VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Matas BULEVIČIUS

KELIŲ TAMPRIOSIOS DANGOS
KONSTRUKCIJŲ SAVYBIŲ ĮTAKA JŲ
VIRŠUTINIO SLUOKSNIO
EKSPLOATACINIAMS RODIKLIAMS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (02T)

Vilnius LEIDYKLA TECHNICA 2013

Disertacija rengta 2008–2013 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. dr. Kazys PETKEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

VG TU leidyklos TECHNIKA 2189-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-609-457-582-2

© VG TU leidykla TECHNIKA, 2013

© Matas Bulevičius, 2013

matas.bulevicius@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Matas BULEVIČIUS

INFLUENCE OF THE PROPERTIES OF FLEXIBLE ROAD PAVEMENT STRUCTURE ON THE SERVICE INDICES OF WEARING COURSES

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (02T)

Vilnius LEIDYKLA TECHNICA 2013

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2008–2013.

Scientific Supervisor

Prof Dr Kazys PETKEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

Reziumė

Disertacijos tikslas – parengti magistralinių automobilių kelių asfaltbetoninės dangos eksploatacinių rodiklių prognozės matematinius modelius, atsižvelgiant į tampriosios dangos konstrukcijos savybes ir transporto priemonių (TP) eismo intensyvumą (EI). Darbe iškelti šie svarbiausieji uždaviniai: išanalizuoti automobilių kelių asfaltbetoninės (AB) dangos eksploatacinius rodiklius lemiančius svarbiausius veiksnius ir atskleisti šių rodiklių blogėjimo priežastis; atlikti magistralinių kelių dangos konstrukcijų (KDK) sluoksniams naudojamų medžiagų kokybės rodiklių tyrimus; nustatyti AB dangos komponentinės sudėties, fizinių bei mechaninių rodiklių ir AB mišiniams naudojamų medžiagų kokybės rodiklių sietį; ištirti AB dangos lygumo ir provėžų gylio kitėjimo dėsningumus; nustatyti AB dangos, kitų (KDK) sluoksnių medžiagų kokybės rodiklių sietį; parinkti dvi racionalias magistralinių kelių tampriosios dangos konstrukcijas (skirtingam TP eismui).

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai ir priedai.

Įvade aptarta tiriamoji problema, darbo aktualumas, tyrimų objektas, darbo tikslas ir uždaviniai, tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė vertė ir ginamieji teiginiai.

Pirmajame skyriuje išnagrinėti įvairių šalių mokslininkų atlikti automobilių kelių asfaltinės dangos bei jos konstrukcijos eksploatacinių rodiklių ir jų funkcionavimo trukmės tyrimai.

Antrajame skyriuje pateikti teoriniai tyrimai AB dangos ir jos konstrukcijos funkcionavimo sąlygoms, eksploataciniams rodikliams ir KDK sluoksnių medžiagų savybėms nustatyti.

Trečiajame skyriuje pateikta atliktų tyrimų metodika, AB dangos eksploatacinių rodiklių ir KDK sluoksnių medžiagų savybių bei jų sieties tyrimai. Taip pat pateikti KDK sluoksniams naudojamų medžiagų fizinių bei mechaninių ir geometrinių rodiklių tyrimai.

Ketvirtajame skyriuje pasiūlyti magistralinių automobilių kelių asfaltbetoninės dangos eksploatacinių rodiklių prognozės (penkerių metų) laikotarpiui matematiniai modeliai. Parinktos dvi racionalios magistralinių kelių tampriosios dangos konstrukcijos TP eismo intensyvumui iki 10 000 aut./parą ir TP eismo intensyvumui iki 30 000 aut./parą.

Disertacijos tema paskelbti šeši moksliniai straipsniai: du – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Thomson Reuters Web of Knowledge* duomenų bazę, trys – recenzuojamuose tarptautinių konferencijų leidiniuose, įtrauktuose į *Thomson ISI Proceeding* duomenų bazę, vienas – tarptautinių konferencijų straipsnių rinkiniuose.

Abstract

The aim of the dissertation is based on the properties of flexible road pavement structures to develop a mathematical models for predicting the performance of wearing courses used in the pavements of the main roads. The main tasks of the dissertation are as follows: to analyze the main factors influencing the service indices of asphalt concrete pavements and to determine their reasons; to investigate the quality of materials and mixtures used in pavement structural layers of the main roads; to determine the interaction between asphalt concrete pavement composition and the quality indices of mixture materials; to study regularities of the change in pavement roughness and rut depth; to determine the interaction between the quality indices of materials used in pavement structural layers; to select two rational flexible pavement structures for the main roads (for the different traffic volume).

The dissertation consists of introduction, four chapters, general conclusions, the list of references and the list of author's publications on the topic of the dissertation, addenda.

Introduction describes the studied problem, topicality of the problem, the object of research, also the aim and tasks, research methodology, scientific novelty, practical value of the results and the defended propositions.

Chapter 1 gives the analysis of scientific researches made by different countries in the field of the performance of asphalt concrete pavements and their structures, duration of their service life.

Chapter 2 describes theoretical investigations to determine the service indices of asphalt concrete pavements and their structures, material properties of pavement structural layers, and time intervals between pavement repairs.

Chapter 3 gives the research methodology, presents investigations in the service indices of asphalt concrete pavements and material properties of structural pavement layers, as well as their interaction. Also, studies the physical, mechanical and geometrical indices of materials used in pavement structural layers.

Chapter 4 suggests mathematical models for predicting asphalt concrete pavement service indices in a period of 5 years. Two rational flexible pavement structures have been selected for the main roads: for the traffic volume of 10 000 veh./day and up to 30 000 veh./day.

On the topic of the dissertation 6 scientific articles have been published: two – in scientific journals included into the list of *Thomson Reuters Web of Knowledge*, three – in the reviewed international conference proceedings included into the *Thomson ISI Proceedings*, one – in the proceedings of international conferences.

Sąvokos

Kelias – eismui skirta (ir naudojama) žemės arba kelių statinio paviršiaus juosta, įskaitant važiuojamąją dalį, kelkraščius, sankryžas, pėsčiųjų ir dviračių takus, transporto priemonių (TP) srautų atskyrimo juostas.

Kelio (kelių) tamprioji danga – eismui skirtos važiuojamosios dalies viršutinė dalis (viršutinis ir apatinis sluoksniai), tiesiogiai priimanti transporto priemonių apkrovas ir jas paskirstanti žemiau esantiems kelių dangos konstrukcijos sluoksniams, taip pat tiesiogiai veikiama (viršutinis sluoksnis) oro temperatūros, saulės spinduliuotės, oro deguonies, kritulių, vėjo ir kitų veiksnių. Ji būna asfaltbetoninė ar kita asfaltinė.

Kelio (kelių) dangos būtinasis remontas – neišvengiamas kelių dangos (KD) remontas, kurį būtina kuo skubiau atlikti, kai KD lygumas ir/ar jos suirties mastas viršija savo leidžiamąją (ribinę) vertę.

Kelio (kelių) dangos funkcionavimo trukmė – kelių dangos (KD) funkcionavimo nuo įrengimo iki jos būtinojo remonto arba jos funkcionavimo tarp būtinųjų remontų laikotarpis (tarpremontinis laikotarpis).

Kelio (kelių) tampriosios dangos konstrukcija – eismui skirtos važiuojamosios dalies konstrukcija, sudaryta iš asfaltbetoninės (AB) dangos ir žemiau esančių pagrindo sluoksnių (asfaltbetonio ar kito asfalto, skaldos, žvyro ar smėlio ir žvyro mišinio arba kitos medžiagos – kapiliarus nutraukiančios ir/ar šilumą izoliuojančios). Jos paskirtis – priimti TP apkrovas ir jas tolygiai

paskirstyti žemės sankasos grunte, taip pat apsaugoti kelio (kelių) dangą nuo kapiliarinio vandens šaltuoju metų laikotarpiu ir nuo perteklinės drėgmės pavasario polaidžio ir rudens liūčių metu.

Kelio (kelių) dangos konstrukcijos funkcionavimo trukmė – kelių dangos konstrukcijos (KDK) funkcionavimo nuo įrengimo iki jos būtinojo remonto arba jos funkcionavimo tarp būtinųjų remontų laikotarpis (tarpremontinis laikotarpis).

Kelio (kelių) dangos lygumas – kelių dangos eksploatacinis (būklės) rodiklis, rodantis, kiek dangos paviršius (važiavimo kryptimi) yra nukrypęs nuo tam tikros idealios linijos, rodančios visišką (idealų) dangos lygumą. Dangos lygumas Lietuvoje nustatomas greitaeigėmis, keliu 80 km/h greičiu važiuojančiomis mobiliosiomis laboratorijomis DYNATEST 5051 RSP ar RST-28, vertinamas tarptautinio lygumo rodiklio *IRI* (*International Roughness Index*) vienetais, išreikštais m/km. Rodiklis *IRI* – tai suma automobilio vibracijų, kurias sukelia kelio išilginio profilio nelygumai vėžėse – standartinio automobilio, važiuojančio 80 km/h greičiu, pakabos vertikaliųjų poslinkių sumos ir nuvažiuoto kelio santykis.

Kelio (kelių) dangos provėža – kelių dangos eksploatacinis (būklės) rodiklis, rodantis kiek transporto priemonių (TP) judėjimo kryptimi susidariusi ištisinė įduba yra nukrypusi nuo tam tikros, statmenos važiavimo krypties linijos, rodančios visišką (idealų) dangos lygumą; KD provėža taip pat charakterizuojama pagal jos plotį.

Kelio (kelių) tampriosios dangos racionali konstrukcija – eismui skirtos važiuojamosios dalies konstrukcija, sudaryta iš dangos ir žemiau esančių pagrindo sluoksnių (asfaltbetonio ar kito asfalto, skaldos, žvyro ar smėlio ir žvyro mišinio arba kitos medžiagos – kapiliarus nutraukiančios ir/ar šilumą izoliuojančios), kurių savybės ir storiai atitinka dangos funkcionavimo sąlygas, esant mažiausiai įrengimo kainai.

Kelio (kelių) dangos suirties mastas – kelių dangos eksploatacinis (būklės) rodiklis, rodantis, kiek (kuria dalimi, %) danga suirusi (pažeista defektų). Dangos suirties mastas nustatomas atliekant matavimus mobiliąja laboratorija RST-28.

Kelio (kelių) dangos defektai – KD liekamosios deformacijos: skersiniai, išilginiai ir įstrižieji plyšiai, briaunų, sandūrų ir nuovargio plyšiai, plyšių tinklas, išaižos, ištrupos, briaunų (kraštų) ištrupos, išdaužos, įgriuvos (įlūžiai), iškylos prie plyšių, kelkraščių nuosėdžiai, vėžės, bangos, slinktys, plyšiai (dėl slinkčių), įdubos, bitumo dėmės ir kt. Pagal KD defektų pobūdį galima nustatyti KD suirties priežastis.

Sunkioji transporto priemonė – krovininis, didesnis kaip 3,5 tonos masės, automobilis, su priekaba ar puspriekabe, ir daugiau kaip 9 sėdimų vietų, įskaičiuojant vairuotojo vietą, autobusas.

Tyrimų ruožai: pirmasis (1-asis) ir antrasis (2-asis) – tai kelio Kaunas–Marijampolė–Suvalkai A5, kairėje pusėje esantys KDK ruožai, įrengti 2005 m; pirmojo kelio ruožo ilgis 6,3 km (nuo 0,0 km iki 6,3 km), o antrojo ilgis 4,5 km (nuo 25,8 km iki 30,3 km).

Transporto priemonė – motorine ar biologine trauka (žmonių, taip pat arklių ir kitų nešulius ar vežimus traukiančių gyvulių raumenų jėga) aprūpinta priemonė žmonėms (keleiviams) ir/ar kroviniams, taip pat ant jos sumontuoti stacionariai įrangai vežti. Ši sąvoka taip pat apima traktorius, savaeiges mašinas ir eismui nekeliais (dviračių takais ir kt.) skirtas transporto priemones.

Žymėjimai

Simboliai

- T – funkcionavimo trukmė, metais.
- L – kelių dangos (KD) bandymų ruožo ilgis, km.
- Y_{IRI} – KD lygumo rodiklio pagal tarptautinį indeksą IRI vertė, m/km.
- H_V – KD vėžės gylis, mm.
- D_D – KD suirties mastas, %.
- N – transporto priemonių (TP) eismo intensyvumas, aut./parą.
- σ – tempimo įtempiai, MPa.
- E – tampros modulis, MPa.
- h – KDK sluoksnių storis, mm.
- SI – formos rodiklis, %.
- FI – plokštumo rodiklis, %.
- ρ – sausasis tankis, Mg/m³.
- F – atsparumas šaldymui-atšildymui, %.
- LA – atsparumas trupinimui.
- SZ – atsparumas smūgiams, %.
- V – asfaltbetonio tuštytumo rodiklis, %.
- B – bituminio rišiklio kiekis (100 % asfaltinio mišinio mineralinės dalies), masės %.
- B/MM – bituminio rišiklio ir mineralinių miltelių santykis, vieneto dalimis.
- k – KD sluoksniu sutankinimo laipsnis, %.

MM – mineralinių miltelių (išbirų pro 0,09 mm skersmens akelių sieta) kiekis, masės %.
SK – skaldos (liekanos ant 2 mm skersmens akelių sieto) kiekis, masės %.

Santrumpos

AASHTO – Amerikos (JAV) kelių ir transporto pareigūnų asociacija
(angl. *American Association of State Highway and Transportation Officials*).
AB – asfaltbetonis.
AM – asfaltinis mišinys.
AŠAS – apsauginis šalčiui atsparus sluoksnis.
DAVASEMA – dangų (būklės) valdymo sistema, sukurta Lietuvoje.
DVS – dangų (būklės) valdymo sistema.
EI – eismo intensyvumas.
ESA₁₀₀ – vidutinis metinis paros standartinių ašių ekvivalentas, kai 100 kN laikoma standartine apkrova.
ES – Europos Sąjunga.
GVL – gruntinio vandens lygis.
HDM – kelių plėtros ir valdymo modelis (angl. *Highway Development and Management Tool*).
IRI – kelių dangos lygumo tarptautinis rodiklis (angl. *International Ratio Index*).
KD – kelių danga.
KDK – kelių dangos konstrukcija.
KK – kelio konstrukcija.
KR – kokybės rodiklis.
KTTI – VŠĮ Kelių ir transporto tyrimo institutas
KVK – konvekcija (šilumos mainai).
STP – sunkioji transporto priemonė.
TKTI – VĮ Transporto ir kelių tyrimo institutas.
TP – transporto priemonė.
VMPEI – vidutinis metinis paros transporto priemonių eismo intensyvumas.
ŠNS – šalčiui nejautrus sluoksnis.
ŽS – žemės sankasa.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas	3
Darbo tikslas	3
Darbo uždaviniai	4
Tyrimų metodika	4
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	5
Ginamieji teiginiai	5
Darbo rezultatų aprobavimas	6
Disertacijos struktūra	6
1. AUTOMOBILIŲ KELIŲ TAMPRIOSIOS DANGOS KONSTRUKCIJŲ SU ASFALTBETONINE DANGA ATLIKTŲ TYRIMŲ ANALIZĖ.....	7
1.1. Lietuvos automobilių keliai ir jų įvertinimas	7
1.2. Automobilių kelių tampriosios dangos konstrukcijų ir asfaltbetoninės dangos būklė bei savybės	12
1.3. Kelių tampriosios dangos konstrukcijų sluoksnių medžiagos ir jų savybės	15
1.4. Transporto priemonių eismo ir klimato bei vietos sąlygų įtaka kelių tampriosios dangos konstrukcijoms.....	20
1.5. Kelių tampriosios dangos konstrukcijų defektai ir jų susidarymo priežastys.....	27
1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir darbo uždavinių formulavimas.....	32

2. AUTOMOBILIŲ KELIŲ TAMPRIOSIOS DANGOS KONSTRUKCIJŲ PROJEKTAVIMO SVARBIAUSIEJI PRINCIPAI.....	35
2.1. Asfaltbetoninės dangos ir kitų konstrukcinių sluoksnių funkcionavimo sąlygos	35
2.2. Kelių tampriosios dangos konstrukcijų funkcionavimo trukmė.....	41
2.3. Kelių tampriosios dangos konstrukcinių sluoksnių projektavimo pagrindimas .	45
2.4. Kelių tampriosios dangos racionalių konstrukcijų parinkimas.....	48
2.5. Antrojo skyriaus išvados	50
3. KONSTRUKCINIŲ SLUOKSNIŲ IR JŲ MEDŽIAGŲ SAVYBIŲ TYRIMAI	51
3.1. Tyrimų atlikimo ir duomenų apdorojimo metodika	51
3.1.1. Laboratorinių tyrimų metodai.....	55
3.1.2. Kelio dangos tyrimų metodai	59
3.1.3. Tyrimų duomenų apdorojimo metodai	61
3.2. Kelių dangos konstrukcijų medžiagų savybių rodiklių tyrimai	65
3.3. Konstrukcinių sluoksnių medžiagų savybių analizė.....	72
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	84
4. KONSTRUKCINIŲ SLUOKSNIŲ, JŲ MEDŽIAGŲ SAVYBIŲ ANALIZĖ, VERTINIMAS IR RACIONALIŲ KONSTRUKCIJŲ PARINKIMAS.....	87
4.1. Konstrukcinių sluoksnių ir jų medžiagų savybių įtakos kelių tampriosios dangos viršutinio sluoksnio eksploataciniams rodikliams tyrimai bei analizė....	87
4.2. Konstrukcinių sluoksnių ir jų medžiagų savybių vertinimas.....	91
4.2.1. Pirmojo tyrimų ruožo rodiklių jautrumo analizė	93
4.2.2. Antrojo tyrimų ruožo rodiklių jautrumo analizė.....	95
4.3. Magistralinių kelių tampriosios dangos racionalių konstrukcijų modeliavimas ir parinkimas	96
4.3.1. Pirmojo tyrimų ruožo modeliavimo rezultatų neapibrėžties analizė.....	97
4.3.2. Antrojo tyrimų ruožo modeliavimo rezultatų neapibrėžties analizė.....	100
4.3.3. Magistralinių kelių tampriosios dangos racionalių konstrukcijų parinkimas.....	103
4.4. Ketvirtąjo skyriaus išvados	105
BENDROSIOS IŠVADOS	107
LITERATŪROS SĄRAŠAS	109
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS .	123
PRIEDAI.....	125
A priedas. Kelio dangos konstrukcinių sluoksnių savybių sistės analizė.....	126
B priedas. Kelio dangos konstrukcinių sluoksnių rodiklių skirstiniai	134
C priedas. Sugeneruoti kelio dangos konstrukcinių sluoksnių rodikliai.....	184
D priedas. Sugeneruotos kelio dangos konstrukcijos	382

Contents

INTRODUCTION	1
Problem formulation	1
Topicality of the problem	2
Research object	3
Aim of the work	3
Tasks of the work	4
Methodology of research	4
Scientific novelty of the work	4
Practical value of the work	5
Defended propositions	5
Approbation of results	6
Structure of the dissertation	6
1. ANALYSIS OF RESEARCH IN THE FIELD OF FLEXIBLE PAVEMENT STRUCTURES WITH ASPHALT CONCRETE PAVEMENT	7
1.1. The motor roads of Lithuania and their evaluation	7
1.2. Condition and properties of flexible road pavement structures and asphalt concrete pavement	12
1.3. Materials and their properties of flexible road pavement structures	15
1.4. Influence of vehicle traffic, climate and local conditions on flexible road pavement structures	20
1.5. Defects and their causes in flexible road pavement structures	27
1.6. Conclusions of chapter 1 and formulation of the tasks of work	32
2. MAIN PRINCIPLES IN THE DESIGN OF FLEXIBLE ROAD PAVEMENT STRUCTURES	35
2.1. Service conditions of asphalt concrete pavement and other structural layers	35
2.2. Duration of the service life of asphalt concrete pavement structure	41
2.3. Design substantiation of the structural layers of flexible road pavement	45

2.4 Selection of rational flexible pavement structures	48
2.5. Conclusions of chapter 2	50
3. RESEARCH IN THE STRUCTURAL LAYERS AND THEIR MATERIAL PROPERTIES	51
3.1. Methodology for the research implementation and data processing	51
3.1.1. Methods for the laboratory tests	55
3.1.2. Methods of the road pavement research	59
3.1.3. Methods for the processing of research results.....	61
3.2. Research of the indices of material properties of road pavement structure.....	65
3.3. Research of the material properties of structural layers	72
3.4. Conclusions of chapter 3	84
4. ANALYSIS AND EVALUATION OF THE PROPERTIES OF STRUCTURAL LAYERS, THEIR MATERIALS, AND SELECTION OF RATIONAL STRUCTURES	87
4.1. Research and analysis on the influence of properties of structural layers and their materials on asphalt concrete road pavement	87
4.2. Evaluation of the properties of structural layers and their materials	91
4.2.1. Sensitivity analysis of the indices of the first experimental road section ...	93
4.2.2. Sensitivity analysis of the indices of the second experimental road section	95
4.3. Modelling and selection of rational road pavement structure for the main roads	96
4.3.1. Uncertainty analysis of the modelling results of the first experimental road section	97
4.3.2. Uncertainty analysis of the modelling results of the second experimental road section.....	100
4.3.3. Selection of a rational road pavement structure for the main roads.....	103
4.4. Conclusions of chapter 4	105
GENERAL CONCLUSIONS	107
REFERENCES	109
LIST OF PUBLISHED WORKS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	123
ADDENDUM	125
Addenda A. Evaluation of the correlation of the indices of material of road pavement structure.....	126
Addenda B. Distribution analysis of material of road pavement structure.....	134
Addenda C. Generated indices of material of road pavement structure	184
Addenda D. Generated road pavement structure.....	382

Ivadas

Problemos formulavimas

Lyginant su išsivysčiusiomis šalimis, Lietuvos automobilių kelių tinklas jau gana gerai išplėtotas. Dabar svarbiausia jį tausoti, tinkamai prižiūrėti ir tobulinti taip, kad jis sklandžiai funkcionuotų Europos kelių tinkle. Dabartinės automobilių kelių plėtros problemos dažniausiai susijusios su mažu kelių laidumu, kelių dangos stipriu ir ilgalaikiškumu.

Automobilių kelių asfaltbetoninės dangos eksploatavimo ir priežiūros patirtis rodo, kad ši danga dažniausiai funkcionuoja trumpiau nei galėtų. Žiemą, rudenį ir pavasarį, esant nepalankiems orams, kelių asfaltbetoninėje dangoje atsiranda plyšių, išdaužų, ištrupų, išaižų ir kitų defektų, o vasarą esant aukštai temperatūrai, įkaitus dangai – provėžų, bangų slinkčių ir kitų liekamųjų šlyties deformacijų. Laikui bėgant šių defektų daugėja, jų įtaka intensyvėja, o jais pažeistos dangos plotas didėja, todėl laikui bėgant sumažėja keliu važiuojančių transporto priemonių (TP) srauto greitis ir eismo saugumas, o kelias tampa sunkiai pravažiuojamas. Dažniausiai kelių dangos priežiūros ir taisymo problemos būna susijusios su daugiaašių sunkiųjų automobilių skaičiaus didėjimu. Lietuvos keliai pagal dangos lygumą, dangos konstrukcijos stiprį ir kitus rodiklius dažnai nėra pritaikyti didelių gabaritų sunkiesiems automobiliams.

Kelių dangos irties spartina šie veiksniai:

- stipriai padidėjęs krovinių TP eismo intensyvumas;
- padidėjusios TP ašių apkrovos, kurios neretai gerokai viršija normines apkrovos, taikytas anksčiau projektuojant kelių dangą;
- transporto priemonės, kurių masė TP sraute viršija leistinąją leidžiamąją masę.

Kelių danga – vienas svarbiausių kelio elementų, kuriame dinaminių ir statinių apkrovų bei aplinkos poveikis sukelia žemės sankasos gruntų bei kelių dangos konstrukcijos (KDK) sluoksnių stiprio pokyčius. Kelių dangos lygumas *IRI*, provėžų gylis ir dangos suirties mastas – tai vieni svarbiausių dangos eksploatacinių rodiklių, rodančių kelių dangos konstrukcijų gebėjimą atlaikyti transporto priemonių apkrovą. Esamų dangos konstrukcijų laikomoji geba ir jų stiprinimo poreikis dažniausiai nustatomi vadovaujantis dangos būklės ir jos konstrukcijos stiprio tyrimais, tačiau Lietuvoje nėra eksperimentiniais tyrimais pagrįstos ir aprobuotos metodikos, kuria vadovaujantis būtų galima nustatyti esamų kelių dangos konstrukcijų laikomąją gebą, todėl, tiesiant kelius, dažniausiai parenkamos tipinės kelių dangos konstrukcijos, neskaiciuojant jų stiprio. Siekiant optimaliai panaudoti turimas Lietuvos valstybės biudžeto lėšas, tikslinga parinkti racionalias, vietos TP eismo ir kitas sąlygas geriausiai atitinkančias, kelių dangos konstrukcijas, naudojant tinkamas konstrukcines medžiagas, kurios užtikrintų kuo geresnes KD eksploatacines savybes visu jos funkcionavimo laikotarpiu.

Darbo aktualumas

Šiuolaikiniai kelių dangos konstrukcijų tyrimo metodai ir taikomos kompiuterinės programos pagrįstos tamprumo teorija. Ši teorija plačiausiai taikoma kelių dangos konstrukcijos modelyje, kai nuo automobilio rato perduodama apkrova kelių dangai, dangos konstrukcijoje sukelia įtempius ir deformacijas. Lietuvoje kelių dangos konstrukcijų sluoksniai parenkami laikantis šalyje naudojamų norminių dokumentų reikalavimų ir naudojantis KDK sluoksnių medžiagų tyrimų rezultatais bei sukaupta inžinerine patirtimi.

Stiprinant kelių dangą, dažnai tenka įvertinti jos likutinį stiprį ir nustatyti atskirų jos sluoksnių bei grunto stiprio rodiklius. Šie uždaviniai tampa vis aktualesni tose šalyse, kuriose kelių tinklas jau yra suformuotas ir didžiausia darbų apimtis siejama su KDK racionalios būklės užtikrinimu, todėl atsiranda vis didesnis poreikis KDK sluoksnius parinkti taikant modernius KDK projektavimo metodus, atliekant reikiamus medžiagų tyrimus ir vertinant KDK

sluoksnių medžiagų kokybės rodiklius, taip pat naudojant naujas medžiagų gamybos ir kelių tiesybos technologijas.

Riboto finansavimo sąlygomis prioritetiniais tampa kelių dangos ilgalaikiškumo rodikliai ir naudojamų medžiagų kaina, taip pat racionalus bei diferencijuotas požiūris į kelių dangos stiprinimą, įvertinant vietovės klimato bei hidrologines sąlygas, likutinį KDK sluoksnių stiprį ir automobilių ašių apkrovas.

Iki šiol dar nesukurta metodika, kurią taikant būtų galima gana tiksliai įvertinti reikiamą KDK stiprį ir parinkti racionalius KDK sluoksnių storius, įvertinus naudojamų jiems įrengti medžiagų kokybės rodiklius. Lietuvoje pastaraisiais metais norminiu dokumentu „Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės KPT SDK 07“ įteisinta metodika tik KDK pagal projekcinę apkrovą A parinkti, o reikiamos metodikos KDK projektuoti, nustatant sluoksnių storius pagal šių sluoksnių medžiagų kokybės rodiklius nėra.

Ypač svarbu kuo tiksliau prognozuoti kelių dangos būklės kitėjimą jos funkcionavimo laikotarpio metu, įvertinant kelių dangos konstrukcijos sluoksnių storius, šių sluoksnių medžiagų kokybės rodiklius. Ištyrus ir įvertinus jų kokybės rodiklius, siektina prailginti kelių asfaltbetoninės dangos funkcionavimo trukmę ir sumažinti KD remontų ir priežiūros sąnaudas. Aktualu pasiūlyti matematinius modelius, kurie leistų prognozuoti kelio dangos eksploatacinių rodiklių kitėjimą pagal KDK sluoksnių ir jų medžiagų kokybės rodiklius.

Tyrimų objektas

Tyrimų objektas – kelių dangos konstrukcijų sluoksnių rodikliai, šiems sluoksniams įrengti naudojamų medžiagų kokybės rodikliai, priemonių eismo intensyvumas ir apkrovos, AB dangos suirties mastas D_D , funkcionavimo trukmė, provėžų gylis H_V ir AB dangos lygumas pagal tarptautinį rodiklį IRI – Y_{IRI} .

Darbo tikslas

Parengti magistralinių automobilių kelių asfaltbetoninės dangos eksploatacinių rodiklių prognozės matematinius modelius, atsižvelgiant į tampriosios dangos konstrukcijos savybes ir transporto priemonių eismo intensyvumą.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti buvo sprendžiami šie uždaviniai:

1. Išanalizuoti automobilių kelių asfaltbetoninės (AB) dangos eksploatacinius rodiklius lemiančius svarbiausius veiksnius ir šių rodiklių blogėjimo priežastis.
2. Atlikus tyrimus, nustatyti dangos AB komponentinės sudėties fizinių bei mechaninių ir AB mišiniams naudojamų medžiagų kokybės rodiklių sietį.
3. Ištirti AB dangos lygumo ir provėžų gylio kitėjimo dėsninumus.
4. Nustatyti dangos AB, kitų KDK sluoksnių medžiagų, šių sluoksnių kokybės rodiklių ir AB dangos lygumo bei provėžų gylio sietį.
5. Parinkti dvi racionalias magistralinių kelių tampriosios dangos konstrukcijas (skirtingam transporto priemonių (TP) eismui), įvertinus jos sluoksniams naudojamų medžiagų kokybės rodiklius.

Tyrimų metodika

Darbe taikyti šie tyrimų metodai: grafinio modeliavimo; matematiniai analiziniai; matematinės statistikos; eksperimentiniai natūriniai automobilių keliuose: transporto priemonių eismo intensyvumo matavimo, kelių dangos lygumo matavimo, provėžų gylio matavimo, kelių dangos suirties masto matavimo, dangos konstrukcinių sluoksnių storio nustatymo; eksperimentiniai laboratoriniai: KDK sluoksniams įrengti naudojamų medžiagų kokybės rodiklių tyrimo.

Darbo mokslinis naujumas

Mokslinį naujumą rodo šie rezultatai:

1. Pirmą kartą asfaltbetoninės dangos eksploataciniai rodikliai prognozuojami įvertinus šiuos magistralinių kelių tampriosios dangos konstrukcijos parametrus: konstrukcinių sluoksnių faktinius storius ir šių sluoksnių medžiagų faktinius kokybės rodiklius, TP faktinį eismo intensyvumą. Gauti asfaltbetoninės dangos eksploatacinių rodiklių matematiniai modeliai leidžia prognozuoti AB dangos višutinio sluoksnio eksploatacinius rodiklius penkerių metų laikotarpiui.
2. Ištirta kelių tiesyboje naudojamų medžiagų kokybės rodiklių tarpusavio sąveika ir jų įtaka kelių dangos eksploataciniams rodikliams.

3. Įvertinus transporto priemonių (TP) eismo intensyvumą, ištirtas kelių dangos eksploatacinių rodiklių kitėjimas, o išanalizavus esamas kelių dangos konstrukcijų medžiagų savybes ir sluoksnių storius, pateikti kelių dangos eksploatacinių rodiklių prognozės matematiniai modeliai ir pateiktos racionalios kelių dangos konstrukcijos.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Pasiūlytos šios priemonės Lietuvos magistralinių kelių AB dangos eksploataciniams rodikliams numatyti ir pagerinti:

1. Pasiūlyti matematiniai modeliai tampriosios kelių dangos konstrukcijos (KDK) viršutinio sluoksnio eksploatacinių rodiklių prognozei atlikti. Šie matematiniai modeliai (juos taikant) leidžia, žinant KDK sluoksnių medžiagų kokybės rodiklius ir sluoksnių storius, parinkti racionalias kelių dangos konstrukcijas ir prailginti KDK funkcionavimo trukmę.
2. Prailginus KDK funkcionavimo trukmę ir jos faktinius tarpremontinius laikotarpius, bus racionaliau panaudojamos Lietuvos Respublikos biudžeto (kelių fondo ir kitos) lėšos, skirtos automobilių kelių tiesybos ir remonto darbams.

Ginamieji teiginiai

1. Tampriosios kelių dangos konstrukcijas motyvuotai sustiprinti galima žinant jų sluoksnių medžiagų kokybės rodiklius. Sustiprinus kelių dangos konstrukcijas, pailgėja jų funkcionavimo trukmė, todėl, atlikus ekonominius skaičiavimus, galima nustatyti KDK sustiprinimo ekonominę naudą.
2. Parengus kelių AB dangos ir jos konstrukcijų eksploatacinių rodiklių nustatymo (pagal sluoksnių storius ir jų medžiagų kokybės rodiklius) matematinius modelius, galima numatyti dangos eksploatacinių rodiklių vertes prognoziniam penkerių metų laikotarpiui.
3. Numačius kelių AB dangos eksploatacinių rodiklių labiausiai tikėtinas vertes, galima pasiūlyti racionalias kelių dangos konstrukcijas.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema paskelbta 6 moksliniai straipsniai: du – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Thomson Reuters Web of Knowledge* duomenų bazę (Bulevičius *et al.* 2011 (a); Bulevičius *et al.* 2013), trys – recenzuojamuose tarptautinių konferencijų leidiniuose, įtrauktuose į *Thomson ISI Proceeding* duomenų bazę (Bulevičius *et al.* 2010 (a); Bulevičius *et al.* 2011 (b); Bertulienė *et al.* 2011), vienas – tarptautinių konferencijų straipsnių rinkiniuose (Булявичюс *et al.* 2010 (b)).

Disertacijos tema skaityti pranešimai trijose mokslinėse konferencijose:

- 10-ojoje tarptautinėje konferencijoje „Modern Building Materials, Structures and Techniques“ 2010 m. Vilniuje;
- 8-ojoje tarptautinėje konferencijoje „Environmental Engineering“ 2011 m. Vilniuje;
- tarptautinėje konferencijoje “Perspective Trends in Design, Construction and Maintenance of Roads, Bridges and Underground Structures” 2010 m. Minske.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai ir rezultatų apibendrinimas. Taip pat yra 4 priedai. Darbo apimtis 124 puslapiai, neįskaitant priedų, tekste panaudotos 48 numeruotos formulės, 40 paveikslų ir 18 lentelių. Rašant disertaciją panaudoti 158 literatūros šaltiniai.

Automobilių kelių tampriosios dangos konstrukcijų su asfaltbetonine danga atliktų tyrimų analizė

Skyriuje atlikta TP eismo intensyvumo ir sudėties Lietuvos magistraliniuose automobilių keliuose, kelių dangos būklės bei jos kitėjimo prognozės sistemų apžvalga. Išanalizuoti pasaulyje taikomi automobilių kelių dangos (KD) būklę apibūdinančių rodiklių vertinimo metodai. Apžvelgti pasaulio mokslininkų atlikti kelio dangos konstrukcijų (KDK) ir jų medžiagų savybių įtakos KD eksploataciniams rodikliams tyrimai. Pagal daugelio mokslininkų atliktus tyrimus apibūdinti KD defektai ir jiems atsirasti įtaką darantys veiksniai.

Skyriaus tematika paskelbti penki autoriaus straipsniai kartu su bendraautoriais (Bulevičius *et al.* 2010 (a); Булявичюс *et al.* 2010 (b); Bulevičius *et al.* 2011 (a); Bulevičius *et al.* 2011 (b); Bulevičius *et al.* 2013).

1.1. Lietuvos automobilių keliai ir jų įvertinimas

Lietuva turi gana tankų automobilių kelių tinklą. Magistraliniais ir krašto keliais, kurių ilgis sudaro 31,4 % visų valstybinės reikšmės kelių ilgio, vežama daugiau

kaip 80 % visų krovinių (Andriejauskas *et al.* 2013). Valstybinės reikšmės automobilių kelių bendras ilgis 2013 m. pradžioje sudarė 21 268 km (1.1 lentelė) (Lietuvos automobilių ... 2013). Valstybinės reikšmės automobilių kelių tinklo tankis 1000 km² sudarė 326 km. Lietuvoje yra 575 km valstybinės reikšmės automobilių kelių su keturiomis eismo juostomis, iš jų 309 km automagistralinių. Didžiojoje dalyje Lietuvos valstybinės reikšmės automobilių kelių (63,87 % jų ilgio) paklota asfaltbetoninė ar kita asfaltinė danga (Lietuvos automobilių ... 2013) (1.1 lentelė).

1.1 lentelė. Lietuvos valstybinės reikšmės automobilių kelių tinklo struktūra (2013 m. pradžios duomenimis)

Table 1.1. The structure of road network of national significance in Lithuania (based on data of the beginning of 2013)

Dangos tipas	Keliai, km			
	magistraliniai	krašto	rajoniniai	iš viso:
Asfaltinė	1674,64	4929,47	7291,07	13895,18
Cementbetonė	71,12	0,0	1,37	72,49
Žvyro	0,0	0,0	7266,91	7266,91
Grindinio	0,42	0,0	7,20	7,62
Iš viso	1746,18	4929,47	14566,55	21242,20

Naudojant kelių priežiūros ir plėtros programos ir ES paramos lėšas, modernizuojami Lietuvą kertantys automobilių transporto koridoriai. Pastaraisiais metais prioritetai buvo skiriami tarptautinių transporto koridorių plėtrai, įdiegiant saugaus eismo priemones. Daugiausia dėmesio skirta I ir IX transporto koridoriams, kuriuose eismo intensyvumas yra pats didžiausias. Šiais keliais vyksta intensyvus tranzito transporto priemonių eismas (Lietuvos automobilių ... 2013).

Lietuvos automobilių keliuose daugėja važiuojančių transporto priemonių (TP). Daugėjant transporto priemonių (2000 m. – 1,29 mln., o 2013 m. – 2,24 mln.) ir jų srautuose didėjant sunkiųjų transporto priemonių (STP) daliai, svarbu sudaryti sąlygas saugiai ir greitai vežti keleivius ir krovinius. Turi būti garantuotos šios automobilių kelių savybės: geras dangos lygumas, nedidelis vėžtumas ir maža suirtis, pakankamas KDK stipris ir gera transporto priemonių ratų sankiba su danga (Klashinsky *et al.* 2010; Sokolov, Sivilevičius 2011).

Transporto priemonių srauto sudėtis 2012 m. magistraliniuose keliuose buvo tokia: lengvieji automobiliai sudarė 80,67 % bendrojo transporto priemonių srauto, o krovininiai automobiliai – 19,33 %, krašto keliuose lengvieji automobiliai sudarė 88,09 % bendrojo transporto priemonių srauto, krovininiai automobiliai – 11,91 %. Rajoniniuose keliuose lengvieji automobiliai sudarė

90,2 %, o kroviniai – 9,8 % bendrojo transporto priemonių srauto. 2012 m. eismo intensyvumas, lyginant su 2000 m., išaugo 47 %.

2012 m. magistraliniuose keliuose, lyginant su 2011 m., vidutinis metinis paros eismo intensyvumas (*VMPEI*) padidėjo 0,31 %. Lengvųjų automobilių eismo intensyvumas sumažėjo 0,61 %, krovinių automobilių eismo intensyvumas padidėjo 4,31 %, o autotraukinių – 7,68 % (1.2 lentelė).

Automobilių kelių dangos tobulinimo galimybes rodo asfaltinių mišinių gamybos apimtys (Sivilevičius, Šukevičius 2009).

1.2. lentelė. Transporto priemonių srauto sudėties pokyčiai 2011–2012 metais

Table 1.2. Changes in the traffic flow composition, 2011–2012

Kelių grupė	<i>VMPEI</i> pokytis 2011 m.–2012 m.			
	bendrojo transporto priemonių srauto	lengvųjų transporto priemonių	krovinių transporto priemonių	autotraukinių (krova > 12t)
Magistraliniai keliai	0,31%	-0,61%	4,31%	7,68%

Grupuojant magistralinių kelių ruožus pagal eismo intensyvumą, nustatyta, kad daugumoje kelių ruožų (ruožų ilgių suma – 665,46 km) *VMPEI* buvo nuo 4 000 iki 8 000 aut./parą. Šių ruožų suminis ilgis sudarė 38,3 % viso magistralinių kelių ilgio. Kelių ruožų, kuriuose *VMPEI* nuo 16 000 aut./parą iki 32 000 aut./parą, suminis ilgis buvo 128,25 km. Tai sudarė 7,4 % viso magistralinių kelių ilgio. Kelių ruožų, kuriuose *VMPEI* didesnis kaip 32 000 aut./parą, suminis ilgis buvo 14,21 km. Tai sudarė 0,8 % viso magistralinių kelių ilgio. Likusiuose magistraliniuose kelių ruožuose *VMPEI* sudarė nuo 8 000 iki 16 000 aut./parą.

1.1 paveiksle parodytas *VMPEI* kitėjimas 2000–2012 metais magistraliniuose keliuose (2000 metų *VMPEI* prilygintas 100 %). Iš grafiko matyti, kad 2000–2008 m. eismo intensyvumas augo, 2009–2010 m. mažėjo, o nuo 2011 m. vėl didėjo. 2012 m. eismo intensyvumas padidėjo ir, lyginant su 2000 m., išaugo 73,35 % (Lietuvos automobilių ... 2013).

Lietuvos automobilių keliai savo eksploataciniais ir stiprio rodikliais (dangos lygumu, dangos konstrukcijos stipriu ir kt.) nėra pritaikyti atlaikyti didėjančias TP ašių apkrovas (Čygas *et al.* 2008; Motiejūnas *et al.* 2010; Laurinavicius *et al.* 2009). Po 1990 metų sumažėjus kelių dangos tobulinimo, taisymo ir stiprinimo darbų apimčiai, ėmė blogėti jos būklė, didėti jos duobėtumas ir vėžėtumas mažėti kelių dangos konstrukcijos stipris (pagal jos stiprio rodiklį *SNC*). KDK stipris magistraliniuose ir krašto keliuose pradėjo didėti tik nuo 2004 metų (Lietuvos automobilių ... 2013).

1.1 pav. Vidutinio metinio paros eismo intensyvumo kitėjimas magistraliniuose keliuose 2000–2012 metais, %

Fig. 1.1. Change in the traffic volume of the main roads in %, 2000–2012

Palyginus 2012 m. ir 2003 m. duomenis, tampa akivaizdu, kad per 9 metų laikotarpį transporto priemonių rida magistraliniuose keliuose padidėjo 43 %, krašto keliuose – 32 %, rajoniniuose keliuose – 16 %. Metinė transporto priemonių rida (2012 m.) magistraliniuose keliuose parodyta 1.3 lentelėje. Šios lentelės duomenys rodo, kad magistraliniuose keliuose TP rida sudaro beveik pusę (apie 47 %) visos valstybinės reikšmės keliuose vykstančios TP ridos.

1.3 lentelė. Transporto priemonių rida magistraliniuose keliuose 2012 metais

Table 1.3. The total run of vehicles on the main roads, 2012

Kelių grupės	Transporto priemonių rida		
	10 ⁶ aut.km	% nuo bendros ridos magistraliniuose ir krašto keliuose	% nuo bendros ridos visuose valstybinės reikšmės keliuose
Magistraliniai keliai	4786,93	57,75 %	46,95 %

Dauguma Lietuvos automobilių kelių buvo suprojektuota ir nutiesta tuo laikotarpiu, kai galiojo 10 t. projektinė ašies apkrova, todėl pastaraisiais metais, vykstant tarptautiniam tranzitiniam krovinių automobilių eismui su STP ašies apkrova, sudarančia 11–13 t, o kartais 15 t (Sunkių transporto.... 2009), kelių danga ir KDK patiria pernelyg didelį ardymo poveikį (Vaitkus *et al.* 2010).

KD defektai blogina sunkiųjų ir ypač greitai važiuojančių TP eismo sąlygas – mažina važiavimo saugumą ir patogumą (komfortą), o kartais ir važiavimo greitį (Andriejauskas *et al.* 2013). Sunkiosios transporto priemonės

daro neigiamą poveikį ne tik kelių dangos lygumui, bet ir išspaudžia dangoje vėžės – šie defektai mažina eismo saugumą (Klashinsky *et al.* 2010; Karkowski, Rafalski 2013; Sokolov, Sivilevičius *et al.* 2011). Lietuvoje, kaip ir daugelyje kitų šalių, nustatyta, kad didžiausias vėžės gylis neturėtų viršyti 40 mm (Alaa *et al.* 2012; Bertulienė *et al.* 2011; Chen *et al.* 2004; Dawson 2008). Kai vėžės gilesnės, kelių būtina remontuoti (KPV PN-05).

Kelių dangos vėžetumo problema egzistuoja visame pasaulyje ir tampa vis aktualesnė (Alaa *et al.* 2012). Praėjusio dešimtmečio viduryje (dėl lėšų stokos) tarptautiniame Via Baltica kelyje A5 ir IXB transporto koridoriuje buvo minimaliai sustiprinta kelių dangos konstrukcija. Buvo tikėtasi, kad, sustiprinus KDK maždaug 10–12 metų jos nereikės remontuoti, tačiau dėl sparčiai didėjančio STP eismo, praėjus septyneriems aštuoneriems metams, KDK reikia iš naujo stiprinti (Karkowski, Rafalski 2013). Pastaruoju metu, norint, kad naujai stiprinamų kelių dangos konstrukcijų ruožuose KDK funkcionuotų projekte numatytą laiką, pravartu taikyti kur kas brangesnes KDK stiprinimo technologijas, naudoti naujas medžiagas, kloti storesnius KDK sluoksnius. (Čygas *et al.* 2008; Laurinavicius *et al.* 2009; Motiejūnas *et al.* 2010).

Svarbiausias automobilių kelių dangos eksploatacinis rodiklis – jos lygumas (Chang *et al.* 2009; Harris 2013; Khattak *et al.* 2013; Sandra, Sarkar 2012; Petkevičius, Sivilevičius 2000). Kelių priežiūros vadovo I dalyje „Automobilių kelių priežiūros normatyvai“ nurodyta, kad magistralinių kelių danga būna trijų priežiūros lygių: aukšto, vidutinio ir žemo. Šių kelių AB dangos lygumas (rodiklio IRI vienetais (m/km)) Y_{IRI} pagal priežiūros lygius suskirstytas taip (KPV PN-05):

- $Y_{IRI} \leq 1,5$ m/km – aukštas priežiūros lygis;
- $Y_{IRI} \leq 2,0$ m/km – vidutinis priežiūros lygis;
- $Y_{IRI} \leq 2,5$ m/km – žemas priežiūros lygis.

Kai rodiklis $Y_{IRI} \geq 2,5$ m/km – AB dangos lygumas neatitinka priežiūros reikalavimų.

Esant įprastai (nekrizinei) šalies ekonominei padėčiai, automagistralinių ir kitų svarbiausių magistralinių kelių AB dangai taikomas aukštas priežiūros lygis. 2000–2006 m. išmatuotas magistralinių kelių AB dangos lygumas metams bėgant gerėjo: daugėjo ruožų, kurių $Y_{IRI} < 2,5$ m/km, ir mažėjo ruožų, kurių $Y_{IRI} > 2,5$ m/km (Macekainis 2006) Visų magistralinių kelių AB dangos lygumo vidutinė vertė sumažėjo nuo $Y_{IRI} = 2,60$ m/km iki $Y_{IRI} = 2,25$ m/km, o automagistralių A1 ir A2 atitinkamai nuo $Y_{IRI} = 1,69$ m/km iki $Y_{IRI} = 1,36$ m/km (A1) ir nuo $Y_{IRI} = 1,59$ m/km iki $Y_{IRI} = 1,31$ m/km (A2). Šių kelių AB dangos lygumas gerėja laiku remontuojant dangą, kurios lygumo rodikliai blogiausi (Macekainis 2006).

Lietuvai 1991 m. atkūrus nepriklausomybę ir perėjus prie rinkos ekonomikos, įsitikinta, kad iki tol naudota automobilių kelių remonto planavimo sistema, kai buvo taikomi norminiai tarpremontiniai laikotarpiai, neefektyvi, o dėl nepakankamo finansavimo ją taikyti praktiškai tapo neįmanoma. Sprendžiant šį uždavinį, buvo naudotos dangų (būklės) valdymo sistemos (DVS).

Tyrimais (Laurinavičius *et al.* 2010; Marzouk *et al.* 2012, Pradhan *et al.* 2001) nustatyta, kad tinkamas DVS sistemų naudojimas leidžia sutaupyti apie 20 % kelių priežiūrai ir remontams skirtų lėšų.

Pritaikytos DVS sistemos leido (net gerokai sumažėjus finansavimui) užtikrinti gerą valstybinės reikšmės automobilių kelių būklę ir planingai vykdyti kelių tinklo plėtrą. Lietuvoje pirmiausia pradėta naudoti HDM-III sistema (Highway Desig.... 1981). Beveik tuo pat metu (1993 m.) pradėta kurti lietuviška DVS – DAVASEMA. 1994 m. buvo sukurta kelių dangos būklės valdymo sistemos pirmoji versija. DAVASEMOJE buvo įvestas posistemis, skirtas AB dangos būklei prognozuoti. Tam buvo taikyti HDM dangų irties modeliai (Dangų valdymo.... 1997).

Įvairių veiksnių įtaka kelių dangos irčiai dažniausia nustatoma atliekant eksperimentus ir įvertinant empiriškai. Šie tyrimai yra brangūs ir ilgalaikiai, todėl, kuriant DAVASEMĄ, nebuvo parengti, o buvo panaudoti kitose šalyse sukurti HDM modeliai. Visgi DAVASEMA svarbiausios nuostatos iki šiol naudojamos kelių dangos stiprinimo ir kelių rekonstrukcijos, naujų kelių tiesybos ir žvyrkelių asfaltavimo projektams įvertinti.

Atlikti tyrimai rodo, kad kelių dangos būklę turėtų būti tikrinama nuolat, siekiant objektyviai ir tiksliai nustatyti kelių dangos ir KDK remonto darbų kasmetines apimtis, o tarpremontiniai laikotarpiai (kelių AB dangos ir KDK funkcionavimo trukmė) periodiškai turėtų būti tikslinami dėl Lietuvos keliuose kintančių eismo sąlygų: susisiekimo priemonių eismo intensyvumo, eismo sudėties ir kt.

1.2. Automobilių kelių tampriosios dangos konstrukcijų ir asfaltbetoninės dangos būklė bei savybės

Kelių AB dangos lygumas priklauso nuo pagrindų tipo, jų storio ir būklės, be to didelę įtaką tam turi ir naudotų medžiagų kokybės rodikliai. Dangos lygumas taip pat priklauso nuo asfaltbetonio sudėties bei struktūros ir nuo jo fizinių ir mechaninių rodiklių (Chang *et al.* 2009; Harris 2013; Khattak *et al.* 2013; Sandra, Sakar *et al.* 2012; Ma *et al.* 2012). Kelio konstrukcijoje svarbus

elementas žemės sankasa, kuri laiko kelią viso jos funkcionavimo laikotarpio metu (Bertulienė *et al.* 2010, Vaitkus *et al.* 2012).

Eksploatuojant kelią susidaro įvairios liekamosios deformacijos bei defektai ir dangos lygumas pradeda blogėti (Sandra, Sakar *et al.* 2012;). Dangos defektus galima suskirstyti į šias pagrindines grupes: paviršiaus suirtis, šlyties liekamosios deformacijos, temperatūros plyšiai, nuovargio plyšiai, provėžos ir dangos skersiniai profilio iškrypimai (Khattak *et al.* 2013).

Vienas iš svarbiausių rodiklių, apibūdinančių kelių dangos kokybę, yra jų dangos lygumas (Harris 2013). Jis lemia važiavimo komfortą bei TP degalų sąnaudas ir užtikrina saugų eismą (Anastasopoulou *et al.* 2012; Anastasopoulou, Mannering 2009). Kelių dangos lygumas apibūdinamas nelygumų skaičiumi, jų vertėmis ir išsidėstymu, tenkančiu kelių dangos ilgio vienetui ir dažniausiai išreiškiamas tarptautiniu lygumo rodikliui *IRI*. Keliai laikomi pakankamai geros būklės, jeigu jų dangos lygumas $Y_{IRI} \leq 2,5$ m/km, o ypač nelygios dangos keliais pripažįstami tie keliai, kurių dangos lygumo rodiklis $Y_{IRI} \geq 12$ m/km (Chang *et al.* 2009; Harris, 2013).

Dangos lygumas, naudojant primityvias matavimo priemones (kartelę), buvo pradėtas matuoti dar 1900 m. Sudėtingesni kelio išilginio profilio matavimo įrenginiai (profilografai, mobilieji matavimo prietaisai) buvo sukurti ir pradėti diegti 1950–1960 metais. Kelius prižiūrinčios įmonės naujai įrengtos dangos lygumą pradėjo tikrinti 1960–1980 m., tačiau 1980–1990 m. tai pradėta taikyti visame pasaulyje (Wang 2006). Anksčiau išvardyta matavimo įranga ir matavimo būdai gali būti suskirstyti į penkias pagrindines grupes (Perera, Kohn 2012):

- matavimas rankinėmis preimonėmis (lygi matuoklė ir gilmatis, kartelė su gylio matavimo pleištu, mobilioji lygumo matavimo kartelė),
- matavimas pusiau automatinėmis matavimo priemonėmis (pusiau automatinis profilografas),
- matavimas automatiniais lygumo matavimo ir fiksavimo prietaisais (Bureau of public roads (BPR) ir Portland Cement Association (PCA) lygumo matavimo prietaisai ir kt.),
- automatiniais greitaeigiais lygumo matavimo prietaisais (mobilioji laboratorija RST-28, DYNATEST 5051 RSP, automatinis kelio analizatorius T6600 ir kt.),
- lengvaisiais profilometrais (lengvasis paviršiaus analizatorius (LISA) 6200, CS8700, DYNATEST/KJL 6400 ir kt.).

Naudojami ir kiti kelių dangos lygumo nustatymo metodai. Atsižvelgiant į eksploatacinius reikalavimus, kelių dangos lygumą siūloma vertinti smūgių kiekiu kelio kilometre. Didžiosios Britanijos transporto ir kelių tyrimų laboratorija daugelį metų dangos lygumo tyrimams naudojo profilografus, pagal

kurių grafogramas nustatinėjo nelygumų aukščių sumą matuojamame ruože, mm/km. Buvo apytiksliai nustatyta šių nelygumų charakteristikų ir tarptautinio lygumo rodiklio sistis (Guidelines of ... 2009):

$$n_T = 13 Y_{IRI}, \quad (1.1)$$

$$n_h = 630 Y_{IRI}^{1,12}. \quad (1.2)$$

čia Y_{IRI} – tarptautinis lygumo rodiklis Y_{IRI} , m/km, n_T – smūgių skaičius, užregistruotas viename kilometre smūgiamačiu, n_h – profilografo rodiklis – nelygumų skaičių suma, mm/km.

Esant ilgiems kelio ruožams, lygumo pokyčių matavimai nenašiais (kartele ir gulsčiuu bei kitais) rankiniais prietaisais mažai efektyvūs. Mokslininkai Lietuvoje ir užsienio šalyse atliko eksperimentinius matavimus ir įrodė, kad *IRI* vertės matuojant mobiliaisiais prietaisais, artimai koreliuoja su rankiniais prietaisais išmatuotomis vertėmis (Múčka 2012; Petkevičius *et al.* 2009; Petkevičius, Sivilevičius 2008). Tarptautinio lygumo rodiklio *IRI* matavimus atlikti trumpuose kelio ruožuose ar uždaroje patalpose, naudojant dabartines mobiliąsias laboratorijas, kartais būna sudėtinga arba ekonomiškai nenaudinga. Šiuos matavimus MingHsin technologijos ir mokslo universitetas (Taivanas) siūlo atlikti naudojant automatinę *IRI* matavimo įrangą (robotą) P3-AT, kurio tikslumas, matavimus atliekant 50 m ilgio kelio ruože nukrypo $\leq 0,02$ m/km, lyginant su mobiliojo profilografo išmatuotomis *IRI* vertėmis (Chang *et al.* 2009).

Pastaraisiais metais kelių dangos lygumui įvertinti dažniausiai naudojami automobiliai, kuriuose sumontuota aparatūra, registruojanti automobilio reakciją į nelygumus – tai smūgiamatis, matuojantis santykinius pakabos poslinkius tarp ašies ir automobilio korpuso. Juo galima tiksliai išmatuoti kelio lygumo rodiklio *IRI* vertę ir nesunkiai apdoroti gautus matavimų duomenis (Múčka 2012, 2013;). Smūgiamačiai montuojami lengvuosiuose automobiliuose arba priekabose su vienu ar dviem ratais.

Vadovaujantis „Automobilių kelių investicijų vadovu“, patvirtintu LAKD, rengiant investicinius projektus, dangos būklę charakterizuoja šie veiksniai:

- kelių dangos lygumas;
- asfaltbetoninės dangos įlinkiai;
- TP ratų sankibos su danga koeficientas.

Kelių dangos lygumas matuojamas *IRI* (tarptautinio lygumo rodiklio) vienetais, m/km. Lygumas matuojamas kas 50 m kiekvienoje eismo juostoje (Andriejauskas *et al.* 2013). Ruožo lygumas nustatomas taip (Perera, Kohn 2012):

$$IRI = \frac{1}{n} \times \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l IRI_{ij}, \quad (1.3)$$

čia IRI – ruožo vidutinis lygumas, m/km, n – 50 m ilgio elementariųjų kelio ruožų skaičius, l – eismo juostų skaičius, IRI_{ij} – i -tojo elementariojo kelio ruožo j -ojoje eismo juostoje KD nelygumas IRI vienetais, m/km.

Kelių asfaltbetoninės dangos lygumas matuojamas 1-os klasės nelygumų matavimo įrenginiu. Šiuo metu Lietuvos valstybinės reikšmės kelių asfaltbetoninės dangos lygumas matuojamas lazeriniu profilometru DYNATEST 5051 RSP. Pagal technines prietaiso charakteristikas matavimai atliekami esant aukštesnei nei +5 °C temperatūrai. Asfaltbetoninės dangos lygumo matavimo sezonas apibrėžtas kelių priežiūros ir valdymo sistemoje, t. y. dangos lygumas matuojamas tik tada, kai jau būna ištaisyti dangos defektai (Šiaudinis, Cygas 2007). Nuo 2007 m. kelių dangos lygumas (svarbiausiuose keliuose) matuojamas naudojant kelių laboratoriją RST-28 (Cygas *et al.* 2011; Dimaitis 2008).

Įlinkiams matuoti Lietuvos automobilių kelių direkcija, kaip ir plačiai pasaulyje (Deblois *et al.* 2010), naudoja krintančio svorio deflektometrą DYNATEST 8000 FWD. Krintančio svorio deflektometru išmatuoti įlinkiai leidžia įvertinti esamų kelių dangos konstrukcijų stiprį ir apskaičiuoti kelių dangos konstrukcijų modifikuotą stiprio rodiklį (SNC) (Šiaudinis, Cygas 2007).

Kelių asfaltbetoninės dangos defektai vertinami orginoleptiniu tyrimu. Toliau pateikti vizualiųjų apžiūrų metu vertinami asfaltbetoninės dangos defektai:

- plyšiai;
- lopai ir duobės;
- paviršiaus deformacija;
- dangos lukštenimasis;
- kelkraščių lūžinėjimas;
- kiti defektai.

Vizualiųjų apžiūrų metu dangos defektai ir jų vertės nustatomi naudojant „Automobilių kelių remontų planavimo normatyvus“, kuriuose nurodytos defektų leidžiamosios vertės ir jų vertinimas (KPV PN-05).

1.3. Kelių tampriosios dangos konstrukcijų sluoksnių medžiagos ir jų savybės

Kelių dangos ir KDK funkcionavimo trukmė ir patikimumas priklauso ne tik nuo dangos asfaltbetonio sudėties, bet ir nuo jo sutankinimo laipsnio, pradinio medžiagų, naudotų konstrukcijos sluoksniams įrengti, kokybės, sluoksnių storio ir kitų veiksnių (Butkevičius *et al.* 2007; Sivilevicius, Vislavicius 2008). Labai

sunku prognozuoti realią asfaltbetoninės dangos ir jos konstrukcijos realią funkcionavimo trukmę, priklausomai nuo asfaltbetonio sudėties ir jo fizinių bei mechaninių ar kitų savybių (Bulevičius *et al.* 2010 (a), 2013).

Daugelio autorių įrodyta, kad asfaltbetonis yra kompozitinė medžiaga, kurioje pasireiškia tampriosios, klampiosios ir plastiškosios jo savybės (Mučinis *et al.* 2009; Petkevičius *et al.* 2009; Petkevičius Sivilevičius 2008; Radziszewski 2007; Sivilevičius *et al.* 2011, 2008 Ferne 2006; Vislavicius *et al.* 2013). Taip pat jis apibūdinamas stipriu (Butkevičius *et al.* 2007). Kompozitai – medžiagos, sudarytos iš dviejų ir daugiau įvairios kilmės medžiagų, kurios pasižymi savybėmis, skirtingomis nei pradinės medžiagos. Kompozitus sudaro kaupiklis (dispersinė fazė) ir rišiklis (matrica). Įtempių deformacijos būvio tyrimai rodo, kad kompozitų savybės gali būti įvairios – jie gali būti ir tampriomis, ir plastiškomis, ir rišamosiomis medžiagomis. Matrica priima apkrovą, o dispersinė fazė trukdo susidaryti deformacijai bei suteikia tvirtumo. Platų kompozitinių medžiagų paplitimą lemia jų pranašumas prieš tradiciškai daugelyje sričių, įskaitant ir kelius, naudojamas medžiagas. Pranašumas yra tas, kad nors kompozito (asfaltbetonio) stipris gali būti mažesnis už, pavyzdžiui, mineralinio užpildo stiprį, tačiau, vertinant tamprumą ir ilgaamžiškumą, kompozitinė medžiaga yra gerokai pranašesnė (Ceylan *et al.* 2008; Ceylan *et al.* 2009).

Tyrimai rodo, kad asfaltbetonio tšiosios ir tampriosios savybės labiausiai išryškėja žiemą. Pavasarį ir rudenį asfaltbetonis daugiausia reiškiasi kaip tamprus ir plastiškas, o vasarą – kaip klampusis, tamprus ir plastiškasis kūnas. Asfaltbetonio savybių kitėjimas bėgant metams labiausiai priklauso nuo vietovės, kurioje įrengtas kelias, hidroterminio režimo, taip pat nuo TP automobilių ratų apkrovų. Kai TP greitis būna didesnis kaip 10–15 km/h, rišamosios asfaltbetonio savybės pasireiškia nedaug. Atsižvelgiant į vienų ar kitų medžiagų savybių raiškos lygį, vyksta įvairūs kelių dangos irties procesai (Gui, *et al.* 2007; Petkevičius *et al.* 2010).

Nustatant asfaltbetonio kokybės rodiklių (K) atitiktį reikalavimams, gali būti trijų tipų nelygybės su vienpusėmis arba dvipusėmis ribomis (apatinė T_a ir viršutinė T_v) (Petkevičius 2008):

$$K < T_v \text{ (rodikliams } R_0, H, K_s, P_1/P_2 \text{ (kai } t = + 50 \text{ } ^\circ\text{C)}),$$

$$K > T_a \text{ (rodikliams } R_{20}, R_{50}, K_v, R_b, E, K_s, P_1/P_2 \text{ (kai } t = - 10 \text{ } ^\circ\text{C)}),$$

$$T_a < K < T_v \text{ (rodikliams } W, LP, SK, SM, MM, B, B/MM).$$

čia K_s , LP – atitinkamai asfaltbetonio tankio koeficientas ir liekamas porėtumas; SK , SM , MM , B – atitinkamai grūdelių, stambesnių kaip 2 mm (skaldos), 0,09–2 mm stambumo (smėlio), smulkesnių kaip 0,09 mm (mineralinių miltelių) ir bitumo kiekiai asfaltbetonyje, masės %.

Tikslinant fizinius ar mechaninius asfaltbetonio rodiklius, pravartu įrodyti, kad kiekvienas iš jų modeliuoja tam tikrą asfaltbetonio atliekamą funkciją kelių

dangoje. Jeigu du ar daugiau rodiklių modeliuoja vieną ir tą pačią asfaltbetonio atliekamą funkciją kelių dangoje, reikia silpniau koreliuojančių su dangos eksploatacinėmis savybėmis rodiklių visiškai atsisakyti, paliekant tik geriausiai jos darbą (funkcijas) modeliuojantį rodiklį. Reikia atsisakyti ir tokių nedubliuotų rodiklių, kurie silpnai modeliuoja tam tikro pobūdžio dangos darbą. (Petkevičius, Sivilevičius 2000; Kim *et al* 2003, 2005; Ker *et al* 2008;).

Labai svarbus asfaltbetoninės dangos kokybės rodiklis yra jos vienodumas pagal sudėtį ir struktūrą bei fizinius ir mechaninius rodiklius. Įrodyta, kad užtikrinus reikiamą asfaltbetoninės dangos vienodumą pagal sudėtį, tuo pačiu metu užtikrinamas ir reikiamas jos vienodumas pagal fizinius ir mechaninius rodiklius (Sivilevičius, Vansauskas 2013).

Tyrimais įrodyta, kad KDK stiprio mažėjimas – tai gana sudėtingas procesas, kurį galima apibūdinti įvairiais determinuotais fiziniais suirties modeliais. KDK irtis priklauso nuo kelių AB dangos bei jos konstrukcijos sluoksnių medžiagų savybių ir jų kitėjimo KDK funkcionavimo laikotarpio laikotarpiu. Ji apibūdinama keturiomis pagrindinėmis reologinėmis AB savybėmis: tamprumu, plastiškumu, tąsumu ir stiprumu. Pastaruoju metu kelių AB dangos ir KDK stiprio mažėjimas nustatomas įvertinant jos eksploatacinių rodiklių, nuo kurių priklauso TP srauto kelyje greitis, eismo saugumas ir važiavimo patogumas, kitėjimą. KDK stiprio kitėjimas nustatomas pagal jos standumo (kelių dangos tampriojo įlinkio) kitėjimą – tai labai apibendrintas apibūdinimas, o mažiausias jos stipris įvertinamas tik projektiniu metu laikotarpiu (Petkevičius, Sivilevičius 2008).

Labiausiai paplitusios žemės sankasos liekamosios deformacijos – nuosėdžiai. Dėl įšalo žemės sankasos gruntų tūris padidėja, o polaidžio metu sumažėja, tačiau ne visur vienodai. Kai pylimai nusėda nedaug, KDK pavojus negresia, tačiau nevienodai ir labai nusėdę mažuose pylimo plotuose gruntai gali dangoje sukelti pavojingus ribinius įtempius ar net ją suardyti.

Taip pat gali būti deformuota ir kuri nors kita žemės sankasos dalis: nušliuožti šlaitas arba nusėsti kelkraštis. Šios šlaitų liekamosios deformacijos būna dažnos, kai būna statūs ir supilti iš nevienodų bei blogai sutankintų gruntų šlaitai. To priežastimi dažniausiai būna padidėjusios transporto priemonių apkrovos ar per daug įmirkę žemės sankasos gruntai.

Defektais ir suirtimi gali būti pažeista tikrai kelių danga ir/ar visa kelių dangos konstrukcija. Dažniausiai pasitaikantys AB dangos defektai ir suirtis (Petkevičius, Sivilevičius 2008):

- nuodyla – dažniausia dangos suirtis;
- išaižos – dangos paviršiaus mineralinių grūdelių apsinuoginimas ir nubyrimas;

- ištrupos – einanti po išaižų dangos irties fazė – tai suirtis, kai nuo AB dangos atsiskiria stambesnieji mineraliniai grūdėliai, jie būna nuo kelių iki 20 mm stambumo;
- kraštų įlūžiai – AB dangos suirtis jos sąlyčio su kelkraščiu vietose, kai kelkraščiai įrengti iš kitos nei danga medžiagos (skaldos, žvyro ir kt.);
- išdaužos (duobės) – nuo 20 iki 100 mm, o kartais ir didesnio gylio vienetiniai suirties dariniai, atsirandantys dėl nepakankamos mineralinių medžiagų ir organinių rišiklių sankibos, taip pat dėl šių medžiagų nepakankamo tankio ir kitų priežasčių;
- šlyties liekamosios deformacijos – tai defektai, atsirandantys didelį plastiškumą turinčioje AB dangoje;
- šlyties liekamosios deformacijos – provėžos, susidarančios AB danga važiuojant TP ratams;
- plyšiai – labai dažni kelių asfaltbetonio dangos defektai, jie būdingi ir cementbetoninei (betoninei) dangai.

Didžiausią įtaką kelio funkcionavimo trukmės prailginimui turi bitumo savybės ir teisingai parinktas bitumas (jo tipas), geriau ar blogiau atitinkantis KDK funkcionavimo sąlygas. Bitumo savybės gerinamos tobulinant jo gamybos technologijas, išgaunant jį iš naftos žaliavos ir įterpiant įvairius priedus. Priedai įterpiami į pagamintą bitumą arba sudozuojami jo gamybos metu. Įterpus priedus, pagerinama bitumo sankiba su mineralinėmis medžiagomis, padidinamas bitumo elastingumas, plastiškumas ir stabilumas, veikiant įvairiems eksploataciniams veiksniams.

Kelių asfaltbetoninės dangos kokybės rodikliams didelę įtaką turi ne tik naudojami bituminiai rišikliai, mineraliniai milteliai ir kiti komponentai, bet ir naudojamos skaldos fizinės, mechaninės bei geometrinės savybės (Petkevičius *et al.* 2009). Autorių darbuose (Timm, Newcomb 2006; Merilla *et al.* 2006; Loizos 2006) parodyta kad, tinkamai suprojektavus ir įrengus nestandartinę kelių dangą ir kelių dangos konstrukciją (KDK), danga ilgą laiką (10–20 metų ir ilgiau) išlieka lygi ir būna, mažai pažeista defektais (Amšiejus *et al.* 2009, 2010).

Atliktų darbų (Lundstrom *et al.* 2004; Choi, Bahia 2004; Kim *et al.* 2005; Tighe *et al.* 2007; Lee *et al.* 2007; Butkevičius *et al.* 2007; Ahammed, Tighe 2008; Li *et al.* 2008) analizė parodė, kad AB danga ir KDK funkcionuoja labai sudėtingomis, nuolat kintančiomis sąlygomis ir veikiant dažnai pasikartojančioms TP apkrovoms. Šių apkrovų poveikio trukmė, pasikartojimo dažnis ir dydis nuolat kinta, todėl intensyviojo sunkiųjų TP eismo keliuose KDK sluoksniams naudojamos mineralinės medžiagos, geriausiai atitinkančios KDK funkcionavimo sąlygas.

Akmens medžiagos ir iš jų įrengti KDK sluoksniai jau daugelį metų tiriami Rusijoje (Иваньски 2003). Šie tyrimai nemaža skirti priklausomybėms tarp

medžiagų stambumo, granulimetrinės sudėties bei stiprio rodiklių ir šių medžiagų tampros modulių tikslinti. Šie tyrimai buvo tęsiami Rusijoje ir Baltarusijoje. Skalda taip pat naudojama ir pagrindo mišiniams gaminti. KDK sluoksniuose esanti medžiaga yra veikiamą statine arba dinamine, pastoviąja, kintamąja, arba cikline apkrovomis. AB dangą ardo temperatūros pokyčiai, krituliai ir kiti klimato bei aplinkos veiksniai. Nuo skaldos savybių priklauso asfaltinio mišinio gamybos būdai, KDK sluoksnių storiai ir kiti KDK ypatumai. Parenkant skaldą, reikia išanalizuoti KDK funkcionavimo sąlygas (apkrovas ir klimato bei aplinkos veiksniai), taip pat – KDK keliamus eksploatacinius reikalavimus. Tada parenkama skalda, geriausiai funkcionuojanti KDK esamomis eksploatacinėmis sąlygomis (Bulevičius *et al.* 2010a, 2010b).

Lenkijoje (Иваньски 2003) ir Rusijoje atlikti įvairių mineralinių medžiagų (kvarco bazalto skaldos bei įvairios kilmės (uolinių) susmulkintų smėlio frakcijų) įtakos skaldos ir mastikos asfaltbetonio savybėms tyrimai. Įrodyta, kad AB savybės labai priklauso ne tik nuo įterpiamų paviršius aktyvinamųjų priedų (PAP), bet ir nuo naudojamų mineralinių medžiagų kilmės (jų uolinių savybių). Darbe (atlikus eksperimentinių tyrimų analizę) nustatyta skaldos sluoksnio, įrengto užkylavimo būdu, tampros modulio ir liekamojo akytumo glaudė koreliacinė sietis (determinacijos koeficientas $R^2 = 0,916$), taip pat – šio sluoksnio tampros modulio ir jo tankio (sutankinto būvio) glaudė koreliacinė sietis ($R^2 = 0,991$).

Skaldos, naudojamos asfaltinių mišinių gamybai, svarbiausi geometriniai rodikliai tai jos granulimetrinė sudėtis, trupintųjų ir skaldytųjų dalelių santykinis kiekis ($C_c - > 50\%$ skelto paviršiaus, $C_{tc} - > 90\%$ skelto paviršiaus, $C_r - > 50\%$ apvalaus paviršiaus, $C_{tr} - > 90\%$ apvalaus paviršiaus) ir pailgų dalelių santykinį kiekį rodantys dalelių plokštumo FI bei formos SI rodikliai. Visi šie rodikliai turi įtakos projektuojamo asfaltbetonio stipriui bei tvarumui (Butkevičius *et al.* 2007; Bulevičius *et al.* 2013; Bennert *et al.* 2011; Komba *et al.* 2010; Markauskas *et al.* 2010; Moaveni *et al.* 2013).

Defektai, atsirandantys kelių dangoje dėl sunkiųjų transporto priemonių poveikio, turi įtakos kelių dangos funkcionavimo trukmei, važiavimo patogumui ir saugiam eismui. Gerinant kelių dangos savybes ir TP eismo sąlygas, Lietuvos ir kitų šalių mokslininkai atlieka kelių dangos konstrukcijų sluoksnių tyrimus, analizuoja šių sluoksnių savybių įtaką eksploataciniams kelių dangos rodikliams, asfaltinių mišinių, naudojamų kelių dangos konstrukcijų sluoksniams, fizikines ir mechanines savybes ir kt. Mineralinės (granito, dolomito, žvyro) medžiagos skiriasi savo stambumu, forma ir funkcionavimo sąlygomis keliuose, kurios priklauso nuo TP apkrovų dydžio ir pobūdžio, aplinkos temperatūros, jos agresyvumo ir kt. Šios medžiagos KDK sluoksniuose būna veikiamos statine ir/ar dinamine, taip pat pastoviąja, kintamąja arba cikline apkrovomis. Aplinkos temperatūra gali būti žema arba aukšta, o pati aplinka – neutrali arba agresyvi.

Mineralinių medžiagų, naudojamų asfaltinių mišinių gamybai, fizinės ir mechaninės savybės turi įtakos kelių dangos konstrukcijų kokybės rodikliams, t. y. patikimumui ir laikiškumui. Nuo fizinių ir mechaninių savybių priklauso mineralinių medžiagų tinkamumas asfaltiniam mišiniui. Nuo mineralinių medžiagų savybių priklauso asfaltinių mišinių gamybos būdai, kelių dangos konstrukcijų sluoksnių storiai ir kiti KDK ypatumai. Parenkant mineralines medžiagas reikia išanalizuoti kelių dangos konstrukcijų funkcionavimo sąlygas (TP apkrovas, vietos sąlygas, klimatą, eksploatacinius reikalavimus KDK) Parenkamos mineralinės medžiagos, geriausiai atitinkančios esamas KDK funkcionavimo sąlygas. Mineralinių medžiagų parinkimas (konkreitiems atvejams) turi būti ekonomiškai pagrįstas. Naudojant didesnio stiprio mineralines medžiagas pailgėja kelių dangos konstrukcijos funkcionavimo trukmė, ji būna patikimesnė, būna plonesni atskiri kelių dangos konstrukcijos sluoksniai ir mažesnės mineralinių medžiagų ir kitų medžiagų sąnaudos (AASHTO, Quide...1993; Petkevičius, Sivilevičius 2000; Skrinskas *et al.* 2011; Al-Quady *et al.* 2002; Butkevičius 2007; Bhasin *et al.* 2009; Bulevičius *et al.* 2011a, 2011b).

Lietuvoje pirmą kartą išmatuotas asfalto dangos konstrukcijų plastinių deformacijų susidarymas ir vystimasis, vertinant natūralias aplinkos sąlygas. Tyrimai buvo atlikti matuojant unikalų, 2007 m įrengtą, 12-kos skirtingų asfaltinės dangos konstrukcijų kelio ruožą eksploatuota 5 metus identiškomis sąlygomis: esant vienodai TP eismo apkrovai, klimatinėms sąlygoms bei dangos konstrukcijų hidroterminiam režimui. Atlikus tyrimą nustatyta, kad kelių eksploatavus 5 metus ir pravažiavus 310000 sunkiojo transporto (ST) srauto ekvivalentių standartinių 100 kN ašių skaičiui konstrukcijos laikomoji geba yra pakankama, o provėžų gylis tiesiogiai priklauso nuo asfalto viršutinio sluoksnio savybių (Čygas *et al.* 2008, 2011; Laurinavicius, *et al.* 2009; Vaitkus *et al.* 2009, 2010; 2012; Žiliūtė *et al.* 2013). Tačiau nebuvo nustatytas kelio dangos eksploatacinių rodiklių: lygumo Y_{IRI} ir pažaidų masto D kitėjimas bei jų saveika su atskirų KDK sluoksnių bei jų medžiagų savybėmis

1.4. Transporto priemonių eismo ir klimato bei vietos sąlygų įtaka kelių tampriosios dangos konstrukcijoms

Automobilių kelių konstrukcijas (KK) sudaro KDK ir žemės sankasa (ŽS), dangos konstrukciją – dangos ir pagrindo sluoksniai. Žemės sankasa – tai dangos konstrukcijos pagrindas. Dangos pagrindas turi priimti ir atlaikyti transporto priemonių eismo ir dangos sluoksnių apkrovą bei ją tolygiai paskirstyti žemės

sankasoje. Jis turėtų būti vientisas ir stabilus. Lietuvoje techniškai tinkama kelių danga ir KDK, atsižvelgiant į paskirtį, transporto priemonių apkrovas, vietos gruntus ir drėkinimo sąlygas, parenkama pagal kelių techninį reglamentą „Automobilių keliai“ (KTR 1.01:2008) ir Dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės (KPT SDK 07).

Kai AB dangą ir visą tampriosios dangos konstrukciją veikiančios daugkartinės apkrovos, perduodamos per TP ratus, atitinka KDK projekcinį stiprį, dangoje ir jos konstrukcijoje pasireiškia tik tampriosios deformacijos. Jeigu keliu važiuoja TP, kurių apkrova viršija projekcinę apkrovą, taip pat, kai žemės sankasos grunto atsparumas labai sumažėja pavasarį ar rudenį, atsiranda neįžymių plastinių deformacijų, o kai šių deformacijų sankaupa didžiausio dangos susilpnėjimo metu viršija tam tikrą leistinąją jų sankaupos ribą, AB dangoje ir KDK atsiranda defektų. Kai TP apkrovos kartoja, šie defektai plečiasi bei didėja ir danga gali pradėti intensyviai irti – dangoje gali atsirasti plyšių, taip pat ištrupų, išdaužų ir kitų pažaidų (Puodžiukas 2000; Yu 2005; Jongvon, Sandhyeok 2006; Petkevičius, Sivilevičius 2008). Automobilių ratų apkrovoms veikiant kelio dangos konstrukciją, KDK įlinksta. Šis įlinkis parodo KDK atsparumą (apibūdina jos tamprą ir stiprį). Kuo didesnis kelio dangos konstrukcijos tampros modulis, tuo tolygiau TP ratų apkrovos (ir dėl jų susidarę įtempiai) pasiskirsto KDK sluoksniuose (Castro, Sanchez 2007; Petkevičius, Sivilevičius 2008).

Pažaidų daugėjimą kelių dangoje lemia kelių dangos tipas, panaudotos medžiagos bei šių medžiagų, esančių kelio dangos konstrukcijoje, kokybė ir savybių (per tam tikrą laiką) kitėjimas, KDK įrengimo technologija, aplinkos veiksniai, transporto priemonių eismo intensyvumas bei sudėtis (STP dalis iš bendro srauto, %), kelių dangos konstrukcijos stiprio (laikui bėgant) mažėjimas, kelių dangos remontas ir KDK sustiprinimas (atliekamas laiku ar pavėluotai). Charakteringos kelių dangos asfaltbetonio (AB) pažaidos dažniausiai būna šlyties ir kitos plastinio pobūdžio liekamosios deformacijos, skersiniai (temperatūros įtakos) ir nuovargio plyšiai, erozija, o vėliau – išdaužos. Didžiąją jų dalį sudaro nuovargio plyšiai (dėl STP dangai poveikio). Kiekvienos skirtingo pobūdžio pažaidos dalis (%) suirusioje dangoje priklauso nuo kelio kategorijos, kelių dangos konstrukcijos stiprio, konstrukcinių sluoksnių storio, STP eismo intensyvumo N_s bei vietovės gruntų, klimato ir drėkinimo sąlygų (Sivilevičius, Petkevičius 2010).

Veiksniai, sukeliantys kelių dangos irtį, yra tarpusavyje susiję, todėl pagal defekto tipą dažniausiai sunku nustatyti, kokia būna konkreti suirties priežastis bei kurie veiksniai turi didžiausią įtaką susidaryti defektui ir didėti jo apimčiai (plotui). Svarbiausi rodikliai, paaiškinantys defektų susidarymo kelių dangoje priežastis: per silpna kelių dangos konstrukcija, pernelyg didelis ardomas TP apkrovų kelių dangai ir jos konstrukcijai poveikis, nepalankios vietovės klimato ir

drėkinimo sąlygos, jautrūs šalčiui žemės sankasos gruntai (Petkevičius, Sivilevičius 2000; Braga 2005; Cygas *et al.* 2007; Guide lines ... 2009).

Darbų (Yu 2005; Jongvon, Sandheyok 2006) analizė parodė, kad, tiesiant automobilių kelius, daugelį metų buvo taip projektuojama KDK, kad tam tikrą (projektinį ar numatytą) laikotarpį, įvertinant STP poveikį kelių dangai ir KDK, būtų užtikrintas reikiamas KDK stipris. Šio tikslo buvo siekiama ne tik įrengiant pakankamo stiprio AB dangą, bet ir daug dėmesio skiriant pagrindo sluoksnių medžiagų stipriui.

Darbų (Puodžiukas 2000; Petkevičius, Podagėlis 2000; ОДН 218.046-01 Yu 2005; Jongvon, Sandheyok 2006) analizė parodė, kad, apibūdinant kelių dangos ir KDK būklę, būtina žinoti jų eksploatacinius rodiklius. Svarbiausi kelių dangos ir jos konstrukcijos rodikliai, nuo kurių priklauso KD ir KDK funkcionavimo trukmė, yra šie:

- kelių dangos ir KDK stipris;
- KDK monolitinių sluoksnių atsparumas tempimui lenkiant ir jų atsparumas šlyčiai;
- KDK nerišliųjų sluoksnių atsparumas šlyčiai;
- dangos lygumas;
- dangos nuodyla;
- automobilių ratų sankiba su kelių danga;
- automobilių kelių dangos apkrovų pobūdis (didžiausiosios apkrovų vertės, apkrovų kartojimosi dažnis) ir kt.

Šių darbų ir darbo De Solminihac *et al.* (2003) rezultatų analizė parodė, kad kelių dangos ir KDK funkcionavimo trukmė gali kitėti nuo transporto priemonių eismo sudėties ir intensyvumo, klimato sąlygų, dangos ir KDK stiprio bei jos sluoksnių storio, dangai įrengti naudojamų medžiagų kokybės ir daugelio kitų veiksnių. Apie racionalų kelių dangos ir KDK funkcionavimo trukmės naudojimą sprendžiama pagal dangos eksploatacinių rodiklių atitiktį transporto priemonių (TP) eismo poreikiams.

Chen *et al.* (2004) teigia, kad po KDK esantis žemės sankasos (ŽS) gruntas nuolat slegiamas virš jo esančių KDK sluoksnių ir TP apkrovų, todėl šio grunto atsparumas apkrovoms lemia kelių dangos stabilumą ir lygumą.

De Solminihac *et al.* (2003) nustatė, kad dėl kelių dangos ir kai kurių kitų KDK sluoksnių medžiagų ir žemės sankasos grunto tūsumo, kelių dangos irtis vyksta lėčiau. Šiuo atveju KDK įlinkis, visiškai atitinkantis pridėtają apkrovą, pasiekiamas ne iš karto, o praėjus keletui minučių.

Daugelis autorių (Petkevičius, Podagėlis 2000; Hu *et al.* 2008a, 2008b; Petkevičius 2008, 2010; Loria *et al.* 2008; Perera, Khon 2012) nurodė, kad STP ardomas poveikis vertinamas taikant asfaltbetonio sluoksnių atsparumo plyšiams kriterijų, nes, važiuojant sunkiosioms transporto priemonėms, kelių

asfaltinėje dangoje labiausiai pasireiškia nuovargio plyšiai. Asfaltbetonio sluoksnių įvairaus pobūdžio pažaidos (nuovargio plyšiai, provėžos, įdubos, pralaužos, skersiniai plyšiai, įstrižieji plyšiai, išaižos, ištrupos, išdaužos ir kt.) susidaro dėl daugkartinio išorės jėgų ir (arba) aplinkos temperatūros, saulės spinduliuotės, taip pat vandens, sniego, ledo poveikio, todėl, įvertinant kelių dangos suirties mastą, nustatomi kelių tiesybos medžiagų ir (arba) gruntų funkcionavimo dangoje, kai veikia kartotinės apkrovos, dėsniumai.

Apkraunami (patiriantys apkrovas) AB dangos sluoksniai skersine kryptimi tempiami labiau nei išilgine, todėl, esant daugkartiniam dažnam automobilių ratų poveikiui, pirmieji išilginiai plyšiai susidaro automobilių ratų labiausiai tikėtino sąlyčio su kelių danga juostoje. Automobilių kelių AB dangos atsparumas plyšiams apibūdinamas jos AB sluoksnių atsparumu tempimui lenkiant.

Spręsti apie automobilių ratų apkrovų poveikį kelių dangai ir KDK (jų naudojimo laikotarpiu) galima tik tada, kai žinomas ciklinių apkrovų, kurias dangos asfaltbetonio bandinys atlaiko iki suirties, skaičius N ir šio skaičiaus sietis su bandinyje susidarančių įtempių amplitude σ arba su santykinę bandinio deformacija ε (ОДН 218.046-01, Li, Metcalf 2002; Li, Metcalf 2004, Pellinan *et al.* 2004).

Tyrimai (Puodžiukas 2000; Yu 2005) parodė, kad kelių dangos lygumas labai priklauso nuo KDK pagrindo tipo, jo storio ir būklės. Jeigu AB dangos sluoksnių sankiba būna nepakankama, dangos funkcionavimo trukmė sumažėja 30 % (Petkevičius, Sivilevičius 2000).

Centrinėje ir pietinėje Vakarų Europos dalyje charakteringos šios AB dangos pažaidos: vėžės, bangos, slinktytės ir bitumo dėmės (nuo sunkiųjų transporto priemonių apkrovų gali susidaryti 1,5–3,0 cm gylio vėžės) (Hongbing *et al.* 2004; Tarelder *et al.* 2005).

JAV automobilių keliuose dominuoja AB dangos temperatūros įtakos ir nuovargio plyšiai, tik pietinėse valstijose vyrauja plastinio pobūdžio pažaidos (Tarelder *et al.* 2005).

Rusijoje atlikti tyrimai parodė, kad jos 2-oje ir 3-ioje kelių ir klimato zonose automobilių kelių dangos AB sluoksniai dažniausia (75–80 % atvejų) suyra atsiradus plyšiams (Sivilevičius, Petkevičius 2002).

De Solminihac *et al.* (2003), Jongvon, Sandhyeok (2006), parodė, kad automobilių kelių dangos būklę ir funkcionavimo trukmę apibūdinantys svarbiausi rodikliai yra asfaltbetonio atsparumas tempimui lenkiant $R_t^{(a)}$, kelių dangos konstrukcijos sluoksnių tampros moduliai E ir asfaltbetonio atsparumas nuovargiui $N^{(a)}$ (Petkevičius 2000; Petkevičius, Podagėlis 2000).

Darbų (Hudson, Flanagan 1987; Arand 1991; Puodžiukas 2000; Zhang *et al.* 2000; Sivilevičius, Petkevičius 2002; Petkevičius *et al.* 2010) analizė parodė,

kad veikiančių kelių dangą veiksnių įtaka yra sudėtinga, nes vieni veiksniai turi įtakos kitiems veiksniams. STP ratų dinaminė apkrova išauga pablogėjus dangos lygumui ir padidėjus jų važiavimo greičiui, įtempiai kelių dangoje dažniausia padidėja, padidinus dangos šiurkštumą ir kt.

Puodžiukas (2000), Zhang *et al.* (2000), Barnes, Trottier (2010) Bausano *et al.* (2004) teigia, kad, kuo lygesnė kelių danga, tuo greičiau STP gali važiuoti, mažiau dyla jų ratų padangos ir mažiau suvartojama degalų, padidėja STP tarpremontinis laikotarpis, padidėja jų darbo našumas, būna mažesnės transporto išlaidos, saugesnis ir patogesnis eismas. Didėjant automobilių ratų apkrovai, kelių dangos funkcionavimo trukmė mažėja. Ji mažėja labiau (didesniu greičiu) nei didėja apkrova.

Tyrimais (Zhang *et al.* 2000; Romero *et al.* 2006) nustatyta, kad žemės sankasos grunte aktyvūs šlyties įtempiai τ_i beveik tiesiškai priklauso nuo kelių dangos apkrovų, o nuo oro slėgio automobilių ratų padangose priklauso labai mažai.

Tyrimų (Hall, Turner 1998; Salama *et al.* 2006) rezultatai rodo, kad STP ratų padangose slėgį padidinus du kartus, kelių dangos santykinis įlinkis padidėja 5,4 %.

Pagal Al-Quadi *et al.* (2002), Richter, Schwartz (2003) duomenis, kai asfaltbetonio sluoksnių storis $h = 22$ cm ir STP ratų padangose oro slėgis padidinamas nuo $p_0 = 0,6$ MPa iki $p_0 = 0,7$ MPa (kai rato apkrova pastovi), KDK funkcionavimo iki kapitalinio remonto trukmė sumažėja 15 %, o jų ratų padangose padidinus oro slėgį nuo $p_0 = 0,7$ MPa iki $p_0 = 0,9$ MPa, jos funkcionavimo trukmė sumažėja 1,5 karto.

Kelių dangos būklė ir funkcionavimo trukmė priklauso nuo KDK stiprio. KDK būklei ir funkcionavimo trukmei didelę įtaką turi ne tik važiuojančių transporto priemonių poveikis, bet ir aplinkos veiksniai: klimato, hidrologiniai ir hidrogeologiniai. Didžiausią įtaką žemės sankasos hidroterminiam režimui turi klimatas, lemiantis kritulių kiekį ir oro temperatūrą (Šiaudinis, Cygas 2007).

Didžiausią įtaką kelių dangai turi teigiamų ir neigiamų temperatūrų kaita. Lietuvoje tokių kaitų per metus pasitaiko nuo 50 iki 80 (Juknevičiūtė, Laurinavičius 2008). Lietuvos teritorija yra plačiai besivystančių kriogeninių procesų zonoje – šie procesai susiję su sezoniniais ir ilgamečiais gruntų įšalimais ir atitirpimais, taip pat su požeminių ir paviršiaus vandenų užšalimu (RSN 256-94).

KDK naudojimo laikotarpis (funkcionavimo trukmė) skirtingomis klimato sąlygomis (kai kitos sąlygos yra identiškos), gali skirtis iki trijų kartų (Ekdahl 1999).

Temperatūra daro didelę įtaką dangos būklei ir savybėms: veikia dangos asfaltbetonio savybes (didina arba mažina jo plastiškumą, trapumą ir kt.); veikia

dangos asfaltbetonio įtempius, atsirandančius dėl temperatūros ir jos kitimo laike.

Sezoniniai pokyčiai lemia kritulių kiekio svyravimus ir veikia dangos konstrukcijos drėkinimo sąlygas. Laikoma, kad Lietuvoje kritiškiausias yra pavasario laikotarpis, kai iš žemės sankasos ir kelio konstrukcijos išeina įšalas (apie kovo mėnesį), ir KDK sluoksniai yra daugiausia prisotinti vandens. Vanduo dangos konstrukcijoje, ypač sluoksniuose iš biriųjų medžiagų, veikia jų standumą – tampros modulį, taip pat ir atsparumą apkrovoms (Braga 2005; Butkevičius 2007).

Lietuvos klimatui būdingas perėjimas iš jūrinio vakaruose į žemyninį rytuose. Klimato skirtumus lemia kontinentiniai ir okeaniniai (Atlanto vandenyno) įtakos veiksniai. Vidutinė metinė oro temperatūra Lietuvos teritorijoje $+6^{\circ}\text{C}$. Vidutinė mėnesio temperatūra įvairėja nuo -6°C iki $+18^{\circ}\text{C}$. Vidutinė mėnesių temperatūrų metinė amplitudė, tolstant nuo Baltijos jūros, Lietuvoje didėja nuo 18°C iki 24°C . Kritulių pasiskirstymui atskirais mėnesiais turi įtakos atstumas nuo jūros ir drėgmę nešantys vėjai. Vasarą daugiau kritulių iškrinta Lietuvos rytuose, o žiemą – vakaruose. Vidutinis kritulių kiekis Lietuvoje – 620 mm (RSN 256-94).

Gruntų vidutinis įšalo gylis Lietuvoje – 80–120 cm, o pietinėje Lietuvos dalyje – daugiau kaip 120 cm (Juknevičiūtė, Laurinavičius 2008). Žemiausia temperatūra Lietuvoje įvairėja nuo -22°C iki -35°C , o aukščiausia – nuo $+25^{\circ}\text{C}$ iki $+32^{\circ}\text{C}$. Vasarą, esant aukščiausiai oro temperatūrai iki $+30^{\circ}\text{C}$, asfaltinė danga įšyla iki $+45^{\circ}\text{C}$, o kai oro temperatūra būna didesnė nei $+30^{\circ}\text{C}$, danga gali įšilti iki $+50^{\circ}\text{C}$ ir daugiau.

Taigi pagal HDM taikomą suskirstymą, Lietuvą galima priskirti vidutinio arba vidutinio – šalto pusiau sauso klimato juostai (Braga 2005).

KDK veikiantys veiksniai egzistuoja laike (jų poveikis pasireiškia AB dangos ir KDK būklės vizualiai pastebimu blogėjimu tik praėjus nemažam, dažniausia ne mažesiam kaip vieneri metai, laikotarpiui). Eksploatuojant AB dangą ir KDK, keičiasi asfaltbetonio savybės ir mažėja jo geba priešintis transporto priemonių apkrovų, klimato veiksnių bei žiemos sąlygomis naudojamų cheminių reagentų poveikiui.

Taip pat, siekiant optimizuoti kelio statybos kainą ir pasiekti galimą geriausią rezultatą, panaudojus šalyje turimus gamtinius išteklius, įvertinant specifines aplinkos, klimato sąlygas, naudojamų medžiagų savybes ir transporto priemonių eismo intensyvumą, šiuo metu pasaulyje plačiai taikomas mechaninis daugiakriterinis KDK skaičiavimo modelis – MEPDG, tačiau įvertinti visus KDK irtį įtakančius veiksnius ir atlikti tikslią jų prognozę dar niekam nėra pavykę (Ioannides, Tallapragada 2013; Tarefder, Rodriguez-Ruiz 2013; Thodesen *et al.* 2012; Žilionienė *et al.* 2013; Wu *et al.* 2013).

Pastaraisiais metais užsienio šalių mokslininkai (Noureldin 1997; Kim *et al.* 2003, 2004, 2009 Yavuzturk *et al.* 2005; Lackner *et al.* 2005; Gui *et al.* 2007; Seo *et al.* 2007; Bhasin *et al.* 2009) kūrė asfaltbetonio struktūros ir savybių pagerinimo naujus metodus, taikydami naujausius mokslo pasiekimus ir naudodami modernią tyrimų įrangą, tačiau šie mokslo darbai skirti AB savybėms pagerinti laboratorijų sąlygomis. Šių savybių (su turima technologine įranga) pasiekti, realiai gaminant asfaltinius mišinius ir įrengiant AB dangą, neįmanoma. Kai kuriuose darbuose (Lundstrom *et al.* 2004; Kim *et al.* 2005; Pellinen *et al.* 2004; Choi, Bahia 2004; Tighe *et al.* 2007; Lee *et al.* 2007; Ahammed, Tighe 2008; Li *et al.* 2008) taip pat nagrinėjamos AB dangos ir KDK funkcionavimo sąlygos ir šių sąlygų įtaka AB dangos ir KDK funkcionavimo trukmei. Visi šie darbai yra reikšmingi mokslo vystymo požiūriu, tačiau didžiojoje jų dalyje pasigendama rekomendacijų, kad gauti svarbiausieji rezultatai būtų panaudoti praktikoje. Laboratorinėmis sąlygomis ištirtos AB savybės parodo šios medžiagos galimybes priešintis transporto priemonių ir aplinkos veiksnių poveikiui. Faktinės AB dangos ir KDK funkcionavimo sąlygos gerokai skiriasi nuo laboratorijoje sukurtų sąlygų, todėl asfaltbetonį reikia tirti įrengtoje dangoje. Geriausia jį tirti eksperimentiniuose ruožuose, pavyzdžiui, tokiuose, kaip įrengtas Lietuvoje (Čygas *et al.* 2008).

Asfaltbetonis – tai medžiaga su grįžtamaisiais mikrostruktūros, atspindinčios kiekybinį bitumo santykį, išdėstymą ir tarpusavio poveikį dispersiškiausiam (smulčiausiam) ir aktyviausiam asfaltbetonio komponentui – mineraliniams milteliams, pokyčiais, galinti būti šių struktūros būvių: tampriai trauptas, tampriai plastinio ir klampiai plastinio (Рыбьев 2008).

Atliktų darbų analizė parodė, kad AB danga ir KDK funkcionuoja labai sudėtingomis, nuolat kintančiomis aplinkos sąlygomis ir veikiant dažnai pasikartojančioms transporto priemonių apkrovoms. Šių apkrovų pobūdis (poveikio trukmė, dydis, pasikartojimo dažnis) nuolat kinta.

Kai kurios kelių dangos pažaidos atsiranda ir vystosi dėl sluoksnių medžiagų ir nepakankamos kelių tiesybos darbų kokybės. Nepakankama šių darbų kokybė pasireiškia mažesniu KDK vienodumu ir didesne jos savybių sklaida. Lietuvoje, priklausomai nuo kelio reikšmės, taikomi skirtingi reikalavimai KDK kokybei (KDK sluoksnių medžiagų sutankinimo rodikliui, sluoksnių storių sklaidai, bitumo ir mineralinių medžiagų komponentų santykinės dalies asfaltbetonyje nuokrypiais (%) nuo AB projektinės sudėties, dangos lygumui (ją įrengus) ir kt. (KTR 1.01:2008; TRA ASFALTAS 08)), kurie lemia magistralinių, krašto ir rajoninių kelių skirtingas eksploatacines savybes jau iš karto, įrengus asfaltbetoninę dangą, taip pat lemia skirtingą šių savybių kitėjimą, eksploatuojant AB dangą ir KDK.

Amerikos (JAV) kelių ir transporto pareigūnų asociacijos AASHTO atliktų tyrimų rezultatai parodė, kad 15 % „geriausios“ kelių dangos ruožų gali

funkcionuoti 6–10 kartų ilgiau nei 15 % „blogiausios“ dangos ruožų, esančių pagal tą patį projektą nutiestame tame pačiame kelyje. Imant kelių dangos funkcionavimo vidutinį laikotarpį $T = 10$ metų, „blogiausi“ jos ruožai funkcionuotų apie 3–4 metus, o „geriausi“ – apie 25–30 metų. Taigi netgi tokia pati KDK, tie patys standartai, technologijos, transporto priemonių eismas ir aplinkos sąlygos negali užtikrinti identiškos kelių dangos irties (Ekdahl 2000).

Kelių dangos irtis – natūralus procesas, priklausantis nuo įvairių veiksnių, kurių dauguma – atsitiktiniai veiksniai, todėl jie negali būti tiksliai išmatuoti ir įvertinti. Visus kelių dangos irčiai įtakos turinčius veiksnius iširti ir sumodeliuoti iki šiol dar niekam nėra pavykę (Ekdahl 1999).

1.5. Kelių tampriosios dangos konstrukcijų defektai ir jų susidarymo priežastys

Dažniausiai pasitaikančios dangos pažaidos ir suirtis: nuodyla – pagrindinis dangos suirties tipas; išaižos – pažaidos, susidarantys mineraliniams dangos paviršiaus grūdeliams atsilupus nuo monolitinės asfaltbetoninės dangos: medžiagos paviršiaus (plonos plėvelės, plokštelės ir smulkūs grūduliai atsiskiria dėl vandens, šalčio ir automobilių ratų poveikio, susidarant iki 5 mm gylio mikronelygumams); ištrupos – po išaižų einanti dangos suirties pažaidų fazė (nuo dangos atsiskiria stambesni mineraliniai grūduliai ir susidaro nuo kelių iki 20 mm gylio nedidelio ploto ištrupos); kraštų įlūžiai – dangos suirtis jos sąlyčio su kelkraščiu vietose; išdaužos (duobės) – nuo 20 iki 100 mm, o kartais – ir didesnio gylio vietinė suirtis, susidaranti dėl mineralinių medžiagų grūdelių ir bitumo ar nepakankamos kitų organinių rišiklių sankibos, dėl nepakankamo dangos tankio ir kitų priežasčių; vėžės – šlyties liekamosios deformacijos, atsirandantys dėl daugiaašių STP poveikio asfaltinei dangai; bangos – liekamosios deformacijos, susidarantys didelio plastiškumo dangoje; slinktyės – dangos liekamosios deformacijos, susidarantys dėl važiuojančių automobilių ratų tangentinių jėgų, atsirandančių stabdant automobilius, poveikio; įspaudos – plastiški dangos pagilėjimai, atsirandantys šiltuoju laikotarpiu, dažniausiai vasarą; plyšiai – kelių AB dangos pagrindinis suirties tipas (Sivilevičius, Petkevičius 2002).

AB dangos ir KDK irtį ir pažaidų joje atsiradimą lemiantys veiksniai yra šie: nenumatytos labai didelės masės STP važiavimas keliu, pernelyg didelis STP eismo intensyvumas, automobilių apkrovų ir eismo intensyvumo augimo nepakankamas įvertinimas projektuojant, nepakankamas aplinkos veiksnių įvertinimas, neteisingas KDK apskaičiavimas, prastos kokybės kelių tiesybos medžiagų dangos konstrukcijoje naudojimas ir kt. (Butkevičius 2007).

Pagrindiniai kelių AB dangos ir KDK suirties ir pažaidų tipai yra šie: išilginiai nuovargio plyšiai arba plyšių tinklas, atsirandantys dangai ir jos konstrukcijai prarandant stipri; nestandžios dangos konstrukcijos nuosėdžiai. Kelių dangos ir KDK pažaidų gausėjimas labiausiai priklauso nuo medžiagų, iš kurių jos įrengtos, stiprio (Sivilevičius, Petkevičius 2002; Petkevičius 2008).

Pirmieji plyšiai dangoje ir jos ištrupos (paviršiaus erozija) bei išdaužos dažniausiai atsiranda po kelerių metų, ją paklojus. Vėliau šių dangos pažaidų formavimasis suintensyvėja: plyšiai plėtėja ir gilėja, erozijos pažeistų dangos vietų plotas ir išdaužų tūris didėja, todėl laiku nepašalintos pažaidos pasiekia kritines vertes, ir kelias tampa sunkiai pravažiuojamas bei neatlieka savo tiesioginės paskirties. Automobilių kelių AB dangos suirties mastą, išreikštą %, siūloma įvertinti rodikliu D_D (Sivilevičius, Petkevičius 2002):

$$D_D = (S_d + S_{pl} + S_p + S_{pd} + S_{nd} + \sum_{i=1}^n l_i b_i) \cdot 100 / S_{AB}, \quad (1.3)$$

čia S_d – tiriamajame ruože pažeistos išaižomis, ištrupomis, kraštų (briaunų) ištrupomis, išdaužomis, įgriuvomis ir užtaisytos lopais dangos plotas, m^2 ; S_{pl} – dangos, pažeistos plyšių tinklu, plotas, m^2 ; S_p – dangos, pažeistos liekamosiomis platinėmis deformacijomis: vėžėmis, bangomis, slinktimis, įdubomis, plotas, m^2 ; S_{pd} – dangos, pažeistos paviršiaus defektais: bitumo dėmėmis, ištirpusio bitumo vietomis, plotas, m^2 ; S_{nd} – dangos, pažeistos paviršiaus nuodyla ir sumažėjusio šiurkštumo vietomis, plotas, m^2 ; l_i – atskiro i -tojo plyšio ilgis, m; b_i – dangos juostos, praradusios stiprį, plotis iš abiejų i -tojo plyšio pusių, priklausančių nuo plyšio pločio, m; S_{AB} – tiriamo kelio ruožo visos AB dangos plotas, m^2 .

Eksplotacinės tik ką nutiesto kelio savybės būna geriausios, o važiuojant keliu jo geometriniai parametrai kinta nedaug. Kelio AB danga, tiesiogiai veikiamą automobilių ratų bei klimato veiksnių, nuolat keičia savo savybes. Dėl to mažėja dangos ir KDK stipris. Veikiant automobilių ratų kartotinėms vertikaliosioms ir horizontaliosioms apkrovoms, AB dangoje susidaro nuovargio plyšių. Susidarę plyšiai, vėžės ir kiti defektai intensyviai vystosi, dėl to blogėja dangos lygumas, o automobilių ratų apkrovos tampa dinaminės, sukeliančios didelius smūgius ir intensyvinančios dangos silpniausių ruožų irtį. Visi šie defektai yra sezoninio pobūdžio: kiekvieną pavasarį, polaidžio metu, smarkiai sumažėja KDK stipris, praplatėja temperatūros (skersiniai) ir kiti plyšiai, labiau aižėja AB dangos paviršius (Zhang *et al.* 2000; Sivilevičius 2003).

Kadangi medžiagų savybės ir asfaltinio mišinio gamybos, klojimo ir tankinimo technologinių operacijų parametrai nepaliaujamai kinta ir yra atsitiktinio pobūdžio, paklota AB danga savo savybėmis nebūna visur vienoda.

AB mineralinės dalies granulimetrinė sudėtis, jo tuštymėtumo ir sutankinimo (dangoje) rodiklis bei kiti fiziniai rodikliai, bitumo kiekis ir asfaltinio mišinio gamybai naudojamų medžiagų savybės, AB dangos sluoksnių storis dangos plote kinta gana plačiai, todėl dangos mechaninės savybės taip pat būna nevienodos. Vienuose elementariuose dangos plotuose asfaltbetonis būna gerokai silpnesnis nei greta esančiuose kituose, kuriuose jo faktinis stipris labai viršija reikiamą jo stiprį. Dėl skirtingo AB dangos vienodumo asfaltbetonis visame dangos plote iškart nesuyra. Kuo mažesnis dangos vienodumas, tuo anksčiau atskiri jos plotai gali pradėti irti ir tuo anksčiau gali prireikti ją remontuoti. Nevienodi yra ir klimato veiksniai bei jų poveikis dangai (Petkevičius, Sivilevičius 2000; Sivilevičius 2003).

Mechaniškai apkrovus kelių dangos asfaltbetonį, atsiskleidžia jam būdingos šios sudėtingos savybės: tamprumas, plastiškumas, slankumas, įtempių relaksacija, kintant deformavimo greičiui, stipris, deformacijų kaupimasis, esant daugkartiniai labai dažnai apkrovai ir kt. Asfaltbetoninėje dangoje, veikiamoje susisiekimo priemonių apkrovoms, atsiranda įtempių. Danga suplyšta, kai tempimo įtempiai pasiekia ir viršija dangos stiprį tempiant. Kelių dangos įtempiai būna tokie (ОДН 218.046-01; Petkevičius, Sivilevičius 2002):

- temperatūros pobūdžio tempimo įtempiai σ_t , atsirandantys dėl to, kad atšalant susitraukianti danga negali laisvai pasislinkti;
- įtempiai σ_p , atsirandantys dangoje dėl netolygiai pakilusio po danga esančio žemės sankasos peršalusio grunto neigiamoje aplinkos ir grunto temperatūroje;
- tempimo ir šlyties įtempiai σ_{sl} , atsirandantys lėtėjant ar greitėjant automobiliams;
- periodiniai tempimo įtempiai σ_l , atsirandantys automobilių ratams vertikaliai slegiant dangą.

Senstančios dangos elastingumas mažėja, o tempimo įtempiai nuolat didėja, plyšių kiekis ir plotis taip pat didėja.

Kelių AB dangos būklė gali būti įvertinta dviem būdais:

- naudojant tam tikrus apibendrinamuosius būklės rodiklius: Lietuvoje ir kai kuriose kitose pasaulio šalyse naudojamas asfaltbetoninės dangos būklės apibendrinamasis rodiklis – jos suirties mastas D_D (angl. *pavement distress index*) (Sivilevičius, Petkevičius 2002; Paterson, Bennet 2001; Haas *et al.* 2006), JAV, Kanadoje, Australijoje ir kitur naudojami šie rodikliai: dangos kokybės indeksas PSI (angl. *pavement serviceability index* (AASHTO Quide... 1993), važiavimo kokybės indeksas RCI (angl. *ride comfort index*), defektų indeksas DMI (angl. *distress manifestation index*) (Kazmierowski, Ninguan 2002) ir kiti;

- vertinant keletą kriterijų – kelių dangos eksploatacinių savybių, atskirai; dangos eksploatacinės savybės apibūdinamos dangos pažeidų skaičiumi ir jų išsivystymo laipsniu, taip pat dangos lygumu ir automobilių ratų sankiba su danga; šis AB dangos būklės vertinimo būdas taikomas HDM dangų irties modeliuose, jis reglamentuotas ir Lietuvoje (Automobilių kelių... 2004).

Kai dangos būklė vertinama antruoju būdu, visą dangos irties modelį sudaro keletas mažesnių modelių. Juos taikant prognozuojamos įvairios dangos pažeidos ir jų plėtra bei poveikis kitoms dangos pažeidoms ir jų eksploatacinėms savybėms.

Vakarų Europos šalyse, JAV ir kitose poindustrinėse valstybėse kelių dangos būklei valdyti sukurtos specialios sistemos. Žinomiausios yra HDM (Pasaulio bankas), *Belman* (Danija), *Quantum* (JAV) ir kt. (Puodžiukas 2000; Li *et al.* 2005; Schmuck, Hekenberger 1993). Šios sistemos sukurtos panaudojus automobilių kelių dangos būklės ilgalaikių tyrimų duomenis. Daugelyje Vakarų Europos šalių kelių dangos būklei valdyti naudojamas HDM-IV modelis.

Dauguma pažeidų daro poveikį kelių dangos lygumo blogėjimui. HDM modeliuose dangos lygumas – tai jos savybė, kuri nusako kiekvieno kelio poveikį automobiliams. Lietuvoje taikomoje sistemoje DAVASEMA (kaip ir HDM sistemoje) dangos lygumas vertinamas tarptautiniu lygumo rodikliu *IRI* (angl. *International Roughness Index*). W. Patersonas pateikia tokį *IRI* apibrėžimą (Paterson 1987): tai suma automobilio vibracijų, kurias sukelia kelio išilginio profilio nelygumai vėžėse (provėžose) – standartinio automobilio, važiuojančio 80 km/h greičiu, pakabos vertikaliųjų poslinkių sumos ir nuvažiuoto kelio santykis.

Automobilių kelių tyrimo mobiliojoje laboratorijoje RST-28, skirtoje geometriniais kelių parametrams ir dangos defektams matuoti, sumontuota sudėtinga įranga leidžia saugiai atlikti matavimus, laboratorijai važiuojant transporto priemonių sraute 20–90 km/h greičiu. Įdiegtos naujos technologijos užtikrina didelį matavimo duomenų tikslumą ir nustatytus dangos parametrus bei defektus leidžia pateikti LKS 94 koordinačių sistemoje (Dimaitis 2008). Nustatomos šios dangos charakteristikos:

- dangos lygumas išilgine kryptimi Y_{IRI} , m/km;
- dangos šiurkštumas (vidutinis makroprofilio gylis), mm;
- vėžių gylis (mm) matavimai atliekami kas 10 cm, o apskaičiuojami kiekvieno 20 m ilgio kelio ruožo kiekvienos vėžės vidutiniai gyliai;
- dangos plyšiai ir kiti defektai nustatomi vaizdo kameromis ir siunčiami į kompiuterį, o duomenys apdorojami pagal specialią programą, t. y. filtruojami, uždedant ant tinklelio, kurio langelių matmenys 0,5×0,5 m (jie gali būti ir mažesni); matavimai atliekami per visą važiavimo juostos

plotą, o defektai pateikiami grafiniuose lapuose ir elektroninėse lentelėse. Pagal šiuos duomenis nustatomas defektais pažeistos (suirusios) dangos plotas, %.

- Panaudojus laboratoriją RST-28, 2007 m. buvo ištirti (Dimaitis 2008) visi magistraliniai keliai, kurių ilgis – 1750,5 km ir apie 3000 km krašto kelių. Tyrimai parodė, kad magistralinių kelių tinkle yra labai daug blogos (nelygios) dangos ruožų, kurios *SDSL* siekia 30 % ir daugiau. Šiuose ruožuose AB dangą reikėtų suremontuoti kapitališkai (ją sustiprinti, įrengiant naują AB dangos sluoksnį). Šių ruožų remonto kaina tris kartus viršijo 2008 metams numatytas dangos remontams lėšas (Dimaitis 2008).

Siekiant sumažinti automobilių kelių ruožų dalį, išreiškiamą %, su labai suirusia ir nelygia AB danga, pravartu ieškoti efektyvių būdų ir priemonių (nedidinant išlaidų remontams) dangos lygumui pagerinti. Viena galimų priemonių – AB dangos ir dangos asfaltbetonio kokybės charakteristikų reikiamų verčių nustatymas:

- AB dangos sluoksnių reikiamo storio h ir sutankinimo laipsnio (pagal sutankinimo koeficientą k_s);
- AB dangos leidžiamojo suirties masto D_D ir leidžiamojo lygumo (iki remonto) pagal tarptautinį indeksą $IRI Y_{IRI}$;
- AB dangos leistinojo vėžetumo H_V ;
- įrengiamos dangos asfaltbetonio fizinių ir mechaninių rodiklių pagal Maršalą verčių, užtikrinančių kuo ilgesnį dangos tarpremontinį laikotarpį (funkcionavimo trukmę).

Siekiant pagerinti AB dangos ir KDK būklę, su analogiškomis problemomis susiduriama tiek poindustrinėse Europos ir kitų žemynų šalyse (JAV, Kanadoje, Japonijoje, Vokietijoje, Prancūzijoje, Šveicarijoje, Danijoje, Austrijoje, Italijoje, Belgijoje, Olandijoje, Australijoje ir kt.), tiek mažiau išsivysčiusiose Vidurio ir Rytų Europos bei kitų žemynų šalyse (Lenkijoje, Čekijoje, Vengrijoje, Rusijoje, Baltarusijoje, Ukrainoje, Kinijoje, Indijoje, Brazilijoje, Pietų Afrikos Respublikoje (PAR)) (Braga 2005; Butkevičius 2007). Šios šalys yra sukūrusios jų sąlygoms (klimatui, automobilių kelių tinklui ir kelių AB dangos būklei) tinkamas AB dangos ir KDK būklės vertinimo metodikas.

Lietuvoje turint laboratoriją RST-28, kelių dangos ir KDK būklės prognozė pagal mūsų šalies sąlygoms priderintą HDM-IV metodiką (Braga 2005) ateiityje, matyt, bus taikoma labiau apribotai.

Rusijoje (Коганзон, Лугов 2004; Бахрах 2008; Апестин 2007), Ukrainoje (Радовский, Сердюк 1997), Baltarusijoje (Яромко 2008), Lietuvoje (Butkevičius 2007) ir kitose šalyse atliktuose tyrimuose siūloma įvertinti KDK stiprio likutinį resursą ir ekonominius rodiklius. Visi šie siūlymai, išskyrus

Jaromko darbą (Яромко 2008), yra sudėtingi ir sunkiai pritaikomi praktikoje, nes reikia turėti daug tyrimų rezultatų ir atlikti sudėtingus rodiklių skaičiavimus.

Atliktų darbų analizė parodė, kad iki šiol dar niekas nepasiūlė universalios ir patogios rodiklio kelių ar kelių dangos būklei vertinti. Patogiausias rodiklis kelių dangos būklei vertinti – VGTU Kelių katedros pasiūlytas kelių dangos suirties mastas D_D (Sivilevičius, Petkevičius 2002).

1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir darbo uždavinių formulavimas

1. Lietuvos automobilių kelių asfaltbetoninės dangos priežiūros ir taisymo didžiausios problemos susijusios su daugiaašių sunkiųjų transporto priemonių daugėjimu. Lietuvos keliai pagal dangos lygumą, kelių dangos konstrukcijų stiprį ir kitus rodiklius nėra pritaikyti didelių gabaritų sunkiosioms transporto priemonėms. Bendrajame transporto priemonių sraute daugėjant sunkiųjų transporto priemonių, didėja svarbiausių automobilių kelių asfaltinės dangos ir kelių dangos konstrukcijos ardymo poveikis bei dangos irties intensyvumas.

3. Kelių dangos irtis – natūralus procesas, priklausantis nuo daugelio veiksnių, kurių dauguma atsitiktiniai veiksniai, todėl jie negali būti labai tiksliai išmatuoti ir įvertinti. Visus kelių dangos irčiai turinčius įtakos veiksnius iširti ir sumodeliuoti niekam nėra pavykę.

4. Daugelio autorių atlikti tyrimai parodė, kad kelių dangos būklė turi būti tikrinama nuolat (pavasarij ir rudeni), kad būtų galima objektyviau ir tiksliau nustatyti kelių asfaltinės dangos ir keli dangos konstrukcijos remonto darbų kasmetines apimtis. Dėl kintančių eismo sąlygų Lietuvos automobilių kelių dangos ir jos konstrukcijos eksploatacinių rodiklių blogėjimo intensyvumas laikui bėgant taip pat turi kitimo pobūdį.

5. Automobilių kelių asfaltinės dangos eksploataciniai rodikliai priklauso nuo jai įrengti naudojamų medžiagų kokybės. Iki šiol pasaulyje nesukurta universali asfaltinės dangos bei kelių dangos konstrukcijų skaičiavimo metodika, įvertinanti jos sluoksnių medžiagų kokybės rodiklius ir nesukurta asfaltinės dangos eksploatacinių rodiklių prognozės metodika, kurią taikant būtų galima tiksliai numatyti jos būklę ateityje.

6. Kitų šalių mokslininkų atliktuose tyrimuose įrodyta, kad, prognozuojant asfaltinės dangos ir kelių dangos konstrukcijos būklę, svarbiausiais eksploataciniais rodikliais turi būti pripažįstami šie: kelių dangos lygumas, vėžtumas ir suirties mastas, todėl tikslinga juos naudoti prognozuojant asfaltinės dangos ir kelių dangos konstrukcijos realią funkcionavimo trukmę.

7. Daug tyrėjų teigia, kad kelių asfaltinės dangos lygumas labai priklauso nuo kelių dangos konstrukcinių sluoksnių storio, dangos asfaltbetonio

komponentinės sudėties ir fizinių bei mechaninių rodiklių. Visgi šį teiginį patvirtinančių tyrimų iki šiol atlikta nedaug. Darbo tikslas – parengti magistralinių automobilių kelių asfaltbetoninės dangos eksploatacinių rodiklių prognozės matematinius modelius, atsižvelgiant į tampriosios dangos konstrukcijų savybes ir transport priemonių eismo intensyvumą. Parengti modeliai, juos naudojant, leistų numatyti kelių asfaltbetoninės dangos lygumo ir vėžtumo rodiklių laukiamas vertes, praėjus penkeriems jos naudojimo metams. Ši penkerių metų dangos funkcionavimo trukmė atitinka garantinį dangos eksploataavimo laikotarpį, todėl parengtus modelius tikslinga naudoti patenkant racionalias magistralinių kelių tampriosios dangos konstrukcijas.

Darbo tikslui pasiekti reikia išspręsti šiuos uždavinius:

- išanalizuoti automobilių kelių asfaltbetoninės dangos eksploatacinius rodiklius lemiančius svarbiausius veiksnius ir šių rodiklių blogėjimo priežastis;
- atlikti magistralinių kelių dangos konstrukcijų sluoksniams naudojamų medžiagų ir mišinių kokybės rodiklių tyrimus;
- nustatyti dangos asfaltbetonio komponentinės sudėties, fizinių bei mechaninių rodiklių ir asfaltiniams mišiniams naudojamų medžiagų kokybės rodiklių sietį;
- ištirti asfaltbetoninės dangos lygumo ir provėžų gylio kitėjimo dėsningumus;
- nustatyti dangos asfaltbetonio, kitų kelių dangos konstrukcinių sluoksnių medžiagų kokybės rodiklių ir asfaltbetoninės dangos lygumo bei provėžų gylio sietį;
- parinkti dvi racionalias magistralinių kelių tampriosios dangos konstrukcijas (skirtingam transporto priemonių eismui), įvertinus jos sluoksniams naudojamų medžiagų kokybės rodiklius.

Automobilių kelių tampriosios dangos konstrukcijų projektavimo svarbiausieji principai

Skyriuje apibūdintos asfaltbetoninės dangos ir jos konstrukcinių sluoksnių funkcionavimo sąlygos ir jų savybes veikiantys veiksniai. Pateikti kelio dangos funkcionavimo ir jos eksploatacinių rodiklių kitėjimo grafiniai modeliai. Nurodytas tampriosios kelių dangos racionalių konstrukcijų parinkimo metodas.

Skyriaus tematika paskelbti keturi autoriaus straipsniai (Bulevičius *et al.* 2010a; Bulevičius *et al.* 2011a, 2011b; Bulevičius *et al.* 2013).

2.1. Asfaltbetoninės dangos ir kitų konstrukcinių sluoksnių funkcionavimo sąlygos

AB danga ir KDK funkcionuoja konkrečiomis (vietinėmis) sąlygomis, kurios priklauso nuo šių veiksnių: dangos bei KDK sluoksnių medžiagų ir žemės sankasos (ŽS) gruntų savybių, šių sluoksnių storio ir jų sutankinimo lygio, klimato veiksnių, transporto priemonių apkrovų bei nuo vietos sąlygų (gruntinio vandens lygio (GVL), vietovės drėkinimo sąlygų), AB dangos ir KDK savybių (dangos eksploatacinių rodiklių: lygumo Y_{IRI} vėžetumo H_V ir suirties masto,

KDK stiprio ir kt.). 2.1 paveiksle parodytas mūsų AB dangos bei KDK funkcionavimo sąlygoms ir jų savybėms bei būklei įtakos turinčių veiksnių sisties modelis, patobulintas remiantis anksčiau sukurtais (Sivilevičius 2003; Petkevičius 2008, 2010) modeliais.

2.1 pav. AB dangos lygumui, vėžetumui, suirties mastui ir KDK stipriui įtakos turinčių veiksnių sisties modelis: 1–5 – KDK sluoksniai (1 – AB dangos viršutinis ir 2 – AB dangos apatinis sluoksniai; 3 – AB pagrindo sluoksnis; 4 – skaldos (SK) arba žvyro (ŽV) pagrindo sluoksnis; 5 – smėlio (SM) ar kitos medžiagos apsauginis šalčiui atsparus sluoksnis); 6 – žemės sankasos (ŽS) gruntas; E_1 – E_5 ir h_1 – h_5 – atitinkamai KDK nurodytų sluoksnių tampos moduliai ir sluoksnių storiai; E_{gr} ir h_{gr} – atitinkamai ŽS grunto tampos modulis ir grunto aktyviosios zonos ekvivalentinis storis

Fig. 2.1. The model of interaction between the factors influencing the asphalt concrete pavement roughness, rutting, degradation extent, structural strength and condition: 1–5 – pavement structural layers (1 – asphalt concrete wearing course, and 2 – asphalt concrete base courses; 3 – asphalt concrete road base; 4 – crushed stone or gravel sub-base; 5 – frost-blanket course from sand or other material); 6 – subgrade soil; E_1 – E_5 and h_1 – h_5 – moduli of elasticity and thicknesses of pavement structural layers, respectively; E_{gr} and h_{gr} – modulus of elasticity and equivalent thickness of the active zone of subgrade soil, respectively

Šis modelis įvertina svarbiausius AB dangos lygumui, KDK stipriui ir jų būklei didelį poveikį darančius veiksnius. Paveiksle visų rodiklių (E_1 – E_5 , h_1 – h_5 ir E_{gr}) vertės, išskyrus rodiklį h_{gr} , nustatomos iš norminių dokumentų, parinkus KDK medžiagas ir žinant vietovės gruntą. Rodiklio h_{gr} vertė nustatoma iš žinomos priklausomybės.

2.1 paveiksle pateikti veiksniai nėra pastovūs (determinuoti). Jų veikimo pobūdis yra atsitiktinis, todėl jų poveikio vertės kitėja atsitiktinai (stochastiškai), neviršydamos tam tikrų ribų. Vieni šių veiksnių yra periodinio pobūdžio: jų vertės periodiškai kartojasi per parą (ryte, dieną, vakare ir naktį), taip pat metų sezonais (pavasarij, vasarą, rudenį ir žiemą). Šie veiksniai – tai oro temperatūra ir saulės spinduliuotė, sudaranti metų saulės spinduliuotės balansą. Kiti veiksniai kitėja (tam tikrose ribose) visiškai atsitiktinai (daugumos jų vertės kitėja pagal normalųjį dėsnį): vėjas (jo greitis); kritulių kiekis; transporto priemonių apkrovos; AB dangos ir kitų KDK sluoksnių kokybės rodikliai (storis ir sutankinimo koeficientas); kelio dangos asfaltbetonio sudėtis, fiziniai ir mechaniniai bei kiti kokybės rodikliai; KDK nerišliųjų sluoksnių medžiagų granulimetrinė sudėtis ir kiti kokybės rodikliai; žemės sankasos gruntų granulimetrinė sudėtis, drėgnis ir kiti kokybės bei stiprumo rodikliai (Barnes, Trotlier 2010; François, Jullien 2009). Dalis veiksnių pastovūs (nekitėja arba kitėja labai mažai): deguonies kiekis (procentinė dalis) ore, gruntinio vandens lygis. Vienas svarbus veiksnys, veikiantis šaltuoju laikotarpiu – gruntų įšalo gylis, kitėja priklausomai nuo atstumo iki jūros (Lietuvos valstybės atveju – Baltijos jūros), sniego dangos storio, taip pat šaltojo sezono (žiemos) vidutinės neigiamosios ir žemiausios neigiamosios temperatūros ir kitų veiksnių (Sivilevičius 2003; Juknevičiūtė, Žilinskienė 2009; Petkevičius 2008).

Daugelis aptartų veiksnių AB dangos eksploataciniams rodikliams (lygumui Y_{IRI} , vėžetumui H_v), KDK stipriui ir jų būklei turi sudėtingą poveikį. Labai dažnai AB dangą ir KDK vienu metu veikia keletas skirtingų veiksnių, todėl kiekvieno jų poveikį nustatyti labai sudėtinga. Paveiksluose (2.2 pav. a, b, c; 2.3 pav. a, b; 2.4 pav.) pateikti kelių dangos ir kitus KDK sluoksnius veikiančių veiksnių scheminiai modeliai. KDK sluoksniai cikliška veikiama TP ratų apkrovų silpsta 2.2 paveiksle (a) ir atsiranda atskirų KDK monolitinių sluoksnių nuovargis. KDK monolitinių sluoksnių vertikalios plastinės deformacijos išjudina žemiau esančius biriuosius KDK sluoksnius. KDK sluoksnių vietose, kuriose cikliška pasireiškia plastinės AB sluoksnių deformacijos, nesurištų mišinių grūdėliai išsistumdo, o mišinio karkasas būna suardomas, KDK sluoksnis praranda pradinę laikomąją gebą. Dėl to prasideda KDK irtis. Pamažu KDK sluoksnių nuovargis perduodamas aukštesniems sluoksniams. Sumažėjus visuminiam KDK stipriui blogėja KD eksploataciniai rodikliai: AB dangoje susiformuoja pažaidos, blogėja KD lygumas. AB dangos ir KDK būklę blogina kelių veiksnių, veikiančių tuo pačiu metu, bendrasis

poveikis: AB dangą ir KDK vienu metu veikiant klimato bei orų veiksniams ir transporto priemonių apkrovoms, bendrasis neigiamas (ardomasis) poveikis gali būti daug žalingesnis negu veikiant kiekvienam veiksmui atskirai.

2.2 pav. Monolitinius kelio dangos konsrukcijos sluoksnius veikiančių veiksmių scheminis modelis: E_1-E_5 ir h_1-h_5 – atitinkamai KDK nurodytų sluoksnių tampos moduliai ir sluoksnių storiai; E_{gr} ir h_{gr} – atitinkamai ŽS grunto tampos modulis ir aktyviosios zonos sritis; P – TP rato apkrova; v – TP judėjimo vektorius; T_1-T_n TP rato ciklinės apkrovos poveikio trukmė; B – bituminio rišiklio plėvelė; T – TP ratų judėjimo kryptis

Fig. 2.2. Schematic model for the service life of asphalt concrete pavement structural layers and its influencing factors: E_1-E_5 ir h_1-h_5 – moduli of elasticity of the respective pavement structural layers and their thicknesses; E_{gr} ir h_{gr} – modulus of elasticity of the respective subgrade; P – vehicle wheel load; v – vehicle movement vector; T_1-T_n impact duration of the cyclic load caused by vehicle wheel; B – membrane of bitumen binder; T – vehicle movement direction

Pavyzdžiui, vasarą, kai būna aukšta oro temperatūra ($t \geq +30$ °C), AB danga įšyla iki $t \geq +60$ °C. Dėl šios priežasties labai sumažėja KDK stipris, ir transporto priemonių apkrovų poveikis AB dangai ir KDK būna daug stipresnis negu to paties dažnio ir dydžio apkrovų poveikis AB dangai ir KDK žiemą. Tačiau daugkartinis vandens ir šalčio poveikis bitumo plėvelei, padengusiai AB mišinio grūdelius, ją taip pat ardo (2.2 pav. b: 1, 2, 3, 4). Vandens plėvelė, veikiant važiuojančių TP ratams, ardo AB dėvimąjį sluoksnį. Dėl to vanduo patenka tarp bitumo plėvelės ir grūdelio. Veikiant šalčio ciklams susidaro ledo lęšiai, kurie suardo bitumo plėvelę ir apnuogina grūdelio paviršių. Tuo pačiu metu AB danga, veikiamą oro temperatūros, deguonies ir saulės spinduliuotės, labai intensyviai senėja, todėl dangos irties procesas dar labiau suintensyvėja. AB dangos senėjimo procesas, dėl oro sąlyčio su danga vykstant konvekcijos (KVK) (šilumos mainų) ir šiluminės radiacijos (ŠR) procesams, dar labiau suintensyvėja. Iš dangos asfaltbetonio daug intensyviau garuoja lakios bitumo

frakcijos – alyvos. Šio proceso metu grupinė bitumo sudėtis pasikeičia – dalis smalų tampa asfaltenais, o dalis alyvų – smalomis, todėl procentinė asfaltenų dalis padidėja, o alyvų sumažėja. Šiam procesui intensyviai vykstant 3–5 metus, dangos asfaltbetonio atsparumas gniuždymui labai padidėja, o elastingumas ir atsparumas tempimui sumažėja. Dangos asfaltbetonis iš tampraus, elastingo ir plastiško gali tapti trapus, dėl šios priežasties AB danga gali pradėti trūkinėti. Šaltuoju metų laikotarpiu (esant neigiamai oro ir AB dangos temperatūrai) AB dangos irtį dėl nuovargio (daugkartinio transporto priemonių apkrovų poveikio) labai suintensyvina oro temperatūros pokyčiai iš teigiamosios į neigiamąją ir iš neigiamosios į teigiamąją, nes danga patiria irties (dėl vandens ir šalčio įtakos) poveikį: AB porose (tuštymėse) esantis vanduo užšaldamas didina savo tūrį ir ardo dangos asfaltbetonį. Mineralinės medžiagos grūdeliams netekus bitumo plėvelės, susilpnėja jų saveikos kontaktai ir važiuojančių TP ratai juos išplėšia ir AB dangos.

2.3 pav. Nerišliųjų kelio dangos konstrukcijos sluoksnius veikiančių veiksnių funkcionavimo scheminis modelis: D – TP rato veikimo zona; AB – asfaltbetonio danga; σ – normaliniai įtempiai; τ – tangentiniai (šlyties) įtempiai

Fig. 2.3. Schematic model for the service life of unbound pavement structural layers and their influencing factors: D – the area of vehicle wheel action; AB – asphalt concrete pavement; σ – normal stresses; τ – tangential (shear) stresses; P – vehicle wheel load

KDK konstrukcijos nerišliusius sluoksnius važiuojančių TP ratai veikia normaliniais įtempiais (išskirstyta apkrova). Veikiančios apkrovos perduodamos žemiau esantiems KDK sluoksniams išjudinami nerišliuose KDK sluoksniuose sukibęs grūdėliai. Jie pradeda judėti vienas kito atžvilgiu. Pasireiškus šiems veiksniams nerišlioje KDK sluoksnyje, tarp judančių grūdėlių atsiranda šlyties jėgos. Silpniems grūdeliams trinant vienas į kitą, jų aštrios briaunos suapvalėja, dėl to susilpnėja jų tarpusavio sąlytis (šlyties jėgos). Nesukimbantys pradeda judėti, o tai suardo sluoksnio medžiagos karkasą ir nerišlus KDK sluoksnis praranda savo stiprį.

2.4 pav. Provėžų susidarymo monolitinėje tampriojoje kelio dangoje modelis: 1 – proceso pradžia; 2 – įsisenėjęs procesas po kelių (3–5 ar daugiau) metų; P – TP rato apkrova

Fig. 2.4. The model of rutting in flexible road pavement: 1) beginning of the process; 2) the long-time process after several (3–5 or more) years, P – vehicle wheel load

Vykstant TP eismui, monolitiniuose tampriuose KDK sluoksniuose surištieji AB grūdėliai rato veikimo zonoje yra gniuždomi. Gniuždomi grūdėliai perduda apkrovas šalia esantiems grūdeliams kurie nuo savęs stumia toliau esančius grūdėlius. Grūdeliams išsistumdžius iš savo vietos AB karkasas tampa ne homogeniškas. TP rato veikimo vietose grūdėliai išretėja, išsistumdo į šonus, o šonuose esantys grūdėliai susistumia arčiau vienas kito. Vietose, kuriose grūdėliai išretėja, atsiranda tuštymų, o vietose, kuriose jie sutankėja prasideda jų irtis. Silpni grūdėliai, gniuždant vienam kitą, trupa ir smulkėja. AB danga praranda savo stiprį, ir atsiranda jos nuovargis. Pasireiškus tokiam grūdėlių judėjimui AB dangoje susidaro vėžės (provėžos).

AB dangos ir KDK būklę apibūdina šie jų rodikliai:

- AB dangos būklę, KD eksploataciniai rodikliai: dangos lygumo Y rodikliai (plačiausiai naudojamas rodiklis – lygumas pagal indeksą IRI Y_{IRI} , m/km); dangos vėžetumo rodikliai (dažniausia naudojamas rodiklis – vėžės gylis H_V , mm), dangos defektingumo rodikliai (patogiausias rodiklis – dangos suirties mastas D_D , išreikštas suirusios dangos ploto dalimi, %) ir kt;
- KDK būklę: kelio konstrukcijos (KK) tampros modulis E_K , MPa; kelio konstrukcijos stiprio koeficientas K_{st} ; dangos ir KDK defektingumo rodikliai (patogiausias rodiklis – suirties mastas D_K , išreikštas suirusios dangos ir KDK ploto dalimi, %) ir kt.

AB dangos ir KDK svarbiausios savybės apibūdina jų gebą ilgą laiką (AB dangai laiką $T_D \geq 6 - 8$ metus, KDK laiką $T_K \geq 8 - 10$ metų) priešintis transporto priemonių apkrovų ir aplinkos veiksnių (tarp jų – klimato ir orų veiksnių) poveikiui ir šiuos poveikius atlaikyti, nesuardžius AB ir kitų KDK sluoksnių medžiagų struktūros ar kitaip nepakeitus šių medžiagų savybių:

- AB dangos būklės savybės apibūdinamos taip: dangos pradinio, pasiekiamo įrengus dangą, lygumo blogėjimo rodikliu ΔY_{IRI} , išreiškiamu dangos lygumo pablogėjimu, m/km (vidutiniškai) per metus; dangos irties D_D didėjimo rodikliu ΔD_D , išreiškiamu suyrančios dangos per metus ploto % (suirusios dangos ploto padidėjimu, absoliučiais defektų ploto %, vidutiniškai per metus); dangos vėžetumo H_V didėjimo rodikliu ΔH_V , išreiškiamu dangos vėžės gylio padidėjimu, mm (vidutiniškai) per metus; dangos asfaltbetonio atsparumo nuovargiui rodiklio pradinės vertės $N_c^{(pr)}$ mažėjimo rodikliu ΔN_c , nuovargio ciklais (vidutiniškai per metus); AB dangos kiekvieno sluoksnio tampros modulio pradinės vertės $E_{AB}^{(pr)}$ mažėjimo rodikliu ΔE_{AB} , MPa (vidutiniškai per metus) ir kt;
- tampriosios KDK eksploatacinės savybės apibūdinamos taip: kelio konstrukcijos (KK) stiprio koeficiento pradinės vertės $K_{st}^{(pr)}$ mažėjimo rodikliu ΔK_{st} , vieneto dalimis (vidutiniškai per metus); KK tampros modulio pradinės vertės $E_K^{(pr)}$ mažėjimo rodikliu ΔE_K , MPa (vidutiniškai per metus) ir kt.

Žinant pradines rodiklių D_D , D_K , Y_{IRI} , H_V , h_n , N_c , E_{AB} , K_{st} , E_K vertes $D_D^{(pr)}$, $Y_{IRI}^{(pr)}$, $H_V^{(pr)}$, $h_n^{(pr)}$, $N_c^{(pr)}$, $E_{AB}^{(pr)}$, $K_{st}^{(pr)}$, $E_K^{(pr)}$ ($D_D^{(pr)} = 0$; $H_V^{(pr)} = 0$; $h_n^{(pr)} = 0$), jos nustatomos atlikus tyrimus arba žinomos iš anksčiau atliktų tyrimų gautų rezultatų, taip pat žinant šių rodiklių leidžiamąsias vertes $D_D^{(l)}$, $Y_{IRI}^{(l)}$, $H_V^{(l)}$, $h_n^{(l)}$, $N_c^{(l)}$, $E_{AB}^{(l)}$, $K_{st}^{(l)}$, $E_K^{(l)}$ (metams bėgant nurodytų rodiklių vertės blogėja – jų leidžiamosios vertės paaimamos iš norminių dokumentų, jeigu kurio nors rodiklio (ar kelių rodiklių) leidžiamosios vertės (leidžiamųjų verčių) norminiuose dokumentuose nėra, šios vertės nustatomos atlikus specialiuosius tyrimus) ir žinant nurodytų rodiklių savybių blogėjimo vidutines vertes ΔD_D , ΔY_{IRI} , ΔH_V , Δh_n , ΔN_c , ΔE_{AB} , ΔK_{st} , ΔE_K (jos nustatomos iš specialiųjų tyrimų rezultatų), pagal siūlomas formules nustatomi AB dangos ir KDK tarpremontiniai laikotarpiai, išreikšti metais, kuriems einant užtikrinamos nurodytų rodiklių leidžiamosios vertės (Petkevičius 2010).

2.2. Kelių tampriosios dangos konstrukcijų funkcionavimo trukmė

Nustatant tampriosios AB ar kitos asfaltinės dangos ir KDK būklę, patogiausi šie rodikliai:

- AB dangos būklei $Y_{IRI}^{(1)}$, $D_D^{(1)}$, $H_V^{(1)}$;
- KDK būklei – $K_{st}^{(1)}$, (jie aptarti 2.1 poskyryje).

Kelių dangos (KD) funkcionavimo trukmė T būna ne mažesnė už numatytą racionalią jos funkcionavimo trukmę $T^{(r)}$ ($T \geq T^{(r)}$) tik tuo atveju, kai numatyto laikotarpio pabaigoje jos faktinis lygumas $Y_{IRI}^{(f)}$ būna ne blogesnis už leidžiamąjį jos lygumą $Y_{IRI}^{(kr)}$ ($Y_{IRI}^{(f)} \leq Y_{IRI}^{(kr)}$). Laikui bėgant, KD, funkcionuojančios T metų, lygumas nuolat ir nenutrūkstamai blogėja. Praėjus tam tikram laikotarpiui (keleriems ar keliolikai metų) KD faktinio lygumo rodiklio vertė $Y_{IRI}^{(f)}$ padidėja nuo pradinės vertės $Y_{IRI}^{(f)} = Y_{IRI}^{(1)}$ iki jo kritinės vertės $Y_{IRI}^{(f)} = Y_{IRI}^{(kr)}$ ir didėja toliau $Y_{IRI}^{(f)} > Y_{IRI}^{(kr)}$ – tuo momentu pasibaigia KD racionalio funkcionavimo trukmė $T^{(kr)}$ ir dangą būtina nedelsiant suremontuoti. Suremontavus dangą, pagerinamas jos lygumas.

Šio rodiklio Y_{IRI} vertės priklauso nuo transporto priemonių eismo intensyvumo N (ypač nuo sunkiųjų transporto priemonių (STP) eismo intensyvumo), nuo KD ir kitų KDK sluoksnių storio, sutankinimo laipsnio, sluoksnių medžiagų savybių, KDK stiprio ir kitų veiksnių.

Išanalizavus savo eksperimentinių tyrimų, atliktų automagistralėje Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (A5) rezultatus, galima prognozuoti magistralinių kelių AB dangos lygumo kitėjimą penkeriems metams (su kaskart mažėjančia arba nekintančia KD tarpremontinio laikotarpio T trukme), charakteringas KD lygumo kitėjimo grafinis modelis pateiktas 2.5 paveiksle.

2.5 pav. Kelių dangos lygumo rodiklio kitėjimo laikui bėgant grafinis modelis

Fig. 2.5. Graphical model of the change in pavement roughness index in the course of time

Kelio dangos (KD) eksploatacinis lygumo rodiklis $Y_{\text{IRI}}^{(1)}$ kitėja nuo $\leq 1,0$ m/km iki 1,5–1,6 m/km per trumpesnį laiką (4,5–5,0 metus) nei pirmasis tarpremontinis laikotarpis T_1 ir neviršija kritinės $Y_{\text{IRI}}^{(\text{kr})}$ ribos.

Kelių dangos (KD) funkcionavimo trukmė T būna ne mažesnė už numatytą racionalią jos funkcionavimo trukmę $T^{(r)}$ ($T \geq T^{(r)}$) tik tuo atveju, kai numatyto laikotarpio pabaigoje jos faktinis vėžtumo rodiklis $H_V^{(f)}$ būna ne blogesnis už leidžiamąjį jos vėžtumo rodiklį $H_V^{(kr)}$ ($H_V^{(f)} \leq H_V^{(kr)}$). Laikui bėgant, KD, funkcionuojančios T metų, vėžtumas nuolat ir nenutrūkstamai blogėja. Praėjus tam tikram laikotarpiui (keleriems ar keliolikai metų) KD faktinio vėžtumo rodiklio vertė $H_V^{(f)}$ padidėja nuo pradinės vertės $H_V^{(f)} = 0$, didėja toliau iki tarpinės vertės (padidėjus T_1 laikotarpiui) $H_V^{(f)} = H_V^{(1)}$ ir didėja iki kritinės vertės $H_V^{(f)} = H_V^{(kr)}$ bei didėja toliau iki vertės $H_V^{(f)} > H_V^{(kr)}$ – tuo momentu pasibaigia racionali KD funkcionavimo trukmė $T^{(kr)}$ ir ją būtina nedelsiant suremontuoti. Suremontavus dangą, pagerinamas jos skersine kelio kryptimi.

Rodiklio H_V vertės taip pat priklauso nuo transporto priemonių eismo intensyvumo N (ypač nuo sunkiųjų transporto priemonių (STP) eismo intensyvumo), nuo KD ir kitų KDK sluoksnių storio, sutankinimo laipsnio, sluoksnių medžiagų savybių, KDK stiprio ir kitų veiksnių.

Išanalizavę savo eksperimentinių tyrimų, atliktų kelyje Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (A5) rezultatus, galime prognozuoti magistralinių kelių AB dangos vėžtumo kitėjimą penkeriems metams (su kaskart mažėjančia arba nekintančia KD tarpremontinio laikotarpio T trukme). Charakteringas KD vėžtumo rodiklio H_V kitėjimo grafinis modelis pateiktas 2.6 paveiksle.

2.6 pav. Kelių dangos vėžtumo rodiklio kitėjimo laikui bėgant grafinis modelis

Fig. 2.6. Graphical model of the change in pavement rutting index in the course of time

Kelių dangos (KD) funkcionavimo trukmė T būna ne mažesnė už numatytą racionalią jos funkcionavimo trukmę tuo atveju, kai numatyto laikotarpio pabaigoje jos faktinis suirties masto rodiklis $D_D^{(f)}$ būna ne blogesnis už leidžiamąjį jos dydį $D_D^{(kr)}$. Laikui bėgant, KD, funkcionuojančios T metų, suirtis nuolat didėja. Praėjus tam tikram laikotarpiui, KD faktinio suirties masto vertė $D_D^{(f)}$ padidėja nuo pradinės vertės $D_D^{(f)} = D_D^{(1)}$ iki jo kritinės vertės $D_D^{(f)} = D_D^{(kr)}$ ir didėja toliau $D_D^{(f)} > D_D^{(kr)}$ – tuo momentu pasibaigia KD racionali funkcionavimo trukmė $T^{(kr)}$ ir būtina dangą nedelsiant suremontuoti. Suremontavus dangą, pagerinama jos būklė.

Išanalizavę savo eksperimentinių tyrimų, atliktų kelyje Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (A5) rezultatus, galime teigti, kad, praėjus penkeriems KD funkcionavimo metams, KD suirties mastas pasiekia tik nedidelę $D_D=3\%$. Charakteringas KD suirties masto $D_D^{(f)}$ kitėjimo grafinis modelis pateiktas 2.7 paveiksle. Laikui bėgant, KD, funkcionuojančios T metų, lygumas Y_{IRI} , vėžetumas H_V ir suirties mastas D_D nuolat blogėja. Šių pagrindinių kelių dangos eksploatacinių rodiklių kompleksinis kitėjimas rodo visos KDK stiprio koeficiento K_{st} mažėjimą. Remiantis šia nuostata, galima teigti, kad, praėjus tam pačiam, kaip ir prieš tai analizuotų rodiklių, kitėjimo laikotarpiui, KD faktinio stiprio koeficiento vertė $K_{st}^{(f)}$ mažėja. KDK stiprio koeficientas K_{st} vertė mažėja nuo pradinės vertės $K_{st}^{(f)} = K_{st}^{(0)}$ iki tarpinės vertės (praėjus T_1 laikotarpiui $K_{st}^{(f)} = K_{st}^{(1)}$ ir toliau mažėja iki jos kritinės vertės $K_{st}^{(f)} = K_{st}^{(kr)}$ bei mažėja toliau iki vertės $K_{st}^{(f)} < K_{st}^{(kr)}$ – tuo momentu pasibaigia KDK racionali funkcionavimo trukmė $T^{(kr)}$, todėl būtina dangą nedelsiant suremontuoti, o KDK – sustiprinti.

2.7 pav. Kelių dangos suirties masto kitėjimo laikui bėgant grafinis modelis

Fig. 2.7. Graphical model of the change in pavement degradation extent in the course of time

Charakteringas KDK stiprio koeficiento K_{st} kitėjimo grafinis modelis pateiktas 2.8 paveiksle.

2.8 pav. Kelių dangos konstrukcijos stiprio koeficiento kitėjimo (laikui bėgant) grafinis modelis

Fig. 2.8. Graphical model of the change in the pavement structure strength coefficient in the course of time

Esant didelėms STP eismo intensyvumo N ir jo didėjimo vertėms, labai dažnai ekonomiškai tikslinga parinkti aukštos kokybės KDK sluoksniams įrengti naudojamas medžiagas ir nustatyti racionalius KDK sluoksnių storius.

2.3. Kelių tampriosios dangos konstrukcinių sluoksnių projektavimo pagrindimas

Projektuojant kelių tampriosios dangos konstrukcijas būtina atsižvelgti į du svarbiausius kriterijus:

- kelių dangos ilgalaikiškumą (sluoksnių storį, jų medžiagas);
- racionalią medžiagų kainą.

Optimizuojant kelių dangos konstrukcijų patikimumą jų projektavimo metu, galima išskirti dvi pagrindines tendencijas. Viena jų – racionali kaina, kuri galėtų garantuoti konstruojamos KDK patikimumą, kita – siekis užtikrinti kuo didesnę KDK stiprį, esant toms pačioms KDK funkcionavimo sąlygoms. Racionalus sprendimas apibrėžia kriterijų, kuris rodo minimalias statybos išlaidas $Kr_{\min}$, išlaikant reikiamą kelių dangos stiprį. Norint garantuoti kuo didesnę kelių dangos ilgalaikiškumą ir KDK funkcionavimo trukmę, reikia siekti išlaikyti kuo vienodesnius KDK sluoksnių projektinius parametrus.

Tai galima pasiekti, pagerinant kokybės kontrolę, naudojant modernias kelių tiesybos mašinas, tobulinant kelių tiesybos technologijas ir garantuojant naudojamų medžiagų kokybės rodiklių didelį vienodumą.

Tam užtikrinti labai svarbu žinoti KDK viršutinio sluoksnio vienodumo įtaką daugiasluoksnės sistemos homogeniškumui (pagal bendrąją tampro modulį E_b).

Tampro modulio E_b vienodumas priklauso nuo šių rodiklių:

žemiau paklotų sluoksnių tampro modulio E_2 vienodumo;

sluoksnį sustiprinančių medžiagų tampro modulio E_1 ;

KDK sluoksnių bendrojo storio h .

Funkcinį ryšį tarp šių verčių galima išreikšti per Barberio (2.1) formulę (Золотарев 2004).

$$E_b = \frac{E_1 E_2 \left[1 + \left(\frac{2h}{D} \right)^2 \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{2/3} \right]^{1/2}}{E_1 - E_2 \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{2h}{D} \right)^2 \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{2/3} \right]^{1/2} \right\}}. \quad (2.1)$$

Pagal tikimybių teoriją žinoma, kad atsitiktinio dydžio dispersija, kuri yra kelių kitų atsitiktinių, nekoreliuojančių dydžių funkcija lygi dispersijų ir išvestinių (nuo atitinkamų kintamųjų kvadratų) sandaugų sumai. Kadangi dydžiai E_1 , E_2 ir h tarp nėra susiję, t. y. tarp savęs nekoreliuoja, gauname (Золотарев 2004).

$$E_b = \sigma_{E_1}^2 \left(\frac{\partial E_b}{\partial E_1} \right)^2 + \sigma_{E_2}^2 \left(\frac{\partial E_b}{\partial E_2} \right)^2 + \sigma_h^2 \left(\frac{\partial E_b}{\partial h} \right)^2, \quad (2.2)$$

čia σ_{E_1} , σ_{E_2} , σ_h – skaičiuojamųjų rodiklių viršutinio sluoksnio tampro modulio E_1 , žemiau esančių sluoksnių suminio tampro modulio E_2 , viršutinio sluoksnio storio h standartiniai nuokrypiai.

Apskaičiuojamos dalies išvestinė (Золотарев 2004).

$$\frac{\partial E_b}{\partial E_1} = \frac{3E_2^2 S (S^{1/2} - 1) + E_2 (S - 1) (E_1 - E_2)}{3S^{1/2} (E_1 - E_2 + E_2 S^{1/2})^2}, \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial E_b}{\partial E_2} = \frac{E_1 \left[1 + \frac{2}{3} (S - 1) \right] (E_1 - E_2) + E_1 E_2 S}{S^{1/2} (E_1 - E_2 + E_2 S^{1/2})^2}, \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial E_{sum}}{\partial h} = \frac{E_1 E_2 (S-1)(E_1 - E_2)}{h S^{1/2} (E_1 - E_2 + E_2 S^{1/2})^2}. \quad (2.5)$$

Formulėse (2.3), (2.4), (2.5) S vertė apskaičiuojama iš (2.7) formulės.

$$S = 1 + \left(\frac{2h}{D} \right)^2 \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{2/3}, \quad (2.6)$$

čia D – apskritimo, atitinkančio rato įspaudą dangoje, skersmuo.

Iš (2.1)–(2.6) pateiktų formulių galima gauti bendrojo tampros modulio E_b variacijos koeficiento V_{E_b} priklausomybę dvisluoksnei sistemai nuo sustiprinto sluoksnio tampros modulio variacijos koeficiento V_{E_1} , bendrojo žemiau pakloto sluoksnio tampros modulio variacijos koeficiento V_{E_2} ir viršutinio sluoksnio storio variacijos koeficiento V_h . (Золотарев 2004).

$$V_{E_b} = V_{E_K} = \frac{\partial E_b}{E_b} = \frac{\left[\left(V_{E_1} E_1 \frac{\partial E_b}{\partial E_2} \right)^2 + \left(V_{E_2} E_2 \frac{\partial E_b}{\partial E_2} \right)^2 + \left(V_h h \frac{\partial E_b}{\partial h} \right)^2 \right]^{1/2}}{E_b}. \quad (2.7)$$

Priklausomybė (2.7) leidžia tirti skaičiuojamųjų rodiklių V_{E_1} , V_{E_2} ir V_h įtaką variacijos koeficiento $V_{E_b} = V_{E_K}$ vertėms. Atlikus apskaičiavimus su skirtingais rodiklių variacijos koeficientais V_{E_1} , V_{E_2} , V_h , gauti rezultatai parodė, kad daugiausia įtakos tampros modulio E_{sum} vienodumui turi apatinio sluoksnio rodiklių vienodumas. Tai dar kartą įrodo būtinybę, kad tiesiant kelius būtų užtikrintas kuo geresnis kiekvieno kelių dangos konstrukcinio sluoksnio homogeniškumas ir žemės sankasos grunto kokybės rodiklių vienodumas. Dvigubai didinant važiavimų tankinimo volu skaičių, grunto tankio rodiklio variacijos koeficientas sumažėja apie 20 % (Золотарев 2004).

Daugelio autorių tyrimai parodė, kad kelių dangos konstrukcijų sluoksnių storio ir jo tampros modulio vienodumas turi įtakos dvisluoksnės dangos vienodumui (Золотарев 2004).

Vertinant daugiasluksnę dangą, kaip pamažu vieną ant kito KDK sluoksnio įrengiamą kelio dangos konstrukciją, galima nustatyti galimus verčių V_{E_1} , V_{E_2} ir V_h pokyčius.

Eksplotavimo metu kelių dangos homogeniškumas gali būti išlaikytas, jeigu laiku atliekama sisteminga ir tinkama (atitinkanti norminius dokumentus) kelių priežiūra.

Tampriosios kelių dangos konstrukcijos sluoksnių optimizavimo uždavinys gali būti išspręstas, įvertinus sluoksniams įrengti naudojamų medžiagų savybes ir nustatant optimalų šių sluoksnių storį.

Daugelyje Vakarų Europos šalių ir JAV kelių dangos ir KDK būklė vertinama naudojant kompleksinius rodiklius. Plačiausiai žinomas Amerikos (JAV) Kelių ir transporto pareigūnų asociacijos (AASHO) nustatytas eksploatacinio patikimumo (eksploatacinės būklės) rodiklis p . Kelių nestandžios dangos konstrukcijoms rodiklis p nustatomas iš formulės (Haas *et al.* 1994).

$$p = 5,03 - 1,91 \lg(1 + SV) - 0,01 \sqrt{C + P} - 1,38(RD)^2, \quad (2.8)$$

čia SV – dangos lygumo rodiklis, įvertinamas laboratoriniu profilometru pagal važiuojamosios dalies nelygumų nuolydžio pokytį, C – plyšių skaičius, $m/1000 m^2$, P – užtaisytų dangos išdaužų santykinis plotas, $m^2/1000 m^2$, RD – vidutinis vėžės gylis.

Kai rodiklio vertė $p = 2,5$ kelių dangą dar leidžiama eksploatuoti. Tampriosios KDK eksploatavimo pradžioje rodiklio p vertės turi būti $p \geq 4,2$.

Rodiklis p nustatomas ir iš šios formulės: (Haas *et al.* 1994).

$$p = 11,683 - 3,9 \lg R - 0,01 \sqrt{3,08C + P} - 0,241(RD)^2, \quad (2.9)$$

čia R – dangos lygumas, nustatytas smūgiamačiu, kiti rodikliai tie patys kaip (2.8) formulėje.

Šį rodiklį p kompleksiniu kelių būklės rodikliu vadinti negalima, nes jis įvertina tik kelių dangos būklę. Svarbiausias kelių vertinimo rodiklio p ir jo modifikacijų trūkumas – jų empiriškumas. Juos galima taikyti tik tomis konkrečiomis sąlygomis, kurios buvo juos nustatant. Eksploatacinei kelių dangos būklei įvertinti patogiu turėti apibendrintą universalų rodiklį, įvertinantį kelių dangos lygumą ir KDK stiprį bei kitas svarbias kelių eksploatacines savybes.

2.4. Kelių tampriosios dangos racionalių konstrukcijų parinkimas

Siekiant parinkti racionalią kelių dangos konstrukciją, pravartu išanalizuoti realiai egzistuojančią (ir ne trumpiau negu 5 metus funkcionuojančią) kelių dangos konstrukciją. Šiam tikslui pasiekti reikalingi ne tik KDK sluoksnių ir jų medžiagų kokybės rodiklių projektinės vertės, esamos kelių dangos būklės tyrimai, bet ir kelių dangos konstrukcijų (KDK) naudotų medžiagų kokybės.

Svarbiausią racionalios konstrukcijos parinkimo principą galima užrašyti taip:

$$\text{racionali KDK} = \frac{\text{rezultatas}}{\text{išlaidos}}.$$

Racionaliausias (optimalus) kelių dangos konstrukcijos sprendinys bus tas, kurio rezultato ir jam pasiekti reikalingų išlaidų santykis bus mažiausias. Rezultatas – KDK funkcionavimo trukmė. Ji turi būti racionali, o jai pasiekti reikiamos lėšos optimalios (2.9 pav).

2.9 pav. Racionalios kelių dangos konstrukcijos parinkimo grafinis modelis, įvertinant KDK funkcionavimo pobūdį

Fig. 2.9. Graphical model for the operation of rational road pavement structure

Mokslo ir pasaulinė patirtis rodo, kad racionali būna ta KDK, kurios funkcionavimo trukmė (esant dideliame TP eismo intensyvumui) būna gana ilga (galimai kuo ilgesnė, kai dangos būklė išlikusi gera).

Atliekant KDK medžiagų tyrimų rezultatų analizę, būtina suskirstyti kelią į ruožus su vienodu eismo intensyvumu. Kadangi svarbiausi rodikliai, nurodantys kelių dangos būklę yra dangos lygumas Y_{IRI} , vėžetumas H_V ir suirties mastas D_D , turi būti rasta analizuojamo kelio tiesybai naudotų medžiagų savybių ir KDK sluoksnių storių įtaka kelių dangos eksploataciniams rodikliams. Nustačius KD kokybės rodiklių matavimų vietas, kuriose buvo imti medžiagų bandiniai (jų kokybės kontrolei), tolesnei analizei sudaryta lygtis. Ji turi įvertinti KD būklę, pagal analizuotų medžiagų kokybės rodiklius. Principinė racionali kelių dangos konstrukcijos parinkimo lygtis:

$$K_{KD}^{(r)} = a + b \cdot K_{AM}^{(r)} + c \cdot K_{AS}^{(r)} + d \cdot h_{AS}^{(r)} + e \cdot K_{PM}^{(r)} + f \cdot K_{PS}^{(r)} + g \cdot h_{PS}^{(r)}, \quad (2.8)$$

čia $K_{KD}^{(r)}$ – kelių dangos eksploatacinis rodiklis; $K_{AM}^{(r)}$ – asfaltinio mišinio kokybės rodiklis; $K_{AS}^{(r)}$ – asfaltbetonio sluoksnio kokybės rodiklis; $h_{AS}^{(r)}$ – asfaltbetonio sluoksnio storis; $K_{PM}^{(r)}$ – kelių dangos pagrindo medžiagos kokybės rodiklis; $K_{PS}^{(r)}$ – kelių dangos pagrindo sluoksnio kokybės rodiklis; $h_{PS}^{(r)}$ – kelio

pagrindo sluoksnio storis; a – laisvasis narys, b, c, d, e, f, g – koeficientai, kurių racionalias vertes išsprendus lygtį, reikia nustatyti.

2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Asfaltinės dangos ir kelių dangos konstrukcijų eksploatacinės savybės priklauso nuo daugelio veiksnių: dangos bei kelių dangos konstrukcijų sluoksnių medžiagų ir žemės sankasos gruntų savybių, jų sluoksnių storio ir jų sutankinimo lygio, klimato veiksnių, transporto priemonių apkrovų bei nuo vietos sąlygų (gruntinio vandens lygio ir vietovės drėkinimo sąlygų). Viršutinio asfaltinės dangos sluoksnio eksploatacinės savybės geriausiai apibūdina dangos lygumo, vėžetumo ir suirties masto rodikliai.
2. Asfaltinės dangos ir kelių dangos konstrukcijų svarbiausios savybės parodo dangos ir kelių dangos konstrukcijų gebą priešintis transporto priemonių apkrovų ir aplinkos veiksnių poveikiui ir šiuos poveikius atlaikyti, nesuardžius asfaltinių ir kitų sluoksnių medžiagų struktūros ar kitaip nepakeitus šių medžiagų savybių. Šią gebą objektyviai parodo asfaltinės dangos lygumo blogėjimo, jos irties didėjimo ir jos vėžetumo didėjimo rodikliai.
3. Priklausomai nuo kelių dangos konstrukcijų funkcionavimo sąlygų (transporto priemonių eismo intensyvumo, jų srauto sudėties ir kt.) kitėjimo, ekonominio tikslingumo ir kitų veiksnių, laikui bėgant, tos pačios kelių dangos konstrukcijų atskirų ruožų tarpremontinių laikotarpių trukmė gali būti vienoda, tačiau gali ir gerokai (keleriais metais) skirtis.
4. Geriausias kelių asfaltinės dangos lygumas ir mažiausias provėžų gylis, dangą įrengus ir ją eksploatuojant bei ilgesnė jos funkcionavimo trukmė pasiekama, susiejus asfaltinio mišinio kokybės rodiklių ir kelių dangos konstrukcinių sluoksnių storių vertes su asfaltinės dangos lygumu bei vėžetumo rodikliu, bei šiuos duomenis naudojant naujoms KDK projektuoti ir įrengti.

Konstruktinių sluoksnių ir jų medžiagų savybių tyrimai

Skyriuje apibūdintos kelio tyrimų ruožų projektinė ir faktinės konstrukcijos, aptarti AB dangos eksploatacinių rodiklių, konstrukcinių sluoksnių ir jiems naudotų medžiagų savybių bandymų ir matavimų metodai, sudaryta eksperimentinių tyrimų sekos schema. Pateikta metodika tyrimų duomenims apdoroti. Išanalizuoti kelio dangos konstrukcijos medžiagų geometriniai (formos rodiklio SI , plokštumo rodiklio FI), mechaniniai (atsparumo smūgiams SZ , trupinimui LA , puoliruojamumui PSV , dėvėjimuisi M_{DE} , šalčio ir šilumos ciklų poveikiui F), fiziniai (tankio ρ) rodikliai ir jų verčių sąveika.

Skyriaus tematika paskelbti penki autoriaus straipsniai kartu su bendraautoriais (Bulevičius *et al.* 2010a; Булявичюс *et al.* 2010b; Bulevičius *et al.* 2011a, 2011b 2013).

3.1. Tyrimų atlikimo ir duomenų apdorojimo metodika

Pirmajame ir antrajame skyriuose, analizuojant skirtingus literatūros šaltinius, buvo nustatyti pagrindiniai KDK sluoksnių ir jų medžiagų savybių veiksniai, turintys įtakos eksploataciniams kelių dangos rodikliams, t. y.: asfaltinės dangos suirties masto D_D , dangos vėžtumo rodiklio H_V ir jos lygumo rodiklio Y_{IRI}

vertėms. Tiriant automobilių kelių AB dangos būklę, naudotas pasaulyje labiausiai paplitęs ir efektyviausias kompleksinis kelių dangos būklės vertinimo būdas. KD matavimai atlikti naudojant mobiliąją kelių tyrimų laboratoriją RST-28. Tyrimams atlikti buvo sudaryta eksperimentinių tyrimų sekos schema pateikta 3.1 paveiksle.

3.1 pav. Eksperimentinių tyrimų sekos schema

Fig 3.1. The scheme for the sequence of experimental research

Išanalizavus Lietuvos magistralinių kelių tinklą, TP eismo intensyvumą (*VMPEI*) ir sudėtį, buvo parinkti tyrimams tinkami kelių ruožai. Lietuvoje didžioji dalis magistralinių kelių nutiesta daugiau kaip prieš 20 metų, tuo metu galiojusieji norminiai dokumentai, reikalavimai ir bandymų standartai šiuo metu pasikeitę arba netaikomi.

Nauji norminiai dokumentai, kuriuose nurodyti reikalavimai, keliami medžiagoms, naudojamoms keliams tiesti, buvo pradėti naudoti nuo 2005 m. Tuo laikotarpiu pradėti taikyti Europos normų bandymų metodai, atliekant tinkamumo ir kontrolės bandymus, kurie taikomi iki šiol. Siekiant mokslinio darbo rezultatų praktiškumo ir norint ištirti KDK ruožus, kurie funkcionuoja ne trumpiau nei garantinis (galimas 5 metų tarpremontinis) laikotarpis, tyrimams parinkti 2005–2006 m. įrengti kelio ruožai.

Tyrimui parinktas vienas svarbiausių (antrasis pagal eismo intensyvumo *VMPEI* rodiklį) magistralinis kelias Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (A5), kurio skirtingų ruožų rekonstrukcija atlikta 2005–2007 m. Eksperimentinis tyrimas buvo atliktas laboratorijoje ir kelyje Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (A5) (VIA Baltica). Tyrimo metodiką sudaro dvi dalys: kelio dangos (KD) ir kelio dangos konstrukcijos (KDK) medžiagų kokybės rodiklių (KR) tyrimai laboratorijoje ir KD eksploatacinių rodiklių matavimas atlikus kelio rekonstrukciją.

Kelyje A5 2007 m. buvo atlikti ir įvertinti kelio dangos lygumo pagal Y_{IRI} , vėžės gylio rodiklio H_v ir suirties masto D_D (nesuirusios dangos $D_D < 1\%$, nedaug suirusios dangos $D_D = 1-3\%$, geros būklės dangos– $D_D = 3-5\%$, pakankamos būklės dangos $D_D = 5-8\%$, patenkinamos būklės dangos $D_D = 8-12\%$, ribinės (kritinės) būklės dangos $D_D = 12-16\%$, nepatenkinamos būklės dangos $D_D = 16-20\%$, blogos būklės dangos $D_D = 20-25\%$, labai blogos būklės dangos $D_D = 25-30\%$ ir visai blogos būklės dangos $D_D > 30\%$) matavimai, kurie tose pačiose vietose pakartotinai buvo atlikti 2010 m.

Iš kelio dangos paimti bandiniai buvo ištirti laboratorijoje. Suskirsčius kelią A5 į ruožus su vienodomis KDK ir kelio geometrinėmis charakteristikomis, parinkti kelio tyrimų ruožai. Kelio ruožai tyrimams buvo parinkti taip, kad jų *VMPEI* būtų skirtingas, o KDK ir naudotos medžiagos kuo vienodesnės. Bandinių atrankos vietos parinktos naudojant atsitiktinių skaičių lentelę. Tyrimų ruožų projektinė KD parodyta 3.2 paveiksle. Jame parodytos tirtų ruožų KDK sluoksnių medžiagos: 0/11 S-M (SMA 11 S) – skaldos ir mastikos AB, skirtas sluoksniams, veikiamiems sunkiąja apkrova, kurio mineralinių medžiagų viršutinio sieto akutės dydis – 11 mm; 0/22-A (AC 22 AS) – AB, skirtas AB apatiniais sluoksniams, veikiamiems sunkiąja apkrova, kurio mineralinių medžiagų viršutinio sieto akutės dydis – 22 mm; 0/32 CS (AC 32 PS) – AB,

skirtas AB pagrindo sluoksniams, veikiamiems sunkiąja apkrova, kurio mineralinių medžiagų viršutinio sieto akutės dydis – 32 mm; dolomito skalda 0/45 – dolomito skaldos mišinys, kurio mineralinių medžiagų viršutinio sieto akutės dydis – 45 mm; smėlis 0/4 – smėlis, kurio mineralinių medžiagų viršutinio sieto akutės dydis – 4 mm.

3.2 pav. Tyrimų ruožų kelių dangos konstrukcijos sluoksnių projektinės charakteristikos

Fig 3.2. Design characteristics of the pavement structural layers of experimental road sections

Tyrimų ruožų ilgiai pateikti 3.1 lentelėje. VĮ Transporto ir kelių tyrimo institutas (TKTI) kelyje Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (A5) (VIA Baltica) (2,4 km ir 30,0 km) yra įrengusi TP svėrimo postus, kuriuose nuolat sveriamos transporto priemonės. Pagal šių postų duomenis apskaičiuojamas TP eismo intensyvumas *VMPEI*.

3.1 lentelė. Magistralinio kelio Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (A5) tyrimų ruožai ir jų ilgiai

Table. 3.1. The lengths of the experimental sections on the road A5 Kaunas–Marijampolė–Suvalkai

Tyrimų ruožai	Ruožo pradžia, km	Ruožo pabaiga, km	Ruožo ilgis, km
Pirmasis	0,0	6,8	6,8
Antrasis	25,8	30,3	4,5

Šiuos tyrimus TKTI atlieka daugiau kaip 10 metų, todėl gauti duomenys yra patikimi ir naudojami analizuojant TP poveikį AB dangai. Tyrimų ruožų TP eismo intensyvumo kitėjimas 2005–2012 m. parodytas 3.3 paveiksle. Duomenys kelio dangos konstrukcijos (KDK) sluoksnių medžiagų analizei buvo surinkti tose pačiose vietose (Pk), kuriose, remiantis atsitiktinių skaičių lentele, buvo

išmatuoti KDK sluoksnių ir jų medžiagų kokybės rodikliai (atlikus asfaltbetonio ėminių tyrimus).

3.3 pav. Tyrimų ruožų transporto priemonių eismo intensyvumo kitėjimas 2005–2012 m.

Fig. 3.3. Change in the traffic volume of the experimental road sections, 2005–2012

KDK sluoksniams įrengti naudotų medžiagų tyrimai laboratorijoje buvo atlikti pagal tuo metu galiojusiose statybos rekomendacijose R 35-01 nurodytus rodiklius, kurių dalis nepasikeitė iki šiol, yra techninių reikalavimų apraše TRA ASFALTAS 08.

3.1.1. Laboratorinių tyrimų metodai

Asfaltinių mišinių bandiniai buvo imami iš medžiagos arti klotuvo sraigtų. Vienam AB bandymui, naudojant ėminių ėmimo kastuvą, buvo imami du elementarieji ėminiai maždaug po 7 kg iš kiekvienos klotuvo pusės. Iš viso gaunami keturi elementarieji ėminiai. Elementarusis ėminys paimamas įstumiant kastuvą į sraigto priekyje esančią dalį. Kai ji užsipildo, medžiagą iškeliamą. Sumaišius elementariusius ėminius, suformuojamas reikiamos bandymams atlikti masės sudėtinis ėminys (LST EN 12697-27). Į laboratoriją pristatytas ėminys padalijamas (ketvirčiuojamas) dalimis šiems tolimesniems tyrimams atlikti:

- mineralinių medžiagų granulimetrinės sudėties ;
- bituminio rišiklio B kiekio (skirtuminiu metodu), masės %;

- asfaltinio mišinio tariamojo tankio;
- asfaltinio mišinio didžiausio tankio;
- asfaltinio mišinio tuštytumo rodiklio.

Atliekant bituminio rišiklio B kiekio nustatymo tyrimą skirtuminiu metodu, asfaltinis mišinys ekstrahuojamas naudojant specialią (tam tikslui skirtą) laboratorinę įrangą (3.4 pav., a). Rišiklio B kiekis (ekstrahavimo būdu) gaunamas rišiklį iš asfaltinio mišinio išplaunant tirpikliu. Rišiklio kiekis nustatomas skirtuminiu metodu pagal 3.1 formulę (LST EN 12697-1):

$$S = \frac{100 \times [M - (M_1 + M_W)]}{M - M_W}, \quad (3.1)$$

čia S – tirpiojo rišiklio kiekis, %; M – neišdžiovintos bandomosios dalies masė, g; M_1 – regeneruotos mineralinės medžiagos masė, g; M_W – neišdžiovintos bandomosios dalies vandens masė, g.

a)

b)

3.4 pav. Laboratorinė įranga bituminio rišiklio kiekiui ir asfaltinio mišinio granulimetrinei sudėčiai nustatyti

Fig. 3.4. Laboratory equipment for the determination of bitumen binder content and grading of asphalt concrete mixture

Atliekant asfaltinio mišinio mineralinių medžiagų granulimetrinės sudėties bandymą granulimetrinė sudėtis nustatoma sijojant ir sveriant. Mineralinės medžiagos tyrimas atliekamas ekstrahavus bituminį rišiklį. Centrifugoje likę mineralinės medžiagos grūdėliai ir mineraliniai milteliai 3.4 paveikslas (b) sijojami ir plaunami per reikiamo akelių dydžio sietus (mm). Mūsų tyrimui buvo atrinkta mineralinės medžiagos masės dalis, likusi ant 2 mm ir prabyrėjusi per 0,09 mm akelių dydžio sietus.

Asfaltinio mišinio turštymėtumo rodiklio bandymui į laboratoriją pristatytas ėminys padalijamas (ketvirčiuojamas) į dvi dalis. Viena ėminio dalis (nuo 1050 g iki 1400 g) pakaitinama iki 140–150 °C temperatūros, supilama į pašildytą (<+150 °C) formą, ir specialiu Maršalo tankinimo prietaisu (3.5 pav., a) sutankinamas reikiamo aukščio (60,5–66,5 mm) bandinys (pagal LST EN 12697-30).

3.5 pav. Laboratorinė įranga asfaltbetonio bandiniams suformuoti ir tariamajam bei didžiausiam tankiui nustatyti

Fig. 3.5. Laboratory equipment for forming asphalt concrete samples and defining the expected and maximum density

Išmatavus gauto bandinio aukštį, skersmenį ir jį pasvėrus, gaunamas tariamasis AB mišinio tankis ρ_b (LST EN 12697-6). Antra padalyto AB ėminio dalis susmulkinama rankomis, nepažeidžiant mišinyje esančių grūdelių. Paruoštas bandinys supilamas į piknometą su vandeniu ir įdedamas į vakuumatorių (3.5 pav., b). Vakuumuojant bandinį, pašalinamas visas asfaltiniame mišinyje esantis oras. Pasvėrus bandinį (po vakuumavimo), apskaičiuojamas didžiausias asfaltinio mišinio tankis ρ_m (LST EN 12697-5). Sutankintų AB bandinių oro tuštymių skaičius apskaičiuojamas pagal 3.2 formulę (LST EN 12697-8):

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100\%, \quad (3.2)$$

čia V_m – mišinio akytumas, %; ρ_m – didžiausias mišinio tankis, Mg/m^3 ; ρ_b – tariamasis mišinio tankis, Mg/m^3 .

Vykdam paklotos kelio AB dangos kokybės kontrolę, parenkamos vietos ėminiams (kernams) iš dangos paimti ir nustatomas ėminių skaičius, kuris reikalingas tolesniems asfaltbetonio tyrimams atlikti. Asfaltbetonio kernų gręžimo vietos objekte parenkamos vadovaujantis atsitiktinių skaičių teorija, tačiau ši teorija gali būti koreguojama taip, kad atstumai tarp kernų ėmimo vietų būtų apytikriai vienodi, o atstumai nuo kelio ašies būtų skirtingi ir apimtų visą gręžiamo ruožo plotį. Tipinė kernų ėmimo schema pavaizduota 3.6 paveiksle (a).

Kerno Nr.	Piketas, km	Atstumas nuo kelio ašies, m		Kernų paėmimo vietos schema	
		kairė	dešinė	Kalkraitis	Kalkraitis
1	0,000	1,50			①
2	0,536	1,00			②
					③
3	1,012	2,00			④
4	1,341	2,30			⑤
5	2,015	1,75			

a)

b)

3.6 pav. Asfaltbetonio kernų iš kelio dangos paėmimo vietų tipinė schema (a) ir AB dangos sluoksnių storio matavimas (b)

Fig. 3.6. Principle scheme for the taking of asphalt concrete core from the pavement (a) and the measurement of asphalt concrete layer thickness (b)

Tokiu būdu buvo atlikti tyrimai pirmajame ir antrajame tyrimų ruožuose. Išgręžus ėminius (kernus), slankmačiu, išmatuoti jų aukščiai ir nustatytas faktinis atskiros AB dangos sluoksnio storis pagal LST EN 12697-29 (3.6 pav., b). AB mišinio sutankinimo laipsnis k apskaičiuojamas žinant iš AB dangos paimto ėminio (kerno) tūrinį tankį $\rho_{b,c}$ ir iš paimtų kernų AB bandinio, pagaminto pagal LST EN 12697-30, tūrinį tankį $\rho_{b,i}$ pagal 3.3 formulę:

$$k = \frac{\rho_{b,c}}{\rho_{b,i}} \cdot 100 \%, \quad (3.3)$$

čia $\rho_{b,c}$ – tariamasis AB ėminių (kernų) tankis, Mg/m^3 ; $\rho_{b,i}$ – tariamasis AB tankis, Mg/m^3 .

Atliktų tyrimų apimtis pateikta 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Eksperimentinių tyrimų apimtis

Table 3.2. The total amount of experimental research

Rodiklis	Tyrimų rūšiai	
	pirmasis	antrasis
	bandymų (matavimų) skaičius, vnt.	
Dangos lygumas Y_{IRI}	643	226
Dangos vėžėtumas H_V	643	226
Dangos suirties mastas D_D	643	226
Ėminių ėmimo vieta, Pk	21	18
Bituminio rišiklio B kiekis, masės %	63	54
AB mišinio granulimetrinė sudėtis, (SK; MM kiekis, masės %)	63	54
AB mišinio tariamasis tankis ρ_b	63	54
AB mišinio didžiausias tankis ρ_m	63	54
AB kenų (ėminių) ėmimas (gręžimas) – ėminiai	84	72
AB dangos sluoksnio storis h	252	276
AB kerno tariamasis tankis $\rho_{b,c}$	63	54
AB bandinio formavimas – bandiniai	252	276
AB suformuoto bandinio tariamasis tankis $\rho_{b,i}$	63	54

3.2 lentelėje pateiktas pirmojo ir antrojo kelio ruožų atliktų dangos eksploatacinių rodiklių matavimų kelyje ir tyrimų laboratorijoje skaičius.

3.1.2. Kelio dangos tyrimų metodai

Kompleksiniai kelio dangos būklės tyrimai buvo atlikti naudojant mobiliąją kelių dangos būklės rodiklių matavimo įrangą RST-28 (3.7 pav., a, b). Šis įrenginys vienu metu matuoja skirtingus kelio dangos parametrus (kelio dangos lygumą, makrotekstūrą, vėžių gylį, plyšių tinklą, skersinius ir išilginius nuolydžius, kreivių plane horizontaliuosius spindulius), mūsų eksperimentui atlikti buvo išmatuoti kelio dangos eksploataciniai rodikliai:

- kelio dangos lygumas Y_{IRI} ;
- kelio dangos vėžių gylis H_V ;
- kelio dangos plyšių tinklas D_D .

Kelio dangos išilginis lygumas IRI matuojamas panaudojus du akcelerometrus (skiriamoji geba – 5 μg), skirtus automobilio svyravimams nufiltruoti, matavimų tikslumas – $\pm 0,2$ %.

3.7 pav. Mobilioji kelių dangos būklės rodiklių matavimo įranga RST-28
Fig. 3.7. Mobile road surface tester RST-28

Provėžų gyliai matuojami kas 10 cm. Apskaičiuoti ir pateikti kiekvieno 20 m ilgio kelio ruožo vidutinis kairiosios ir dešinėsios vėžės gyliai yra tikslūs ir patikimi, kad būtų galima atlikti kelio dangos būklės analizę. Skaičiavimuose analizuojami didesni, t. y. dešinėsios provėžos gyliai, rezultatai. Kelių dangos vėžės matavimo tipinė schema pateikta 3.8 paveiksle. Provėžų gylį fiksuoja ant priekinės automobilio dalies (sijos), sumontuota 19 lazerinių matuoklių sistema (3.7 pav., a).

3.8 pav. Kelių dangos vėžės matavimo tipinė schema, naudojant įrangą RST -28
Fig. 3.8. Principle scheme for measuring pavement rut with the use of the tester RST-28

Kelių dangos būklę (skersinius, išilginius plyšius, plyšių tinklą ir kt.) fiksuoja galinėje automobilio dalyje įrengtos keturios vaizdo kameros (3.7 pav., b). Kelių danga filmuojama vieno metro ruožais, o gauti duomenys superkompiuteriu perkeltami į skaitmeninį formatą. Turima medžiaga superkompiuteriui ir duomenų apdorojimo programa filtruojama, įvertinant kelio

dangos tekstūrą. Filtravimo rezultatas – plyšių kontūrų išryškinimas. Pagal gautus plyšių kontūrus programa apskaičiuoja plyšių dengiamą plotą (suirties mastą D_D), išreikštą suirtusios dangos ploto % (3.9 pav.).

3.9 pav. Plyšių ploto išryškinimas, naudojant įrangą RST-28

Fig. 3.9. Measurement of the area of cracks with the use of the tester RST-28

Naudojant mobiliąją kelių dangos tyrimų laboratoriją RST-28, KD eksploataciniai rodikliai (kelio dangos išilginis lygumas, vėžės gylis ir suirties mastas) išmatuoti tiksliai tose pačiose vietose ir tuo pačiu metu. Gautų rezultatų patikimumas ir gausa leidžia atlikti kelių dangos būklės vertinimo analizę.

3.1.3. Tyrimų duomenų apdorojimo metodai

Bandymų rezultatai apdoroti „Maple 10 Academic edition“ programa. Šia programa, buvo apskaičiuojami statistiniai rodikliai: n – imtis, $x_{\min}$ – mažiausioji imties vertė, $x_{\max}$ – didžiausioji imties vertė, $\bar{x}$ – imties vidurkis, s – standartinis nuokrypis, s^2 – dispersija, g_1 – asimetrijos koeficientas, g_2 – eksceso koeficientas. Taip pat nustatyti skirstiniai jų koreliacijos koeficientas R , determinacijos koeficientas R^2 ir regresijos lygtys. Sugrupavus analizuojamus rodiklius (programa „STATISTIKA 7“), buvo sudaryti: tiriamųjų rodiklių priklausomybės nuo įvesties parametrų (kintamųjų) matematiniai modeliai; koreliacinė matrica; apskaičiuota tiesinės regresijos lygtis, (kaip pavaizduota 2.8 lygtimi). Gautas matematinis modelis pagrįstas tiesinės priklausomybės tarp kintamųjų ir nagrinėjamų rodiklių (Y_{IRI} ir H_V) buvimu. Statistinio skaičiavimo tikslas - apskaičiuoti KDK sluoksnių ir jų medžiagų kokybės rodiklių tarpusavio regresinius ryšius.

Gautos dangos būklės prognozės lygties kintamieji (rodikliai), naudojant skirstinių analitinę programą „EasyFit 5.5 professional“, išanalizuoti ir kiekvienai kintamųjų imčiai nustatytas artimiausias skirstinys. Pagal gautų skirstinių funkcijas atskiriems kintamiesiems (rodikliams) Monte Karlo metodu sugeneruota 1000 atsitiktinių verčių.

Naudojantis daugiaplatforme „MathWorks“ programine įranga „MATLAB“, atlikta kintamųjų (rodiklių) modeliavimo duomenų neapibrėžties tikimybinė analizė. Taikant Monte Karlo metodą ir jautrumo indeksais pasirinkus standartizuotus regresijos koeficientus (SRK), buvo atlikta modeliavimo rezultatų jautrumo analizė kiekvienai sudarytai tiesinei regresijos lygčiai.

Norint pasiekti rezultatai būtų aiškesni, kiekvieno poskyrio pradžioje pateikti santrumpų paaiškinimai ir apibendrinti kintamųjų analiziniai skaičiavimų rezultatai. Visi pirminiai duomenys, naudoti statistiniam rezultatų apdorojimui, pateikti prieduose.

Sudarius formulę, buvo išspręstas lygties neapibrėžties uždavinys ir apskaičiuotas atskiros lygties rodiklio jautrumas. Rezultato neapibrėžties ir jautrumo analizė atlikta tikimybinio būdu. Parametrai laikyti atsitiktiniais dydžiais ir jų įgyjamos vertės aprašytos tikimybiniais skirstinių dėsniais (pateikta prieduose). Pavyzdžiui, pritaikius Monte Karlo metodą, atsitiktiniu būdu parinktos analizuojamų parametų vertės ir atliktas modeliavimas, o neapibrėžtumo ir jautrumo analizė atlikta naudojant sugeneruotų parametų verčių rinkinius ir gautus modeliavimo rezultatus.

3.10 pav. Imties generavimo (Monte Karlo) metodu pagrįsta neapibrėžties analizė

Fig. 3.10. Uncertainty analysis based on sample generation (Monte Carlo) method

Svarbiausieji atliktos tikimybės analizės žingsniai šie:

1. Išanalizuoti gauto modelio rezultatai (vidurkis, vidurkio pasikliauties intervalas, kriterijaus viršijimo tikimybė), parinkti pagrindiniai įvesties parametrai (jie buvo pasirenkami įvairesni).
2. Parinktiems įvesties parametrams apibrėžti tikimybės skirstinio dėsniai.
3. Sugeneruota įvesties parametru verčių aibė, įvertinant jų skirstinių dėsnius.
4. Kiekvienam parametru verčių rinkiniui atlikti skaitiniai vertinimai ir gauti modelio rezultato verčių rinkiniai.
5. Rezultatų neapibrėžtumas pateiktas skaitine išraiška (vidurkis, standartinis nuokrypis (dispersija), kvantiliai, skirstinio charakteristikos) ir grafinė išraiška (kiekvieno realizuoto rezultato priklausomybė nuo laiko, kvantiliai, tikimybės tankio funkcijos (PDF), kumuliacinės tikimybės funkcijos (CDF)).

Atlikus rezultato neapibrėžties analizę, neapsiribota tik jo galimų kitėjimo ribų ar tikimybės, kuriai esant rezultatas viršys (ar neviršys) nustatytą ribinę vertę, įvertinimu. Siekiant sistemos optimizavimo, įvertinti tie KDK rodikliai, kurie turi daugiausiai įtakos KD eksploataciniams rodikliams. Svarbiausias rezultatų jautrumo analizės tikslas: nustatyti, kuris iš įvesties parametru turi didžiausią įtaką KDK būklės prognozavimo matematinio modelio rezultatui ir pagal šią įtaką įvertinti KDK rodiklių parametru svarbą.

Skaitinės jautrumo analizės pirmieji žingsniai buvo šie: įvesties parametru skirstinių parinkimas, parametro verčių generavimas (1000 verčių), modeliavimas ir modelio rezultato verčių rinkinio sudarymas. Tuomet atlikta pati jautrumo analizė, taikant Monte Karlo metodą. Kadangi dalis žingsnių yra analogiški žingsniams, atliekamiems neapibrėžtumo analizės metu, jautrumo analizei panaudotos tos pačios įvesties parametru aibės ir gauti rezultatai. Pagal jautrumo analizės rezultatus galima nustatyti, kurių modelio parametru tikslesnis įvertinimas leistų gerokai sumažinti rezultato neapibrėžtumą ir kurių parametru tolesnis tikslinimas nėra prasmingas (Kopustinskas *et. al.* 2007).

Modelio skaičiavimo (realizacijų) skaičius, reikalingas patikimam jautrumo indeksų įvertinimui, priklauso nuo parametru skaičiaus ir imties sudarymo metodo.

Jautrumo analizės metodai skirstomi į globalios ir lokalios analizės metodus. Taikant globalios jautrumo analizės metodus, vertinama visų analizuojamų kintamųjų neapibrėžties įtaka rezultato neapibrėžčiai, todėl (šiuo atveju) tenka atlikti daug modelio skaičiavimų.

Rezultatų neapibrėžties priklausomybei nuo parametru neapibrėžties nusakyti buvo nustatytas Pirsono koreliacijos koeficientas. Parametro x_i

koreliacijos (Pirsono) koeficientas nusako tiesinę priklausomybę tarp parametro ir rezultato ir yra apskaičiuojamas (Kopustinskas *et. al.* 2007):

$$PKK = r(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left(n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right) \cdot \left(n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right)}}. \quad (3.4)$$

Ryšio tarp kintamųjų glaudumo matui naudotas koreliacijos determinacijos koeficientas R^2 . Kuo determinacijos koeficiento vertė artimesnė vienetui, tuo parametro x_i įtaka rezultato neapibrėžčiai būna didesnė.

Atliekant regresinę analizę, rezultato ir įvesties parametrų priklausomybė, kurią bendruoju atveju galima apibrėžti kaip $F(x_1, x_2, \dots, x_N)$, aprašoma tiesinės regresijos lygtimi (3.5 lygtis), o rezultato jautrumą vieno ar kito parametro pokyčiui rodo regresijos lygties koeficientai:

$$y = F(x_1, x_2, \dots, x_N) = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \dots + b_N x_N, \quad (3.5)$$

čia x_i – regresijos lygties kintamieji, $i=0\dots n$; b_i – regresijos lygties koeficientai, $i=0\dots n$.

Regresijos lygties koeficientai b_i apskaičiuoti mažiausių kvadratų metodu, tačiau dažniausiai jie negali būti jautrumo indeksais, nes skiriasi parametrų matavimo skalės. Parametrų matavimo vienetai normuojami standartizuojant kiekvieną parametą ir modelio rezultatą (Kopustinskas *et. al.* 2007):

$$\hat{x}_{i,k} = \frac{x_{i,k} - Ex_i}{\sigma x_i}; \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad k = 1, 2, \dots, m, \quad (3.6)$$

$$\hat{y}_k = \frac{y_k - Ey}{\sigma y}, \quad (3.7)$$

čia Ex_i – parametro x_i vidurkis; σx_i – parametro x_i standartinis nuokrypis; Ey – rezultato vidurkis; σy – rezultato standartinis nuokrypis; m – parametrų atsitiktinės imties dydis; n – parametrų skaičius.

Sudarius daugialypės regresijos lygtį, standartizuotiems duomenims lygties koeficientai β_i (3.8 lygtis), vadinami standartizuotais regresijos koeficientais (SRK) buvo panaudoti kaip parametrų jautrumo indeksai:

$$\hat{y} = \alpha + \beta_1 \hat{x}_1 + \beta_2 \hat{x}_2 + \dots + \beta_n \hat{x}_n. \quad (3.8)$$

Būtina regresinės analizės metodo taikymo sąlyga – tiesinė rezultato priklausomybė nuo parametrų, monotoniškumas, o metodo tinkamumas

įvertinamas pagal determinacijos koeficiento R^2 vertę, kuris apskaičiuojamas pagal šia formulę:

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_p}, \quad (3.9)$$

čia SS_p – bendroji nuokrypių kvadratų suma; $SS_p = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$, apibūdinanti y verčių sklaidą apie vidurkį $\bar{y}$, SS_R – regresinė nuokrypių kvadratų suma, $SS_R = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$, apibūdinanti y verčių, gautų iš regresijos lygties su nustatytais regresijos koeficientais, sklaidos apie vidurkį dalį.

Koeficiento vertė artima vienetui reiškia modelio tiesiškumą ir SRK turi prasmę. Jautrumo analizėje determinacijos koeficiento vertė nurodo tą dalį modelio rezultato neapibrėžties, kurią galima paaiškinti analizuojant modelio parametrų neapibrėžtį. Likusi nepaaiškinta modelio rezultato neapibrėžties dalis yra susijusi su modelio parametrų tarpusavio sąveikos įtaka rezultatui. Ji gali būti analizuojama dispersijos išskaidymo metodais. Praktikoje dažnai reikalaujama, kad tiesinio modelio determinacijos koeficientas būtų ne mažesnis, kaip 0,6–0,7. Esant netiesinei priklausomybei ($R^2 < 0,7$), regresinė analizė gali būti atliekama transformuotiems duomenims (rangams), o jautrumo indeksais tampa standartizuoti ranginės regresijos koeficientai (SRRK).

3.2. Kelių dangos konstrukcijų medžiagų savybių rodiklių tyrimai

Atlikus skirtingų gamintojų granito, dolomito ir žvyro skaldos tyrimus, buvo nustatytos plokštumo rodiklio FI ir formos rodiklio SI vertės. Išanalizavus skaldos geometrinių kokybės rodiklių duomenis, gauti šie rezultatai: asfaltbetonio (AB) tinkamumui reikalavimus FI_{20} atitinka 99 %, o aukščiausią viršutinę FI_{15} kategoriją atitinka 95 % visų ištirtų granito ir dolomito skaldos bandinių pagal plokščių grūdelių tyrimų metodą. AB keliamus reikalavimus atitinka 98 % visų skaldos bandinių, ištirtų pagal grūdelių formos rodiklio SI bandymų metodą. Reikalavimų SI_{15} viršutinę leidžiamąją ribą viršija 6 % ištirtų skaldos bandinių: 3% – granito ir 3% – dolomito skaldos bandinių. Šie tyrimų rezultatai buvo gauti atsitiktiniu būdu iš krūvos statybvietyje ir sandėliavimo vietos atrinkus bandinius. Tai rodo, kad Lietuvos kelių tiesyboje naudojama skalda daugiausia atitinka jai keliamus aukščiausius geometrinius kokybės reikalavimus. Išanalizavus skaldos atsparumo trupinimui rodiklio tyrimų duomenis, gauti šie rezultatai: asfaltinei dangai keliamus reikalavimus LA_{20}

atitinka 94 % visų ištirtų granito skaldos bandinių pagal LA metodą, 88 % dolomito skaldos bandinių tyrimo duomenų patenka tarp nustatytų reikalavimų LA_{20} ir LA_{25} , o LA_{30} reikalavimų ribą viršija 33 % visų žvyro skaldos bandinių tyrimo duomenų. Atsitiktinai atrinktų bandinių iš statybvietsės ar sandėliavimo vietos tyrimų rezultatai rodo, kad Lietuvos kelių tiesyboje naudojama granito skalda daugiausia atitinka, o dolomito ir žvyro skalda žvyro skalda daugiausi ne atitinka jai keliamų aukščiausių atsparumo trupinimui reikalavimų. AB dangai keliamus reikalavimus tenkina 81 % visų skaldos bandinių, ištirtų taikant smūginį metodą. Reikalavimų smūginio stiprio SZ_{18} leidžiamąją apatinę ribą viršija 19 % ištirtų granito skaldos bandinių, SZ_{22} leidžiamąją apatinę ribą viršija 49 % dolomito skaldos bandinių. Atsitiktinai atrinktų bandinių tyrimų rezultatai rodo, kad Lietuvos kelių tiesyboje naudojama granito skalda, o dolomito skalda tik puse tirtų bandinių atitinka aukščiausius atsparumo trupinimui keliamus reikalavimus. Tai rodo, kad norint dolomito skaldą naudoti asfaltiniams mišiniams, jos stiprio savybes reiktų ištirti išsamiau arba padidinti kontrolinių tyrimų skaičių.

Visų analizuotų uolienu skaldai apskaičiuotos jos savybių rodiklių statistinės charakteristikos pateiktos 3.3 ir 3.4 lentelėse. Analizuojant ištirtas asfaltiniams mišiniams skirtos skaldos savybes, sudarytos atskirų savybių rodiklių statistinių duomenų imtys. Pagal LST EN 1367-1:2007 bandymo metodą atlikta 10 šaldymo ir atšildymo ciklų, kurių metu temperatūra kito nuo $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-17.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Skaldos atsparumo šaldymui ir atšildymui rodiklio F verčių imtis sudaryta iš 123 individualių duomenų ($n = 123$). Šių rodiklio F verčių duomenys pateikti 3.11 paveiksle.

3.11 pav. Skaldos atsparumo šaldymui ir atšildymui rodiklio vertės
Fig. 3.11. The values of the aggregate resistance to freezing and thawing index

Rodiklio F vertės sugrupuotos pagal uolienų tipus. Analizuojant ir vertinant gautus stambųjų mineralinių medžiagų tyrimų rezultatus, asfaltiniams mišiniams parinktos, pavyzdžiui, F_1 , kai masės nuostoliai $\leq 1\%$. 3.11 paveiksle pateikti atlikto tyrimo (atsparumo šaldymui ir atšildymui) rezultatai, sugrupuoti pagal uolienos tipus (granitas, dolomitas, žvyras), o leidžiamuosius bandinių išbirų masių nuostolius rodo atitinkamų kategorijų ribos (ribinės F_1 ir F_2 vertės), parinktos pagal stambųjų mineralinių medžiagų naudojimą asfaltinės dangos sluoksniuose. Visi ištirtų stambųjų mineralinių medžiagų bandinių atsparumo šaldymui ir atšildymui rezultatai labai aukšti ir 100 % tenkina AB dangai keliamus F_1 ir F_2 reikalavimus. 91 % granito skaldos rezultatų neviršija $1/10 F_1$ (t. y. 0,1 %), o 80 % dolomito skaldos rezultatų neviršija $1/5 F_1$ (t. y. 0,2 %). Visi žvyro skaldos tyrimų rezultatai patenka tarp F_1 ir F_2 ribų.

Gautos mažos statistinių rodiklių vertės rodo, kad atsparumo pakartotiniam šaldymui ir atšildymui bandymų, vertinant jos tinkamumą asfaltiniams mišiniams, nepakanka. Dolomito ir granito skaldos rodiklio F verčių aritmetiniai vidurkiai skiriasi nedaug. Žvyro skaldos bandinių tyrimų duomenų vidutinė vertė yra penkis kartus didesnė už granito ir tris kartus už dolomito aritmetinius vidurkius. Tai rodo, kad žvyro skalda atitinkamai mažiau kartų atspari aplinkos temperatūros poveikiui nei granito ir dolomito skalda.

3.12 paveiksle pateiktos skaldos atsparumo trupinimui rodiklio LA vertės. Ši imtis sudaryta iš 59 individualių duomenų ($n = 59$).

3.12 pav. Skaldos atsparumo trupinimui rodiklio vertės

Fig. 3.12. The values of the aggregate resistance to fragmentation index

3.12 paveiksle rodiklio LA vertės sugrupuotos pagal uolienų tipus. Užpildyti taškai parodo atliekant tolimesnius statistinius skaičiavimus atmetas (dėl akivaizdaus išsiskyrimo) vertes. Tyrimų rezultatai įvertinti pagal atitiktį

kategorijoms. Atitinkamai koeficientai žymimi LA_{20} , LA_{25} , LA_{30} , kur indeksai 20, 25, 30 rodo bandinio nuostolius masės procentais po bandymo, t. y. pavyzdžiui LA_{20} , kai masės nuostoliai ≤ 20 . AB dangos reikalavimus LA_{20} atitinka 94 % visų ištirtų stambiųjų mineralinių medžiagų bandinių pagal LA metodą. 88 % dolomito skaldos bandymo duomenų patenka tarp LA_{20} ir LA_{25} ribų. LA_{30} reikalavimų ribą viršija 33 % visų žvyro skaldos bandinių.

Skaldos atsparumo smūginiam trypiui rodiklio SZ vertės pateiktos 3.13 paveiksle. Šios vertės sugrupuotos pagal uolienu tipus. Atsparumo smūginiam trypiui rodiklio SZ imtį sudaro 238 individualūs duomenys ($n = 238$). Užpildyti taškai parodo tolimesniuose statistiniuose skaičiavimuose atmetas (dėl išsiskyrimo) rodiklio SZ vertes.

3.13 pav. Skaldos atsparumo smūginiam trypiui rodiklio vertės

Fig 3.13. The values of aggregate impact resistance

Skaldos atsparumo trupinimui rodikliai SZ_{18} , SZ_{22} , SZ_{26} , SZ_{32} ir SZ_{35} , kur indeksai 18, 22, 26, 32 arba 35 rodo išbirų masių nuostolius procentais per penkis kontrolinius sietus, pavyzdžiui, SZ_{18} , kai masės nuostoliai ≤ 18 %. Atlikta ištirtos skaldos mechaninių savybių rodiklių verčių statistinė analizė (3.3 ir 3.4 lentelės). Visų trijų tirtų uolienu skaldos atsparumo kartotiniam šaldymui ir atšildymui verčių sklaida buvo nedidelė: pataisytas standartinis nuokrypis kito nuo 0,08 % iki 0,5 %. Granito skaldos tyrimo duomenų standartinis nuokrypis gautas itin nedidelis. Tai rodo skaldos atsparumo aplinkos poveikiui nedidelę bandymo duomenų sklaidą. Granito ir dolomito skaldos tyrimų duomenų vidurkiai neviršija atitinkamai 13 % ir 25 % aukščiausios F_1 kategorijos vertės (F_1 atitinka masės nuostolius iki 1 %). Pagal smūginį metodą, SZ_{18} ribą viršija 27 % tirtų granito skaldos bandinių, SZ_{22} ribą viršija 36 % dolomito skaldos

bandinių, o SZ_{26} ribą viršija 23 % žvyro skaldos bandinių. Dėl mažo verčių įvairumo, t. y. dėl verčių mažos sklaidos arba dėl nepakankamo tyrimų duomenų skaičiaus, atsparumo poliruojamumui ir Devalio rodikliams tolimesni skaičiavimai nebuvo atliekami.

Atlikta skaldos sausųjų grūdelių tankio (SGT) rodiklio ρ_{rd} duomenų statistinė analizė (3.5 lentelė). Didžiausią SGT rodiklio ρ_{rd} verčių aritmetinį vidurkį gavome dolomito skaldai, o mažiausią – žvyro skaldai. Tirtų uolienu skaldos SGT rodiklio ρ_{rd} verčių amplitudės kitimas yra siaurų ribų – 0,05–0,15 Mg/m^3 . Tai rodo nedidelę šio rodiklio verčių sklaidą. Visų trijų uolienu skaldos SGT rodiklio ρ_{rd} verčių standartiniai nuokrypiai yra artimi – tai rodo panašią tirtų rodiklio verčių variaciją. Granito bei dolomito skaldos rodiklių LA ir SZ aritmetinių vidurkių vertės yra artimos. Žvyro skaldos tirtų savybių rodiklių standartinių nuokrypių vertės gautos didžiausios. Tai rodo šios skaldos tirtų fizinių savybių rodiklių verčių didžiausią variaciją.

3.3 lentelė. Granito ir dolomito skaldos mechaninių rodiklių verčių suvestinė

Table 3.3. Summary values of the mechanical indices of crushed granite and dolomite

Statistinis rodiklis	Uoliena									
	granitas					dolomitas				
	savybių rodikliai ir jų vertės									
	F,%	LA	SZ,%	PSV	M _{DE}	F,%	LA	SZ,%	PSV	M _{DE}
$x_{\min.}$	0,5	19	19,7	50	9	1,0	26	26,3	41	16
$x_{\maxs.}$	0,02	1 2	14,8	53	6	0,1	19	18,9	47	14
Amplitudė	0,48	7	4,9	3	3	0,9	7	7,4	6	2
$\overline{x}$	0,13	15,5	17,23	51,4	6,76	0,24	21,1	22,23	44,1	15,71
Standartinis nuokrypis s_x	0,08	2,11	1,13	0,89	0,75	0,13	1,55	1,36	1,58	0,55
Dispersija s_x^2	0,01	4,46	1,27	0,78	0,56	0,02	2,42	1,84	2,49	0,30
Imties asimetrijos koeficientas g_1	12,4	-0,8	0,1	-0,5	2,3	14,1	3,4	0,7	0,8	3,2
Imties eksceso koeficientas g_2	3,3	-0,3	0,001	0,1	1,2	2,8	1,3	0,5	-0,01	-1,9
Individualių duomenų imtis n	47	19	81	15	21	67	21	135	10	21

Visų trijų tirtų uolienų skaldos rodiklio M_{DE} verčių amplitudė yra artima. Tai rodo tirtos rodiklio verčių rezultatų artimą sklaidą visų uolienų skaldai ir galima teigti, kad analizuojamas metodas yra tinkamas tirtos skaldos rodiklio M_{DE} vertėms nustatyti.

3.4 lentelė. Žvyro skaldos mechaninių rodiklių verčių suvestinė

Table 3.4. Summary values of the mechanical indices of crushed gravel

Statistinis rodiklis	Žvyro savybių rodikliai ir jų vertės			
	F	LA	SZ	M_{DE}
1	2	3	4	5
Imties mažiausioji vertė $x_{\min}$	1,5%	35	26,7%	20
Imties didžiausioji vertė $x_{\max}$	0,2%	21	19,1%	14
Amplitudė	1,3%	14	7,6%	6
Imties vidurkis $\bar{x}$	0,7%	27,05	23,47%	17,8
Standartinis nuokrypis s_x	0,478%	3,992	2,189%	1,222
Dispersija s_x^2	0,23(%) ²	15,94	4,79(%) ²	1,49
Imties asimetrijos koeficientas g_1	-1,202	-0,178	-0,655	6,312
Imties eksceso koeficientas g_2	0,708	0,587	-0,599	-1,769
Individualių duomenų imtis n	9	17	18	15

3.5 lentelė. Skaldos sausųjų grūdelių verčių suvestinė

Table 3.5. Summary particles dry density values of the of aggregate

Statistinis rodiklis ir jo matavimo vienetas	Uoliena		
	granitas	dolomitas	žvyras
	sausųjų grūdelių tankio (SGT) ρ_{rd} vertės		
Imties mažiausioji vertė $x_{\min}$, Mg/m ³	2,64	2,63	2,60
Imties didžiausioji vertė $x_{\max}$, Mg/m ³	2,76	2,78	2,65
Amplitudė, Mg/m ³	0,12	0,15	0,05
Imties vidurkis $\bar{x}$, Mg/m ³	2,713	2,723	2,702
Standartinis nuokrypis s_x , Mg/m ³	0,022	0,028	0,023
Dispersija s_x^2 , (Mg/m ³) ²	0,0005	0,0008	0,0005
Imties asimetrijos koeficientas g_1	1,68	1,32	8,43
Imties eksceso koeficientas g_2	-0,94	-0,82	2,45
Individualių duomenų imtis n	65	95	16

Dolomito ir žvyro skaldos rodiklio M_{DE} verčių aritmetiniai vidurkiai skiriasi nedaug – tai parodo dolomito, kaip ir žvyro skaldos, nedidelį atsparumą tiriant bandinius šiuo metodu (mechanškai veikiant uolieną vandenyje). Šių uolienų skaldai atsparumo dėvėjimuisi vandenyje savybių panašumą rodo ir artimi šio rodiklio verčių standartiniai nuokrypiai. Visų trijų tirtų uolienų skaldos šio rodiklio verčių standartiniai nuokrypiai yra nedideli – tai rodo nedidelę duomenų variaciją tiriant bandinius Devalio metodu.

Granito skaldos atsparumo poliruojamumui rodiklio verčių sklaida ir standartiniai nuokrypiai, lyginant su dolomito skaldos analogiškų verčių tais pačiais sklaidos rodikliais skiriasi dvigubai – tai rodo daug didesnę granito skaldos šio kokybės rodiklio pastovumą.

3.6 lentelė. Granito ir dolomito skaldos mechaninių rodiklių verčių suvestinė

Table 3.6. Summary values of the mechanical indices of crushed granite and dolomite

Statistinis rodiklis	Uoliena					
	granitas		dolomitas		Granito, dolomito ir žvyro skaldos mišinys	
	savybių rodikliai ir jų vertės					
	<i>FI</i>	<i>SI</i>	<i>FI</i>	<i>SI</i>	<i>FI</i>	<i>SI</i>
Imties mažiausioji vertė $x_{\min.}, \%$	1	1	1	1	1	1
Imties didžiausioji vertė $x_{maks.}, \%$	21	20	18	21	21	27
Amplitudė, %	20	19	17	20	20	26
Imties vidurkis $\bar{x}, \%$	9,20	8,59	7,14	8,44	7,61	8,44
Standartinis nuokrypis $s_x, \%$	5,12	3,96	3,11	3,80	3,74	3,92
Dispersija $s_x^2, (\%)^2$	25,23	15,66	9,69	14,41	13,96	15,34
Imties asimetrijos koeficientas g_1	0,42	0,63	0,62	0,56	0,85	0,52
Imties eksceso koeficientas g_2	2,36	2,94	3,52	3,04	3,82	2,91
Individualių duomenų imtis n	30	71	102	189	132	273

Analizuoti mineralinių medžiagų fiziniai ir mechaniniai rodikliai skaičiuojant toliau jų tarpusavio ryšius ir analizuoti tinkamumo tyrimų optimizavimo sprendinius.

3.3. Konstrukcinių sluoksnių medžiagų savybių analizė

Siekiant racionalizuoti kelio dangos konstrukcinių sluoksnių medžiagų tinkamumo tyrimus, buvo atlikta statistinė mineralinių medžiagų rodiklių analizė. Svarbiausias skaičiavimų tikslas - rasti koreliacinius ryšius tarp rodiklių ir išanalizuoti jų statistinius parametrus bei duomenų sklaidos rodiklius.

Koreliacinių priklausomybių tarp įvairių uolienu skaldos fizinių ir mechaninių rodiklių verčių nustatymas ir hipotezių apie turimų duomenų normalųjį pasiskirstymą patikra

Pagal TRA MIN 07:2007 „Automobilių kelių mineralinių medžiagų techninių reikalavimų aprašo“ reikalavimus nustatyti skirtingi to paties tipo asfaltinių mišinių leidžiamieji skaldos fiziniai ir mechaniniai rodikliai, todėl reikia patikrinti ir įvertinti tirtos skaldos skirtingų savybių rodiklių koreliacinės priklausomybės. Analizuojamų rodiklių koreliacinės priklausomybės įvertintos pagal koreliacijos koeficientų vertes, pateiktas 3.7 ir 3.7 ir lentelėse. Statistinei patikrai atrinkti tik tie bandiniai, kuriems buvo tirti du ar daugiau skaičiavimams naudoti rodikliai. Koreliaciniai ryšiai vertinti pagal 3.8 lentelėje pateiktas vertes.

3.7 lentelė. Koreliacinių priklausomybių tarp granito skaldos fizinių ir mechaninių rodiklių verčių suvestinė

Table 3.7. Summary values of the correlation dependencies between mechanical and physical indices of crushed granite

Uoliena	Koreliacinės priklausomybės	Koreliacinės priklausomybės pobūdis	Imtis n	Vidurkiai		Dispersija		Regresijos lygtis	Koreliacijos koeficientas r
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Granitas	$r(X_{LA}, X_F)$	Nėra koreliacijos	11	$\bar{X}_{LA} = 14,91$	$\bar{X}_F = 0,16\%$	$S_{LA}^2 = 3,537$	$S_F^2 = 0,02 (\%)^2$	$F = 0,11 + 0,003 LA$	0,07
	$r(X_{LA}, X_{SZ})$	Vidutinė koreliacija	14	$\bar{X}_{LA} = 15,14$	$\bar{X}_{SZ} = 17,17 (\%)$	$S_{LA}^2 = 4,55$	$S_{SZ}^2 = 1,49 (\%)^2$	$SZ = 12,88 + 0,28 LA$	0,50

3.7 lentelės pabaiga
The end of Table 3.7.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Granitas	$r(X_{LA}, X_{\rho_{rd}})$	Nėra koreliacijos	11	$\bar{X}_{LA} = 15,50$	$\bar{X}_{\rho_{rd}} = 2,728$ (Mg/m ³)	$S_{LA}^2 = 9,25$	$S_{\rho_{rd}}^2 = 0,074$ (Mg/m ³) ²	$\rho_{rd} = 2,731 - 0,0002 LA$	0,01
	$r(X_{LA}, X_{\rho_{rd}})$	Nėra koreliacijos	11	$\bar{X}_{LA} = 15,50$	$\bar{X}_{\rho_{rd}} = 2,728$ (Mg/m ³)	$S_{LA}^2 = 9,25$	$S_{\rho_{rd}}^2 = 0,074$ (Mg/m ³) ²	$\rho_{rd} = 2,731 - 0,0002 LA$	0,01
	$r(X_{SZ}, X_F)$	Labai silpna koreliacija	25	$\bar{X}_{SZ} = 17,00$ (%)	$\bar{X}_F = 0,15$ %	$S_{SZ}^2 = 2,285$ (%) ²	$S_F^2 = 0,010$ (%) ²	$F = -0,037 + 0,011 SZ$	0,17
	$r(X_{SZ}, X_{\rho_{rd}})$	Vidutinė koreliacija	66	$\bar{X}_{SZ} = 17,31$ (%)	$\bar{X}_{\rho_{rd}} = 2,718$ (Mg/m ³)	$S_{SZ}^2 = 2,23$ (%) ²	$S_{\rho_{rd}}^2 = 0,001$ (Mg/m ³) ²	$\rho_{rd} = 2,92 - 0,011 SZ$	0,46
	$r(X_{\rho_{rd}}, X_F)$	Silpna koreliacija	26	$\bar{X}_{\rho_{rd}} = 2,722$ (Mg/m ³)	$\bar{X}_F = 0,15$ %	$S_{\rho_{rd}}^2 = 0,003$ (Mg/m ³) ²	$S_F^2 = 0,01$ (%) ²	$F = 0,96 - 0,3 \rho_{rd}$	0,15

3.8 lentelė. Koreliacijos įverčių vertinimo lentelė (Čekanavičius, Murauskas 2004)
Table 3.8. Evaluation of the correlation values (Čekanavičius, Murauskas 2004)

Koreliacijos koeficiento vertės	Koreliacinė priklausomybės pobūdis
0,00–0,19	Labai silpna priklausomybė arba jos nėra visai
0,20–0,39	Silpna priklausomybė
0,40–0,69	Vidutinė priklausomybė
0,70–0,89	Stipri priklausomybė
0,90–1,00	Labai stipri priklausomybė

Nustatėme granito ir dolomito skaldos fizinių ir mechaninių rodiklių koreliacijos priklausomybės tarp rodiklių: LA ir SZ ; LA ir tankio ρ_{rd} ; LA ir F ; SZ ir tankio ρ_{rd} ; rodiklių SZ ir F ; tankio ρ_{rd} ir rodiklio F . Lietuvoje asfaltiniams mišiniam dažniausiai naudojama granito ir dolomito skalda. Dėl analizuojamų rodiklių verčių stygiaus statistiniai apskaičiavimai buvo atlikti ne visiems rodikliams. Koreliacijos priklausomybės buvo nustatytos tik tarp rodiklių LA ir SZ ; LA ir tankio ρ_{rd} ; rodiklio SZ ir tankio ρ_{rd} .

Statistinių rodiklių indeksai nurodo tą skaldos uolieną, kurios kokybės rodiklis analizuojamas. Hipotezės, kad analizuojamų rodiklių dažniai histogramose pasiskirstę pagal normalųjį skirstinį, buvo tikrinamos priimant reikšmingumo lygmenį $\alpha = 0,05$.

3.9 lentelė. Koreliacinių priklausomybių tarp žvyro ir dolomito skaldos fizinių ir mechaninių rodiklių verčių suvestinė

Table 3.9. Summary values of the correlation dependencies between mechanical and physical indices of crushed gravel and crushed dolomite

Uoliena	Korelia- cinės priklauso- mybės	Korelia- cinės priklauso- mybės pobūdis	Imtis n	Vidurkiai		Dispersija		Regresi- jos lygtis	Korelia- cijos koefici- entas r
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dolomitas	$r(X_{LA}, X_F)$	Labai silpna koreliacija	12	$\bar{X}_{LA} = 21,0$	$\bar{X}_F = 0,31\%$	$S_{LA}^2 = 1,58$	$S_F^2 = 0,01\%^2$	$F = -0,0067 + 0,015 \cdot LA$	0,16
	$r(X_{LA}, X_{SZ})$	Stipri koreliacija	16	$\bar{X}_{LA} = 20,8$	$\bar{X}_{SZ} = 21,4\%$	$S_{LA}^2 = 1,44$	$S_{SZ}^2 = 1,55\%^2$	$SZ = 6,39 + 0,72 \cdot LA$	0,70
	$r(X_{LA}, X_{\rho_{rd}})$	Vidutinė koreliacija	16	$\bar{X}_{LA} = 20,2$	$\bar{X}_{\rho_{rd}} = 2,73 \text{ Mg/m}^3$	$S_{LA}^2 = 5,59$	$S_{\rho_{rd}}^2 = 0,002 \text{ (Mg/m}^3)^2$	$LA = 68,26 - 17,38 \cdot \rho_{rd}$	0,47
	$r(X_{SZ}, X_F)$	Silpna koreliacija	38	$\bar{X}_{SZ} = 22\%$	$\bar{X}_F = 0,25\%$	$S_{SZ}^2 = 1,18\%^2$	$S_F^2 = 0,028\%^2$	$F = -0,47 + 0,033 \cdot SZ$	0,26

3.9 lentelės pabaiga
The end of Table 3.9.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dolomitas	$r(X_{SZ}, X_{\rho_{rd}})$	Nėra koreliacijų	94	$\overline{X}_{SZ} = 22,3\%$	$\overline{X}_{\rho_{rd}} = 2,72 \text{ Mg/m}^3$	$S_{SZ}^2 = 2,12\%^2$	$S_{\rho_{rd}}^2 = 0,001 \text{ (Mg/m}^3)^2$	$SZ = 31,12 - 3,83 \cdot \rho_{rd}$	0,06
	$r(X_{\rho_{rd}}, X_F)$	Silpna koreliacija	37	$\overline{X}_{\rho_{rd}} = 2,73 \text{ Mg/m}^3$	$\overline{X}_F = 0,25\%$	$S_{\rho_{rd}}^2 = 0,001 \text{ (Mg/m}^3)^2$	$S_F^2 = 0,010\%^2$	$F = 4,39 - 1,52 \cdot \rho_{rd}$	0,24
Žvyras	$r(X_{LA}, X_{SZ})$	Stipri koreliacija	10	$\overline{X}_{LA} = 25,5$	$\overline{X}_{SZ} = 23,07\%$	$S_{LA}^2 = 8,65$	$S_{SZ}^2 = 4,89\%^2$	$SZ = 7,018 + 0,63 \cdot LA$	0,84
	$r(X_{LA}, X_{\rho_{rd}})$	Silpna koreliacija	10	$\overline{X}_{LA} = 25,5$	$\overline{X}_{\rho_{rd}} = 2,7 \text{ Mg/m}^3$	$S_{LA}^2 = 8,65$	$S_{\rho_{rd}}^2 = 0,001 \text{ (Mg/m}^3)^2$	$LA = 201,5 - 2,65 \cdot \rho_{rd}$	0,18
	$r(X_{SZ}, X_{\rho_{rd}})$	Silpna koreliacija	16	$\overline{X}_{SZ} = 23,20\%$	$\overline{X}_{\rho_{rd}} = 2,7 \text{ (Mg/m}^3)$	$S_{SZ}^2 = 4,59\%^2$	$S_{\rho_{rd}}^2 = 0,001 \text{ (Mg/m}^3)^2$	$SZ = -52 + 27,83 \cdot \rho_{rd}$	0,30

Hipotezės apie dažnių normalųjį pasiskirstymą buvo tikrinamos tik tų rodiklių, kurių dažniai buvo išsidėstę normaliojo skirstinio tendencija. Jeigu braižant histogramą kreivė įgauna apytiksliai simetrišką varpo formą, keliama hipotezė, kad duomenys pasiskirstę normaliai, dažniausiai pasitvirtina. Kuo daugiau veiksnių turi įtakos rodiklio vertei, tuo didesnė tikimybė, kad rodiklio duomenys bus pasiskirstę pagal normalųjį skirstinį.

Koreliacinių priklausomybių tarp granito skaldos kokybės rodiklių verčių apskaičiavimas ir hipotezių apie duomenų normalųjį pasiskirstymą patikra

Koreliacinei priklausomybei tarp rodiklių LA ir SZ verčių apskaičiuoti atrinkta 16 granito skaldos bandinių ($n = 16$). Atlikę granito skaldos bandinių atsparumo trupinimui LA ir smūginio trupio SZ rodiklių verčių statistinius skaičiavimus, gavome rodiklių LA ir SZ koreliacijos koeficientą $r = 0,37$, regresijos lygtį $SZ = 14,12 + 0,18LA$, analizuotų verčių vidurkius $\overline{X}_{LA} = 15,69$ ir

$\bar{X}_{SZ} = 16,98 \%$, verčių dispersijas $S_{LA}^2 = 8,59$ ir $S_{SZ}^2 = 2,13 (\%)^2$. Kadangi rodiklio LA vertė LA_{24} labai skyrėsi nuo likusių verčių, ją atmetėme. Dėl tos pačios priežasties atmetėme ir rodiklio SZ vertę $SZ_{13,5}$. Toliau skaičiuodami naudojome imtis be šių verčių. Atmetę minėtas rodiklių LA ir SZ vertes, gavome šiuos rezultatus: koreliacijos koeficientą $R = 0,4952$, regresijos lygtį $SZ = 12,89 + 0,28LA$, analizuotų verčių vidurkius $\bar{X}_{LA} = 15,14$ ir $\bar{X}_{SZ} = 17,17 \%$ ir verčių dispersijas $S_{LA}^2 = 4,55$ ir $S_{SZ}^2 = 1,49 (\%)^2$. Pagal 3.8 lentelėje pateiktas koreliacijos koeficientų vertes, priklausomybę tarp rodiklių LA ir SZ verčių vertiname kaip vidutinę.

Atlikę granito skaldos bandinių atsparumo trupinimui rodiklio LA ir tankio ρ_{rd} verčių statistinius skaičiavimus, gavome rodiklio LA ir tankio ρ_{rd} verčių koreliacinę priklausomybę, išreikštą koreliacijos koeficientu $r = -0,0075$, regresijos lygtį $\rho_{rd} = 2,73 - 0,0002LA$, analizuotų verčių vidurkius $\bar{X}_{LA} = 15,50$ ir $\bar{X}_{\rho_{rd}} = 2,728 \text{ Mg/m}^3$ ir dispersijas $S_{LA}^2 = 9,25$ ir $S_{\rho_{rd}}^2 = 0,074 (\text{Mg/m}^3)^2$. Esant tokiam mažam koreliacijos koeficientui, galima teigti, kad koreliacinės priklausomybės tarp rodiklių LA ir ρ_{rd} praktiškai nėra.

Atlikę granito skaldos bandinių atsparumo trupinimui rodiklio LA ir atsparumo šaldymui ir atšildymui rodiklio F verčių statistinius skaičiavimus, gavome koreliacinę priklausomybę tarp rodiklių LA ir F , išreikštą koreliacijos koeficientu $r = 0,067$ ir regresijos lygtį $F = 0,11 + 0,003LA$. Gavę artimą nuliui koreliacijos koeficientą, galime teigti, kad priklausomybės, tarp analizuotų rodiklių verčių praktiškai nėra.

Atlikę granito skaldos bandinių smūginio trupio rodiklio SZ ir sausųjų grūdelių tankio (SGT) rodiklio ρ_{rd} verčių statistinius apskaičiavimus, gavome koreliacinę priklausomybę tarp rodiklio SZ ir rodiklio ρ_{rd} verčių, išreikštą koreliacijos koeficientu $r = -0,46$, regresijos lygtį $\rho_{rd} = 2,92 - 0,011SZ$, analizuotų verčių vidurkius $\bar{X}_{SZ} = 17,32 \%$ ir $\bar{X}_{\rho_{rd}} = 2,718 \text{ Mg/m}^3$ ir dispersijas $S_{SZ}^2 = 2,23 (\%)^2$ ir $S_{\rho}^2 = 0,0013 (\text{Mg/m}^3)^2$. Koreliacijos koeficiento vertė $r = -0,46$ rodo vidutinio stiprio atvirkštinę priklausomybę tarp rodiklių SZ ir ρ_{rd} verčių.

Atlikę granito skaldos bandinių smūginio trupio rodiklio SZ ir atsparumo šaldymui ir atšildymui rodiklio F verčių statistinius apskaičiavimus, gavome koreliacinę priklausomybę tarp rodiklių SZ ir F verčių, išreikštą koreliacijos koeficientu $r = 0,17$, regresijos lygtį $F = -0,037 + 0,011SZ$, analizuotų verčių vidurkius $\bar{X}_{SZ} = 17,0037 \%$ ir $\bar{X}_F = 0,15 \%$ ir dispersijas $S_{SZ}^2 = 2,29 (\%)^2$ ir $S_F^2 = 0,0097 (\%)^2$. Apskaičiuota rodiklių SZ ir F koreliacijos koeficiento vertė rodo labai silpną analizuojamų rodiklių verčių tarpusavio priklausomybę. Atsparumo smūginiam trapiui rodiklio SZ verčių dažnių pasiskirstymo

histogramą nubraižėme atmetę akivaizdžiai išsiskiriančias vertes (13,5, 21,4, 21,5), gavome $\bar{X}_{SZ} = 17,24 \%$, $S_{SZ}^2 = 1,12 (\%)^2$. Granito skaldos atsparumo trupinimui smūginio metodu rodiklio SZ verčių histograma pateikta 3.14 paveiksle.

3.14 pav. Granito skaldos atsparumo trupinimui rodiklio verčių histograma ir skirstinio funkcija

Fig 3.14. Histogram of values and distribution function of the resistance to fragmentation index of crushed granite

Histogramą nubraižėme atvejui, kai intervalų pločiai vienodi, analizuojama imtis $n = 81$, intervalo ilgį h nustatėme pagal (3.10) formulę: $h = 0,98$, intervalų skaičius k pasirinktas 7:

$$h = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{k}, \quad (3.10)$$

čia $x_{\max}$ – didžiausioji rodiklio vertė, $x_{\min}$ – mažiausioji rodiklio vertė.

Kadangi granito skaldos kokybės rodiklio SZ verčių dažnių histograma gali būti artima normaliajam skirstiniui, tikrinama hipotezė, ar granito skaldos smūginio stiprio tyrimų duomenys pasiskirstę pagal normalųjį skirstinį. Kadangi pagal (3.10) formulę gavome, kad $T_{stat}^2 = 7,774 > T_{krit}^2 = 5,991$, tai hipotezė buvo atmesta. Skaičiavimų suvestinė pateikta 3.10 lentelėje.

Atlikę granito skaldos bandinių tankio ρ_{rd} ir atsparumo šaldymui ir atšildymui rodiklio F verčių statistinius apskaičiavimus, gavome koreliacinę priklausomybę tarp rodiklių ρ_{rd} ir F verčių, išreikštą koreliacijos koeficientu $r = -0,15$ ir regresijos lygtį $F = 0,96 - 0,3\rho_{rd}$. Kadangi apskaičiuotas koreliacijos koeficientas r nesiekia vertės $r = 0,19$, galima teigti, kad šių rodiklių tarpusavio priklausomybė labai silpna.

Tikrinama hipotezė, kad granito skaldos SGT rodiklio ρ_{rd} matavimų rezultatai pasiskirstę pagal normalųjį skirstinį.

3.10 lentelė. Hipotezių apie turimų duomenų normalųjį pasiskirstymą verčių suvestinė
Table 3.10. Summary values of the hypotheses on the normal distribution of data available

Uoliena	Rodiklis	Imtis n	Intervalų skaičius k	Aritmetinis vidurkis	Dispersija	Statistinė vertė T_{stat}^2	Kritinė vertė T_{krit}^2	Statusas dėl normaliojo pasiskirstymo
Granitas	SZ, %	81	7	$\bar{X}_{SZ} = 17,24$	$S_{SZ}^2 = 1,12$	7,77	5,99	atmestas
	ρ_{rd} , Mg/m ³	67	7	$\bar{X}_{\rho_{rd}} = 2,713$	$S_{\rho_{rd}}^2 = 0,001$	4,11	5,99	Ne atmestas
Dolomitas	SZ, %	135	7	$\bar{X}_{SZ} = 22,61$	$S_{SZ}^2 = 3,58$	37,91	5,99	atmestas
	ρ_{rd} , Mg/m ³	93	7	$\bar{X}_{\rho_{rd}} = 2,722$	$S_{\rho_{rd}}^2 = 0,001$	9,96	5,99	atmestas

Granito skaldos SGT rodiklio ρ_{rd} histograma ir skirstinio funkcija pateikta 3.15 paveiksle.

3.15 pav. Granito skaldos (fr. 8/12,5 mm) sausųjų grūdelių tankio histograma ir skirstinio funkcija

Fig 3.15. Histogram and distribution function of the dry density of crushed granite grains (fraction 8/12,5)

Atlikę statistinius skaičiavimus, atmetus stipriai išsiskiriančius tankio rezultatus ($2,86 \text{ Mg/m}^3$ ir $2,91 \text{ Mg/m}^3$), gavome $\bar{X}_{\rho_{rd}} = 2,713 \text{ Mg/m}^3$ ir $S_{\rho}^2 = 0,022 (\text{Mg/m}^3)^2$. Kadangi $T_{stat}^2 = 4,110 < T_{krit}^2 = 5,991$, hipotezės, kad granito skaldos tankio histograma pasiskirsčiusi pagal normalųjį skirstinį, atmesti nėra pagrindo.

Koreliacinių priklausomybių tarp dolomito skaldos kokybės rodiklių LA ir SZ vertėms apskaičiuoti buvo atrinkta 16 bandinių ($n = 16$). Šioje imtyje atmetas išsiskiriantis įvertis $X_{LA} = 12$. Jis nebuvo įtrauktas į vėliau analizuotas imtis. Atlikę dolomito skaldos bandinių atsparumo trupinimui rodiklio LA ir smūginio trupio rodiklio SZ verčių statistinius skaičiavimus, gavome koreliacinę priklausomybę tarp rodiklių LA ir SZ verčių, išreikštą koreliacijos koeficientu $r = 0,7$, regresijos lygtį $SZ = 6,39 + 0,72LA$, analizuotų verčių vidurkius $\bar{X}_{LA} = 20,75$ ir $\bar{X}_{SZ} = 21,42 \%$ ir imčių dispersijas $S_{LA}^2 = 1,44$, ir $S_{SZ}^2 = 1,55 (\%)^2$.

Apskaičiuojant koreliacinę priklausomybę tarp dolomito skaldos kokybės rodiklių, LA ir ρ_{rd} verčių, atrinkta 16 bandinių ($n = 16$) imtis. Apskaičiavę gavome koreliacijos koeficientą $r = -0,47$ ir regresijos lygtį $LA = 68,26 - 17,38\rho_{rd}$. Esant tokiam koreliacijos koeficientui, galima teigti, kad priklausomybė tarp dolomito skaldos kokybės rodiklių, LA ir ρ_{rd} verčių yra vidutinė.

Atlikę dolomito skaldos kokybės rodiklių, LA ir F verčių statistinius apskaičiavimus, gavome koreliacinę priklausomybę tarp rodiklių LA ir F verčių, išreikštą koreliacijos koeficientu $r = 0,16$ ir regresijos lygtį $F = -0,0067 + 0,015LA$. Esant tokiam mažam koreliacijos koeficientui, galima teigti, kad tarp analizuotų rodiklių verčių priklausomybė labai silpna.

Koreliacinei priklausomybei tarp dolomito skaldos kokybės rodiklių SZ ir ρ_{rd} verčių apskaičiuoti buvo atrinkta 94 ėminių imtis. Atlikę statistinius skaičiavimus, gavome šiuos rezultatus: koreliacijos koeficientą $r = -0,0622$, regresijos lygtį $SZ = 31,12 - 3,83\rho_{rd}$, analizuotų verčių vidurkius $\bar{X}_{SZ} = 22,3160 \%$ ir $\bar{X}_{\rho_{rd}} = 2,722 \text{ Mg/m}^3$ bei dispersijas $S_{SZ}^2 = 2,15 (\%)^2$ ir $S_{\rho_{rd}}^2 = 0,0008 (\text{Mg/m}^3)^2$. Kai koreliacijos koeficientas artimas nuliui, galima teigti, kad priklausomybės tarp šių dviejų kokybės rodiklių verčių praktiškai nėra.

Dolomito skaldos bandinių smūginio trupio rodiklio SZ verčių ir jos atsparumo šaldymui ir atšildymui rodiklio F verčių statistinius skaičiavimus atlikome kai imtis $n = 38$. Gavome koreliacinę priklausomybę tarp rodiklių SZ ir F verčių, išreikštą koreliacijos koeficientu $r = 0,26$, ir regresijos lygtį $F = -0,47 + 0,033SZ$. Remiantis apskaičiuotais statistiniais rodikliais galima teigti, kad priklausomybė tarp dolomito skaldos kokybės rodiklių SZ ir F verčių yra silpna.

Atlikę dolomito skaldos bandinių SGT rodiklio ρ_{rd} ir atsparumo šaldymui ir atšildymui rodiklio F verčių statistinius apskaičiavimus, gavome koreliacinę priklausomybę tarp rodiklių ρ_{rd} ir F verčių, išreikštą koreliacijos koeficientu $r=-0,24$, ir regresijos lygtį $F=4,39-1,52\rho_{rd}$. Imtis šiai statistinei analizei atlikti buvo sudaryta iš 37 verčių. Gautas koreliacijos koeficientas rodo silpną priklausomybę tarp tankio rodiklių ρ_{rd} ir F verčių.

Atsparumo smūginiam trypiui rodiklio SZ verčių dažnių pasiskirstymo histogramą nubraižėme imčiai, kurios $n=135$, o intervalų ilgis $h=1,48$. Tikrinta hipotezė, ar dolomito skaldos smūginio stiprio tyrimų rezultatai pasiskirstę pagal normalųjį skirstinį. Šios imties vidurkis $\bar{X}_{SZ}=22,61\%$, o imties dispersija $S_{SZ}^2=3,58(\%)^2$. Kadangi gavome, kad $T_{stat}^2=37,914 > T_{krit}^2=5,991$, tai ši hipotezė buvo atmesta. Dolomito skaldos atsparumo trypinimui smūginio metodu rodiklio SZ verčių histograma pateikta 3.16 paveiksle.

3.16 pav. Dolomito skaldos atsparumo trypinimui rodiklio verčių histograma ir skirstinio funkcija

Fig 3.16. Histogram of values and distribution function of the resistance to fragmentation index of crushed dolomite

Tikrinta hipotezė, kad dolomito skaldos SGT rodiklio ρ_{rd} dažnių matavimo rezultatai pasiskirstę pagal normalųjį skirstinį 3.17 (pav).

Analizuota imtis $n=93$, o intervalo ilgis $h=0,03$. Gavome $\bar{X}_{\rho_{rd}}=2,722 \text{ Mg/m}^3$ ir $S_{\rho_{rd}}^2=0,0008 (\text{Mg/m}^3)^2$. Kadangi $T_{stat}^2=9,959 > T_{krit}^2=5,991$, tai hipotezė, kad dolomito skaldos SGT rodiklio ρ_{rd} tyrimo duomenys pasiskirstę pagal normalųjį skirstinį, buvo atmesta.

3.17 pav. Dolomito skaldos sausųjų grūdelių tankio rodiklio histograma ir skirstinio funkcija

Fig. 3.17. Histogram and distribution function of the dry density index of crushed dolomite

Koreliacinių priklausomybių tarp žvyro skaldos kokybės rodiklių LA ir SZ vertėms apskaičiuoti buvo atrinkta 10 bandinių ($n = 10$) Atlikę žvyro skaldos bandinių atsparumo trupinimui rodiklio LA verčių ir smūginio trupio rodiklio SZ verčių statistinius apskaičiavimus, gavome koreliacinę priklausomybę tarp rodiklių LA ir SZ verčių, išreikštą koreliacijos koeficientu $R = 0,84$, regresijos lygtį $SZ = 7,02 + 0,63LA$, analizuotų verčių vidurkius $\bar{X}_{LA} = 25,5$ ir $\bar{X}_{SZ} = 23,07$ %, dispersijas $S_{LA}^2 = 8,65$ bei $S_{SZ}^2 = 4,89$ (%)². Pagal 3.8 lentelėje pateiktus koreliacijos koeficientų įverčius, nustatėme, kad koreliacinę priklausomybę tarp rodiklių LA ir SZ verčių žvyro skaldai yra stipri.

Apskaičiuojant koreliacinę priklausomybę tarp žvyro skaldos bandinių atsparumo trupinimui rodiklio LA ir SGT rodiklio ρ_{rd} verčių, atrinkta 10 bandinių imtis. Gavome koreliacinę priklausomybę tarp žvyro skaldos rodiklių, LA ir ρ_{rd} verčių, išreiktą koreliacijos koeficientu $r = -0,18$, regresijos lygtį $LA = 201,52 - 65,22\rho_{rd}$, analizuotų verčių vidurkius $\bar{X}_{LA} = 25,5$ ir $\bar{X}_{\rho_{rd}} = 2,699$ Mg/m³ ir dispersijas $S_{LA}^2 = 8,65$ bei $S_{\rho_{rd}}^2 = 0,000069$ (Mg/m³)². Koreliacinę priklausomybę tarp rodiklių LA ir ρ_{rd} verčių žvyro skaldai yra labai silpna.

Apskaičiuojant koreliacinę priklausomybę tarp žvyro skaldos smūginio trupio rodiklio SZ verčių ir jos SGT rodiklio ρ_{rd} verčių, sudaryta 16 bandymų duomenų imtis ($n = 16$). Atlikę bandymą, gavome koreliacinę priklausomybę, išreikštą koreliacijos koeficientu $r = -0,3$, regresijos lygtį $SZ = -52 + 27,83\rho_{rd}$ ir

analizuotų verčių vidurkius $\overline{X}_{SZ} = 23,2 \%$ ir $\overline{X}_{\rho_{rd}} = 2,702 \text{ Mg/m}^3$, imčių dispersijas $S_{SZ}^2 = 4,59 (\%)^2$ ir $S_{\rho_{rd}}^2 = 0,0005 (\text{Mg/m}^3)^2$. Nustatėme, kad tarp rodiklių SZ ir ρ_{rd} verčių koreliacinė priklausomybė yra silpna.

Pagal TRA MIN 07:2007 „Automobilių kelių mineralinių medžiagų techninių reikalavimų aprašo“ reikalavimus nustatyti skirtingi to paties tipo asfaltinių mišinių skaldos geometriniai rodikliai, todėl turi būti patikrintos ir įvertintos tirtos skaldos plokštumo rodiklio FI ir formos rodiklio SI koreliacinės priklausomybės. Taip pat patikrintos skaldos geometrinių rodiklių koreliacinės priklausomybės su fiziniais kokybės (LA ir SZ) rodikliais. Analizuojamų rodiklių koreliacinės priklausomybės vertintos pagal koreliacijos koeficientus, pateiktus 3.9 lentelėje.

Kadangi Lietuvoje asfaltiniams mišiniams dažniausiai naudojama granito ir dolomito skalda, todėl nagrinėjamų kokybės rodiklių statistiniai skaičiavimai atlikti šių uolienų skaldai.

Kai nagrinėjamų rodiklių imtis $n < 10$, statistiniai skaičiavimai gaunami su labai didele paklaida. Todėl neatlikome šių tolesnių statistinių skaičiavimų: granito skaldos koreliacinių priklausomybių tarp plokštumo rodiklio FI ir smūginio trupio SZ , formos rodiklio SI ir atsparumo trupinimui koeficiento LA bei plokštumo rodiklio FI ir atsparumo trupinimui koeficiento LA . Taip pat buvo skaičiuota koreliacinė granito skaldos rodiklių SZ , SI ir sausųjų dalelių tankio ρ_{rd} matrica, tačiau koreliacijos koeficientas tarp SI ir ρ_{rd} verčių buvo gautas $R = -0,032$. Kadangi koreliacijos koeficientas artimas nuliui, tai tolesnių šios matricos skaičiavimas netenka prasmės.

Nustatant skaldos plokštumo rodiklio FI ir formos rodiklio SI koreliacinę priklausomybę, rezultatai pagal uolieną skirstomi nebuvo, nes šiuo atveju analizuojamas tik geometrinių skaldos parametras. Nustatėme granito skaldos fizinių, mechaninių ir geometrinių rodiklių koreliacijos priklausomybes tarp rodiklių SI ir SZ verčių, bei dolomito skaldos fizinių, mechaninių ir geometrinių rodiklių koreliacijos priklausomybes tarp rodiklių: SI ir SZ ; FI ir SZ ; SI ir LA ; FI ir LA verčių.

Koreliacinei priklausomybei tarp rodiklių FI ir SI verčių skaičiuoti buvo atrinkta 134 skirtingos uolienos (granito, dolomito žvyro) skaldos bandinių ($n = 134$). Atlikę skaldos bandinių plokštumo rodiklio FI ir formos rodiklio SI verčių statistinius skaičiavimus, gavome rodiklių FI ir SI koreliacijos koeficientą $r = 0,74$, regresijos lygtį $SI = 2,71 + 0,6FI$, analizuotų verčių vidurkius $\overline{X}_{FI} = 7,49 \%$ ir $\overline{X}_{SI} = 8,015 \%$, verčių dispersijas $S_{FI}^2 = 13,41 (\%)^2$ ir $S_{SI}^2 = 20,58 (\%)^2$. Pagal 3.7 lentelėje pateiktas koreliacijos koeficientų vertes, priklausomybę tarp rodiklių FI ir SI verčių vertiname kaip stiprią.

Koreliacinei priklausomybei tarp rodiklių *SI* ir *SZ* verčių apskaičiuoti buvo atrinktas 51 granito skaldos bandinys ($n = 51$). Atlikę granito skaldos bandinių formos rodiklio *SI* ir smūginio trupio rodiklio *SZ* verčių statistinius skaičiavimus gavome, analizuotų verčių vidurkius $\bar{X}_{SI} = 10,13 \%$ ir $\bar{X}_{SZ} = 22,12 \%$, dispersijas $S_{SI}^2 = 14,16 (\%)^2$ bei $S_{SZ}^2 = 1,95 (\%)^2$. Esant tokiam mažam koreliacijos koeficientui, galima teigti, kad koreliacinės priklausomybės tarp rodiklių *SI* ir *SZ* praktiškai nėra.

Koreliacinės priklausomybės tarp rodiklių *FI* ir *SZ* vertėms apskaičiuoti buvo atrinkta 17 dolomito skaldos bandinių ($n = 17$). Atlikę dolomito skaldos bandinių plokštumo rodiklio *FI* ir smūginio trupio rodiklio *SZ* verčių statistinius skaičiavimus, gavome plokštumo rodiklio *FI* ir smūginio trupio rodiklio *SZ* koreliacinę priklausomybę, išreikštą koreliacijos koeficientu $r = 0,57$, regresijos lygtį $FI = 18,96 + 0,35SZ$, analizuotų verčių vidurkius $\bar{X}_{FI} = 8,12 \%$ ir $\bar{X}_{SZ} = 21,78 \%$, ir dispersijas $S_{FI}^2 = 5,87 (\%)^2$ bei $S_{SZ}^2 = 2,19 (\%)^2$. Esant koreliacijos koeficientui $r = 0,57$, pagal 3.9 lentelėje pateiktas koreliacijos koeficientų vertes, priklausomybę tarp rodiklių *FI* ir *SZ* verčių vertiname kaip vidutinę.

Koreliacinės priklausomybės tarp formos rodiklio *SI* ir atsparumo trupinimui rodiklio *LA* verčių skaičiavimus buvo atrinkta 20 dolomito skaldos bandinių ($n = 20$). Atlikę dolomito skaldos bandinių formos rodiklio *SI* ir atsparumo trupinimui rodiklio *LA* verčių statistinius apskaičiavimus, gavome formos rodiklio *SI* ir atsparumo trupinimui rodiklio *LA* koreliacinę priklausomybę, išreikštą koreliacijos koeficientu $r = 0,62$, regresijos lygtį $SI = 19,25 + 0,35LA$. Kadangi rodiklių *SI* ir *LA* vertės (2; 22) ir (3; 23) labai skyrėsi nuo likusių verčių, šias skaldos bandinių vertes atmetėme. Toliau skaičiuoti naudojome imtį be šių verčių. Atmetę minėtas rodiklių *SI* ir *LA* vertes, gavome šiuos rezultatus: koreliacijos koeficientą $r = 0,76$, regresijos lygtį $SI = 17,98 + 0,47LA$, analizuotų verčių vidurkius $\bar{X}_{SI} = 7,94 \%$ ir $\bar{X}_{LA} = 21,72$ ir verčių dispersijas $S_{SI}^2 = 11,28 (\%)^2$ ir $S_{LA}^2 = 4,31$. Pagal 3.8 lentelėje pateiktas koreliacijos koeficientų vertes, priklausomybę tarp rodiklių *SI* ir *LA* verčių vertiname kaip stiprią.

Koreliacinės priklausomybės tarp plokštumo rodiklio *FI* ir atsparumo trupinimui rodiklio *LA* vertėms apskaičiuoti buvo atrinkta 18 dolomito skaldos bandinių ($n = 18$). Atlikę dolomito skaldos bandinių plokštumo rodiklio *FI* ir atsparumo trupinimui rodiklio *LA* verčių statistinius skaičiavimus, gavome plokštumo rodiklio *FI* ir atsparumo trupinimui rodiklio *LA* koreliacinę priklausomybę, išreikštą koreliacijos koeficientu $r = 0,64$, regresijos lygtį $FI = 18,29 + 0,42LA$. Kadangi rodiklių *FI* ir *LA* vertės (2; 22) labai skyrėsi nuo likusių verčių, šio skaldos bandinio vertes atmetėme. Toliau skaičiuodami naudojome imtį be šių verčių. Atmetę minėtas rodiklių *FI* ir *LA* vertes, gavome

šiuos rezultatus: koreliacijos koeficientą $r = 0,74$, regresijos lygtį $FI = 17,14 + 0,55LA$, analizuotų verčių vidurkių $\bar{X}_{FI} = 8,12\%$ ir $\bar{X}_{LA} = 21,54$ ir verčių dispersijas $S_{FI}^2 = 8,46 (\%)^2$ ir $S_{LA}^2 = 4,71$.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Bandymų ruožai automobilių kelių asfaltbetoninės dangos ir kelių dangos konstrukcijų sluoksnių kokybės rodikliams nustatyti turi būti parinkti taip, kad kiekviename iš šių ruožų kelių dangos konstrukcijų parametrai būtų kiek galima vienesni.
2. Lietuvos magistraliniuose keliuose asfaltinėje dangoje dažniausiai dominuoja šie defektai: dangos suirtis dėl staigaus atšalimo (temperatūros plyšiai), plastinės liekamosios deformacijos (provėžos), dangos suirtis veikiant transporto priemonių apkrovoms dėl kelių dangos konstrukcijų nuovargio (nuovargio plyšiai), dangos erozija dėl temperatūros kaitos, jai (temperatūrai) labai dažnai (iki 80 ir daugiau kartų šaltojo sezono metu) pereinant iš teigiamosios į neigiamąją ir iš neigiamosios į teigiamąją.
3. Išanalizavus kelių dangos konstrukcijų sluoksnių medžiagų fizinių ir geometrinių rodiklių tyrimų rezultatus, nustatyta, kad Lietuvoje naudojamų mineralinių medžiagų geometrinės savybės atitinka aukštus norminių dokumentų keliamus reikalavimus šių medžiagų kokybei. Išanalizavus šių medžiagų mechaninių (atsparumo smūgiams ir trupinimui) rodiklių faktines vertes, nustatyta, kad labai dažnai (net iki 50 % atvejų) šie rodikliai neatitinka Lietuvoje galiojančių norminių dokumentų reikalavimų, todėl šių rodiklių neatitiktis reikalavimams turi labai didelę neigiamą įtaką kelių dangos konstrukcijų stipriui (kelių dangos konstrukcijų stipris sumažėja).
4. Visų analizuotų geometrinių skaldos kokybės rodiklių imties asimetrijos koeficientai yra mažesni negu 0. tai rodo imties verčių empirinio skirstinio dešinįjį asimetrijos atvejį. Granito ir dolomito skaldos bandinių imties asimetrijos koeficientas yra gerokai didesnis (kinta intervale $[0,42; 0,62]$), lyginant su žvyro skaldos analogišku koeficientu 0,14. Tai reiškia, kad granito ir dolomito skaldos plokštumo ir formos rodiklių vertės labiau pasiskirsčiusios kairėje, aukštesnių verčių, vidurkio (medianos) pusėje, o žvyro skaldos imties vertės daugumoje išsidėsčiusios aplink vidutinę vertę. Tai patvirtina Lietuvoje naudojamų skaldos uolienu atitiktį aukštoms geometrinių kokybės rodiklių kategorijoms.
5. Patikrinus koreliacinius ryšius tarp skirtingų uolienu skaldos geometrinių ir stiprio rodiklių verčių, buvo nustatytas glaudus koreliacinis ryšys tarp plokštumo ir atsparumo trupinimui rodiklių. Šis faktas leidžia teigti, kad, nustačius plokštumo rodiklio vertę, galima atlikti gana tikslią tiriamos skaldos atsparumo

smūgiams rodiklio vertės prognozę ir teigti, kad, atliekant skaldos kokybės kontrolę, tyrimų skaičių galima sumažinti ir atlikti tik skaldos plokštumo rodiklio bei atsparumo trupinimui tyrimus.

6. Visų tirtų uolienu fiziniai rodikliai, rodantys skaldos stiprumo savybes (atsparumą trupinimui ir atsparumą smūgiams), turi stiprų tarpusavio ryšį, nes gautose koreliacijos regresijos priklausomybėse koreliacijos koeficiento vertės buvo didesnės kaip 0,70.

7. Pasinaudojus gautomis koreliacijos regresijos priklausomybėmis, galima pagerinti mineralinių medžiagų stiprumo savybių įvertinimo kontrolę. Nedidinant sudėtingų ir imlių laiko sąnaudoms atsparumo trupinimui ir smūgiams kontrolinių bandymų skaičiaus, siūloma dažniau nustatyti greitai ir palygint paprastai geometrinius mineralinių medžiagų parametrus apibūdinantį plokščiųjų grūdelių kiekio medžiagoje rodiklį.

Konstruktinių sluoksnių, jų medžiagų savybių analizė, vertinimas ir racionalių konstrukcijų parinkimas

Skyriuje parengti dangos eksploatacinių rodiklių prognozės matematiniai modeliai, kai TP eismo intensyvumo rodiklis $VMPEI$ kelyje yra $VMPEI \leq 10\,000$ aut./parą ir $VMPEI \leq 30\,000$ aut./parą. Sudarytas kelių dangos būklės prognozės sekos scheminis modelis. Sumodeliuotos ir pateiktos dvi racionalios magistralinių kelių dangos konstrukcijos, kai $VMPEI \leq 10\,000$ aut./parą ir $VMPEI \leq 30\,000$ aut./parą. pateikti ekonominiai racionalių magistralinių kelių dangos konstrukcijų skaičiavimai.

Skyriaus tematika paskelbtas autoriaus straipsnis kartu su bendraautoriais (Bertulienė *et al.* 2011).

4.1. Konstrukcinių sluoksnių ir jų medžiagų savybių įtakos kelių tampriosios dangos viršutinio sluoksnio eksploataciniams rodikliams tyrimai bei analizė

Atlikus pirmojo tyrimų ruožo (Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (A5) 0,0–6,8 km) ir antrojo ruožo (Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (A5) 25,8–30,3 km) KDK

matavimus ir medžiagų tyrimus laboratorijoje, nustatyti elementarių (20 m ilgio) tyrimų ruožų dangos būklės rodikliai Y_{IRI} , H_V ir D_D , taip pat KDK sluoksnių ir jų medžiagų kokybės rodikliai ir buvo apskaičiuotos statistinės jų charakteristikos. Buvo apskaičiuoti gautų rezultatų koreliacijos koeficientai ir nustatytas jų reikšmingumas sudarant analizuojamų rodiklių koreliacinių rodiklių matricą, pateiktą A priede. Taip pat patikrinti koreliaciniai ryšiai tarp kelio dangos kokybės rodiklių bei sudarytos tiesinės regresijos lygtys kelio dangos eksploataciniams rodikliams Y_{IRI} ir H_V vertinti. Suiirties masto rodiklis D_D vertinamas nebuvo, nes jo vertės tiriamuosiuose kelio ruožuose daugiausiai buvo $D_D = 0$, o pavienės vertės nesiekė 3%, t. y. danga buvo nedaug suirusi – $D_D \leq 3\%$ (Petkevičius 2008). Gautos mažos dangos suirties masto vertės parodo, kad po penkerių KD funkcionavimo metų atsirado tik plastinio pobūdžio defektų, kurie pasireiškė dideliu kelio dangos lygumo Y_{IRI} ir vėžetumo H_V pablogėjimu. Plastinių KD defektų atsiradimo priežastys tyrimų ruožuose galėjo būti šios:

- nepakankama KDK sluoksniams įrengti naudotų medžiagų kokybė;
- technologiniai nuokrypiai kelio tiesybos metu;
- kitos, kelio tiesybos metu atsiradusios aplinkybės (klimato kaita, tiesybos brokas, per žema specialistų kvalifikacija).

Statistiniais skaičiavimais buvo patikrinta, kaip kelio dangos kokybės rodikliai kitėja nepriklausomai nuo KDK sluoksnių ir jų medžiagų savybių. Analizuojamų rodiklių savybės lygtyse žymimos žymenimis ir atitinkamais indeksais, kurie nurodo KDK sluoksnį: indeksas S – viršutinį asfaltbetoninės (AB) dangos sluoksnį, AS – apatinį AB sluoksnį, PS – AB pagrindo sluoksnį, Sk – pagrindo skaldos sluoksnį, ŠAS – apsauginį šalčiui atsparų smėlio sluoksnį. Programine įranga „STATISTICA 7“ sudarytos KDK sluoksnių ir medžiagų kokybės rodiklių tiesinės priklausomybės regresinės lygtys: (4.1, 4.2) 1-ojo kelio ruožo, kurio $VMPEI > 30\,000$ aut./parą ir lygtys (4.3, 4.4) 2-ojo ruožo, kurio $VMPEI > 10\,000$ aut./parą.

$$Y_{IRI} = 0,114V_S + 0,203B_S + 0,446SK_S + 0,014MM_S + 0,267B/MM_S - 0,075V_{AS} - 0,287B_{AS} - 0,151SK_{AS} + 0,023MM_{AS} - 0,321B/MM_{AS} - 0,318V_{PS} - 0,136B_{PS} + 0,085SK_{PS} - 0,321MM_{PS} + 0,068B/MM_{PS} + 0,351k_S - 0,147k_{AS} + 0,093k_{PS} - 0,289h_S + 0,011h_{AS} + 0,071h_{PS} - 0,066h_{Sk} + 0,214h_{ŠAS}, \text{ kai } R^2 = 0,69, \quad (4.1)$$

$$H_V = 0,118V_S - 0,078B_S + 0,467SK_S + 0,023MM_S - 0,069B/MM_S + 0,072V_{AS} + 0,117B_{AS} + 0,33SK_{AS} + 0,023MM_{AS} + 0,104B/MM_{AS} + 0,078V_{PS} + 0,212B_{PS} + 0,055SK_{PS} - 0,119MM_{PS} + 0,082B/MM_{PS} + 0,325k_S + 0,042k_{AS} + 0,014k_{PS} + 0,299h_S + 0,017h_{AS} - 0,184h_{PS} + 0,104h_{Sk} - 0,522h_{ŠAS}, \text{ kai } R^2 = 0,83, \quad (4.2)$$

$$Y_{\text{IRI}} = 0,134V_S - 0,142B_S - 0,05SK_S - 0,124MM_S + 0,044B/MM_S + 0,117V_{AS} - 0,033B_{AS} - 0,257SK_{AS} + 0,027MM_{AS} - 0,056B/MM_{AS} + 0,303V_{PS} + 0,09B_{PS} - 0,179SK_{PS} + 0,212MM_{PS} - 0,223B/MM_{PS} - 0,126k_S - 0,161k_{AS} - 0,162k_{PS} + 0,175h_S + 0,217h_{AS} + 0,115h_{PS} + 0,533h_{Sk} + 0,409h_{SAS}, \text{ kai } R^2 = 0,69, \quad (4.3)$$

$$H_V = 0,458 \cdot V_S + 0,166 \cdot B_S + 0,065 \cdot SK_S + 0,012 \cdot MM_S + 0,082 \cdot B/MM_S - 0,144 \cdot V_{AS} - 0,124 \cdot B_{AS} + 0,308 \cdot SK_{AS} + 0,056 \cdot MM_{AS} - 0,256 \cdot B/MM_{AS} + 0,277 \cdot V_{PS} + 0,326 \cdot B_{PS} - 0,289 \cdot SK_{PS} + 0,37 \cdot MM_{PS} - 0,154 \cdot B/MM_{PS} - 0,24 \cdot k_S + 0,022 \cdot k_{AS} - 0,011 \cdot k_{PS} - 0,189 \cdot h_S + 0,24 \cdot h_{AS} - 0,123 \cdot h_{PS} + 0,07 \cdot h_{Sk} - 0,08 \cdot h_{SAS}, \text{ kai } R^2 = 0,85, \quad (4.4)$$

čia Y_{IRI} – kelių dangos lygumo tarptautinis rodiklis, m/km; H_V – kelio dangos vėžės gylis, mm; V_S , V_{AS} , V_{PS} – atitinkamo asfaltbetonio (S – viršutinis asfaltbetoninės dangos sluoksnis; AS – apatinis asfaltbetoninės dangos sluoksnis; PS – asfaltbetoninės dangos pagrindo sluoksnis) turštytumo rodiklis, %; B_S , B_{AS} , B_{PS} – atitinkamo asfaltbetonio sluoksnio bituminio rišiklio kiekis, masės %; SK_S , SK_{AS} , SK_{PS} – atitinkamo sluoksnio asfaltbetonio mineralinės medžiagos, liekančios ant 2 mm skersmens akelių sieto, kiekis masės %; MM_S , MM_{AS} , MM_{PS} – atitinkamo sluoksnio asfaltbetonio mineralinės medžiagos prabyrančios pro 0,09 mm skersmens akelių sietą, kiekis masės %; B/MM_S , B/MM_{AS} , B/MM_{PS} – atitinkamo sluoksnio asfaltbetonio bituminio rišiklio ir mineralinių miltelių santykis; k_S , k_{AS} , k_{PS} – atitinkamo sluoksnio asfaltbetonio sutankinimo rodiklis, %; h_S , h_{AS} , h_{PS} , h_{Sk} , h_{SAS} – atitinkamų kelio dangos konstrukcijos sluoksnių storiai (asfaltbetoninės dangos sluoksnių išreikšti – 0,01 m, biriųjų medžiagų pagrindo sluoksnių išreikšti – 0,1 m).

Regresijos modelis – statistinis modelis, leidžiantis vieno kintamojo vertes prognozuoti pagal kito kintamojo vertes. Šiam modeliui sudaryti taikoma regresinė analizė – tai statistiniai metodai, skirti regresijos modeliui sudaryti ir patikrinti, ar jis tinkamas, bei taikyti prognozėms.

Atlikus šiuos veiksmus, gaunama vienas pusė statistinė priklausomybė – regresijos funkcija, kuri nustato ryšį tarp kintamųjų ir įvertina statistinio ryšio formą. Tokios funkcijos sukūrimas naudingas tuo, kad juo remiantis galima apskaičiuoti tiriamojo kelio ruožo dangos būklės rodiklius Y_{IRI} ir H_V , pakitus vienai, kelioms ar net visoms analizuojamų rodiklių vertėms, lemiančioms nagrinėjamo rodiklio vertes. Gauti gana aukšti determinacijos koeficientai R^2 (pirmojo tyrimų ruožo $R^2 = 0,69$ ir $R^2 = 0,83$, o tyrimų antrojo tyrimų ruožo $R^2 = 0,69$ ir $R^2 = 0,85$) leidžia daryti išvadą, kad sudarytų lygčių kintamieji (rodikliai) sąveikauja pakankamai stipriai. Remiantis atliktu tyrimu sudaromas kelio dangos prognozavimo tyrimų sekos scheminis modelis pateiktas 4.1 paveiksle.

Atlikus statistinius analizuotų rodiklių skaičiavimus ir sudarius KDK sluoksnių ir jų medžiagų kokybės rodiklių tiesinės priklausomybės regresijos

lygtis (4.1, 4.2, 4.3, 4.4), galima parinkti racionalią kelio dangos konstrukciją esant ekvivalentiniam (tam tikram) TP eismo intensyvumui. Šiam tikslui pasiekti reikia atlikti lygčių (4.1, 4.2, 4.3, 4.4) rodiklių jautrumo analizę ir atlikti kintamųjų (rodiklių) modeliavimo rezultatų neapibrėžties tikimybinę analizę.

4.1 pav. Kelio dangos eksploatacinių rodiklių prognozės sekos scheminis modelis

Fig. 4.1. Schematic model for the sequence of predicting the road pavement service indices

Gauti rezultatai leis nustatyti prognozuojamų rodiklių vertes, esant tam tikrai tikimybei. Atmetus sugeneruotų rodiklių aibę kuri nepatenka į apibrėžtos kumuliacinės kreivės tikimybių sritį, galima nustatyti analizuojamų rodiklių vertes ir apskaičiuoti jų įtaką visos kelio dangos konstrukcijos kainai.

Išanalizavus gautus rezultatus ir įvertinus ribines kelio dangos eksploatacinių rodiklių vertes ir KDK kainą (tam tikram eismo intensyvumui), galima parinkti racionalią KDK.

4.2. Konstrukcinių sluoksnių ir jų medžiagų savybių vertinimas

Naudojantis eksperimentiniu tyrimų duomenimis, empiriniu būdu sudaryti tiriamųjų rodiklių priklausomybės nuo įvesties parametrų (kintamųjų) matematiniai modeliai. Šie modeliai pagrįsti tiesinės priklausomybės tarp kintamųjų ir nagrinėjamo rodiklio buvimu. Kadangi siekiamas rezultatas – gauti kuo mažesnę kelio dangos būklės rodiklių prognozės duomenų sklaidą, reikia mažinti kintamųjų neapibrėžtį, t. y. stiprinti statistškai reikšmingų rodiklių, kurie turi didžiausią įtaką nagrinėjamo parametro vertei, kontrolę. Tai reiškia, gerinti konkrečių KDK įrengimo technologinių procesų kokybę ir jų priežiūrą.

Jautrumo analizei atlikti taikytas Monte Karlo metodas (metodas aprašytas 3.1.3 poskyryje), o jautrumo indeksais pasirinkti standartizuotos regresijos koeficientai (SRK) pateikti 4.1 lentelėje. Kiekvieno nagrinėjamo rodiklio (Y_{IRI} , H_v) atveju priklausomybė išreikšta tiesinėmis regresinėmis lygtimis pirmajam (4.1, 4.2) ir anrajam (4.3, 4.4) tyrimų ruožams. Norint išsiaiškinti lygčių kintamuosius (Y_{IRI} – kelių dangos lygumo tarptautinis rodiklis; H_v – kelio dangos vėžės gylis; V_s , V_{AS} , V_{PS} – asfaltinio mišinio tuštymėtumo rodiklis; B_s , B_{AS} , B_{PS} – monolitinių sluoksnių asfaltbetonio bituminio rišiklio B kiekis; SK_s , SK_{AS} , SK_{PS} – sluoksnių asfaltbetonio mineralinės medžiagos likučio ant 2 mm skersmens akelių sieto kiekis; MM_s , MM_{AS} , MM_{PS} – sluoksnių asfaltbetonio mineralinės medžiagos, prabyrančios pro 0,09 mm skersmens akelių sieta, kiekis; B/MM_s , B/MM_{AS} , B/MM_{PS} – sluoksnių asfaltbetonio bituminio rišiklio ir mineralinių miltelių santykis; k_s , k_{AS} , k_{PS} – asfaltbetonio sluoksnių sutankinimo rodiklis; h_s , h_{AS} , h_{PS} , h_{SK} , h_{SAS} – kelio dangos konstrukcijos sluoksnių storis), turinčius didžiausią įtaką rezultato neapibrėžčiai, atlikta jautrumo analizė.

4.1 lentelė. Pirmojo ir antrojo kelio ruožų dangos būklės vertinimo lygčių standartizuotos regresijos koeficientai

Table 4.1. Standardized regression coefficients of equations for determining pavement service indices of the first and second experimental sections

Kelio ruožas	Pirmasis		Antrasis	
Rodiklis	Y_{IRI}	H_v	Y_{IRI}	H_v
V_S	0,114	0,118	0,134	0,458
B_S	0,203	-0,078	-0,142	0,166
SK_S	0,446	0,467	-0,050	0,065
MM_S	0,014	0,023	-0,124	0,012
B/MM_S	0,267	-0,069	0,044	0,082
V_{AS}	-0,075	0,072	0,117	-0,144
B_{AS}	-0,287	0,117	-0,033	-0,124
SK_{AS}	-0,151	0,330	-0,257	0,308
MM_{AS}	0,023	0,023	0,027	0,056
B/MM_{AS}	-0,321	0,104	-0,056	-0,256
V_{PS}	-0,318	0,078	0,303	0,277
B_{PS}	-0,136	0,212	0,090	0,326
SK_{PS}	0,085	0,055	-0,179	-0,289
MM_{PS}	-0,321	-0,119	0,212	0,370
B/MM_{PS}	0,068	0,082	-0,223	-0,154
k_S	0,351	0,325	-0,126	-0,240
k_{AS}	-0,147	0,042	-0,161	0,022
k_{PS}	0,093	0,014	-0,162	-0,011
h_S	-0,289	0,299	0,175	-0,189
h_{AS}	0,010	0,017	0,217	0,240
h_{PS}	0,071	-0,184	0,115	-0,123
h_{Sk}	-0,066	0,104	0,533	0,070
h_{SAS}	0,214	-0,522	0,409	-0,080

Neapibrėžties analizės metu Monte Karlo metodu sugeneruota 1000 analizuojamų rodiklių verčių aibė.

4.2.1. Pirmojo tyrimų ruožo rodiklių jautrumo analizė

Regresinės analizės metu gautas determinacijos koeficientas ($R^2 = 1$) leido jautrumo indeksais naudoti standartizuotos regresijos koeficientus (SRK). Pirmojo tyrimų ruožo rodiklio Y_{IRI} lygties apskaičiuoti jautrumo indeksai pateikti 4.2 paveiksle.

Kaip matyti iš gautų rezultatų 4.2 paveiksle, rodiklio Y_{IRI} neapibrėžčiai didžiausią įtaką turi parametrai SK_S (viršutinio sluoksnio asfaltbetonio mineralinės medžiagos likutis ant 2 mm skersmens akelių sieta) ir k_S (viršutinio asfaltbetoninės dangos sluoksnio storis) neapibrėžtis, kiek mažiau reikšminga rodiklių B/MM_{AS} (apatinio sluoksnio asfaltbetonio bituminio rišiklio ir mineralinių miltelių santykis), V_{PS} (pagrindo sluoksnio asfaltbetonio tuštymėtumo rodiklis) ir MM_{PS} (pagrindo sluoksnio asfaltbetonio mineralinės medžiagos, prabyrančios pro 0,09 mm skersmens akelių sieta, kiekis) neapibrėžtis.

4.2 pav. Pirmojo tyrimų ruožo dangos lygumo rodiklio modeliavimo tikimybinės jautrumo analizės rezultatai

Fig. 4.2. Results of probabilistic sensitivity analysis of roughness index modelling for the first experimental road section

Teigiamos jautrumo indeksų SRK vertės rodo, kad, didėjant šiems parametrams, rodiklio Y_{IRI} vertės taip pat didėja. Tarp nagrinėjamo dangos lygumo rodiklio Y_{IRI} verčių ir reikšmingų rodiklių B_{AS} , B/MM_{AS} , V_{PS} , MM_{PS} , h_S (atitinkamai apatinio asfaltbetonio sluoksnio bituminio rišiklio kiekio ir jo santykio su mineraliniais milteliais, pagrindo sluoksnio asfaltbetonio tuštymėtumo rodiklio ir mineralinių miltelių kiekis bei asfaltbetoninės dangos viršutinio sluoksnio storio) esti atvirkštinė priklausomybė – didėjant nurodytų rodiklių vertėms, rodiklio Y_{IRI} įgyjama vertė mažėja. Naudojantis gautais rezultatais ir siekiant sumažinti Y_{IRI} neapibrėžtį, tikslinga orientuoti tolesnius tyrimus pirmiausia į tikslesnį išskirti

parametrų neapibrėžties įvertinimą. Tai galima pasiekti, didinant kontrolės bandymų skaičių, tikrinant AB dangos viršutinio sluoksnio įrengimo metu skaldos frakcijos asfaltbetonyje kiekį ir gerinant AB viršutinio sluoksnio įrengimo darbų kontrolę. Kitų analizuotų rodiklių neapibrėžtis neturi reikšmingos įtakos rodiklio Y_{IRI} modeliavimo rezultatų neapibrėžčiai.

Vėžės gylio rodiklio H_v gautų modeliavimo rezultatų pateiktą 4.3 paveiksle neapibrėžčiai didžiausią įtaką turi rodiklio SK_s (viršutinio sluoksnio asfaltbetoninės dangos mineralinės medžiagos likučio ant 2 mm skersmens akelių sieto kiekio), kaip ir rodiklio Y_{IRI} atveju, ir rodiklio h_{SAS} (apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio storio) neapibrėžtis ($SRK = 0,47$ ir $(-0,52)$, atitinkamai), kiek mažiau reikšminga rodiklių SK_{AS} , B_{PS} , k_s ir h_s (atitinkamai apatinio sluoksnio asfaltbetonio mineralinės medžiagos likučio ant 2 mm skersmens akelių sieto, pagrindo sluoksnio asfaltbetonio bituminio rišiklio kiekio ir asfaltbetoninės dangos viršutinio sluoksnio storio ir sutankinimo koeficiento) neapibrėžtis (SRK nuo 0,2 iki 0,3).

4.3 pav. Pirmojo tyrimų ruožo vėžetumo rodiklio modeliavimo tikimybinės jautrumo analizės rezultatai

Fig. 4.3. Results of probabilistic sensitivity analysis of rutting index modelling for the first experimental road section

Vėžės gylio rodiklio H_v atvirkštinę priklausomybę stipriausiai sieja apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio storis h_{SAS} . Remiantis gautais rezultatais ir siekiant sumažinti H_v neapibrėžtį, tikslinga orientuoti tolesnius tyrimus pirmiausia į viršutinio ir apatinio dangos sluoksnių asfaltbetonio mineralinių medžiagų kiekių tikslinimą, viršutinio AB sluoksnio storio ir sutankinimo kontrolę bei didinti įrengimo apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio storio kontrolę. Likusių analizuotų rodiklių neapibrėžtis neturi reikšmingos įtakos rodiklio H_v modeliavimo rezultatų neapibrėžčiai.

4.2.2. Antrojo tyrimų ruožo rodiklių jautrumo analizė

Regresinės analizės metu gautas determinacijos koeficientas ($R^2 = 1$) leido jautrumo indeksais naudoti standartizuotos regresijos koeficientus (SRK). Antrajam tyrimų ruožui Y_{IRI} apskaičiuoti lygties jautrumo indeksai pateikti 4.4 paveiksle.

Rodiklio Y_{IRI} neapibrėžčiai antrajame tyrimų ruože didžiausią įtaką turi rodiklių h_{SK} , $h_{\Sigma AS}$ (atitinkamai kelio skaldos pagrindo ir apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio storių) neapibrėžtis, kiek mažiau reikšminga rodiklių V_{PS} , MM_{PS} , SK_{AS} , B/MM_{PS} , h_{AS} (pagrindo sluoksnio AB tuštymių skaičiaus, bituminio rišiklio ir mineralinių miltelių santykio bei mineralinių miltelių kiekio, taip pat asfaltbetonio sluoksnio storio ir skaldos asfaltbetonyje kiekio) neapibrėžtis.

4.4 pav. Antrojo tyrimų ruožo dangos lygumo rodiklio modeliavimo tikimybinės jautrumo analizės rezultatai

Fig. 4.4. Results of probabilistic sensitivity analysis of roughness index modelling for the second experimental road section

Teigiamos jautrumo indeksų SRK rodo, kad, didėjant šiems parametrams, rodiklio Y_{IRI} vertės didėja. Tarp nagrinėjamo rodiklio Y_{IRI} verčių ir reikšmingų rodiklių (MM_{PS} , SK_{AS} , B/MM_{PS}) esti atvirkštinė priklausomybė – didėjant jautrumo vertėms, rodiklio Y_{IRI} įgyjama vertė mažėja. Remiantis gautais rezultatais ir siekiant sumažinti Y_{IRI} neapibrėžtį, atlikti orientuoti kontrolės tyrimus pirmiausia į kelio pagrindo įrengimo kontrolės tyrimus, t. y. tikslesnį sluoksnių storio neapibrėžties įvertinimą. Kitų parametų neapibrėžtis neturi reikšmingos įtakos rodiklio Y_{IRI} modeliavimo rezultatų neapibrėžčiai.

Vėžės gylio rodiklio H_v gautų modeliavimo rezultatų pateiktą 4.5 paveiksle neapibrėžčiai didžiausią įtaką turi viršutinio dangos sluoksnio asfaltbetonio

tuštymių skaičiaus ir rodiklio V_S neapibrėžtis ($SRK=0,46$), kiek mažiau reikšminga rodiklių SK_{AS} , B/MM_{AS} , V_{PS} , B_{PS} , SK_{PS} , MM_{PS} , k_S , h_{AS} (apatinio dangos sluoksnio asfaltbetonyje esančio skaldos kiekio, bituminio rišiklio ir mineralinių miltelių santykio, pagrindo sluoksnio asfaltbetonio tuštymių ir bituminio rišiklio, skaldos bei mineralinių miltelių kiekio; AB viršutinio sluoksnio sutankinimo rodiklio ir AB apatinio sluoksnio storio) neapibrėžtis.

Kaip matyti iš gautų rezultatų pateiktų 4.5 paveiksle, rodiklio H_v atvirkštinę priklausomybę sieja apatinio dangos sluoksnio asfaltbetonio bituminio rišiklio kiekis, pagrindo sluoksnio asfaltbetonyje esančios skaldos granulometriją ir bituminio rišiklio kiekis (atitinkamai B/MM_{AS} , SK_{PS} , B_{PS}).

4.5 pav. Antrojo tyrimų ruožo vėžtumo rodiklio modeliavimo tikimybės jautrumo analizės rezultatai

Fig. 4.5. Results of probabilistic sensitivity analysis of rutting index modelling for the second experimental road section

Remiantis gautais rezultatais ir siekiant sumažinti rodiklio H_v neapibrėžtį, tikslinga tolesnius tyrimus pirmausia sutelkti į viršutinio dangos sluoksnio AB tuštymėtumo V_S neapibrėžties tikslesnį įvertinimą, taip pat į rodiklių SK_{AS} , B/MM_{AS} , V_{PS} , B_{PS} , SK_{PS} , MM_{PS} , k_S , h_{AS} tikslinimą. Likusių rodiklių neapibrėžtis neturi reikšmingos įtakos rodiklio H_v modeliavimo rezultato neapibrėžčiai.

4.3. Magistralinių kelių tampriosios dangos racionalių konstrukcijų modeliavimas ir parinkimas

Sudarius kelio dangos konstrukcijų (KDK) sluoksnių ir medžiagų kokybės rodiklių tiesinės priklausomybės regresines lygtis (4.1, 4.2, 4.3, 4.4) ir

išskirsčius kintamųjų (rodiklių) įtaką kelio dangos būklės rodiklių pagal svarbą (rangus), galima sumažinti prognozuojamo kelio dangos (KD) būklės rodiklio neapibrėžtį. Žinant prognozuojamo KD būklės rodiklio neapibrėžtį, galima numatyti, kokių ribų apskaičiuota vertė kitės. Siekiant sumodeliuoti racionalią kelio konstrukciją, įvertinant prognozuojamą KD rodiklio vertę, reikia žinoti, kokių patikimumo laipsniu α būna apskaičiuotos gaunamos rodiklių vertės. Nagrinėjant sudėtingas sistemas, ne visada ribinės parametrų vertės lemia rezultato ribines vertes, jas gali nulemti tam tikros parametrų verčių kombinacijos, todėl sudarytų lygčių rezultato neapibrėžties analizė atlikta tikimybinio būdu. Anksčiau aprašytu (2.4 poskyryje) būdu, pasitelkiant Monte Karlo metodą, atsitiktiniu būdu, iš analizuojamų rodiklių tikimybinio skirstinio, atrinktos analizuojamų rodiklių vertės ir atliktas jų verčių modeliavimas.

Teorinė ir metodinė darbo dalys (apie gauto matematinio modelio (lygties) rezultatų neapibrėžtį ir naudojamus metodus) aprašyta 3.1.3 poskyryje. Nagrinėjamų rodiklių (Y_{IRI} , H_V , V_S , V_{AS} , V_{PS} , B_S , B_{AS} , B_{PS} , SK_S , SK_{AS} , SK_{PS} , MM_S , MM_{AS} , MM_{PS} , B/MM_S , B/MM_{AS} , B/MM_{PS} , k_S , k_{AS} , k_{PS} , h_S , h_{AS} , h_{PS} , h_{Sk} , h_{SAS}) neapibrėžtis aprašyta tikimybinėmis pasiskirstymo funkcijomis (skirstiniais), o skirstinių histogramos ir parametrai pateikti B priede. Pasiskirstymo funkcijos buvo parinktos atsižvelgiant į gautus eksperimentinius duomenis ir įvertinus pasirinkto skirstinio tinkamumą statistikoje naudojamais „godness-of-fit testais“ (Kolmogorovo ir kt.). Monte Karlo metodu kiekvienam analizuojamam rodikliui sugeneruota 1000 rezultatų. Šių rodiklių suvestinė pateikta C priede. Parenkant skirstinį buvo atsižvelgta, ar, atsitiktiniu būdu sudarant kintamųjų verčių aibes, skaitinės vertės yra galimos (realios) fiziniu požiūriu (pavyzdžiui, dangos sluoksnio storis negali įgyti neigiamas vertes).

4.3.1. Pirmojo tyrimų ruožo modeliavimo rezultatų neapibrėžties analizė

Atliekant tikimybinę modeliavimo analizę, buvo panaudotos sugeneruotos pirmojo tyrimų ruožo analizuotų rodiklių vertės. Sugeneruotos vertės pateiktos C priede. Atlikus tikimybinę modeliavimo analizę, gautos rodiklio Y_{IRI} vertės, pasiskirsčiusios intervale (0,079;1,994). Nustatyta, kad rezultatų aritmetinis vidurkis 1,08, o vidurkio pasikliautinas intervalas, esant 0,95 patikimumui, yra (1,06; 1,10). Darome prielaidą, kad vertės pasiskirsčiusios pagal normaliojo skirstinio dėsnį (4.6 pav.).

4.6 pav. Pirmojo tyrimų ruožo dangos lygumo rodiklio sumodeliuotų verčių skirstinys
Fig. 4.6. Distribution of the modelled roughness index values for the first experimental road section

Rodiklių neapibrėžties tikimybinės analizės rezultatai pateikti 4.7 paveiksle.

4.7 pav. Dangos lygumo rodiklio modeliavimo duomenų neapibrėžties analizės rezultatai
Fig. 4.7. Results of uncertainty analysis of index roughness index modelling results

Nustatyta, kad rodiklis H_v įgyja vertes iš didesnio verčių intervalo (0,685; 8,962), didesnė verčių sklaida ($S = 1,308$). Verčių aritmetinis vidurkis 4,798, o vidurkio pasikliautinis intervalas, esant 0,95 patikimumui, yra (4,717; 4,879).

Vertindami tariame, kad šios vertės pasiskirsčiusios pagal normaliojo skirstinio dėsnį (4.8 pav.).

4.8 pav. Pirmojo tyrimų ruožo vėžetumorodiklio sumodeliuotų verčių skirstinys

Fig. 4.8. Distribution of the modelled rutting index values for the first experimental road section

Rodiklio H_V neapibrėžties tikimybinės analizės rezultatai pateikti 4.9 paveiksle.

4.9 pav. Vėžetumo rodiklio modeliavimo duomenų rezultatų neapibrėžties analizės rezultatai

Fig. 4.9. Results of uncertainty analysis of index rutting index modelling results

Nustatyti rodiklių Y_{IRI} ir H_V įgyjamų verčių ($q = 0,25, 0,5, 0,75, 0,95$) kvantiliai pateikti 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė. Pirmojo tyrimų ruožo lygumo ir vėžetumorodiklių įgyjamų verčių kvantiliai
Table 4.2. Quantiles of the values acquired by the roughness and rutting indices in the first experimental road section

Rodiklis	$q=0,25$	$q=0,5$	$q=0,75$	$q=0,95$
Y_{IRI}	0,864	1,089	1,293	1,594
H_V	3,835	4,764	5,709	7,039

4.3.2. Antrojo tyrimų ruožo modeliavimo rezultatų neapibrėžties analizė

Atliekant tikimybinę modeliavimo analizę, buvo naudotos sugeneruotos antrojo tyrimų ruožo rodiklių vertės. Sugeneruotos vertės pateiktos C priede. Atlikus tikimybinę modeliavimo duomenų analizę, buvo gauta, kad rodiklio Y_{IRI} vertės pasiskirsčiusios intervale (0,325; 2,335). Nustatyta, kad duomenų aritmetinis vidurkis 1,129, o vidurkio pasikliautinis intervalas, esant $P = 0,95$ patikimumui, yra (1,111; 1,147). Vertindami tariame, kad šios vertės pasiskirsčiusios pagal normaliojo skirstinio dėsnį 4.10 paveikslas.

4.10 pav. Antrojo tyrimų ruožo sumodeliuotų lygumo rodiklio verčių skirstinys
Fig. 4.10. Distribution of the modelled roughness values for the second experimental road section

Rodiklio Y_{IRI} duomenų neapibrėžties tikimybinės analizės rezultatai pateikti 4.11 paveiksle.

4.11 pav. Lygumo rodiklio modeliavimo duomenų neapibrėžties analizės rezultatai
Fig. 4.11. Results of uncertainty analysis of roughness index modelling results

Nustatyta, kad rodiklis H_v įgyja vertes iš didesnio verčių intervalo (-1.019; 5.235) ir gauta didesnė šių verčių sklaida ($S = 0,968$). Verčių aritmetinis vidurkis 2,077, vidurkio pasikliautinis intervalas, esant 0,95 patikimumui, yra (2,017; 2,137). Vertindami tariame, kad reikšmės pasiskirsčiusios pagal normalųjį skirstinio dėsnį 4.12 (pav).

4.12 pav. Antrojo tyrimų ruožo sumodeliuotų vėžetumo rodiklio verčių skirstinys
Fig. 4.12. Distribution of the modelled rutting values for the second experimental road section

Rodiklio H_v duomenų neapibrėžties tikimybinės analizės rezultatai pateikti 4.13 paveiksle.

4.13 pav. Vėžetumo rodiklio modeliavimo duomenų neapibrėžties analizės rezultatai

Fig. 4.13. Results of uncertainty analysis of rutting index modelling results

Nustatyti rodiklių Y_{IRI} ir H_v įgyjamų verčių ($q = 0,25, 0,5, 0,75, 0,95$) kvantiliai pateikti 4.3 lentelėje.

4.3 lentelė. Antrojo tyrimų ruožo lygumo ir vėžetumo rodiklių įgyjamų verčių kvantiliai
Table 4.3. Quantiles of the values acquired by thoroughness and rutting indices in the second experimental road section

Rodikliai	$q=0,25$	$q=0,5$	$q=0,75$	$q=0,95$
Y_{IRI}	0,925	1,106	1,315	1,634
H_v	1,400	2,072	2,755	3,680

Apskaičiavę neapibrėžties tikimybes ir nubraižę kumuliacines pasiskirstymo funkcijas, apskaičiavome tyrimų ruožų sugeneruotų rodiklių Y_{IRI} ir H_v funkcijų įgyjamų verčių kvantilius. Pasinaudoję pateiktomis funkcijomis (4.7, 4.9 pav.), galime teigti, kad su tikimybe $P = 0,95$ pirmajame tyrimų kelio ruože rodiklis Y_{IRI} įgis vertę $\leq 1,59$ m/km, o rodiklis H_v vertę $\leq 7,04$ mm. Pasinaudoję funkcijomis (4.11, 4.13 pav.) galime teigti, kad antrajame tyrimų kelio ruože su tikimybe $P = 0,95$ rodiklis Y_{IRI} įgis vertę $\leq 1,63$ m/km, o rodiklis H_v vertę $\leq 3,68$ mm.

4.3.3. Magistralinių kelių tampriosios dangos racionalių konstrukcijų parinkimas

Pasinaudoję gautomis kritinėmis rodiklių Y_{IRI} ir H_v vertėmis, parenkame sugeneruotų kelio konstrukcijų eilę, pateiktą D priede. Kiekvieno tyrimų ruožo sugeneruotas rodiklių Y_{IRI} ir H_v verčių eilės sugrupuojame pagal jų vertes nuo mažiausios iki didžiausios. Visas rodiklių eilutes, kurios viršija $Y_{IRI} = 1,59$ m/km ir $H_v = 7,04$ mm pirmajame tyrimų ruože ir atitinkamai eilutes, kurios viršija $Y_{IRI} = 1,63$ m/km ir $H_v = 3,68$ mm antrajame tyrimų ruože, atmetėme ir toliau skaičiavome tik su likusiomis vertėmis.

Racionalią kelio konstrukciją parinkome pagal du kriterijus: geriausią kelio dangos būklę nurodančio rodiklio vertę ir mažiausią apskaičiuotą KDK kainą.

KDK kainos apskaičiuotos pagal šiuo metu sąmatiniams skaičiavimams taikomus įkainius (4.4 lentelė). Kad būtų patogiau atlikti kelio dangos konstrukcijos sąmatinius skaičiavimus, medžiagų įkainius parinkome artimus analizuotų konstrukcijų sluoksnių įkainiams.

Apskaičiavę KDK kainas su sugeneruotomis (be atmestųjų duomenų eilučių) KDK rodiklių vertėmis (išskirsčius jas pagal mažiausią kainą), gavome keturias racionalias kelio dangos konstrukcijas iš kurių dvi gautos vienodos (4.5 lentelė).

4.4 lentelė. Kelio dangos konstrukcijos sluoksnių įkainiai, Lt (be PVM)

Table 4.4. The construction costs of road pavement structural layers, Lt, excluding VAT

KDK sluoksnis	Asfaltbetonis			Dolomito sk. 0/45	Smėlis 0/4
	SMA 11 S	AC 22 AS	AC 32 PS		
Sluoksnio storis, cm	4	8	14	30	40
Kaina už m ² , Lt (be PVM)	48,8	65,1	88,8	53,84	13,2

Gauti racionalių KDK sluoksnių storiai suapvalinti iki taikomų praktikoje – 1 cm tikslumu. 4.8 lentelėje taip pat pateikti projektiniai analizuotų ruožų KDK sluoksnių storiai bei atitinkamos kelio dangos konstrukcijos įrengimo (skaičiuojamosios) kainos Lt/m² (Lt, be PVM). Kadangi pirmajame tyrimų ruože KDK pagrindo sluoksnių storius gavome skirtingus, siekdami užtikrinti KDK stiprį, racionaliai dangos konstrukcijai modeliuoti pasirinkome storesnius, gautus vertinant rodiklį Y_{IRI} , sluoksnius ($h_{sk} = 20$ cm, $h_{sas} = 50$ cm). Skaičiavimai parodė, kad, analizuojant dangos būklės vertinimo rodiklius Y_{IRI} ir H_v , antrajame tyrimų ruože, dangos konstrukcinių sluoksnių racionalūs storiai (esant šioms rodikliams) gauti vienodi.

4.5 lentelė. Racionalios KDK sluoksnių storiai**Table 4.5.** The rational road pavement structures

Kelio ruožas	Pirmasis		Antrasis		Projektinės vertės
<i>VMPEI</i> , aut./para	≤ 30 000		≤ 10 000		
Rodiklis	Y_{IRI}	H_V	Y_{IRI}	H_V	
KDK sluoksnis	KDK sluoksnio storis, cm				
SMA 11 S	4	4	4	4	4
AC 22 AS	7	7	7	7	8
AC 32 PS	12	12	12	12	14
Dolomito sk. 0/45	20	16	22	22	30
Smėlis 0/4	50	49	31	31	40
Kaina, Lt be PVM/m ²	234,68	227,16	231,84	231,84	261,93

Sumodeliuotos racionalios magistralinių kelių dangos konstrukcijos pateiktos 4.14 paveiksle: (a) kai $VMPEI \leq 30\,000$ aut./para, (b) kai $VMPEI \leq 10\,000$ aut./para).

Sumodeliuotų racionalių kelių dangos konstrukcijų įrengimo kainosulygintos su projekcinės KDK įrengimo kaina.

4.14 pav. Sumodeliuotos racionalios kelių dangos konstrukcijos**Fig. 4.14.** Rational road pavement structures for the main roads

Skaičiavimai parodė, kad sumodeliuotos racionalios kelių dangos konstrukcijos 1 m² įrengimo kaina pirmajame tyrimų ruože 4.14 paveikslas (a), (TP eismui pagal rodiklį $VMPEI \leq 30\,000$ aut./para) lyginant su projekcinės KDK konstrukcijos įrengimo kaina yra 10,4 % (27,25 Lt be PVM) mažesnė, o racionalios kelio dangos konstrukcijos antrajame tyrimų ruože (4.14 paveikslas (b)) (TP eismui pagal rodiklį $VMPEI \leq 10\,000$ aut./para) mažesnė 11,5 % (30,09 Lt be PVM).

4.4. Ketvirtąjo skyriaus išvados

1. Naudojant programinę įrangą „STATISTICA 7“, sudaryti skirtingo transporto priemonių eismo intensyvumo magistralinių kelių asfaltbetoninės dangos eksploatacinių rodiklių prognozės matematiniai modeliai. Tyrimų rezultatai parodė, kad tarp magistralinių kelių asfaltbetoninės dangos eksploatacinių rodiklių ir tampriosios kelių dangos konstrukcijų savybių egzistuoja glaudi koreliacinė sietis. Gautuose matematinuose modeliuose determinacijos koeficientų vertės įvairėja nuo 0,69 iki 0,85:

- determinacijos koeficientas 0,69, vertinant kelio asfaltbetoninės dangos lygumą (kai vidutinis metinis paros eismo intensyvumas ne didesnis negu 30 000);
- determinacijos koeficientas 0,83, vertinant kelio asfaltbetoninės dangos vėžtumą (kai vidutinis metinis paros eismo intensyvumas ne didesnis negu 30 000);
- determinacijos koeficientas 0,69, vertinant kelio asfaltbetoninės dangos lygumą (kai vidutinis metinis paros eismo intensyvumas ne didesnis negu 10 000);
- determinacijos koeficientas 0,85, vertinant kelio asfaltbetoninės dangos vėžtumą (kai vidutinis metinis paros eismo intensyvumas ne didesnis negu 10 000).

2. Atlikus dangos lygumo ir vėžtumo rodiklių prognozės tiesinių regresinių lygčių (analizuotų kelio ruožų) jautrumo analizę, galima teigti, kad:

- pirmojo kelio ruožo dangos lygumo neapibrėžtį efektyviausiai galima sumažinti, tikslinant viršutinio sluoksnio asfaltbetonio mineralinės medžiagos likučio ant 2 mm skersmens akelių sieto kiekio ir asfaltbetoninės dangos viršutinio sluoksnio storio neapibrėžties įvertinimą, o dangos vėžės gylio rodiklio – tikslinant viršutinio sluoksnio asfaltbetonio mineralinės medžiagos likučio ant 2 mm skersmens akelių sieto kiekio ir apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio storio neapibrėžties įvertinimą;
- antrojo kelio ruožo dangos lygumo neapibrėžtį efektyviausiai galima sumažinti tikslinant atitinkamai skaldos pagrindo ir apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio storius, o vėžės gylio rodiklio – tikslinant asfaltbetonio viršutinio sluoksnio tuštymų kiekio rodiklio neapibrėžties įvertinimą.

3. Pasinaudojus apskaičiuotomis kumuliacinėmis neapibrėžties funkcijomis galima teigti, kad:

- prognozuojant kelių dangos eksploatacinius rodiklius pagal parengtus matematinius modelius, kai vidutinis metinis paros eismo intensyvumas ne didesnis negu 10 000 aut./parą, dangos lygumo rodiklis įgis vertę ne didesnę nei 1,6 m/km, o vėžtumo rodiklis – ne didesnę nei 4 mm, esant 95 % tikimybei;
- prognozuojant kelių dangos eksploatacinius rodiklius pagal parengtus matematinius modelius, kai vidutinis metinis paros eismo intensyvumas ne didesnis negu 30 000 aut./parą, dangos lygumo rodiklis įgis vertę ne didesnę nei 1,6 m/km, o vėžtumo rodiklis – ne didesnę nei 7 mm, esant 95 % tikimybei.

4. Pasinaudojus apskaičiuotomis dangos lygum ir vėžtumo rodiklių kritinėmis vertėmis, buvo pasiūlytos racionalios kelių dangos konstrukcijos magistraliniams keliams, esant, nurodytoms transport priemonių eismo intensyvumo rodiklio vertėms, ir gauti šie svarbūs rezultatai:

- esant vidutiniam metiniam paros eismo intensyvumui ne didesniau negu 10 000 aut./parą, po penkerių eksploataavimo metų, kelių asfaltbetoninės dangos lygumo rodiklis bus ne didesnis nei 1,6 m/km, o jos vėžtumo rodiklis bus ne didesnis nei 4 mm, esant 95 % tikimybei;
- esant vidutiniam metiniam paros eismo intensyvumui ne didesniau negu 30 000 aut./parą, po penkerių eksploataavimo metų kelių asfaltbetoninės dangos lygumo rodiklis bus ne didesnis nei 1,6 m/km, o jos vėžtumo rodiklis bus ne didesnis nei 7 mm, esant 95 % tikimybei.

5. Apskaičiavus parinktų racionalių dangos konstrukcijų įrengimo kainas, nustatyta, kad:

- parinktos racionalios kelio dangos konstrukcijos įrengimo kaina, kai vidutinis metinis paros eismo intensyvumas ne didesnis negu 10 000 aut./parą, lyginant su projektinės kelio dangos konstrukcijos įrengimo kaina, yra 11,5 % mažesnė.
- parinktos racionalios kelio dangos konstrukcijos įrengimo kaina, kai vidutinis metinis paros eismo intensyvumas ne didesnis negu 30 000 aut./parą, lyginant su projektinės kelio dangos konstrukcijos įrengimo kaina, yra 10,4 % mažesnė.

Bendrosios išvados

1. Magistralinių kelių asfaltinės dangos eksploatacinių rodiklių (dangos lygumo ir vėžetumo) verčių prognozei (penkerių metų laikotarpiui) prognozei atlikti pasiūlyti šių rodiklių prognozės matematiniai modeliai (regresijos priklausomybės). Gauti šie priklausomybių determinacijos koeficientai: 0,69, vertinant kelių dangos lygumą ir 0,83, vertinant kelio dangos vėžetumą, kai vidutinis metinis paros eismo intensyvumas neviršija 30 000 aut./parą; 0,69, vertinant kelių dangos lygumą, ir 0,85, vertinant kelio dangos vėžetumą, kai vidutinis metinis paros eismo intensyvumas neviršija 10 000 aut./parą.

2. Atlikus asfaltinės dangos eksploatacinių rodiklių – dangos lygumo ir vėžetumo, prognozės tiesinių regresinių lygčių jautrumo analizę, gavome, kad:

- pirmojo kelio ruožo dangos lygumo neapibrėžtį efektyviausiai galima sumažinti, tikslinant: viršutinio sluoksnio asfaltbetonio mineralinės medžiagos likučio ant 2 mm skersmens akelių sieto kiekio ir asfaltbetoninės dangos viršutinio sluoksnio storio neapibrėžties įvertį, o kelio dangos vėžės gylio rodiklio rezultatų neapibrėžtį – tikslinant viršutinio sluoksnio asfaltbetonio mineralinės medžiagos likučio ant 2 mm skersmens akelių sieto kiekio ir apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio storio neapibrėžties įvertį;
- antrojo kelio ruožo dangos lygumo neapibrėžtį efektyviausiai galima sumažinti tikslinant skaldos pagrindo ir apsauginio šalčiui atsparaus

sluoksnio storių neapibrėžties įvertį, o kelio dangos vėžės gylio rodiklio neapibrėžtį – mažinant asfaltbetonio viršutinio sluoksnio tuštymių kiekio rodiklio neapibrėžtį.

3. Pagal sudarytus kelių asfaltinės dangos eksploatacinių rodiklių prognozės matematinius modelius (po penkerių kelių dangos konstrukcijos eksploataavimo metų), esant vidutiniam metiniam paros eismo intensyvumui ne didesniai kaip 10 000 aut./parą, dangos lygumo rodiklis įgis vertę ne didesnę, kaip 1,6 m/km, o dangos vėžės gylio rodiklis – vertę ne didesnę, kaip 4 mm, esant 95 % tikimybei, esant vidutiniam metiniam paros eismo intensyvumui ne didesniai kaip 30 000 aut./parą, dangos lygumo rodiklis įgis vertę ne didesnę, kaip 1,6 m/km, o rodiklis H_v – vertę ne didesnę, kaip 7 mm, esant 95 % tikimybei.

4. Apskaičiavus skaičiavimus parinktos dvi racionalios kelio dangos konstrukcijos, kurios garantuoja:

- magistralinių kelių, kurių vidutinis metinis paros eismo intensyvumas neviršija 10 000 aut./parą, po penkerių eksploataavimo metų, asfaltinės dangos lygumo rodiklis bus ne didesnis, kaip 1,6 m/km, o vėžėtumo rodiklis ne didesnis, kaip 4 mm, esant 95 % tikimybei;
- magistralinių kelių, kurių vidutinis metinis paros eismo intensyvumas neviršija 30 000 aut./parą, po penkerių eksploataavimo metų, asfaltinės dangos lygumo rodiklis bus ne didesnis, kaip 1,6 m/km, o vėžėtumo rodiklis ne didesnis, kaip 7 mm, esant 95 % tikimybei.

5. Apskaičiavę magistralinių kelių parinktų racionalių dangos konstrukcijų įrengimo kainas, nustatėme, kad:

- parinktos racionalios kelio dangos konstrukcijos, kai vidutinis metinis paros eismo intensyvumas neviršija 10 000 aut./parą, įrengimo kaina, lyginant su projektinės kelio dangos konstrukcijos įrengimo kaina, yra 11,5 % mažesnė;
- parinktos racionalios kelio dangos konstrukcijos, kai vidutinis metinis paros eismo intensyvumas neviršija 30 000 aut./parą, įrengimo kaina, lyginant su projektinės kelio dangos konstrukcijos įrengimo kaina, yra 10,4 % mažesnė.

6. Atlikus neapibrėžties analizę, buvo nustatytos kelio dangos lygumo ir vėžėtumo ribinės vertės: kelio dangos lygumui 1,6 m/km, o vėžëtumui 4 mm, kai vidutinis metinis paros eismo intensyvumas neviršija 10 000 aut./parą, ir dangos lygumui 1,6 m/km, o vėžëtumui 7 mm, kai vidutinis metinis paros eismo intensyvumas neviršija 30 000 aut./parą, esant 95 % tikimybei. Šią lygumo ribinę vertę galima taikyti aukštam priežiūros lygiui. Gauti rezultatai rodo, kad pasiūlytos racionalios kelio dangos konstrukcijos garantuoja gana geras kelių eismo sąlygas po penkerių kelio dangos eksploataavimo metų.

Literatūros sąrašas

AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. 1993. *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). 720 p.

Ahammed, M. A.; Tighe, S. L. 2008. Statistical modeling in pavement management – do the models make sense? *Transportation Research Record* 2084: 3–10.

Alaa H.; Abed Adel A. Al-Azzawi. 2012. Evaluation of rutting depth in flexible pavements by using finite element analysis and local empirical model, *American Journal of Engineering and Applied Sciences* 5 (2): 163–169
DOI 10.3844/ajeassp.2012.163.169

Al-Quadi, I. L.; Loulizi, A.; Janajreh I., et al. 2002. Pavement response to dual tires and new wide – base ties at same tire pressure, *Transportation Research Record* 1806: 38–47.

Amšiejus, J.; Dirgelienė, N.; Norkus, A.; Žilionienė, D. 2009. Evaluation of Soil Strength Parameters via Triaxial Testing by Height versus Diameter Ratio of Sample, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 4(2): 54–60. doi:10.3846/1822-427X.2009.4.54–60.

Amšiejus, J.; Kačianauskas, R.; Norkus, A.; Tumonis, L. 2010. Investigation of the Sand Porosity via Oedometric Testing, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 5(3): 139–147. doi:10.3846/bjrbe.2010.20.

Anastasopoulos, P. Ch.; Mannering, F. L. 2009. A note on modeling vehicle accident frequencies with random-parameters count models, *Accident Analysis & Prevention* 41 (1): 153–159.

Anastasopoulos, P. Ch.; Mannering, F. L.; Shankar, V. N.; Haddock, J. E. 2012. A study of factors affecting highway accident rates using the random-parameters tobit model, *Accident Analysis & Prevention*, 45: p. 628–633.

Andriejauskas, T.; Vaitkus A.; Tumavičė, A. 2013. Traffic monitoring and weigh-in-motion system for lithuanian road network, *The XXVIII International Baltic Road Conference*, 8 p.

Asfaltbetonio dangų defektų nustatymo metodika. 1998. Kaunas: TKTI. 52 p.

Atkočiūnas, J.; Jarmolajeva, E.; Markevičiūtė, D. 2004. Optimal shakedown loading for circular plates, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 27(3): 178–188.

Automobilių kelių remontų planavimo normatyvai. 2004. Vilnius: LAKD prie Susisiekimo ministerijos. 22 p.

Barnes, C. L.; Trottier, J.F. 2010. Evaluating in-service asphalt concrete damage using surface waves, *International Journal of Pavement Engineering* 11(6): 449–458, DOI:10.1080/10298430903254125

Bausano, J. P.; Chatti, K.; Williams, R. C. 2004. Determining life expectancy of preventive maintenance fixes for asphalt-surfaced pavement, *Transportation Research Record* 1866: 1–8.

Bennert, T., Cooley Jr., L. A., Ericson, C., Zavery, Z. 2011. Coarse Aggregate Angularity and Its Relationship to Permanent Deformation of Gravel-Aggregate Hot-Mix Asphalt in New York State, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2207: 25–33. doi:10.3141/2207-04.

Bertulienė, L.; Laurinavičius, A.; Lapinskienė, O. 2010. Research of Strength Measurement Methods on Subgrade of Experimental Road pavement, *Proc of the 10th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”*: selected papers, vol. 1. Ed. by. Vainiūnas, P.; Zavadskas, E. K. May 19–21, 2010 Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 28–33.

Bertulienė, L.; Laurinavičius, A.; Vaitkus, A. 2010. Research and Evaluation of Methods for Determining Deformation Modulus of a Base Course of Road Pavement, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 5(2): 110–115. doi:10.3846/bjrbe.2010.16.

Bhasin, A.; Castelo Branco, V. T. F.; Masad, E.; Little, D. N. 2009. Quantative comparison of energy methods to characterize fatigue in asphalt materials, *Journal of Materials Civil Engineering* 21(2): 83–92. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:2(83).

Braga, A. 2005. *Dangų degradacijos modeliai ir jų taikymas Lietuvos automobilių keliams*: daktaro disertacija. Vilnius. 205 p.

Butkevičius S. *Sunkiasvorio transporto įtaka automobilių kelių asfaltbetonio dangos funkcionavimo trukmei: daktaro disertacija*. Vilnius. 27 p.

Butkevičius, S.; Petkevičius, K.; Kamaitis, I.Z. 2007. Evaluation of flexible road pavement construction state using objective strength criteria, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 2(2): 61–66.

Castro, M. Sanchez, J. A. 2007. Damage based model for prediction of asphalt concrete fatigue curves, *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(8):700–702. ISSN 0899-1561.

Ceylan, H., Coree B., Gopalakrishnan K. 2008. Design of Rigid Pavements in Iowa Using the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 3(4): 219–225

Ceylan, H.; Schwartz, C.W.; Kim, S.; Gopalakrishnan, K. 2009. Accuracy of Predictive Models for dynamic Modulus of hot Mix asphalt, *Journal of Materials in Civil Engineering* 21(6): 286–293. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:6(286)

Chang, J. R.; Su, Y.S.; Huang, T.C.; Kang, S.C.; Hsieh, S. H. 2009. Measurement of the International Roughness Index (IRI) Using an Autonomous Robot (P3-AT), in *The 26th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2009)* 24–27 June 2009, Austin, Texas, 325–331.

Chen, J. S.; Lin, C. H.; Stein, E., et al. 2004. Development of a mechanistic-empirical model to characterize rutting in flexible pavement, *Journal of Transportation Engineering* 130(4): 519.

Choi, J. H.; Bahia, H. U. 2004. Life-cycle cost analysis-embedded Monte Carlo approach for modeling pay adjustment at state departments of transportation, *Transportation Research Record* 1900: 86–93.

Čygas D.; Laurinavičius, A.; Vaitkus, A.; Paliukaite, M.; Motiejūnas, A. 2011. A test road section of experimental pavement structures in Lithuania (ii), *The 8th International Conference Environmental Engineering vol. 3*: 1064–1069. ISBN 978-9955-28-829-9

Čekanavičius, V.; Murauskas, G. 2004. *Statistika ir jos taikymai. II knyga. [Statistics and its Applications. II Book]*. Vilnius: TEV. 259–260 p.

Čygas, D., Laurinavičius, A., Vaitkus, A., Tuminiene, F. 2007. Implementation of special requirements for asphalt concrete street pavement, *Journal of Construction Science & Engineering* 3(12): 91–95.

Čygas, D.; Laurinavičius, A.; Vaitkus, A.; Perveneckas, Z.; Motiejūnas, A. 2008. Research of asphalt pavement structures on lithuanian roads (I), *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 3(2): 77–83.

Dangų valdymo sistemos (DAVASEMA) optimizavimo metodų tobulinimas. 1997. Kaunas: TKTI. 52 p.

Dawson, A. 2008. Rut accumulation and power law models for-volume pavement under mixed traffic, *Transportation Research Record* 2068: 78–86.

De Solminihač, H.; Salsilli, R.; Kohler, E., et al. 2003. Analysis of pavement serviceability for the AASHTO design method: The Chilean case, *Arabian Journal for Science and Engineering* 28(2B): 143–160.

Deblois, K.; Bilodeau JP.; Dore G. 2010. Use of falling weight deflectometer time history data for the analysis of seasonal variation in pavement response, *Canadian Journal of Civil Engineering* 37(9): 1224–1231, doi:10.1139/L10-069

Dimaitis, M. 2008. *Šiuolaikins technologijos kelių dangos būklei vertinti. Lietuvos keliai* 2008/1. Vilnius: Ex Arte. p. 32–35.

Ekdahl, P. 1999. Sensitivity Analysis of Two Deterioration Models for Flexible Pavements. *Lund: Lund University*. 102 p.

Ekdahl, P. 2000. Deterioration Models and Road Capital as Tools in Performance Contracts for Pavement Maintenance: doctoral thesis. *Lund University*. 172 p.

Ferne, B. 2006. Long – life pavements – a European study by ELLPAG, *International Journal of Pavement engineering* 7(2): 91–100.

François D.; Jullien, A. 2009. A framework of analysis for field experiments with alternative materials in road construction *Waste Management*, Volume 29, (1): 374–382. doi.org/10.1016/j.wasman.2008.04.005

Gui, J. (G); Phelan, P. E.; Kaloush, K. E.; Golden, J. S. 2007. Impact of pavement thermophysical properties on surface temperatures, *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(8): 683–690. ISSN 0899-1561.

Guidelines of a complex methodology for nondestructive pavement measuring techniques *European commission dg research*, 2009

Haas, R.; Hudson, W. R.; Zaniewsky J. 1994. *Modern Pavement Management*. Florida: Krieger Publishing Company. 583 p.

Haas, R.; Tighe, S. L.; Falls, L. C. 2006. Determining return on long-life pavement investments, *Transportation Research Record* 1974: 10–17.

Hall, J. W.; Turner, D. S. 1998. Development and adaption of early AASHTO design criteria, *Transportation Research Record* 1612: 26–33.

Harris, D. 2013. Development of Methods and Specifications for the Use of Inertial Profilers and the International Roughness Index for Newly Constructed Pavement. Publication. *Joint Transportation Research Program*, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2013 (09). doi: 10.5703/1288284315211

Highway Design and Maintenance Standards Model HDM: Model Description And User's Manual. 1981. World Bank, Washington, D.C. 227 p.

Hongbing, F.; Haddock, J. E.; White, T. D., et al. 2004. On the characterization of flexible pavement rutting using creep model-based finite element analysis, *Finite Elements in Analysis and Design*, 41(1): 49–73.

Hu, S., Hu, X., Zhou, F., Walubita, L. F. 2008. SA-crack pro: New finite element analysis tool for pavement crack propagation, *Transportation Research Record* 1121:34–39.

Hu, S.; Hu, X.; Zhou, F.; Walubita, L. F. 2008. SA-crack pro: New finite element analysis tool for pavement crack propagation, *Transportation Research Record* 2068: 10–19.

Hudson, W. R.; Flanagan, P. R. 1987. An examination of environmental versus load effects on pavement, *Transportation Research Record* 1121: 34–39.

Ioannides, A. M., Tallapragada, P. K. 2013. An overview and a case study of pavement performance prediction, *International Journal of Pavement Engineering* 14(7):629–644. Doi:10.1080/10298436.2012.715644.

IT ASFALTAS 08. 2008. *Automobilių kelių dangos konstrukcijos asfalto sluoksnių įrengimo taisyklės*. Vilnius. 62 p.

Jongvon, S.; Sandhyeok, K. 2006. Geographic information system based road way construction planning, *Canadian Journal of Civil Engineering* 33(5): 508–528.

Juknevičiūtė, L.; Laurinavičius, A. 2008. Analysis and evaluation of depth of frozen ground affected by road climatic, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 3(4): 226–232. ISSN 1822-427X

Juknevičiūtė-Žilinskienė L. (aut., disert.). Methodology for the evaluation of the effect of the climate of Lithuania on road construction and climatic regioning: summary of doctoral dissertation: technological sciences, civil engineering (02T)/Lina Juknevičiūtė-Žilinskienė; Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius: Technika, 2009. 24 p.

Karkowski, M.; Rafalski, L. 2013. The problem of overloaded vehicles in Poland, *The XXVIII International Baltic Road Conference*, 8 p.

Kazmierowski, T.; Ninguan, L. 2002. Modeling flexible pavement using Canadian historic data. Ninth International Conference on Asphalt Pavement. Conference Proceedings (1) CD-ROM. Codehouse, Denmark. 20 p.

Ker, H. W.; Lee, Y. H.; Lin, Ch. H. 2008. Prediction models for transverse cracking of jointed concrete pavements: Development with long-term pavement performance database, *Transportation Research Record* 2068: 20–31.

Khattak, J. M.; Nur, M. A.; Bhuyan, M. R. U. K.; Gaspard, K. 2013. International roughness index models for HMA overlay treatment of flexible and composite pavements, *International Journal of Pavement Engineering* doi: 10.1080/10298436.2013.842237

Kim, S.; Roque, R.; Birgisson, B.; Guarin, A. 2009. Porosity of the dominant aggregate size range to evaluate coarse aggregate structure of asphalt mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering* 21(1): 32–39. ISSN 0899-1561.

Kim, Y. R.; Allen, D. H.; Little, D. N. 2005. Damage-induced modeling of asphalt mixtures through computational micromechanics and cohesive zone fracture, *Journal of Materials in Civil Engineering* 17(5): 477–484. ISSN 0899-1561.

Kim, Y. R.; Little, D. N.; Lytton, R. L. 2003. Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering* 15(1): 75–83. ISSN 0899-1561.

Kim, Y. R.; Little, D. N.; Lytton, R. L. 2004. Effect moisture damage on material properties and fatigue resistance asphalt mixtures, *Transportation Research Record* 1891: 48–54.

Klashinsky, R.; Hanson, R.; McGibney, S. 2010. Strategic Commercial Vehicle Enforcement to Reduce GHG Emissions and Infrastructure Damage. *International Road Dynamics Inc.*

Komba, J. J., Anochie-Boateng J. K., Steyn W. van der M. 2013 Analytical and Laser Scanning Techniques to Determine Shape Properties of Aggregates, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2335: 60–71. 10.3141/2335-07.

Kopustinskias, V., Alzbutas, R., Augutis, J. Matematinų modelių parametrų jautrumo ir rezultatų neapibrėžtumo statistiniai tyrimo metodai. *Energetika*, 2007, T. 53, Nr. 3, 10–15 p.

KPT SDK 07. 2007. *Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės*. 63 p.

KPV PN-05. 2005. Kelių priežiūros vadovas. I d. *Automobilių kelių priežiūros normatyvai*. Vilnius. 50 p.

KTR 1.01:2008. *Kelių techninis reglamentas. Automobilių keliai*. 33 p.

Lackner, R.; Spiegl, M.; Blab, R.; Eberhardsteiner, J. 2005. Is low-temperature creep of asphalt mastic independent of filler shape and mineralogy? – arguments from multiscale analysis, *Journal of Materials in Civil Engineering* 17(5): 485–491. ISSN 0899-1561.

Laurinavicius, A., Vaitkus, A., Bertulienė, L., Tuminienė, F., Ziliute, L. 2009. Research of experimental road pavement structures in Lithuania, *Proceedings of II International Conference Environmentally Friendly Roads-ENVIROAD 2009*, editor D. Sybilski, Poland, 6 p.

Lee, H. J.; Park, H. M.; Lee, J. H. 2007. Development of a simplified design procedure for determining layer thickness in long-life pavement, *Transportation Research Record* 2037: 76–85.

Li, J. H.; Mahoney, J. P.; Muench, S. T.; Pierce, L. M. 2008. Bituminous surface treatment protocol for the Washington state department of transportation, *Transportation Research Record* 2084: 65–72.

Li, Y.; Metcalf, J. B. 2002. Crack initiation model from asphalt slab tests, *Journal of Materials in Civil Engineering* 14(4): 303–310. ISSN 0899-1561.

Li, Y.; Metcalf, J. B. 2004. fatigue characteristic of asphalt concrete from asphalt slab tests, *Journal of Materials in Civil Engineering* 16(4): 306–314.

Lietuvos automobilių kelių direkcija. 2013. 3p.

Loizos, A. 2006. Assessment and upgrading of in-service heavy duty pavements to long life, *International Journal of Pavement Engineering* 7(2): 133–144.

Loria, L.; Sebaaly, P. E.; Hajj, E. Y. 2008. Long-term performance of reflective cracking mitigation technique in Nevada, *Transportation Research Record* 2044: 86–95.

LST EN 12697-1:2012. *Bituminiai mišiniai. Karštojo asfalto mišinio bandymo metodai. 1 dalis. Tirpiojo rišiklio kiekis*

LST EN 12697-27:2002. *Bituminiai mišiniai. Karštojo asfalto mišinio bandymo metodai. 27 dalis. Ėminių ėmimas*

LST EN 12697-29. *Bituminiai mišiniai. Karštojo asfalto mišinio bandymo metodai. 29 dalis. Bandinių matmenų nustatymas*

LST EN 12697-30. *Bituminiai mišiniai. Karštojo asfalto mišinio bandymo metodai. 30 dalis. Bandinio paruošimas smūginiu tankintuvu*

LST EN 12697-6. *Bituminiai mišiniai. Karštojo asfalto mišinio bandymo metodai. 6 dalis. Bituminių bandinių tariamojo tankio nustatymas*

LST EN 12697-8. *Bituminiai mišiniai. Karštojo asfalto mišinio bandymo metodai. 8 dalis. Bituminių bandinių tuštytumo rodiklių nustatymas*

Lundstrom, R.; Di Benedetto, H.; Isacsson, U. 2004. Influence of asphalt mixture stiffness on fatigue failure, *Journal of Materials in Civil Engineering* 16(6): 516–525. ISSN 0899-1561

Ma T.; Huang X.; Zhao Y.; Yuan H.; Ma X. 2012. Degradation Behavior and Mechanism of HMA Aggregate, *Journal of Testing and Evaluation* 40(5): 697–707. doi: 10.1520/JTE20120057

Mackainis, V. 2006. Magistralinių kelių asfaltbetonio dangų būklė, *Lietuvos keliai* 2: 64–67 p.

Markauskas, D.; Kačianauskas, R.; Džiugys, A.; Navakas, R. 2010. Investigation of adequacy of multi-sphere approximation of elliptical particles for DEM simulations, *Granular Matter* 12: 107–123. doi:10.1007/s10035-009-0158-y

Marzouk, M.; Awad, E.; Moheeb El-Said. 2012. Kompleksinė priemonė automobilių kelių dangų atnaujinimo programoms optimizuoti, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* (7)4: 297–304.

Merilla, D.; Dommelenb, V.A.; Gasparc, L. 2006. A review of practical experience throughout Europe on deterioration in fully-flexible and semi-rigid long-life pavement, *International Journal of Pavement Engineering* 7(2): 101–109.

Moaveni, M.; Wang, S.; Hart, J. M.; Tutumluer, E.; Ahuja, N. 2013. Evaluation of Aggregate Size and Shape by Means of Segmentation Techniques and Aggregate Image

Processing Algorithms, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2335:50–59. 10.3141/2335-06.

Motiejūnas, A.; Paliukaitė, M.; Vaitkus, A.; Čygas, D.; Laurinavičius, A. 2010. Research of Dependence of Asphalt Pavement Stiffness upon the Temperature of Pavement Layers, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 5(1): 50–54. doi:10.3846/bjrbe.2010.07.

Mučinis D., Sivilevičius H., Oginskas R. 2009. Factors Determining the Inhomogeneity of Reclaimed Asphalt Pavement and Estimation of its Components Content Variation Parameters, *The Baltic Journal Of Road And Bridge Engineering*, 4(2): 69–79.

Múčka, P. 2012. Relationship between International Roughness Index and Straightedge Index, *Journal of Transportation Engineering* 138(9): 1099–1112. doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000417

Múčka, P. 2013. Correlation among Road Unevenness Indicators and Vehicle Vibration Response, *Journal of Transportation Engineering* 139(8): 771–786. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000417

Múčka, P. 2013. Influence of road profile obstacles on road unevenness indicators, *Road Materials and Pavement Design*: 1–14. doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000417

Noureldin, A. S. 1997. Quantifying the effect of pavement performance characteristics, *Transportation Research Record* 1575: 75–84.

Pellinen, T. K.; Christensen, D. W.; Rove, G. M.; Sharok, M. 2004. Fatigue transfer functions – how do they compare? *Transportation Research Record* 1896: 77–87.

Perera, R. W.; Kohn, S. D. 2012. Issues in Pavement Smoothness: A Summary Report. NCHRP, *Transportation Research Board*, 20–51 p.

Paterson, W. D. O. 1987. *Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management*. A World Bank Publication. The Johns Hopkins University Press. Baltimore, 453 p.

Paterson, W. D. O.; Bennet, Ch. 2001. *Calibration and Validation of HDM-4*. 44 p.

Petkevičius E., (aut., disert.) Automobilių kelių asfaltbetonio dangos eksploatacinių rodiklių leistinųjų verčių pagrindimas, Evaldas Petkevičius: technologijos mokslai, statybos inžinerija (02T); Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika 2010.

Petkevičius K. Automobilių kelių asfaltbetonio dangos ir jos konstrukcijos tarpremontiniai laikotarpiai ir metodika jiems nustatyti. *Miesto plėtra ir keliai*. Mokslo žurnalo „Statyba“ priedas. 2000, p. 94. ISBN 9986-05-143-1.

Petkevičius, K.; Sivilevičius, H. 2000. Automobilių kelių asfaltbetonio dangos ir jos konstrukcijos reikiamos savybės ir racionali funkcionavimo trukmė, *Transportas* 15(4): 184–195. ISSN 1392-1533.

Petkevičius K. Podagėlis I. 2000. Didžiausią atsparumą nuovargiui laiduojanti optimali asfaltbetonio sudėtis, *Miestų plėtra ir keliai* 49–54 p.

Petkevičius, E.; Laurinavičius, A.; Petkevičius, R.; Babickas, R. 2009. Effect of components content on properties of hot mix asphalt mixture and concrete, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 4(4): 161–167. DOI: 10.3846/1822-427X.2009.4.161-167.

Petkevičius, K. (aut., disert.). Automobilių kelių asfaltbetonio dangos būklės tyrimai ir jų rezultatų taikymas : habilitacijos procedūrai teikiamų mokslo darbų apžvalga Kazys Petkevičius: technologijos mokslai, statybos inžinerija (02T); Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika, 2008: 39 p. ISBN 9789955283416.

Petkevičius, K.; Sivilevičius, H. 2008. Necessary measures for ensuring the quality of hot mix asphalt in Lithuania, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 3(1): 29–37.

Pradhan, N. P.; Hennig, T.; Wilson, D. J. 2001. *Development of pavement deterioration modeling in New Zealand. A Review of Achievements. HTC Infrastructure Management Ltd.* 56 p.

Puodžiukas, V. *Bituminous pavement evolution and strengthening needs assessment in Lithuania. Summary of doctoral dissertation.* Vilnius: Technika, 2000. 42 p.

Radziszewski, P. 2007. Modified Asphalt Mixtures resistance to Permanent Deformations, *Journal of Civil Engineering and Management International Research and Achievements* 13(4): 307–315. DOI:10.1080/13923730.2007.9636451

Romero, J. A.; Lozano, A., *et al.* 2006. Effect of truck suspension and tire properties on pavement damage spatial distribution, *Transportation Research Record* 1949: 148–154.

Richter, C. A.; Schwartz, C. W. 2003. Modeling stress – and moisture-induced variation in pavement layer moduli, *Transportation Research Record* 1860: 33–40

RSN 256-94. *Statybinė klimatologija.* 1995. Vilnius: Aplinkos ministerija. 136 p.

Sandra, A. K.; Sarkar, A. K., 2012. Development of a model for estimating International Roughness Index from pavement distresses, *International Journal of Pavement Engineering* 14 (8): 715–724. doi: 10.1080/10298436.2012.703322.

Salama, H. K.; Chatti, K., *et al.* 2006. Effect of heavy multiple axle trucks on flexible pavement damage using in-service pavement performance data, *Journal of Transportation Engineering – ASCE* 132(10): 763–770.

Schmuck, A.; Hehenberger, F. 1993. Mängelursachen, Erhaltungmaßnahmen und Auswirkungen auf das Zustandsniveau-Endwicklung einer Systematic für das Management der Straßenerhaltung Forch, *Strassenbau und Strassenverkehrstechn* 652: 118.

Seo, Y.; El-Haggan, O.; King, M.; Lee, S. J.; Kim, Y. R. 2007. Air Void models for the dynamic modulus, fatigue cracking, and rutting of asphalt concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(10): 874–883. ISSN 0899-1561.

Šiaudinis G., Čygas D. 2007. Determination of Seasonal Effects on the Structural Strength of Asphalt Pavements, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 2(2): 67–72.

Sivilevičius, H.; Petkevičius, K. 2002. Regularities of defect development in the asphalt concrete road pavement. *Journal of Civil Engineering and Management* 8(3): 206–213.

Sivilevičius H., Vansauskas V. 2013. Research and evaluation of ruts in the asphalt pavement on Lithuanian highways, *Journal of Civil Engineering and Management* 19(5): 609–621. DOI:10.3846/13923730.2013.817481

Sivilevičius H.; Zavadskas, E. K.; Turskis Z. 2008. Quality Attributes And Complex Assessment Methodology of the Asphalt Mixing Plant, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 3(3): 161–166. DOI: 10.3846/1822-427X.

Sivilevičius, H. 2011. Modelling the Interaction of Transport System Elements, *Transport* 26(1): 20–34. doi:10.3846/16484142.2011.560366

Sivilevičius, H. The quality improvement system of asphalt concrete mixture production technological process: summary of the research report presented for habilitation: technological sciences, civil engineering (02T); Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius : Technika, 2003. 36 p

Sivilevičius, H.; Vislavicius, K. 2008. Stochastic Simulation of the Influence of Variation of Mineral Material Grading and Dose Weight on Homogeneity of Hot Mix Asphalt, *Construction and Building Materials* 22(9): 2007–2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.001>

Sivilevičius, H.; Šukevičius, Š. 2009. Manufacturing technologies and dynamics of hot-mix asphalt mixture production. *Journal of Civil Engineering and Management* 15(2): 169–179. ISSN 1392-3730 print./ISSN 1822-3605 online.

Skrinskas, S.; Gasiūnienė, V. E.; Laurinavičius, A.; Podagėlis, I. 2010. Lithuanian mineral resources, their reserves and possibilities for their usage in road building, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 5(4): 218–228. ISSN 1822-427X

Sokolov, J.; Sivilevičius, H. 2011. Sunkiųjų automobilių sąveikos su kelio dangą ir jų įtakos konstrukcijos sluoksniams analizė, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 3(2): 103–109. doi:10.3846/mla.2011.040

Sunkiųjų transporto priemonių įtakos asfaltbetonio dangos konstrukcijoms, įvertinant automobilių srautus valstybinės reikšmės keliuose, tyrimai ir vertinimas. 2009. Vilnius: VGTU. 211 p.

ST 9306149.02: 2002. *Pažaidų taisymas gatvių asfaltbetonio dangoje. Statybos taisyklės.* Vilnius: Vilniaus miesto savivaldybės Energetikos ir ūkio departamento Miesto ūkio skyrius. 10 p.

Tarefder, R., Rodriguez-Ruiz, J. 2013. Local Calibration of MEPDG for Flexible Pavements in New Mexico. *Journal of Transportation Engineering* 139(10): 981–991. doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000576.

Thodesen, C. C.; Lerfald, B. O.; Hoff, I. 2012. Review of asphalt pavement evaluation methods and current applications in Norway, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 7(4): 246–252. DOI: 10.3846/bjrbe.2012.33

Tarelder, R. A.; White, L.; Zaman, M. 2005. Development and application of a rut prediction model for flexible pavement, *Transportation Research Record* 1936: 201–209.

Tighe, S.; Huen, K.; Haas, R. 2007. Environmental and traffic deterioration with mechanistic – empirical pavement design model: Canadian example, *Transportation Research Record* 1989(2): 336–343.

Timm, D.H.; Newcomb, D.E. 2006. Perpetual pavement design for flexible pavements in the US, *International Journal of Pavement Engineering* 7(2): 111–119.

TRA ASFALTAS 08. Automobilių kelių asfalto mišinių techninių reikalavimų aprašas. Vilnius. 2008

TRA MIN 07. Automobilių kelių mineralinių medžiagų. techninių reikalavimų aprašas. Vilnius. 2007

Vaitkus, A.; Čygas, D.; Laurinavičius, A.; Perveneckas, Z. 2009. Analysis and evaluation of possibilities for the use of warm mix asphalt in Lithuania, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 4(2): 80–86. DOI: 10.3846/1822-427X.2009.4.80-86

Vaitkus, A.; Laurinavičius, A.; Oginskas, R.; Motiejūnas, A.; Paliukaitė, M.; Barvidienė, O. 2012. The road of experimental pavement structures: experience of five years operation, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 7(3): 220–227. ISSN 1822-427X

Vaitkus, A.; Puodžiukas, V.; Motiejūnas, A.; Vitkienė, J.; Vorobjovas, V.; Paliukaitė, M. 2010. Long term research of experimental asphalt pavement structures. Transport Research Arena Europe, Brussels, Belgium, 7–10 June : proceedings [DVD] Brussels : The European Road Transport Research Advisory Council 1–8 p.

Vaitkus, A.; Vorobjovas, V.; Žiliūtė, L.; Kleizienė, R.; Ratkevičius, T. 2012. Optimal selection of soils and aggregates mixtures for a frost blanket course of road pavement structure, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 7(2): 154–159. ISSN 1822-427X

Vislavicius, K.; Sivilevicius, H. 2013. Effect of Reclaimed Asphalt Pavement Gradation Variation on the Homogeneity of Recycled Hot-Mix Asphalt, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 13(3): 345–253. <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2013.03.003>.

Wang, H. 2006. Road Profiler Performance Evaluation and Accuracy Criteria Analysis. *Master thesis*, Civil and Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University.

Wu, Z., Yang, X., Zhang, Z. 2013. Evaluation of MEPDG flexible pavement design using pavement management system data: Louisiana experience, *International Journal of Pavement Engineering* 14(7): 674–685. Doi:10.1080/10298436.2012.715644.

Yavuzturk, C.; Ksaibati, K.; Chiasson, A. D. 2005 Assessment of temperature fluctuation in asphalt pavements due to thermal environmental condition using a two-dimensional, transient finite-difference approach, *Journal of Materials in Civil Engineering* 17(4): 465–475. ISSN 0899-1561.

Yu, H. S. 2005. Road materials and pavement desing – Foreword, *Road Materials and Pavement* 6(1): 7–14.

Zhang, Z. M.; Leidy, J. P.; Kawa, I., *et al.* 2000. Impact of changing traffic characteristics and environmental condition on flexible pavement, *Transportation Research Record* 1730: 125–131.

Žilionienė, D.; De L., M.; Dellacqua, G. 2013. Evaluation of climatic factors based on the mechanistic -empiric al pavement de sign guide, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 8(3): 158–165. ISSN 1822-427X

Žiliūtė, L.; Laurinavičius, A. 2013. Traffic load impact on the initiation and development of plastic deformations in road asphalt pavements, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 8(3): 220–226. ISSN 1822-427X

Апестин, В. К. 2007. Требования к предельному состоянию нежестких дорожных одежд, *Наука и техника в дорожной отрасли* 41(2): 16–17

Бахрах, Г. С. 2008. Проектирование нежестких дорожных одежд по критерию усталостного растрескивания, *Наука и техника в дорожной отрасли* 45(2): 32–34.

Золотарев, В. А. 2004. Влияние свойств битумополимерных вяжущих на здвигоустойчивость асфальтобетонов, *Наука и техника в дорожной отрасли* 29(2): 27–30.

Иваньски, М. 2003. Влияние вида минерального материала на свойства асфальтобетона, *Наука и техника в дорожной отрасли* 25(2): 35–37.

Рыбьев, И. А. 2008. *Строительное материаловедение*. Москва: Высшая школа. 701 с.

Коганзон, М. С.; Лугов, С. В. 2004. Расчет и конструирование дорожных одежд по критерию допустимой остаточной деформации, *Наука и техника в дорожной отрасли* 30(3): 17–19.

Радовский, Б. С.; Сердюк, А. В. 1997. Прогнозирование закономерности изменения состояния дорожной одежды, *Автомобильные дороги* 7: 19–21.

Яромко, В. Н. 2008. О совершенствовании проектирования дорожных одежд нежесткого типа, *Наука и техника в дорожной отрасли* 45(2): 28–31.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Bulevičius, M., Petkevičius, K., Žilionienė, D., Čirba S. 2011. Statistical analysis of thermal and weathering, physical-mechanical properties of aggregates used for producing asphalt mixtures test results, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 6(2): 115–123 doi: 10.3846/bjrbe.2011.16 (Thomson Reuters Web of knowledge).

Bulevičius, M., Petkevičius, K., Čirba S. 2013. The influence of geometric parameters on strength properties of the aggregates used to produce asphalt mixtures, *Journal of Civil Engineering and Management* 19(6): 894–902 doi:10.3846/13923730.2013.858645 Thomson Reuters Web of knowledge).

Straipsniai kituose leidiniuose

Bulevičius, M., Petkevičius, K., Žilionienė, D., Čirba S., Oginskas, R., Bertulienė, L. 2011. The influence of geometrical parameters on the strength of crushed stone used for the manufacture of asphalt mixtures. *8th international conference „Environmental Engineering”, Selected Papers (19–20 May 2011, Vilnius, Lithuania)* 3: 1160–1161. ISBN 978-9955-28-826-8 (Thomson ISI Proceedings).

Bertulienė, L., Oginskas, R., Bulevičius, M. 2011. Research of rut depth in asphalt pavements reinforced with geosynthetic materials. *8th international conference „Environmental Engineering”: Selected Papers (19–20 May 2011, Vilnius, Lithuania)* 2: 738–743. ISBN 978-9955-28-826-8 (Thomson ISI Proceedings).

Bulevičius, M., Petkevičius, K., Žilionienė, D., Drozdova, K. 2010. Testing of physical-mechanical properties of coarse aggregate, used for producing asphalt mixtures, and analysis of test results. *10th international conference „Modern building, materials, structures and techniques”: Selected Papers (16–21 May 2004, Vilnius, Lithuania)*: 186–192. ISBN 978-9955-28-594-6 (Thomson ISI Proceedings).

Булявичюс М.; Петкявичюс К.; Жиленене Д. Исследование физико-механических свойств крупных заполнителей, применяемых для производства асфальтовых смесей в Литве, *Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Белорусского национального технического университета, "Перспективные направления проектирования, строительства и эксплуатации дорог, мостов и подземных сооружений"* часть 1. 21–22 октября 2010 г. Минск, Беларусь, Минск: БНТУ, 18–24.

Priedai ¹

A priedas. Kelio dangos konstrukcinių sluoksnių savybių
sieties analizė

B priedas. Kelio dangos konstrukcinių sluoksnių rodiklių
skirstiniai

C priedas. Sugeneruoti kelio dangos konstrukcinių
sluoksnių rodikliai

D priedas. Sugeneruotos kelio dangos konstrukcijos

¹ Priedai pateikti pridėtoje elektroninėje laikmenoje

Matas BULEVIČIUS

KELIŲ TAMPRIOSIOS DANGOS KONSTRUKCIJŲ SAVYBIŲ ĮTAKA JŲ VIRŠUTINIO
SLUOKSNIO EKSPLOATACINIAMS RODIKLIAMS

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, statybos inžinerija (02T)

Matas BULEVIČIUS

INFLUENCE OF THE PROPERTIES OF FLEXIBLE ROAD PAVEMENT STRUCTURE
ON THE SERVICE INDICES OF WEARING COURSES

Doctoral Dissertation
Technological Sciences, Civil Engineering (02T)

2013 12 13. 11,75 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius