaus blokas, sąveikaujantis su ledo sluoksniu. Didesnės šių dydžių reikšmės lemia ir geresnę padangos sankibą su ledo sluoksniu. Ši sąsaja taip pat patvirtinta atlikus eksperimentus su skirtingo kietumo padangomis. Minkšto mišinio padangos maksimalus RSDK buvo apie du kartus didesnis padangą greitinant ir lėtinant, o skersinis RSDK apie 33 % didesnis už kieto mišinio padangos.
2. Padangos sąveikos su ledo sluoksniu stendiniai bandymai leido nustatyti aplinkos temperatūros įtaką skersinės ir išilginės sankibos charakteristikoms: padangos sankiba mažėja kylant aplinkos oro temperatūrai. Maksimalios RSDK reikšmės, kai aplinkos oro temperatūra padidėjo nuo –9 °C iki –1 °C ratui riedant pastoviu greičiu, skersine kryptimi sumažėja apie 27 %. Ratui greitėjant ir lėtėjant RSDK atitinkamai sumažėjo apie 37 % ir 46 % nuo pradinės reikšmės, nustatytos –9 °C temperatūroje. Padangos ir ledo paviršiaus temperatūros matavimai parodė, jog veikiant skersinėms arba išilginėms trinties jėgoms ledo temperatūra padidėja ir maksimalią reikšmę pasiekia esant didžiausiam išiliginiam padangos slydimui.

3. Sukurta padangos sąveikos su sniego ir vandens, taip pat ledo ir vandens mišiniais eksperimentinių tyrimų metodika naudojant būgninį padangų tyrimo stendą, leidžianti nustatyti išilgines ir skersines padangos trinties jėgas. Ją taikant skirtingo storio (kiekio) sniego ir vandens sluoksniui, o taip pat ledo ir vandens sluoksniui, nustatytos padangos išilginės jėgos, kai ji buvo greitinama. Įvertinta pradinio sluoksnio storio įtaka išilginiam sukibimui padangai pagreitėjant. Didėjant sniego ir vandens mišinio sluoksnio storiui, RSDK mažėja. Pradiniam mišinio sluoksnio storiui sumažėjus perpus (nuo 4 cm iki 2 cm), RSDK padidėjo apie 11 %. Tiriant ledo ir vandens sluoksnio storio įtaką, pastebėta atvirkštinė tendencija: šio mišinio sluoksnio storiui sumažėjus perpus, RSDK sumažėjo apie 19 %. Taip pat gauta padangos sąveikos su puriu sniegu greitinimo charakteristika: maksimali RSDK reikšmė lygi 0,24 ir yra artima pateiktajai standarte, kuri lygi 0,22.
4. Palyginus skirtingų agregatinių būvių vandens sluoksniais padengtų kelio dangų maksimalias RSDK reikšmes, nustatyta, jog didžiausia RSDK (0,31) buvo ledo ir vandens mišinio sluoksniui, kurio pradinis storis buvo 4 cm. Mažiausias RSDK (0,12) buvo gautas ledo dangai – 1 °C aplinkos oro temperatūroje. Gautoji RSDK reikšmė yra daugiau nei 6 kartus mažesnė už sauso asfalto dangos. Šis ledo sluoksnis turėtų būti nedelsiant šalinamas. Atlikti skirtingų ledą tirpinančių medžiagų eksperimentiniai tyrimai parodė, jog efektyviausia tą būtų daryti naudojant Icemelt ir NaCl druskas.

Literatūra ir šaltiniai

Adreescu, P. M.; Frost, B. D. 1998. Weather and traffic accidents in Montreal, Canada, *Climate Research* 9 (3): 225–230. https://doi.org/10.3354/cr009225

Akin, M.; Shi, X. 2012. Development of Standard laboratory testing procedures to evaluate the performance of deicers, *Journal of Testing and Evaluation* 40 (6): 1–12. http://dx.doi.org/10.1520/JTE103615

Alagappan, V. A.; Rao Narasimha, V. K.; Kumar Krsihna, R. 2015. A comparison of various algorithms to extract Magic Formula tyre model coefficients for vehicle dynamics simulation, *Vehicle System Dynamics* 53(2): 154–178. http://dx.doi.org/10.1080/00423114.2014.984727

Asfaltas 08. 2009. *Automobilių kelių dangos konstrukcijos asfalto sluoksnių įrengimo taisyklės,* 49 p.

ASTM D2240-15. *Standard Test Method for Rubber Property–Durometer Hardness,* 2015.

ASTM E1136-14. *Standard Specification for P195/75R14 Radial Standard Reference Test Tire,* 2014.

ASTM E867-06. *Standard Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems,* 2006.

ASTM F1572-08. *Standard Test Methods for Tire Performance Testing on Snow and Ice Surfaces,* 2008.

ASTM F1805-12. *Standard Test Method for Single Wheel Driving Traction in a Straight Line on Snow- and Ice-Covered Surfaces,* 2012.

ASTM F1805-12. *Standard Test Method for Single Wheel Driving Traction in a Straight Line on Snow- and Ice-Covered Surfaces,* 2012.

ASTM F2493-06. *Standard Specification for P225/60R16 97S Radial Standard Reference Test Tire,* 2006.

ASTM F538-13. *Standard Terminology Relating to the Characteristics and Performance of Tires,* 2013.

Bachman, J. L. 2012. Snow traction performance of low rolling resistance drive tires for class-8 tractor trailers, *SAE Technical Paper* 2012–01–1918: 1–8. https://doi.org/10.4271/2012-01-1918

Bakker, E.; Nyborg, L.; Pacejka, B. H. 1987. Tyre modelling for use in vehicle dynamics studies, *SAE Technical Papers* 870421: 1–15. https://doi.org/10.4271/870421

Bhoopalam, K. A.; Sandu, C. 2014. Review of the state of the art in experimental studies and mathematical modelling of tire performance on ice, *Journal of Terramechanics* 53: 19–35. http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2014.03.007

Bhoopalam, K. A.; Sandu, C.; Taheri, S. 2014. Tire traction of commercial vehicles on icy roads, *SAE International Journal of Commercial Vehicles* 7(2): 357–365. https://doi.org/10.4271/2014-01-2292

Bhoopalam, K. A.; Sandu, C.; Taheri, S. 2015a. Experimental investigation of pneumatic tire performance on ice: Part 1 – Indoor study, *Journal of Terramechanics* 60: 43–54. http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2015.02.006

Bhoopalam, K. A.; Sandu, C.; Taheri, S. 2015b. Experimental investigation of pneumatic tire performance on ice: Part 2 – Outdoor study, *Journal of Terramechanics* 60: 43–54. http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2015.03.001

Bhoopalam, K. A.; Sandu, C.; Taheri, S. 2016. A tire-ice model (TIM) for traction estimation, *Journal of Terramechanics* 66: 1–12. http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra. 2016.02.003

Bolz, G. 2006. *Entwicklung eines prüfverfahrens für reifenmessungen auf schnee im labor*. Dissertation, Universität Karlsruhe. 169 p.

Bowden, P. F.; Hughes, P. T. 1939. The mechanism of sliding on ice and snow, *Proceedings of the Royal Society A* 172 (949): 280–298. https://doi.org/10.1098/rspa.1939.0104

Bulevičius, M.; Mučinis, D.; Čygas, D.; Laurinavičius, A.; Vaitkus, A. 2014. Materials and technologies for winter road maintenance in Lithuania, in *Proceedings of Winter Road Congress,* Andora. 61–67 p.

Chappelow, C. C.; McElroy, A. D.; Blackburn, R. R.; Darwin, D.; de Noyelles, F. G.; Locke, C. E. 1992. *Handbook of Test Methods for Evaluating Chemical Deicers:* Strategic Highway Research Program Reporpt No. SHRP–H–332, National Research Council, National Academy of Sciences, Washington. 283 p.

Chen, X.; Dai, S.; Yang, Y.; Yang, J.; Huang, X. 2016. Polishing of asphalt pavements: form macro- to micro-scale, *Journal of Testing and Evaluation* 44(2): 885–894. https://doi.org/10.1520/JTE20150271

Choi, H. J.; Cho, R. J.; Woo, S. J.; Kim, W. K. 2012. Numerical investigation of snow traction characteristics of 3-D patterned tire, *Journal of Terramechanics* 49: 81–93. https://doi.org/10.1016/j.jterra.2012.01.003

Coutermarsh, A. B.; Shoop, A. S. 2009. Tire slip-angle force measurements on winter surfaces, *Journal of Terramechanics* 46: 157–163. https://doi.org/10.1016/j.jterra.2008.08.002

Cuelho, E.; Harwood, J. 2012. Laboratory and field evaluation of anti-icing strategies, *Transportation Research Record* 2272: 144–151. http://dx.doi.org/10.3141/2272-17

Dörrie, H.; Schröder, C.; Wies, B. 2010. Winter tires: operating conditions, tire characteristics and vehicle driving behavior, *Tire Science and Technology* 38(2): 119–136. https://doi.org/10.2346/1.3428961

Dörrie, H.; Schröder, C.; Wies, B. 2010. Winter tires: operating conditions, tire characteristics and vehicle driving behavior, *Tire Science and Technology* 38(2): 119–136. https://doi.org/10.2346/1.3428961

Eddie, R. 1994. Ice, ABS, and temperature, *SAE Technical Paper* 940724: 163–168. https://doi.org/10.4271/940724

Eisenberg, D.; Warner, E. K. 2005. Effects of snowfalls on motor vehicle collisions, injuries, and fatalities, *American Journal of Public Health* 95(1): 120–124. https://doi.org/10.2105/AJPH.2004.048926

Ella, S.; Formagne, Y.P.; Koutsous, V.; Blackford, R. J. 2013. Investigation of rubber friction on snow for tyres, *Tribology International* 59: 292–301. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.01.017

Evans, B. C. D.; Nye, F. J.; Cheeseman, J. K. 1976. The kinetic friction of ice, *Proceedings of the Royal Society A* 347 (1651): 493–512. https://doi.org/10.1098/rspa.1976.0013

Fierz, C.; Armstrong, R. L.; Durand, Y.; Etchevers, P.; Green, E.; McClung, D. M.; Nishimura, K.; Satyawali, P. K.; Sokratov, S. A. 2009. *The International Classification for Seasonal Snow on the Ground,* IHP-VII Technical Documents in Hydrology Nr. 83. 90 p.

Fristedt, K; Norrbom, B. 1980. *Studies of contaminated runways*. The Aeronautical Research Institute of Sweden. 60 p.

Fujimoto, A.; Tokunaga, A. R.; Kiriishi, M.; Kawabata, Y.; Takahashi, N.; Ishida, T.; Fukuhara, T. 2014. A road surface freezing model, using heat, water and salt balance and its validation by field experiments, *Cold Regions Science and Technology* 106-107: 1–10. http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.06.001

Giessler, M. 2012. *Mechanismen der Kraftübertrangung des Reifens auf Schnee und Eis*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie. 194 p.

Giessler, M.; Gauterin, F.; Hartmann, B.; Wies, B. 2007. Influencing factors on force transmission of tires on snow tracks, *VDI Berichte 2014* 383: 1–16.

Giessler, M.; Gauterin, F.; Wiese, K.; Wies, B. 2010a. Influence of friction heat on tire traction on ice and snow, *Tire Science and Technology* 38(1): 4–23. https://doi.org/10.2346/1.3298679

Giessler, M.; Gauterin, F.; Wiese, K.; Wies, B. 2010b. Thermographische laboruntersuchungen der kraftübertragung von reifen auf winterlichen fahrbahnen, in *Proceedings of 19th Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motortechnik*, 1–25.

Giuliani, F.; Merusi, F.; Polacco, G.; Filippi, S.; Paci, M. 2012. Effectivness of sodium chloride-based anti-icing filler in asphalt mixtures, *Construction and Building Materials* 30: 174–179. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.036

Gomez, G. L. G.; Lonnergard, A.; Asher, H. M.; Nybacka, M.; Bakker, E.; Drugge, L. 2017. Analysis and optimisation of objective vehicle dynamics testing in winter conditions, *Vehicle System Dynamics* 55(7): 945–969. http://dx.doi.org/10.1080/00423114.2016.1278248

Haeberli, W.; Whitema, C.; Shroder, F. J. 2015. *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters.* Elsiever. 812 p.

Hayat, B. R.; Debbarh, M.; Antoniou, C.; Yannis, G. 2013. Explaining the road accident risk: weather effects, *Accident Analysis and Prevention* 60: 456–465. http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2013.03.006

Hayhoe, F. G.; Shapley, G. C. 1989. Tire force generation on ice, *SAE Technical Paper 890028*: 199–207. https://doi.org/10.4271/890028

Higgins, D. D.; Marmo, A. B.; Jeffree, E. Ch.; Koutsos, V.; Blackford, R. J. 2008. Morphology of ice wear from rubber-ice friction tests and its dependence on temperature and sliding velocity, *Wear* 265: 634–644. https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.12.015

Hjort, M.; Eriksson, O.; Bruzelius, F. 2017. Comprehensive study of the performance of winter tires on ice, snow, and asphalt roads: the influence of tire type and wear, *Tire Science and Technology* 45(3): 175-199. https://doi.org/10.2346/tire.17.450304

Hossain, K. M. S.; Fu, L.; Olesen, J. A. 2014. Effectiveness of anti-icing operations for snow and ice control of parking lots and sidewalks, *Canadian Journal of Civil Engineering* 41: 523–530. http://dx.doi.org/10.1139/cjce-2013-0587

Huemer, T.; Liu, N. W.; Eberhardsteiner, J.; Mang, A. H. 2001. A 3D finite element formulation describing the frictional behavior of rubber on ice and concrete surfaces, *Engineering Computations* 18 (3/4): 417–436. http://dx.doi.org/10.1108/02644400110387109

Ignatyev, A. P.; Ripka, S.; Mueller, N.; Trbuegge, S.; Wies, B. 2015. Tire ABS-braking prediction with lab tests and friction simulations, *Tire Science and Technology* 43(4): 260–275. https://doi.org/10.2346/tire.15.430401

Yamazaki, S.; Yamaguchi, M.; Hiroki, E.; Suzuki, T. 2000. Effects of number of siping edges in a tire tread block on friction property and contact with an icy road, *Tire Science and Technology* 28(1):58–69. https://doi.org/10.2346/1.2135992

Yokoyama, T.; Hiratsuka, K.; Notoni, Sh. 2015. A study of tire characteristics and vehicle performance on snow-covered roads, *SAE Technical Paper* 2015–01–1522: 1–9. https://doi.org/10.4271/2015-01-1522

Jazar, N. R. 2014. *Vehicle Dynamics: Theory and Application,* Springer. 1066 p.

Kietzig, M. A.; Hatzikiriakos, G. S.; Englezos, P. 2010. Physics of ice friction, *Journal of Applied Physics* 107(8): 1–15. https://doi.org/10.1063/1.3340792

Klapproth, C.; Kessel, M. T.; Wiese, K.; Wies, B. 2016. An advanced viscous moder for rubber-ice-friction, *Tribology International* 99: 169–181. http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2015.09.012

Lahayne, O.; Pichler, B.; Reihsner, R.; Eberhardsteiner, J.; Suh, J.; Kim, S.; Nam, S.; Paek, H.; Lorenz, B.; Persson, J. N. B. 2016. Rubber friction: experiments and modeling, *Tribology Letters* 62: 1–19. https://doi.org/10.1007/s11249-016-0665-z

Laurinavičius, A.; Čygas, D.; Vaitkus, A.; Ratkevičius, T.; Bulevičius, M.; Mučinis, D.; Baltrušaitis, A. 2016. Research of snow melting materials performance efficiency for road winter maintenance, *Transport* 31(3): 322–332. doi:10.3846/16484142.2016.1211551

Lee, H. J. 2008. Longitudinal interfacial forces of the interaction of a treaded tire with snow, *SAE International Journal of Passenger Cars* 1(1): 1–9. https://doi.org/10.4271/2008-01-1415

Lee, H. J. 2011a. An improved slip-based model for tire-snow interaction, *SAE International Journal of Materials and Manufacturing* 4(1): 278–288. https://doi.org/10.4271/2011-01-0188

Lee, H. J. 2011b. Finite element modeling of interfacial forces and contact stresses of pneumatic tire on fresh snow for combined longitudinal and lateral slips, *Journal of Terramechanics* 48: 171–197. https://doi.org/10.1016/j.jterra.2010.12.003.

Lee, H. J.; Huang, D. 2016. Vehicle-wet snow interaction: testing, modeling and validation, *Journal of Terramechanics* 67: 37–51. http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2016.08.001

Lee, H. J.; Huang, D.; Johnson, H. T.; Meurer, S.; Reid, A. A.; Meldrum, R. B. 2012. Slip-based experimental studies of a vehicle interacting with natural snowy terrain, *Journal of Terramechanics* 49: 233–244. http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2012.07.002

Lee, H. J.; Liu, Q.; Mourelatos, P. Z. 2006. Simulation of tire-snow interfacial forces for a range of snow densities with uncertainty, *SAE Technical paper* 2006–01–0497: 3–12. https://doi.org/10.4271/2006-01-0497

Lee, H. J.; Liu, Q.; Zhang, T. 2005. Predictive semi-analytical model for tire-snow interaction, *SAE Technical Paper* 2005-01-0932: 3–14. https://doi.org/10.4271/2005-01-0932

Leonovič, I.; Laurinavičius, A.; Čygas, D. 2014. *Keliai ir klimatas*. Technika. 168 p.

Li, L.; Sandu, C.; Lee, J.; Liu, B. 2009. Stochastic modeling of tire-snow interaction using a polynomial chaos approach, *Journal of Terramechanics* 46: 165–188. https://doi.org/10.1016/j.jterra.2009.06.006

Linke, T.; Wiese, K.; Wangenheim, M.; Wies, B.; Wallaschek, J. 2017. Investigation of snow milling mechanics to optimize winter tire traction, *Tire Science and Technology* 45(3): 162–174. https://doi.org/10.2346/tire.17.450302

Macnabb, J. M.; Baerg, R.; Sanderson, S.; Chafe, B.; Navin, F. 1996. Tire/Ice friction values, *SAE Technical Paper* 960959: 1–9. https://doi.org/10.4271/960959

Mamčic, S.; Sivilevičius, H. 2014. The analysis of traffic accidents on Lithuanian regional gravel roads, *Transport* 28(1): 108–115. http://dx.doi.org/10.3846/16484142.2013.782894

Martin, P. D.; Schaefer, F. G. 1996. Tire-road friction in winter conditions for accident reconstruction, *SAE Technical Paper* 960657*:* 1–18. http://dx.doi.org/10.4271/960657

Meywerk, M. 2015. *Vehicle Dynamics.* Wiley. 360 p.

Mundl, R.; Meschke, G.; Liederer, W. 1997. Friction mechanism of tread blocks on snow surfaces, *Tire Science and Technology* 25(4): 245–264. https://doi.org/10.2346/1.2137543

Nakajima, Y. 2003. Analytical model of longitudinal tire traction in snow, *Journal of Terramechanics* 40: 63–82. https://doi.org/10.1016/j.jterra.2003.09.003.

Nakajima, Y. 2011. Application of computational mechanics to tire design – yesterday, today, and tomorrow, *Tire Science and Technology* 39(4): 223–244. https://doi.org/10.2346/1.3670034

Navin, F.; Macnabb, M.; Nicolletti, C. 1996. Vehicle traction experiments on snow and ice, *SAE Technical Paper* 960652: 1–11. https://doi.org/10.4271/960652.

Nilssen, K.; Paste-Klein, A.; Wahlin, J. 2016. Accuracy of ice melting capacity tests: Review of melting data for sodium chloride, *Transportation Research Record* 2551: 1–9. https://doi.org/10.3141/2551-01

Oksanen, P.; Keinonen, J. 1982. The mechanism of friction of ice, *Wear* 78 (3): 315–324. https://doi.org/10.1016/0043-1648(82)90242-3

Oosten, V. M. J. J.; Bakker, M. 1992. Determination of Magic tyre model parameters, *Vehicle System Dynamics* 21: 19–29. https://doi.org/10.1080/00423119208969995

Optris. 2014. *Infrared thermometers operator's manual.* Optris GmbH. 97 p.

Pacejka, B. H. 2012. *Tire and Vehicle Dynamics*. Elsiever. 672 p.

Pacejka, B. H.; Bakker, E. 1992. The magic formula tyre model, *Vehicle System Dynamics* 21: 1–18. http://dx.doi.org/10.1080/00423119208969994

Paste-Klein, A.; Potapova, J. 2014. Thermal aspects of melting ice with deicer solution, *Transportation Research Record* 2440: 69–75. http://dx.doi.org/10.3141/2440-09

Paste-Klein, A.; Sinha, K. N.; 2010. Comparison between rubber–ice and sand–ice friction and the effect of loose snow contamination, *Tribology International* 43: 1145–1150. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.12.037

Peng, D. X.; Xie, B. Y.; Guo, H. K. 1999. A tire traction modeling for use in ice mobile, *SAE Technical Paper* 1999–01–0478: 3–10. https://doi.org/10.4271/1999-01-0478

Peng, D. X.; Xie, B. Y.; Guo, H. K. 2000. A new method for determining tire traction on ice, *SAE Technical Paper* 2000-04-1640: 3–9. https://doi.org/10.4271/2000-01-1640

Perrson, J. N. B. 2011. Rubber friction and tire dynamics, *Journal of Physics: Condensed Matter* 23 (1): 1–14.

Persson, J. N. B. 2001. Theory of rubber friction and contact mechanics, *The Journal of Chemical Physics* 115 (8): 3840–3861. https://doi.org/10.1063/1.1388626

Persson, J. N. B. 2006. Rubber friction: role of the flash temperature, *Journal of Physics: Condensed Matter* 18: 7789–7823. https://doi.org/10.1088/0953-8984/18/32/025

Persson, J. N. B. 2015. Ice friction: role of non–uniform frictional heating and ice premelting, *The Journal of Chemical Physics* 143: 1–9. https://doi.org/10.1063/1.4936299

Petrenko, F. V.; Whitworth, W. R. 1999. *Physics of Ice.* Oxford. 386 p.

Petrovic, J. J. 2003. Review of mechanical properties of ice and snow, *Journal of Materials Science* 38: 1–6. https://doi.org/10.1023/A:1021134128038

Phetteplace, G.; Shoop, S.; Slagle, T. 2007. Measuring lateral tire performance on winter surfaces, *Tire Science and Technology* 35(1): 56–68. https://doi.org/10.2346/1.2698573

Pokorski, J.; Renski, A.; Sar, H. 2015. System for investigation of friction properties of the road surface, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 10(2): 126–131. https://doi.org/10.3846/bjrbe.2015.16

Pukalskas, S.; Pečeliūnas, R.; Sadauskas, V.; Kilikevičienė, K.; Bogdevičius, M. 2015. The methodology for calculation of road accident costs, *Transport* 30(1): 33–42. http://dx.doi.org/10.3846/16484142.2015.1020871

Qiu, L.; Nixon, A. W. 2008. Effects of adverse weather on traffic crashes, *Transportation Research Record* 2055: 139–146. https://doi.org/10.3141/2055-16

Rantonen, M.; Tuononen, J. A.; Sainio, P. 2012. Measuring stud and rubber friction on ice under laboratory conditions, *International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing* 7(2): 194–207. https://doi.org/10.1504/IJVSMT.2012.048447

Ripka, S. 2012. *Experimental investigation and modeling of tire tread block friction on ice*. Dissertation, Leibniz Universität Hannover. 111 p.

Ripka, S.; Gäbel, G.; Wangenheim, M. 2009. Dynamics of a siped tire tread block–experiment and simulation, *Tire Science and Technology* 37(4): 323–339. https://doi.org/10.2346/1.3148296

Ripka, S.; Lind, H.; Wangenheim, M.; Wallaschek, J.; Wiese, K.; Wies, B. 2012. Investigation of friction mechanisms of siped tire tread blocks on snowy and icy surfaces, *Tire Science and Technology* 40(1): 1–24. https://doi.org/10.2346/1.3684409

Ripka, S.; Mihajlovic, S.; Wagenheim, M.; Wallaschek, J.; Wiese, K.; Wies, B. 2009. Tread block mechanics on ice and snow surfaces studied with a new high speed linear friction test rig, in *12th International Congress Tire-Chasis-Road,* 239–254.

Roberts, D. A. 1981. Rubber–ice adhesion and friction, *The Journal of Adhesion* 13(1): 77–86. https://doi.org/10.1080/00218468108073176

Roberts, D. A.; Richardson, C. J. 1981. Interface study of rubber–ice friction, *Wear* 67: 55–69. https://doi.org/10.1016/0043-1648(81)90075-2

Salimi, S.; Nassiri, S.; Bayat, A.; Halliday, D. 2016. Lateral coefficient of friction for characterizing winter road conditions, *Canadian Journal of Civil Engineering* 43: 73–83. https://doi.org/10.1139/cjce-2015-0222

Sandu, C.; Taylor, P. B.; Biggans, S. J.; Ahmadian, M. 2008. Building and infrastructure for indoor terramechanics studies: The development of a terramechanics rig at Virginia tech, in *16th International Conference of the International Society for Terrain–Vehicle Systems,* 177–185.

Sapragonas, J.; Keršys, A.; Makaras, R.; Lukoševičius, V.; Juodvalkis, D. 2014. Research of the influence of tire hydroplaning on directional stability of vehicle, *Transport* 28(4): 374–380. http://dx.doi.org/10.3846/16484142.2013.865673

Savitsky, D.; Schleinin, D.; Ivanov, V.; Augsburg, K.; Jimenez, E.; He, R.; Sandu, C.; Barber, P. 2017. Improvement of traction performance and off-road mobility for a vehicle with four individual electric motors: driving over icy road, *Journal of Terramechanics* 69: 33–43. http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2016.10.005

Schramm, D.; Hiller, M. Bardini, R. 2014. *Vehicle Dynamics: Modeling and Simulation.* Springer. 405 p.

Seeherman, J.; Liu, Y. 2015. Effects of extraordinary snowfall on traffic safety, *Accident Analysis and Prevention* 81: 194–203. http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2015.04.029

Seta, E.; Kamegawa, T.; Nakajima, Y. 2003. Prediction of snow/tire interaction using explicit FEM and FVM, *Tire Science and Technology* 31(3): 173–188. https://doi.org/10.2346/1.2135267

Shi, X.; Fortune, K.; Smithlin, R.; Akin, M.; Fay, L. 2013. Exploring the performance and corrosivity of chloride deicer solutions: Laboratory investigation and quantitative modeling, *Cold Regions Science and Technology* 86: 36–44. http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.10.011

Shi, X.; Jungwirth, S.; Akin, M.; Wright, R.; Fay, L.; Veneziano, A. D.; Zhang, Y.; Gong, J.; Ye, Z. 2014. Evaluating snow and ice control chemicals for environmentally sustainable highway maintenance operations, *Journal of Transportation Engineering* 140(11): 1–8. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000709

Shoop, S.; Kestler, K.; Haehnel, R. 2006. Finite element modeling of tires on snow, *Tire Science and Technology* 34 (1): 2–37. https://doi.org/10.2346/1.2169827

Shoop, S.; Young, B.; Alger, R.; Davis, J. 1994. Effect of test method on winter traction measurements, *Journal of Terramechanics* 31(3): 153–161. https://doi.org/10.1016/0022-4898(94)90012-4

Sivilevičius, H. 2011. Modelling the interaction of transport system elements, *Transport* 26(1): 20–34. http://dx.doi.org/10.3846/16484142.2011.560366

Skouvaklis, G.; Blackford, R. J.; Koutsos, V. 2012. Friction of rubber on ice: A new machine, influence of rubber properties and sliding parameters, *Tribology International* 49: 44–52. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.12.015

Sokolovskij, E. 2007. Automobile braking and traction characteristics on the different road surfaces, *Transport* 22 (4): 275–278. https://doi.org/10.1080/16484142.2007.9638141

Svendenius, J.; Gafvert, M.; Bruzelius, F.; Hulten, J. 2009. Experimental validation of the brush tire model, *Tire Science and Technology* 37(2): 122–137. https://doi.org/10.2346/1.3130985

Theofilatos, A.; Yannis, G. 2014. A review of the effect of traffic and weather characteristics on road safety, *Accident Analysis and Prevention* 72: 244–256. http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2014.06.017

Topp, A.; Kendziorra, N.; Wies, B.; Lange, H. 2008. Braking force transfer capabilities of tires on wet roads, in *17th EVU Annual Congress Proceedings*, 205–214.

Usman, T.; Fu, L.; Moreno-Miranda, F. L.; 2010. Quantifying safety benefit of winter road maintenance: accident frequency modeling, *Accident Analtsis and Prevention* 42: 1878-1887. https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.05.008

Usman, T.; Fu, L.; Moreno-Miranda, F. L.; 2012. A dissagregate model for quatifying the safety effects of winter road maintenance activities at an operational level, *Accident Analysis and Prevention* 48: 368–378. https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.02.005

Venkatesh, S. 1975. Laboratory studies of the friction of rubber on ice, *Tribology International* 8(2): 51–55. https://doi.org/10.1016/0301-679X(75)90052-3

Wahlin, J.; Leisinger, S.; Paste, K. A. 2014. The effect of sodium chloride solution on the hardness of compacted snow, *Cold Regions Science and Technology* 102: 1–7. http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.02.002

Wahlin, J.; Paste, K. A. 2015. The effect of common de-icing chemicals on the hardness of compacted snow, *Cold Regions Science and Technology* 102: 28–32. http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.09.007

Wallaschek, J.; Wies, B. 2013. Tyre tread-block friction: modelling, simulation and experimental validation, *Vehicle System Dynamics* 51(7): 1017–1026. https://doi.org/10.1080/00423114.2013.803580

Wassertheurer, B.; Gauterin, F. 2015. Investigations on winter tire characteristics on different track surfaces using statistical approach, *Tire Science and Technology* 43(3): 195–215. https://doi.org/10.2346/tire.15.430304

Wiese, K.; Kessel, M. T.; Mundl, R.; Wies, B. 2012. An analytical thermodynamic approach to friction of rubber on ice, *Tire Science and Technology* 40(2): 124–150. https://doi.org/10.2346/1945-5852-40.2.124

Wu, J.; Wang, S. Y.; Su, L. B.; Liu, Q. 2014. Experimental and numerical studies on tire tread block friction characteristics based on a new test device, *Advances in Material Science and Engineering* 2014: 1–9. http://dx.doi.org/10.1155/2014/816204

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Ružinskas, A.; Bulevičius, M.; Sivilevičius, H. 2016. Laboratory investigation and efficiency of deicing materials used in road maintenance, *Transport* 31(2): 147–155. ISSN 1648–4142 (Clarivate Analytics Web of Science; IF: 1,163).

Ružinskas, A. 2016. Automobilio padangos sąveikos su ledu termografiniai tyrimai, *Mokslas – Lietuvos ateitis: Statyba, transportas, aviacinės technologijos* 8(5): 509–513. ISSN 2029–2341.

Ružinskas, A. 2017. Padangos protektoriaus elementų sąveikos ledu modeliavimas ir tyrimas, *Mokslas – Lietuvos ateitis: Statyba, transportas, aviacinės technologijos* 9(5): 565–570. ISSN 2029–2341.

Straipsniai kituose leidiniuose

Ružinskas, A.; Sivilevičius, H. 2014. Influence of winter weather changes on road pavement condition in Lithuania, *The 9th International Conference „Enviromental Engineering"*, May 22–23, Vilnius, Lithuania. p. 1–6. ISSN 2029–7092 (Clarivate Analytics Proceedings).

Ružinskas, A.; Sivilevičius, H. 2017a. Investigation and comparison of tires performance on ice, *10th International Conference „Enviromental Engineering"*, April 27–28, Vilnius, Lithuania. p. 1–6. ISSN 2029–7092.

Ružinskas, A.; Sivilevičius, H. 2017b. Magic formula tyre model application for a tyre–ice interaction, *TRANSBALTICA 2017: Transportation Science and Technology: Proceedings of the 10th International Scientific Conference*, May 4–5, Vilnius, Lithuania. vol. 187: 335–341. ISSN 1877–7058 (Clarivate Analytics Proceedings).

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

The difference of traffic conditions in wintertime is significant comparing with summertime. In countries with the clear climate seasonality (Scandinavian, Baltic), a precipitation covering the road pavement turns into ice, loose or compacted snow and doesn't allow the wheels to be in the direct contact with the road. The properties of these layers change over the amount of precipitation, intensity, ambient temperature and reduce the wheel grip parameters with the road. In many countries, including and Lithuania, the pavements of main highways should be cleaned mechanically, or snow and ice layer should be melted with salts. If it won't have been done in time, the tire becomes the main component of the car chassis interacting with the road. Thus, the values of longitudinal and lateral friction forces generated in the contact patch are strongly dependent on tire's condition and external parameters (vertical load, inflation pressure, temperature, driving speed).

The vehicle tires have to ensure not only the low rolling resistance, but also have to guarantee the good grip with the road. The force coefficient is one of the main parameters influencing the vehicle dynamics. The high values of force coefficient ensure the fast vehicle acceleration, good maneuverability and effective braking, and it directly affects the road safety in wintertime.

The thesis focuses on tire force transmission with different winter road conditions. In order to determine the friction forces transmitted by the tire on different winter tracks, experimental research was conducted.

Relevance of the thesis

Many traffic accidents occur due to slippery road in wintertime when tires loose the grip with the road and it becomes harder to control the vehicle. Also a serious danger is the fact, that slippery road could increase the braking distance even couple times comparing with the dry road. A negative influence of the slippery road is also on vehicle acceleration. The slipping wheels reduce the dynamics of the vehicle. Thus, there is a significant decrease in acceleration when vehicle starts moving, overtaking or maneuvering. The slipping wheels can cause and energy losses. The fuel consumption is increased leading to more polluted air.

Despite the fast improvement and increasing application of the vehicle active safety systems (ABS, TCS, ESP, DSC, EBD), it is still necessary to analyse the opportunities of tire grip assurance in any weather conditions. It‘s more reasonable to avoid the tire slip than try to handle the vehicle using various safety systems or due to excellent driving skills. Lithuania belongs to the climate zone where ambient temperature fluctuates about 0 °C many times in wintertime and it leads to formation of mixed precipitation (snow–ice–water) on the road. The tire interaction and physical processes with these layers aren‘t fully investigated, so the topic has scientific novelty and practical value.

The object of the research

The object of the research is the interaction of the passenger car tire and its tread compononents with snow and ice covered pavement.

The aim of the thesis

To develop the research methodology for establishing the transmitted forces of the tire on different winter road pavements.

The tasks of the thesis

For an implementation of the aim of the thesis, the following tasks were set:

1. To analyze the scientific research on the tire force transmission with snow and ice covered pavement as well as mathematical and experimental establishment methods of tire friction forces.
2. To develop a tire tread interaction model evaluating the elastic properties of rubber compund, contact with the road and generated friction heat.
3. By conducting experimental research to determine the ambient temperature influence on longitudinal and lateral tire performance on ice covered pavement.
4. To develop the experimental research methodology for establishing the parameters of tire‘s longitudinal performance with snow and water (slush), also ice and water mixtures. To adopt the methodology for experimental research of tire interaction with loose snow.
5. To investigate the peformance of snow and ice melting materials, used by agencies of winter road maintenance under different temperatures and duration of melting action.

The research methodology

In the thesis, theoretical and experimental methods are applied.

In the theoretical part, mathematical modeling methods based on finite element analysis were applied. *Ansys Workbench, Matlab, Optris PI connect, Microsoft Office* software was applied.

The experimental research works on tire force transsmision were caried out with the internal drum test bench at Karlsruhe Institute of Technology (Germany). For temperature measurements of tire and ice surfaces, *Optris PI 160* infrared camera was used. Also, a climatic chamber *Weiss WK11* (JSC „Problematika“) was used for measurements of deicing materials performance. The experimental data evaluation was made using statistical methods.

Scientific novelty of the thesis

In course of preparation of the thesis, the following results innovative for Transport Engineering science were obtained:

1. For establishing longitudinal tire force transmission on snow and water mixture, a new laboratory research methodology was developed.
2. The longitudinal tire characteristics on snow and water mixture were obtained clearly defining the consistency of mixture.
3. The longitudinal tire characteristiscs on different amount of ice and water mixture were obtained.
4. The influence of amount of snow and water, and ice and water mixtures on longitudinal tire characteristics was determined.

Practical value of the research findings

The obtained lateral and longitudinal tire characteristics on different winter road pavements enable to identify the tire's sticking and slipping conditions.

The obtained peak values of force coefficient may be applied by the agencies of road maintence for planning or performing the winter road maintenance. The values may be also used to clarify the levels of winter road maintenance.

The lateral and longitudinal tire characteristics may be applied by the experts of accident reconstroction simulating the vehicle's behaviour on particular winter road pavement.

Defended statements

1. The tire with the softer tread rubber compound has better traction on ice due to higher deformation leading to a larger contact area.
2. The water layer formed on ice decreases the tire force coefficient. The wet ice extremely reduces friction and driving conditions become critical. This layer should be removed immediately by the road maintenance agencies.
3. The larger amount of snow and water mixture reduces tire friction – the force coefficient decreases. The opposite trend is with the ice and water mixture – the force coefficient is higher on larger amount of mixture.

4. The salts for winter road maintenance have different efficiency and speed of chemical reactions depends on ambient temperature and duration of melting action.

Approval of the research findings

6 scientific papers were published on the topic of the thesis: one in scientific journal, included in the *Clarivate Analytics Web of Science* database (Ružinskas *et al.* 2016), two – in a peer–reviewed scientific journal (Ružinskas, 2016; Ružinskas, 2017), two – in international conference proceedings listed in the Clarivate Analytics Proceedings database (Ružinskas, Sivilevičius 2014; 2017b), one – publication on international conference (Ružinskas, Sivilevičius 2017a).

The results of the research conducted in this thesis were presented at three conferences in Lithuania:

- at the International Conference *„Environmental Engineering“* in 2014 and 2017, Vilnius;
- at the International Conference *„Transbaltica“* in 2017, Vilnius.

The structure of the thesis

The thesis consists of the introduction, four chapters and general conclusions. In addition six annexes are enclosed.

The volume of the thesis is 122 pages ecxluding the annexes; in the text, 48 numbered formulas, 60 figures and 8 tables are provided. In course of prepration of the thesis, 128 sources of the literature were used.

Acknowledgements

The first thanks goes to the thesis supervisor Prof. Dr. Habil. Henrikas Sivilevičius for his patience, valuable scientific consultations and advice. I would like to express my graditude to my internship supervisor Dr. Ing. Martin Gießler and all the stuff members from the Institute of Vehicle System Technology (FAST) for warm welcome, assistance and technical support they provided during my internship. I am grateful to all employees of Department of Mobile Machinery and Railway Transport and special thanks goes to Dr Raimundas Junevičius. Finally, I want to sincerely thank my family for their support, understanding and patience.

1. Analysis of scientific research on tire interaction with snow and ice covered pavement

Traffic accidents on the road depend on a particular season. In regions with severe winters such like Scandinavian, Baltic, winter road safety is a source of concern for transportation officials. Driving conditions in winter can deteriorate and vary dramatically due to snowfall and ice formation, causing significant reduction in pavement friction and increasing the risk of accidents (Qiu, Nixon 2008; Usman *et al.* 2010; Usman *et al.* 2012; Hayat *et al.* 2013; Seeherman, Liu 2015). Although the weather itself cannot be changed, understanding how it affects road safety is useful for both analysis and prevention.

Motion of a vehicle is based on its grip with pavement. As tires are in direct contact with the pavement, the vehicle is controlled directly due to its tire grip with the pavement,

and parameters of the tires have a great influence on controlling, stability and ride safety of the vehicle. In order to ensure traffic safety, controllability of a vehicle at all seasons and weather conditions is of special importance (Sapragonas *et al.* 2014). This is the main reason why in countries with severe winters, use of tires with special tread pattern is mandatory. The tread pattern of these tires is made of blocks with sipes, which increase the grip on snow and ice covered road. Therefore, the tire force transmission on ice and snow becomes a special importance for tire manufacturers, road maintenance and safety agencies. To engineer winter tires in an effective way, the friction infuelncing factors as well as the contact mechanics should be well known. Besides the rubber material behaviour the friction mechanisms of rubber are very complex as well. The viscoelastic material properties of rubber cause a complicated friction behaviour which depends on the cantact area, the sliding velocity, the normal pressure and the ambient temperature. The rubber friction in general is dominated by four single mechanisms (Ripka, 2012; Ignatyev *et al.* 2015). 1) Hysteresis – the friction mechanism called hysteresis is caused by inner damping of the rubber material. The hysteresis friction mechanism occurs, when a tire tread block slides on a rough surface. The single surface asperities cause a deformation of the tire tread blocks. It depends on the rubber material, surface rougness, sliding velocity, normal load and temperature. 2) Adhesion – can be generally described as a rise of physical bonding between two bodies, when they are brought in a close contact. Rearrangement or braking of these bonds during rubber sliding requires certain energy. The adhesion dominates on smooth surfaces. It can be eliminated by lubricants like water or oil in the contact. 3) Viscous friction – occurs in lubricated contacts. The movement of the rubber causes shear forces in the lubricant due to viscous flow. The most prominent example of this mechanism is a friction of rubber block on wet surface. The viscous friction force increases with increasing velocity. 4) Cohesion – the generation of wear particles or cracks on the rubber surface is associated with the formation of free cack surfaces and needs energy. This energy represents the cohesional part of the friction force. In general, the generation of new surfaces due to material failure on the tread block is called cohesion. The overall friction force is assumed to be the sum of these components.

Nakajima (2003) and Seta *et al.* (2003) developed the analytical model of tire traction on snow. Longitudinal snow traction of a rolling tire is composed of four kinds of forces. 1) Braking force due to compression occurs due to compressing undisturbed snow ahead of the contact patch. Since the footprint area of a tire sinks into snow, there is a step in front of the tire. When tire rolls on the step, a reaction force is generated by snow compression at the step. 2) Shear force of snow in void is caused by the shear deformation of snow in the void regions formed between the tread blocks. 3) Digging force (edge effect) – occurs at block and sipe edges. These edges dig the snow surface during tire rolling and contribute traction force. 4) Friction force – generated between tire and snow surfaces. It is controlled by the force coefficient of the tread rubber and actual contact area between tire and snow, and is the major portion of the total traction force (Choi *et al.* 2012).

Longitudinal and lateral friction forces acting between the tire and the road usually are represented as the ratio of vertical force. This ratio is called a force coefficient and can be represented as a function of longitudinal slip or sideslip angle. The functions are called slip curves and give a lot of information about the tire‘s behaviour. Sliding and sticking

areas, peak values of coefficients can be clearly determined. A shape of these curves depends on road conditions and tire tread pattern. To obtain the tire slip curves on snow and ice, a special tire testing program and equipment is necessary. Experimental tire testing can be separated into outdoor and indoor measurements. Tire measurements on outdoor snow and ice tracks are very challenging, as track and ambient parameters continuously change during the measurements. Indoor testing allows control these parameters and measurements become much more reproducible than outdoor measurements. Since tire is a very complex engineering object, to reduce the difficulty and complexity of the tire testing, it can be practicable to test only parts of the tire. For example, studying the interaction of tire tread and road surface can be done with a single tread block. It allows investigating the dominating friction mechanisms.

There are many mathematical models describing the interaction between tire and the road. They can be separated into physical and empirical, and finite element analysis (FEA). Pacejka model is one of the most popular and widely used tire model. It was presented by Bakker *et al.* (1987) and then improved by Pacejka and Bakker (1992). The model consists of empirical formula, called „Magic Formula", and was able to describe an accurate steady–state tire behaviour. By selecting the proper values of formula coefficients, the characteristics for either side force, aligning torque or longitudinal force can be obtained. Since Pacejka tire model is widely used for fitting the experimental and simulation data, there are many fitting techniques presented in the literature. The most popular is a least square method. A brush model is also widely used of describing the interaction between the tire and road. In this model, the tire is described by a row of elastic bristles. These bristles come into contact with the road and move from the leading to the trailing edge of the contact patch. If the tire has side of longitudinal slip, the bristles develop deflection, generating therefore lateral or longitudinal forces. Once the maximum deflection is reached by the brushes, the adhesion force changes to sliding force. A more advanced formulation of the model can be found in Pacejka (2012).

Analysing the friction models describing the interaction between the tire and ice or snow track, many of them are based on relating the force coefficient to the thermal energy which is transfered to the ice or snow (Peng *et al.* 2000; Giessler *et al.* 2010a; Skouvaklis *et al.* 2012; Ella *et al.* 2013). Wiese *et al.* (2012) and Klapproth *et al.* (2016) assumed that dominating friction mechanism of a sliding rubber on ice is a viscous friction, and related force coefficient with the water height. Lee *et al.* (2005) developed a semi analytical tire – snow interaction model. The snow was described using Drucker–Prager plasticity model and tire was assumed as a rigid body. This model was further used by other authors (Lee *et al.* 2006; Li *et al.* 2009; Lee 2011; 2013; Lee, Huang 2014) analysing the tire interaction with snow.

FEA is mostly used to simulate the interaction between the tire and snow. The snow is described by already mentioned Drucker-Pracker plasticity or Mohr-Coulomb yield model. To describe the tire material behaviour a three parameters Mooney–Rivlin hyperealistic model is used (Seta *et al.* 2003; Shoop *et al.* 2006; Lee, 2008; 2011; Choi *et al.* 2012).

Many scientists were investigating the tire force transmission on snow and ice (Giessler *et al.* 2010a; Lee *et al.* 2012; Bhoopalam *et al.* 2015; Salimi *et. al.* 2015; Wassertheurer, Gauterin 2015; Hjort *et al.* 2017) and friction between tire tread blocks and ice

or snow covered pavement (Ripka *et al.* 2012; Skouvaklis *et al.* 2012; Ella *et al.* 2013; Lahayne *et al.* 2016; Klapproth *et al.* 2016; Linke *et al.* 2017). The analysis of scientific papers have showed, that tire interaction on snow and ice is well known, but there aren't many researches with the winter tracks like slush. The closest investigation is presented by Lee and Huang (2016). The authors are using wet snow definition described by the International Snow Classification (Fierz *et al.* 2009) and presenting the outdoor measurements with a special test vehicle. According to the classification, the volume fraction of water in wet snow ranges 3–8 % and water cannot be pressed out by moderately squeezing the snow in the hands. Meanwhile, the slush is described as a soaked snow with water and its volume fraction is higher than 15 %.

2. Theoretical analysis of the tire interaction with snow and ice covered pavement

To evaluate the elastic behaviour of the rubber material, a 3D tire tread block interaction model was created. The tread block is described as nonlinear material using three parameters Mooney–Rivlin hyperelastic model:

$$W = C_{10}\left(I_1 - 3\right) + C_{01}\left(I_2 - 3\right) + C\left(\frac{1}{I_3^2} - 1\right) + D\left(I_3 - 1\right)^2, \tag{S.2.1}$$

where W – strain energy density; I_1, I_2, I_3 – first, second and third strain invariants; C_{10}, C_{01}, D – material constants, taken from Klapproth *et al.* (2016) for soft and hard rubber compounds.

The road surface is analysed as a smooth rigid body and the contact between two surfaces is described with the constant friction coefficient. The interaction is analysed in statics. Since presented model analysis only elastic (deflection, strain, stress) and contact (pressure and tangential stress) parameters, to evaluate the friction heat in the contact, a new model was created.

The model was simplified to 2D and only one sliding tread block element (sub-block) was analysed. It was assumed that element is sliding over the length of the tire contact patch. Both road and tread elements were considered as linear materials and their physical–mechanical properties were taken from Petrenko and Whitworth (2009) and Petrovic (2003) for rubber and ice. It was focused on ice temperature, since it could affect the ice melting and formation of a thin water layer. Heat flux was calculated:

$$q_L = x_I \cdot X \cdot \tau \cdot v_s, \tag{S.2.2}$$

where x_I – the weight factor for the distribution of heat between the ice and rubber surfaces; X – fraction of frictional dissipated energy converted to heat (it was assumed that all dissipated energy is converted to heat); τ – tangential stress; v_s – sliding speed.

The weight factor was calculated by the ratio of conductive heat transfer coefficient. This showed that ice absorbs most of the frictional heat generated in the contact due to its higher value of conductive coefficient.

Since there aren't mathmetical models describing the tire interaction with slush, the first approach is to create a tire forces model. The forces acting on the tire rolling the slush covered road are shown in Figure S.2.1.

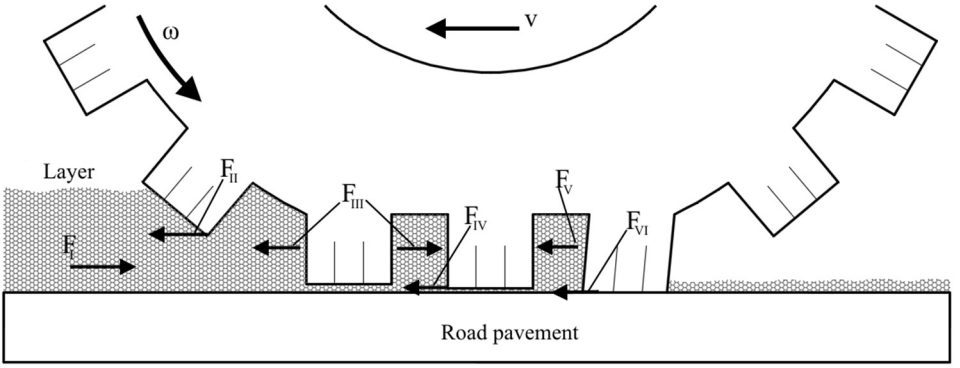


Fig. S.2.1. Forces acting on the rolling tire with the layer of snow or ice and water

It was assumed that 6 forces are acting: 1) Slush resistance force; 2) Digging force; 3) Compressing force (slush is pressed out by the tire); 4) Friction force (a friction between tire and slush surfaces and viscous friction); 5) Shear force of slush in void; 6) Contact friction force (a friction between tire and the surface of the road). The next step should be implementation of experimental measurements of tire performance on slush.

3. Design of experimental research of tire interaction with snow and ice

Measurements of tire performance on different winter tracks were performed with the internal drum test rig at Karlsruhe Institute of Technology in Germany. The institute's test rig provides the opportunity to perform measurements of different track surfaces and various operating conditions. The test rig consists of the drum with a diameter of 3,8 m, wherein the tire, mounted on a rigid wheel suspension, rolls on the installed track. Wheel and drum can be driven independently for braking and traction tests. Sideslip, camber angles and vertical load are adjusted by hydraulic system. The test rig is surrounded by a climate chamber with an air conditioning system which allows cool down the testing room to –20 °C.

The first measurements were performed with the ice track. It was produced pouring the tap water on the slowly rotating drum at low ambient temperature ~ (–10 °C) to build up the ice track of about 15 mm thickness. The initial ice layer is usually uneven, so sharp blade is used to cut some layer from the top. After this procedure, the formed ice layer is polished by a special tire that is completely covered with a siped tread and the ice track is fully prepared for the measurements.

To perform measurements on slush, a new test method was developed. At first, it was clearly defined a slush description based on the International Snow Classification provided by Fierz *et al.* (2009). The next challenge was to keep the slush mixture on the drum and spread it uniformly. It was decided to throw it on the rotating drum. For this reason, the drum speed (~55 km/h) was calculated from acting forces, at which should be thrown the mixture. Also an initial height of the layer was calculated: for 2 cm of initial

height, should be thrown about 62 *l* of mixture. A detailed preparation of the track is shown in Figure S.3.1.

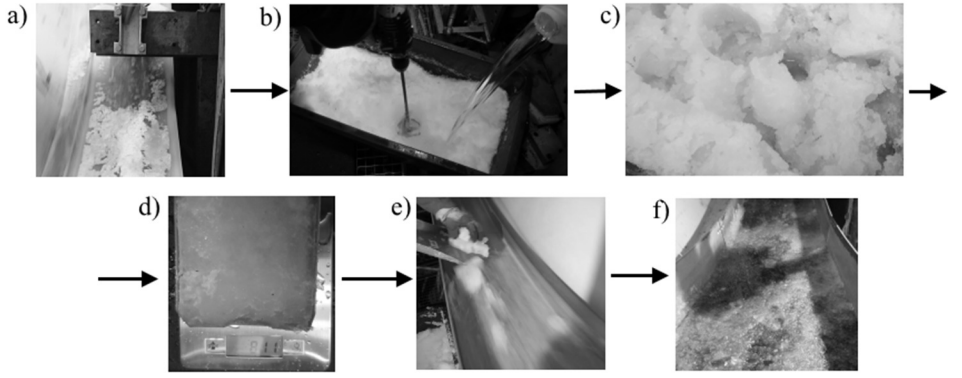


Fig. S.3.1. Production and preparation of the snow and water mixture: a) production of snow; b) mixing of mixture; c) prepared mixture; d) measurement of mixture density; e) throwing mixture on the rotating drum; f) pavement after throwing the mixture

The necessary snow was produced by cutting the ice with the blade. Then snow was mixed with the water, the mixture was weighted to determine the density and then thrown on the rotating drum at ~55 km/h. After the procedure, the drum was stopped to evaluate the initial layer. It was clearly seen (Fig. S.3.1. f) that mixture stuck on the drum surface and spread rather uniformly.

Using the same method two more tracks were evaluated: mixture of crushed ice and water (CIW) and pure snow. The mixture of CIW was prepared the same as the mixture of snow and water. The snow track was prepared by throwing the pure snow (~62 l) on the rotating drum. It was decided to analyse this track, because all the previous measurements were performed on the medium or hard packed snow (Bolz, 2006; Giessler *et al.* 2010a). The hardness of the snow is evaluated with the CTI penetrometer by ASTM F1805.

Two tires were used for the ice track measurements. Both were winter tires and the same size (205/55 R16), but the tread pattern and hardness were different. Shore A hardness was 57 for the first tire and 65 for second. For measurements with other tracks was used only one tire with softer tread compound. Also an infrared camera was used for the temperature measurements on ice which was mounted in front of the rolling tire.

Since it was proved that ice and snow reduces grip of the vehicle, the fast removing of these precipitations from the road are of high importance. The factors affecting ice and snow melting and removing could be separated into natural (include climate and weather conditions), chemical (include de–icing chemicals) and artificial (include mechanical removal and artificial road pavement heating). Since the road maintenance agencies generally use de–icing materials to melt or remove the ice and snow layer, a laboratory experiments to investigate the performance of different de–icing materials were initiated. Five different materials: NaCl, $CaCl_2$, $MgCl_2$, Icemelt and Nordway were tested at different ambient temperature and different melting duration. Ice samples were prepared of uniform

thickness (3 mm) and surface area. The trays with ice samples were kept in a climatic chamber until the temperature of ice surface reached the indicated (from –20 °C up to –3 °C). When the required temperature is reached, the same amount of deicing material of about 10 g and of uniform size (fr. 0,5/1) were manually spread on the surface of ice sample. Then ice samples are kept in a climatic chamber at different pre–set length of time varied from 4 up to 120 minutes. Then, trays were removed from the chamber and immediately weighed when de–icing material solvent are poured off.

Raw tire measurements data were recorded in the TYDEX C axis system. For further analysis, it was conformed with the TYDEX H axis system. As a main result, average longitudinal and lateral slip curves were obtained. For slush and CIW mixtures, and pure snow, the average longitudinal curves were fitted with the „Magic formula“ using the least square method. Also for measurements on ice a special measurement protocol, developed by Giessler (2012), was used. For other tracks data was recorded manually. Evaluating the performance of de–icing materials, the percentage of mass that is lost, when material is applied, was calculated. Test results obtained for each deicing material were also approximated by second degree polynomial equation.

4. Analysis of the results of the mathematical modeling and experimental research

Simulation was made using two different approaches presented in chapter 2. At first, an elastic behaviour of tread block with 3 sipes was analysed. Two different rubber compounds (soft and hard) were analysed at different vertical load: 100, 200 and 300 N. These values were calculated from the footprint area of the real tire, which was pressed by 4200 N load. The coefficient of friction was assumed equal 0,2 The relationship between the contact pressure, tangential stress and rubber deflection with the diffierent vertical load is shown in Figure S.4.1

It is clearly seen that tread block made from softer rubber compound has higher contact pressure, tangential stress and deflection values than hard rubber. A higher deflection means that tread block deforms more and the direct contact area with the road increases. The contact pressure and tangential stress values are directly related with the force coefficient and higher values should increase the traction. The difference between different rubber compounds contact pressure and tangential stress values is more noticeable by increasing the load.

Also a solid tread block with the same rubber parameters was analysed. It was noticed that solid tread block has much lower contact pressure and tangential stress values compared to the siped tread block, but there wasn‘t a significant difference in the deflection. Contact pressure and tangential stress distribution in the contact showed that siped tread block has much smoother distribution of these values. Performed analysis explains why most of nowadays winter tires tread pattern is covered with sipes. A positive sipe effect was proved by many scientists (Yamazaki *et al.* 2000; Ripka *et al.* 2012; Ella *et al.* 2013).

With the next approach, a temperature rise in the contact between the tire and the ice was simulated and analysed. Three different friction coefficients (0.1; 0.15 and 0.2) and four slip values (5, 20, 50 and 100%) representing the sliding speed were taken. The temperature rise was obeserved on the ice surface at the point, located in the middle of the

contact length which is equal 145 mm. It was assumed that ice and rubber temperature was the same, and the initial value was taken equal to –2 °C. The maximum temperature values depending on slip and friction coefficient are shown in Figure 4.2.

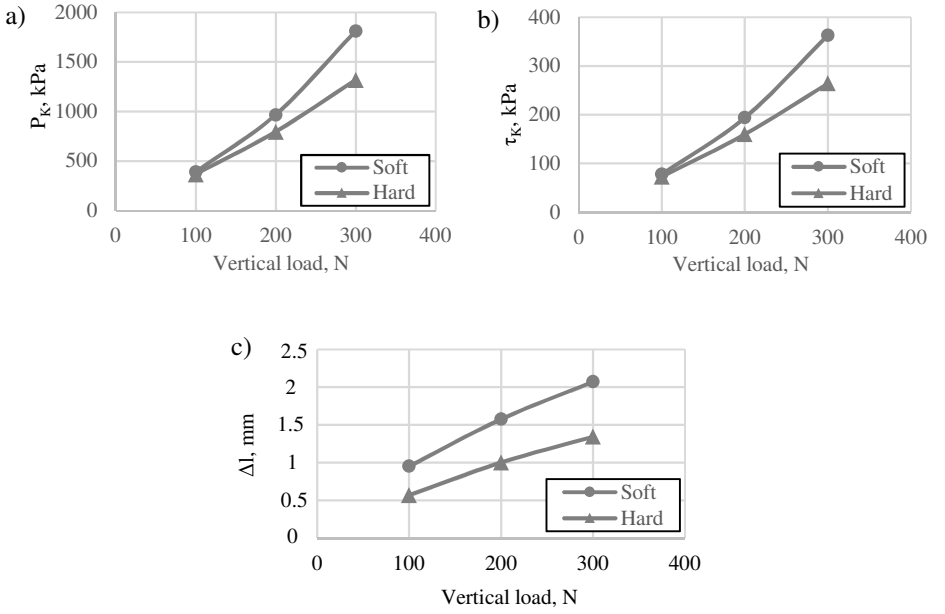


Fig. S.4.1. Relationship between contact pressure (a), tangential stress (b) and deflection (c) with the different vertical load of different rubber compound

It is seen that maximum temperature was reached at highest slip and friction coefficient. It reaches a positive value (up to +3 °C) and ice melting could start.

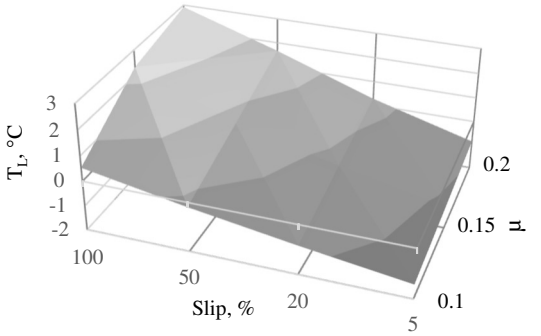


Fig. S.4.2. Relationship between ice temperature, slip and force coefficient

To understand the temperature influence on tire force transmission, experimental research was conducted. At first, it was analyzed the ambient temperature influence on force

coefficient. The influence was analysed at these operating conditions: drum speed v = 30 km/h; tire pressure p = 2.2 bar; vertical load F_z ~ 4200 N; inclination angle γ = 0°. It was used a soft rubber tire presented in chapter 3 and 5 measurements were made for each temperature. Then average values were calculated and presented in Figure S.4.1 as a function of slip.

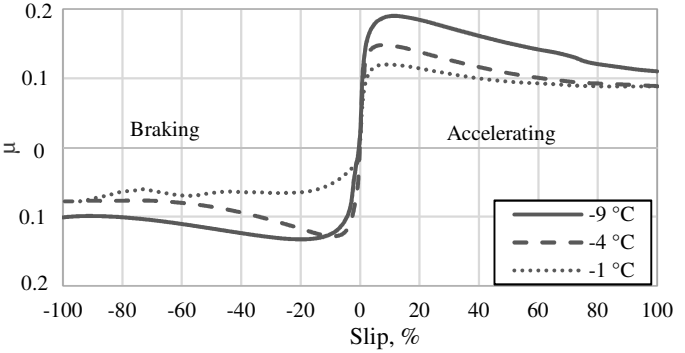


Fig. S.4.3. Relationship between longitudinal force coefficient and slip at different ambient temperature

A decreasing in force coefficient was observed when ambient temperature increases. It can be explained by friction heat generated in the tire contact with the ice. The heat flow heats up the ice surface and it starts melting. Then a thin water layer is formed reducing the friction between the tire and ice. This phenomena is clearly seen at temperatures near the melting point (Bowden, Hughes 1939). At lower temperatures, a formation of water film becomes more difficult. A friction melting isn't the only reason affecting the tire grip on ice. It is also affected by the tire's viscoelastic behaviour and change in material properties of tread rubber compound. The same decreasing trend was noticed with the tire's lateral performance. Since the simulation results showed that amount of friction heat generated in the contact patch is strongly dependent from slip and friction forces, an additional ice temperature measurements were made. It was clearly seen that ice temperature increases when lateral friction force is applied.The highest temperature was reached at highest longitudinal slip and it confirms the simulation findings.

Also a comparison of two different tires (presented in chapter 3) was made. The same test procedure was used as in previous measurements. The only difference was in vertical load (F_z ~ 6300 N). The measurements were performed at –4 °C temperature and comparison of longitudinal performance is shown in Figure S.4.4.

The comparison shows that tire with softer tread rubber compound has much better performance on ice compared to hard rubber compound. The difference in a peak force coefficient is about twice and for both tires it was reached at about 8% slip. The same trend was observed comparing the lateral performance. The peak value of lateral force coefficient for soft rubber tire was about 33% higher than hard rubber. Since for the soft rubber measurements were made with the higher vertical load, it can be compared with the previous measurements at the same temperature (–4 °C), but with the lower load. It was found that higher load (F_z ~6300 N) had about 20 % higher peak value of longitudinal

force coefficient compared to F_z ~ 4200 N. It can be stated, that all the differences are lead by higher contact pressure and tangential stress as it was confirmed with the simulation results. The contact pressure is directly related to the contact area depending on higher deformation of the tread rubber.

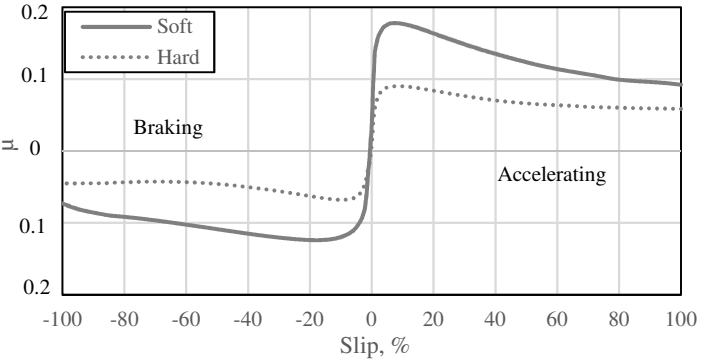


Fig. S.4.4. Relationship between longitudinal force coefficient and slip for different tires

The measurements on slush and CIV mixtures were performed at these operating conditons: drum speed v ~ 50 km/h; tire pressure p = 2.2 bar; vertical load F_z ~ 4000 N; inclination angle $\gamma = 0°$; the ambient temperature varied from 0 °C to +1 °C. Also a different ratio of mixtures was used. For slush the ratio was 5.5:1 (55 *l* water and 10 *l* snow) and almost twice higher amount with the ratio 11:2.2. The initial height of the layer after throwing it on the drum was about 2 cm and 4 cm respectively. For CIW the ratios were 6:0.75 and 11:1.5. Also density values were determined for each mixture: the slush density was about $\rho = 815$ kg/m^3, and for CIW mixture it was $\rho = 674$ kg/m^3. At least 3 measurements were made for each mixture ratio using the soft rubber tire. Only longitudinal tire performance was analysed within the measurements and only peak values of force coefficients are presented (Fig. S.4.5).

Analysing the tire performance on slush mixture, the decreasing in force coeffcient was observed when amount of mixture increases. This trend can be explained by the area of direct contact with the solid road pavement. It decreses by increasing the amount of slush and becomes more difficult for the tire to press out the mixture off the contact patch. The opposite trend was noticed with the CIW mixture: force coefficient increases by increasing the amount of mixture. It was also noticed that higher amount of CIW mixture is compacted with the tire. It should lead to a tread digging into the compacted mixture. The literature analysis already showed that in general digging effect supports traction.

The measurements on loose snow were performed at these conditions: drum speed v ~ 30 km/h; tire pressure p = 2.2 bar; vertical load Fz ~ 4200 N; inclination angle $\gamma = 0°$; the ambient temperature $T_a = -6$ °C. Three measurements were performed and average peak value of force coefficient was 0.24. It was close to the value presented in ASTM F1805 for a loose snow (0.22). It also should be stated that force coefficient values presented in the standard were obtained with a slightly different tire and test procedure.

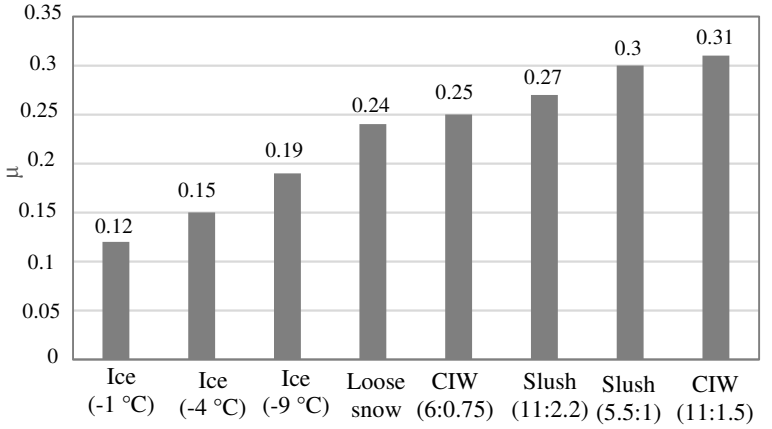


Fig. S.4.5. Comparison of peak values of longitudinal force coefficient

Comparing the obtained peak force coefficients (Fig. S.4.5), the highest value (0.31) was for CIW mixture with the ratio 11:1.5. The lowest value (0.12) was for ice at the temperature of –1 °C. This value is 6 times lower comparing with the dry asphalt (Pokorski *et al.* 2015) and should be immediately removed from the road by road maintenance service. The experimental study on the different deicing materials performance showed that most effective way could be melting the ice with Icemelt and NaCl. Also it should be stated that deicing performance depends on ambient temperature and duration of applied material. The performance of deicing materials decreases by decreasing the ambient temperature.

General conclusions

1. The simulation results have shown that tire tread block of soft rubber compound interacting with ice surface has higher contact pressure and tangential stress. The larger values of these parameters lead to higher friction between the tire and ice. It was confirmed with the conducted experimental research using two tires with different tread rubber hardness. The longitudinal peak value of force coefficient for soft rubber tire was about two times hihgner and laterarl force coefficient was about 33% higher compared with the hard rubber tire.
2. The conducted experimental research using the special tire test rig allowed to determine the ambient temperature influence on longitudinal and lateral tire performance on ice. It was found a decreasing trend in friction when ambient temperature increases. The peak values of lateral force coefficient have decreased about 27% when ambient temperature increased from –9 °C to –1 °C. The longitudinal values of force coefficient have decreased about 37% for tire acceleration and 46% for braking comparing with the iniatial values obtained at –9 °C temperature. The temperature measurements of tire and ice surface

have shown an increase in ice temperature when lateral and longitudinal friction forces were applied. The peak value of ice temperature was reached at highest longitudinal tire slip.

3. An experimental research methodology, allowing to analyze the tire interaction with snow and water (slush) mixture using the internal drum test bench, has been developed. The methodology is based on mixture preparation and spreading on the drum pavement. Using the methodology, longitudinal tire forces have been determined on snow and water, and ice and water mixtures. The initial height of the mixture layers has been evaluated. An increased initial height of snow and water mixture has decreased tire traction. The peak force coefficient decreases about 11% when initial height of snow and water mixture has increased from 2 cm to 4 cm. The opposite tredn has been observed analysing tire traction on ice and water mixture: there was an increase of about 19% in force coefficient when initial height of the layer has increased twice. The methodology was also used to evaluate longitudinal tire peformance on loose snow. The obtained peak force coefficient value was equal to 0.24 and is close to the standard.
4. After the performed comparison of peak force coefficient values for all the investigated winter road pavements, it was determined that highest force coefficient (0.31) is on ice and water mixture with the initial layer height of 4 cm. The lowest friction (0.12) was observed on ice at –1 °C ambient temperature. The obtained force coefficient value is about 6 times lower compared to the dry road and it should be removed immediately by the road maintenance agencies. The performed experimental research on different deicing materials performance has shown that most efficient on melting ice at –1 °C ambient temperature would be Icemelt and NaCl salts.

Priedai[3]

A priedas. Padangos sąveikos laboratorinių bandymų pradinės sąlygos

B priedas. Protektoriaus elementų sąveikos matematinio modeliavimo rezultatai

C priedas. Protektoriaus bloko elemento sąveikos matematinio modeliavimo rezultatai

D priedas. Autoriaus sąžiningumo deklaracija

E priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą daktaro disertacijoje

F priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

[3] Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Andrius RUŽINSKAS

AUTOMOBILIO RATO SĄVEIKOS SU SNIEGU IR LEDU PADENGTA KELIO DANGA MODELIAVIMAS IR EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
transporto inžinerija (03T)

SIMULATION AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF TIRE INTERACTION WITH SNOW AND ICE COVERED PAVEMENT

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Transport Engineering (03T)

2018 05 04. 11,75 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
http://leidykla.vgtu.lt
Spausdino UAB „BMK leidykla“
J. Jasinskio g. 16, 01112 Vilnius