

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Lina BERTULIENĖ

AUTOMOBILIŲ KELIŲ KONSTRUKCIJOS
PAGRINDO SLUOKSNIŲ STIPRUMO
NUSTATYMO METODŲ
VERTINIMAS, TYRIMAI IR TAIKYMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI
STATYBOS INŽINERIJA (02T)



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2011

Disertacija rengta 2006–2011 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Disertacija ginama eksternu.

Mokslinis konsultantas

prof. dr. Alfredas LAURINAVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T).

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

Pirmininkas

prof. dr. Donatas ČYGAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T).

Nariai:

prof. habil. dr. Juozas ATKOČIŪNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T),

prof. dr. Žilvinas BAZARAS (Kauno technologijos universitetas, transporto inžinerija – 03T),

doc. dr. Dainius MIŠKINIS (Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos, statybos inžinerija – 02T),

prof. dr. Juris SMIRNOVS (Rygos technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2011 m. gruodžio 21 d. 14 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 5 270 0112; el. paštas: doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2011 m. lapkričio 18 d.

Disertaciją galima peržiūrėti interneto svetainėje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 1928-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-609-457-019-3

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2011

© Lina Bertulienė, 2011

lina.bertulienė@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Lina BERTULIENĖ

ASSESSMENT, RESEARCH AND USE
OF METHODS FOR DETERMINING
THE STRENGTH OF BASE COURSES
OF ROAD PAVEMENT STRUCTURE

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (02T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNICA 2011

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2006–2011.

The dissertation is defended as an external work.

Scientific Consultant

Prof Dr Alfredas LAURINAVIČIUS (Vilniaus Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T).

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

Chairman

Prof Dr Donatas ČYGAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T).

Members:

Prof Dr Habil Juozas ATKOČIŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T),

Prof Dr Žilvinas BAZARAS (Kaunas University of Technology, Transport Engineering – 03T),

Assoc Prof Dr Dainius MIŠKINIS (Lithuanian Road Administration under the Ministry of Transport and Communications, Civil Engineering – 02T),

Prof Dr Juris SMIRNOVS (Riga Technical University, Civil Engineering – 02T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Civil Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University **at 2 p. m. on 21 December 2011.**

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intended defending of the dissertation was send on 18 November 2011.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Internet website <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjami automobilių kelių konstrukcijų stiprumo nustatymo metodai ir jų taikymas. Disertacijos tikslas – remiantis teorinių bei eksperimentinių tyrimų rezultatais pagrįsti statinių ir dinaminių poveikių matavimo metodų tinkamumą kelio konstrukcijos sluoksnių stiprumui nustatyti bei parinkti patikimiausią. Sprendžiami šie pagrindiniai uždaviniai: išnagrinėti kelio konstrukcijos stiprumo nustatymo metodus, eksperimentiškai ištirti Lietuvos automobilių kelių konstrukcijų stiprumą taikant statinį ir dinaminį matavimo metodus, nustatyti patikimą ryšį tarp matavimo metodų rezultatų, parinkti tinkamiausią matavimo metodą atskiriems kelio konstrukcijos sluoksniams.

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros ir autorės publikacijų disertacijos tema sąrašai, 9 priedai.

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

Pirmasis skyrius skirtas literatūros analizei. Jame pateikta Europos ir pasaulio šalių automobilių kelių dangų konstrukcijų stiprumo nustatymo skaičiuojamaisiais metodais, jas projektuojant, apžvalga, plačiau aprašomi vieni svarbiausių metodų, taikomų Lietuvoje.

Antrajame skyriuje atlikta įvairių veiksnių įtakos kelio dangos stiprumui analizė. Išnagrinėtas žalingas važiuojančių automobilių ašinių apkrovų poveikis kelio dangai, išanalizuota kelio dangos stiprumo ir būklės priklausomybė nuo aplinkos temperatūros bei kritulių sezoninių pokyčių.

Trečiajame skyriuje analizuojami eksperimentinių tyrimų etapai, bandomojo ruožo eksperimentiniams tyrimams parinkimas, dangos konstrukcijos parametrų tyrimo metodika ir naudojama įranga, autorės atliktų tyrimo duomenų analizė.

Ketvirtajame skyriuje pateikta bandomojo ruožo ant žemės sankasos ir apatinių dangos konstrukcijos sluoksnių tyrimų rezultatų statistinė analizė ir vertinimas. Pasiūlyti redukcijos koeficientai tarp statinių ir dinaminių matavimo metodų.

Disertacijos tema paskelbta 10 mokslinių straipsnių: du – mokslo žurnaluose, referuojamuose *Thomson ISI Web of Science* duomenų bazėje, vienas – konferencijų pranešimų rinkinyje, referuotame Mokslinės informacijos instituto *Thomson ISI Proceedings* leidinyje, penki – recenzuojamų tarptautinių konferencijų ir seminarų rinkiniuose, du – Lietuvos konferencijos straipsnių rinkinyje. Disertacijos tema perskaityti trys pranešimai Lietuvos ir kitų šalių mokslinėse konferencijose bei seminaruose.

Abstract

The dissertation studies methods and their use for determining structural strength of the road pavements. The aim of research – on a basis of theoretical and experimental research results to justify suitability of the static and dynamic measuring methods for determining structural strength of road pavement layers and to select the most reliable method. The following main tasks were solved: analysis of methods for measuring structural strength of road pavements, experimental research on the structural strength of Lithuania's road pavements by the static and dynamic measuring methods, determination of a reliable correlation between the results of measuring methods, selection of the most suitable measuring method for the separate structural layers.

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

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

Chapter 1 covers the analysis of the literature. There is the review of research works carried out in Europe and other countries of the world for determining structural strength of road pavements by calculation methods during their design and gives a wide description of the main methods used in Lithuania.

Chapter 2 gives the analysis of the effect of different factors on the road pavement strength, studies a damaging impact of the axle loads of moving vehicles on road pavement, also the dependency of strength and condition of road pavement on the changes in the ambient temperature and seasonal precipitation.

Chapter 3 analyses the stages of experimental research, selection of a test section for experimental research, methodology for investigating pavement structure parameters and the equipment used, gives the analysis of research data obtained by the author.

Chapter 4 describes statistical analysis and assessment of research results obtained on the subgrade and the lower pavement layers. Reduction coefficients are suggested to be used between the static and dynamic measuring methods.

On the topic of the dissertation 10 scientific articles have been published: two – in scientific journals included in the Thomson ISI Web of Science, one – in the proceedings referred in the Thomson ISI Proceedings, five – in the reviewed proceedings of international conferences and seminars, two – in the proceedings of the conference held in Lithuania. On the topic of the dissertation 3 presentations were made in the scientific conferences and seminars held in Lithuania and other countries.

Sąvokos

Deformacija – kūno formos ir (arba) matmenų pokytis dėl išorinių jėgų, šilumos, drėgmės ar kt. veiksnių; pernelyg didelių deformacijų neišvengiamai sukelia kelių dangos (KD) remonto poreikį, o jį būtina kuo skubiau atlikti, kai KD lygumas ir (arba) jos suirties mastas viršija savo (ribinę) vertę.

Deformacijos modulis – medžiagos gebėjimą priešintis deformavimui apibūdinantis dydis. Išreiškiamas įtempio ir santykinės deformacijos dalmeniu.

Dinaminis (momentinis) tamprumo modulis – įtempių ir jų sukeliamos tampriosios santykinės deformacijos santykis, apkrovai veikiant trumpiau kaip 0,1 s. Tai skaičiuojamasis parametras, apibūdinantis kelio dangos sluoksnių medžiagos savybes tamprumo požiūriu ir jų atsparumą deformacijoms, kai veikia važiuojančių transporto priemonių apkrova.

Dinaminis tamprumo modulis – dydis, nustatomas iš įtempimo ir tempiamosios (gniuždomosios) santykinės deformacijos santykio neišeinant už proporcingumo (Huko) dėsnio ribų, kai medžiaga dirba diniminiu režimu.

Dinaminis stiprumas – medžiagos gebėjimas priešintis dinaminei apkrovai.

Ekvivalentinis tamprumo modulis – daugiasluoksnės kelio dangos tamprumo rodiklis, lygus vienalytės puserdvės, pagal įlinkio dydį ekvivalentiškos nagrinėjamosios daugiasluoksnės dangos ir sankasos (kelio konstrukcijos) tamprumo moduliui.

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

Kelio (kelių) danga (KD) – 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 spindulių, oro deguonies, kritulių, vėjo ir kitų veiksnių. Ji būna asfaltbetoninė ar kita asfaltinė, cementbetoninė, skaldos, žvyro, akmens grindinio ir kita.

Kelio (kelių) dangos konstrukcija (KDK) – 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, kapiliarus nutraukiančios ir (arba) šilumą izoliuojančios, medžiagos). Jos paskirtis – priimti transporto priemonių 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 konstrukcija – eismui skirtos važiuojamosios dalies konstrukcija, sudaryta iš kelio dangos konstrukcijos ir po ja esančio žemės sankasos grunto, priimančio transporto priemonių apkrovas, sluoksnio (aktyvioji grunto zona, kurioje susidaro įtempiai dėl transporto priemonių apkrovų tiesioginio poveikio).

Ilgalaikis tamprumo modulis – įtempių ir jų sukeltos tampriosios santykinės deformacijos santykis, apkrovai veikiant ilgą laiką (daugiau kaip 5 min.). Priklauso nuo apkrovos trukmės.

Išilginio tamprumo modulis – proporcingumo tarp normalinių įtempių ir santykinio pailgėjimo (sutrumpėjimo) koeficientas, kai tiesaus strypo vienalytė vienašė tamproji deformacija neišeina už Huko dėsnio ribų. Koeficientas žymi normalinio įtempimo ir jį atitinkančios linijinės deformacijos santykį. Reiškiamas paskaliais (Pa).

Tamproji deformacija – deformacija, greitai išnykstanti pašalinus jos priežastį.

Tampros modulis – įtempio ir santykinės deformacijos santykis.

Statinis tamprumo modulis – skaičiuojamasis parametras, apibūdinantis kelio dangos medžiagos tamprumą, kai medžiagą veikia statinė apkrova.

Stipris – dydis, išreiškiamas didžiausiu įtėmpiu, kuriam esant medžiaga suyra.

Stiprumas – medžiagos, konstrukcijos ar jos elemento savybė priešintis išorinėms mechaninėms jėgoms.

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

Žymėjimai

Santrumpos

AASHTO – Amerikos (JAV) kelių ir transporto asociacija (angl. *American Association of State Highway and Transportation Officials*);

CBR – Kalifornijos santykinio atsparumo rodiklis (angl. *California Bearing Ratio*);

DAVASEMA – dangų (būklės) valdymo sistema, sukurta Lietuvoje;

DORNII – DORNII dangų projektavimo metodika, sukurta remiantis rusiškąja VSN 46-83 automobilių kelių instrukcija;

DVS – dangų (būklės) valdymo sistema;

ELMOD – programa, skirta dangos konstrukcijos sluoksnių tamprumo moduliams nustatyti ir projektavimo veiksams atlikti (angl. *Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design*);

ES – Europos Sąjunga;

ESA – ekvivalentinė standartinė ašis (angl. *Equivalent Standart Axle*);

FWD – krintančio svorio deflektometras (angl. *Falling Weight Deflectometer*);

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 – kelio danga;

KDK – kelio dangos konstrukcija;

KK – kelio konstrukcija;
 PMS – kelio dangos būklės valdymo sistema (angl. *Pavement Management System*);
 SNC – kelio dangos konstrukcijos stiprio rodiklis;
 SNSG – sankasos grunto stiprumo rodiklis;
 TKTI – VĮ Transporto ir kelių tyrimo institutas;
 VMPEI – vidutinis metinis paros transporto priemonių eismo intensyvumas;
 ŽS – žemės sankasa.

Pagrindiniai simboliai

A_i – automobilio ašinė apkrova, kN;
 E – tamprumo modulis, MPa;
 E_o – paviršiaus modulis apkrovos plokštės centre, MPa;
 E_b – bendras konstrukcijos tamprumo modulis, MPa;
 E_r – reikalingas ekvivalentinis (bendras) konstrukcijos tamprumo modulis, įvertinantis dangos tipą, apkrovų intensyvumą, MPa;
 E_d – žemės sankasos deformacijos modulis, MPa;
 E_v – dangos konstrukcijų sluoksnių tamprumo modulis, MPa;
 E_{vd} – dinaminis deformacijos modulis, MPa;
 E_{v2} – deformacijos modulis, nustatytas pagal statinio bandymo antrinę apkrovą, MPa;
 G_i – transporto priemonės ašies apkrova, MPa;
 H – krentančio svorio aukštis, cm;
 K_{st} – kelio dangos stiprumo koeficientas;
 k_p – stiprumo koeficientas, pagal tampraus įlinko kriterijų;
 k^* – siūlomas redukcijos koeficientas skirtas palyginti statiniais ir dinaminiais matavimo metodais gautus rezultatus;
 m – atliktų matavimų skaičius per metus;
 N – automobilio ašių skaičius;
 n – dangos konstrukcijos sluoksnių skaičius;
 P – automobilio rato slėgis į dangą, Pa;
 R_s – ribiniai leidžiamieji tempimo įtempiai monolitiniame dangos sluoksnyje;
 R – apkrovos plokštės spindulys cm;
 S – rato pėdsako plotas, cm;
 s – grunto po apkrovos plokšte deformacija, mm;
 γ_{vd} – dangos konstrukcijos, slūgsančios ant nagrinėjamojo taško, vertinis lyginamasis svoris;
 ε_b – suminės deformacijos atsirandančios kelio konstrukcijoje dėl įtempių;
 $\Delta\sigma$ – įtempių pokytis po štapu centre, mm;
 Δs – grunto deformacijos pokytis štapo centre, mm;
 ν – Puasono koeficientas.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektas	3
Darbo tikslas	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas	5
Disertacijos struktūra	5
1. ANALITINĖ AUTOMOBILIŲ KELIŲ DANGŲ KONSTRUKCIJŲ STIPRUMO TYRIMO METODŲ APŽVALGA	7
1.1. Automobilių kelių dangų konstrukcijų stiprumo kriterijai	7
1.2. Automobilių kelių dangų konstrukcijų stiprumo nustatymas jas projektuojant	11
1.2.1. Kelio dangų konstrukcijų projektavimas taikant DORNII metodą	18
1.2.2. Automobilių kelių dangų projektavimas taikant „Dynatest“ ELMOD metodą	22
1.2.3. Automobilių kelių dangų projektavimas taikant AASHTO metodą	23
1.3. Praktikoje taikomų kelio dangos konstrukcijos stiprumo matavimo metodų apžvalga	25
1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir darbo uždavinių formulavimas	31

2. AUTOMOBILIŲ KELIŲ KONSTRUKCIJŲ STIPRUMO PARAMETRŲ TYRIMO METODAI.....	33
2.1. Kelio konstrukcijos stiprumą įvertinantys metodai ir modeliai, tamprumo ir deformacijos modulio nustatymas	33
2.1.1. Nestandžiųjų dangų konstrukcijos veikiant apkrovai nustatymo modeliai	38
2.1.2. Statiniai ir dinaminiai stiprumo matavimo metodai	43
2.2. Priklausomybės tarp statinių ir dinaminių matavimo metodų nustatymas	51
2.3. Automobilų kelio konstrukciją veikiantys veiksniai	55
2.3.1. Automobilų apkrovų poveikis kelio dangos konstrukcijos būklei ir ilgaamžiškumui	55
2.3.2. Aplinkos veiksniai ir jų įtaka kelio dangos konstrukcijai.....	58
2.4. Antrojo skyriaus išvados	63
3. KELIO KONSTRUKCIJOS STIPRUMO MATAVIMO METODŲ EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI	65
3.1. Eksperimentinių tyrimų planas.....	65
3.2. Bandomojo ruožo eksperimentiniams tyrimams įrengimas	67
3.3. Kelio konstrukcijos parametrų tyrimo metodika ir naudojama įranga	71
3.4. Tyrimų, atliktų ant žemės sankasos ir apatinių dangos konstrukcijos sluoksnių, analizė	78
3.4.1. Tyrimų, atliktų ant žemės sankasos bandomuosiuose ruožuose, analizė	78
3.4.2. Tyrimų, atliktų ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio bandomuosiuose ruožuose, analizė.....	80
3.4.3. Tyrimų, atliktų ant dangos pagrindo sluoksnių bandomuosiuose ruožuose, analizė	82
3.5. Trečiojo skyriaus išvados	85
4. KELIO KONSTRUKCIJOS STIPRUMO MATAVIMO METODŲ TYRIMŲ REZULTATŲ ANALIZĖ IR VERTINIMAS	87
4.1. Tyrimo rezultatų statistinės duomenų charakteristikos ir analizė	88
4.2. Žemės sankasos stiprumo matavimo rezultatų analizė.....	90
4.3. Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio stiprumo matavimo rezultatų analizė.....	97
4.4. Dangos pagrindo stiprumo matavimo rezultatų analizė	102
4.5. Siūlomas redukcijos koeficientas ir jo nustatymas.....	110
4.6. Ketvirtojo skyriaus išvados	116
BENDROSIOS IŠVADOS	117
LITERATŪROS SĄRAŠAS	119
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	127
SUMMARY IN ENGLISH.....	129

PRIEDAI ¹	147
A priedas. Automobilių kelių konstrukcijos sandara, sluoksnių paskirtis	148
B priedas. Kelio konstrukcijos sluoksnių stiprumo nustatymo metodai	154
C priedas. Rekomenduojamos apytikrės dinaminio deformacijos modulio pervedimo į statinių deformacijos modulį reikšmės	167
D priedas. Kauno bandomojo ruožo duomenys	168
E priedas. Pagirių bandomojo ruožo duomenys	186
F priedas. Matavimų schemos	206
G priedas. Konstrukcijos schemos	208
H priedas. Publikacijų bendraautorių sutikimai teikti publikacijas disertacijos gynime	212
I priedas. Autoriaus publikacijų disertacijos tema kopijos	219

¹ Priedai pateikti pridėtoje elektroninėje laikmenoje

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem	1
Topicality of the thesis	2
The object of research	3
The aim of thesis	3
The tasks of thesis	3
Methodology of research	3
Scientific novelty	4
Practical value	4
Defended propositions	4
Approval of the results of work	5
The scope of dissertation.....	5
1. ANALYTICAL REVIEW OF METHODS FOR THE DETERMINATION OF PAVEMENT STRUCTURAL STRENGTH.....	7
1.1. Strength criteria for road pavement structures	7
1.2. Determination of strength of road pavement structures during their design	11
1.2.1. Design of road pavement structures by DORNII method	18
1.2.2. Design of road pavement structures by Dynatest ELMOD 5 method	22
1.2.3. Design of road pavement structures by AASHTO method	23
1.3. Review of methods used in practice for measuring structural strength of road pavement ..	25
1.4. Conclusions of the first chapter and formulation of the tasks of work.....	31

2. METHODS FOR THE DETERMINATION OF STRUCTURAL STRENGTH PARAMETERS OF ROAD PAVEMENT	33
2.1. Methods and models for the assessment of strength of road structure	33
2.1.1. Models for determining strength of flexible pavement structure under the effect of load	38
2.1.2. Static and dynamic measuring methods	43
2.2. Determination of correlation between the static and dynamic measuring methods	51
2.3. Factors influencing road structure	55
2.3.1. Vehicle load impact on the condition and durability of road pavement structure	55
2.3.2. Environmental factors and their effect on road pavement structure	58
2.4. Conclusions of the second chapter	63
3. EXPERIMENTAL RESEARCH ON MEASURING METHODS OF PAVEMENT STRUCTURAL STRENGTH	65
3.1. The plan of experimental research	65
3.2. Construction of a test section for experimental research	67
3.3. Methodology for determining parameters of the road structure and the equipment used	71
3.4. Analysis of research on the subgrade and the lower layers of pavement structure	78
3.4.1. Analysis of research on the subgrade of the test sections	78
3.4.2. Analysis of research on the frost-blanket course of the test sections	80
3.4.3. Analysis of research on the base courses of the test sections	82
3.5. Conclusions of the third chapter	85
4. ANALYSIS AND ASSESSMENT OF RESEARCH RESULTS ON MEASURING METHODS OF PAVEMENT	87
4.1. Statistical data characteristics and analysis of research results	88
4.2. Analysis of results of measuring subgrade strength	90
4.3. Analysis of results of measuring frost-blanket course strength	97
4.4. Analysis of results of measuring pavement base strength	102
4.5. The suggested reduction coefficient and its determination	110
4.6. Conclusions of the fourth chapter	116
GENERAL CONCLUSIONS	117
REFERENCES	119
LIST OF AUTHOR'S PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	127
SUMMARY IN ENGLISH	129
ANNEXES ¹	147
Annex A. Composition of road structure, designation of layers	148
Annex B. Methods for determining structural strength of road pavement layers	154
Annex C. The recommended approximate values for reducing the dynamic deformation modulus to the static deformation modulus	167

¹ The annexes are supplied in the enclosed compact disc

Annex D. Data on Kaunas test section	168
Annex E. Data on Pagiriai test section	186
Annex F. Schemes of measurements	206
Annex G. Schemes of structure	208
Annex H. The coauthors agreements to present publications for the dissertation defence	212
Annex I. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation	219

Ivadas

Problemos formulavimas

Lietuvos automobilių kelių tinklas yra gerai išvystytas ir per pastaruosius metus kito nedaug (21 324,8 km valstybinių kelių), tačiau ankstesniais metais nutiesiems keliams padidėjusių apkrovų ir didėjančio krovinio transporto eismo intensyvumas turi įtakos jų dangos stipriui ir ilgaamžiškumui. Šie veiksniai reikalauja daug daugiau lėšų kelių priežiūrai ir eismo intensyvumui laiduoti. Lietuvos magistraliniuose keliuose ekvivalentinių ašinių apkrovų kiekis nuo 2000 m. padidėjo daugiau kaip du kartus, o bendras eismo intensyvumas – apie 55 %, nors šiuo metu dėl pasaulinės krizės padarinių eismo intensyvumas yra ir sumažėjęs, suintensyvėjusio sunkaus transporto eismo apkrovos sukelia spartų kelio dangos irimą.

Dangos konstrukcijos stiprumas – vienas iš svarbiausių rodiklių, lemiančių gebėjimą atlaikyti transporto priemonių apkrovas. Automobilių kelių nestandžių dangų konstrukcijų atskirų sluoksnių ir visos konstrukcijos bendras stiprumas gali būti apskaičiuotas jas projektuojant. Šiuo metu Lietuvos automobilių kelių nestandžių dangų konstrukcijos yra parenkamos pagal KPT SDK 07 „Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės“ reikalavimus. Dažnai parinktos kelio dangų konstrukcijos neatitinka realių jų eksploatavimo sąlygų (transporto priemonių apkrovų, klimatinių faktorių ir kt.), todėl tipinių,

jokiais skaičiavimais nepatikrintų dangų konstrukcijų taikymas tiesiant, rekonstruojant bei remontuojant automobilių kelius neretai reikalauja patikslinimų. Tiesiant ir rekonstruojant kelius, reikia kontroliuoti, ar įrengtų dangos konstrukcijų sluoksnių stiprumas atitinka projektinį stiprumą. Tam taikomi įvairūs dangos konstrukcijų sluoksnių stiprumo nustatymo metodai. Pasaulyje plačiai taikomi statinis ir dinaminis deformacijos modulio nustatymo metodai, neardant kelio konstrukcijų, tačiau daugumoje šalių projektuojant ir įrengiant automobilių kelių konstrukcijas jų stiprumas apibrėžiamas statiniu deformacijos moduliu. Todėl labai svarbu teoriškai ir eksperimentinių tyrimų rezultatų pagrindu pagrįsti šių pasaulyje naudojamų metodų tinkamumą kelio konstrukcijos sluoksnių stiprumui nustatyti.

Darbo aktualumas

Nuolat didėjantis Lietuvos automobilių kelių dangų konstrukcijų stiprinimo poreikis skatina diegti naujas kelių rekonstrukcijos technologijas, ieškoti naujų kelio dangos konstrukcijos sluoksnių įrengimo variantų, tirti konstrukcijas realiomis jų eksploataavimo sąlygomis. Siekiant nustatyti ir palyginti statiniu ir dinaminio metodu atliktų bandymų rezultatų tikslumą, 2007 m. Vilniaus Gedimino technikos universiteto Automobilių kelių mokslo laboratorija atliko lyginamuosius matavimus bandomajame kelio ruože. Remiantis šių matavimų duomenimis, atlikta matavimo metodų apžvalga, eksperimentiškai ištirti Lietuvos automobilių kelių dangos konstrukcijų stiprumas skirtingais matavimo metodais naudojant statinių ir dinaminių matavimų prietaisus. Šio bandomojo ruožo tyrimų rezultatai, jų analizė ir vertinimas leis parinkti tinkamiausią matavimo metodą atskiriems kelio konstrukcijos sluoksniams.

Svarbiausias tokių tyrimų tikslas – nustatyti priklausomybę tarp statinių ir dinaminių kelio dangos tamprumo modulių. Kadangi tiesioginės priklausomybės tarp šių modulių nustatymo formulės praktikoje naudojamos retai, buvo siekiama nustatyti redukcijos koeficiento reikšmes, kurios leistų įvertinti reikalaujamą sluoksnių laikomąją galią taikant dinامينius matavimo metodus.

Kitaip tariant, netolimoje ateityje kokybės vertinimas, pagrįstas dinaminiais moduliais, galėtų pakeisti plačiai naudojamą lėtą ir sudėtingą bandymą statine plokštės apkrova. Remiantis šiais rezultatais būtų galima sukurti ir panaudoti naujus dinaminiais tyrimais pagrįstus projektavimo metodus.

Tyrimų objektas

Tyrimų objektas: automobilių kelių konstrukcijų stiprumo matavimo metodai, jų taikymas ir vertinimas. Eksperimentinis objektas – kelio dangos konstrukcija, įrengta bandomajame ruože, statinių ir dinaminių matavimo metodų lyginamųjų tyrimų analizė ir vertinimas.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – teoriškai ir eksperimentiškai pagrįsti statinių ir dinaminių matavimo metodų tinkamumą ir suderinamumą atskirų kelio konstrukcijos (išskyrus viršutinius dangos konstrukcijos sluoksnius) sluoksnių stiprumui matuoti ir parinkti patikimiausią Lietuvos sąlygomis.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti reikia išspręsti šiuos uždavinius:

1. Išanalizuoti automobilių kelių dangos konstrukcijų stiprumo matavimo metodus.
2. Eksperimentiškai ištirti Lietuvos automobilių kelių konstrukcijų stiprumą skirtingais matavimo prietaisais, naudojant statinį ir dinaminį matavimo metodą.
3. Nustatyti patikimą ryšį tarp matavimo metodų rezultatų, gautų atlikus eksperimentinius matavimus statiniu ir dinaminiu metodu.
4. Pagrįsti tinkamiausią matavimo metodą atskiriems kelio konstrukcijos sluoksniams.

Tyrimų metodika

Darbe taikomos tyrimo metodikos pagrįstos Lietuvos ir užsienio šalių mokslininkų šios srities darbų analize. Darbe taikyti šie tyrimų metodai: analitiniai, statistiniai, matematiniai metodai; eksperimentiniai laboratoriniai; eksperimentiniai natūriniai (automobilių keliuose).

Rengiant disertaciją remtasi Lietuvos ir užsienio autorių mokslinėmis publikacijomis, mokslo institucijų moksliniais bei informaciniais leidiniais.

Darbo mokslinis naujumas

Darbo mokslinį naujumą rodo šie rezultatai:

1. Pirmą kartą įvairiais dinaminiais ir statiniais matavimo prietaisais atlikti skirtingų dangos konstrukcijų, įrengtų ant vienodo stiprio žemės san-
kasos, tyrimai.
2. Pirmą kartą atlikta lyginamoji statinių ir dinaminių matavimo metodų ir
matavimo prietaisų gautų matavimo rezultatų analizė.
3. Įvertinus taikomus stiprumo matavimo metodus, paremtus įlinkiu ma-
tavimu, pateikti siūlymai šių metodų taikymui kiekvienam kelio konst-
rukcijos sluoksniui. Pagal gautas tyrimų rezultatus pasiūlyti redukcijos
koeficientai tarp statinių ir dinaminių matavimo metodų rezultatų.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

1. Remiantis darbe atliktais tyrimais nustatyta, kad prietaisai ir metodai stip-
rumui nustatyti turi būti taikomi pagal tai, kam bus naudojami matavimo
rezultatai:
 - statiniai matavimo metodai – tinkamiausi biriųjų medžiagų
sluoksnių paviršiaus deformacijos moduliams nustatyti;
 - dinaminiai matavimo metodai – detaliems visos dangos konstruk-
cijos būklės tyrimams.
2. Atlikus matavimo rezultatų analizę nustatytas patikimas ryšys tarp mata-
vimo metodų; nustatytas gautų rezultatų skirtumas tarp statinių ir dinami-
nių prietaisų; pasiūlytos regresijos lygtys dinaminių matavimo prietaisų E
modulių reikšmėms priartinti prie statiniais matavimo metodais išmatuotų
 E_{v2} reikšmių. Pasiūlyti redukcijos koeficientai statiniams ir dinaminiam
matavimo metodams palyginti.

Ginamieji teiginiai

1. Kelio konstrukcijos kokybės vertinimą galima pagrįsti dinaminiais ma-
tavimo moduliais, kurie galėtų pakeisti plačiai naudojamą lėtą ir sudė-
tingą bandymą naudojant statinį matavimo metodą. Šie rezultatai yra
pagrindas, siekiant pagrįstai taikyti naujus dinaminis matavimo meto-
dus.

2. Statinių matavimo metodų taikymas tinkamiausias biriųjų medžiagų paviršiaus deformacijos moduliams nustatyti.
3. Dinaminiai matavimo metodai gali būti taikomi žemės sankasos ir kelio konstrukcijos apatinių sluoksnių kokybei vertinei ir kontrolei atlikti.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema paskelbta 10 mokslinių straipsnių: du – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Thomson ISI Web of Science* duomenų bazę (Bertulienė *et al.* 2008; Bertulienė *et al.* 2010), vienas – recenzuojamame tarptautinės konferencijos leidinyje, įtrauktame į *Thomson ISI Proceedings* duomenų bazę (Bertulienė *et al.* 2008), penki – tarptautinių seminarų ir konferencijų straipsnių rinkiniuose (Лауринавичюс *et al.* 2009, 2010; Laurinavičius *et al.* 2009; Bertulienė *et al.* 2010; Leonovich, Bertulienė 2011), du – jaunųjų mokslininkų konferencijos straipsnių rinkinyje (Kniukštaitė 2006, Kniukštaitė 2007).

Disertacijos tema skaityti pranešimai trijose mokslinėse konferencijose:

- 10-ojoje tarptautinėje konferencijoje „Modern Building Materials, Structures and Techniques“ 2010 m. Vilniuje;
- 10-ojoje jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ 2007 m. Vilniuje;
- 9-ojoje jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ 2006 m. Vilniuje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, rezultatų apibendrinimas ir bendrosios darbo išvados, 9 priedai.

Darbo apimtis – 126 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudotos 58 numeruotos formulės, 67 paveikslai ir 13 lentelių. Rašant disertaciją naudoti 99 literatūros šaltiniai.

Analitinė automobilių kelių dangų konstrukcijų stiprumo tyrimo metodų apžvalga

Skyriuje atlikta Europos ir pasaulio šalių automobilių kelių dangų konstrukcijų stiprumo nustatymo skaičiuojamaisiais metodais, jas projektuojant, apžvalga ir plačiau aprašomi vieni svarbiausių metodų, taikomų Lietuvoje. Išanalizuoti kelių dangos konstrukcijos stiprumui nustatyti naudojami prietaisai ir mokslininkų atlikti kelio dangos stiprumo nustatymo eksperimentiniai bandymai. Apžvelgti mokslinių tyrimų rezultatai, gauti naudojant statinius ir dinامينius matavimo metodus.

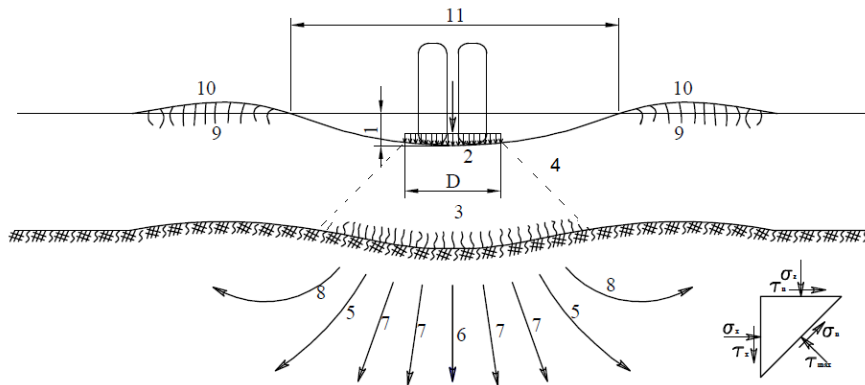
Skyriaus tematika paskelbti trys autoriaus straipsniai (Bertulienė *et al.* 2008; Bertulienė, Laurinavičius, Lapinskienė 2010; Bertulienė *et al.* 2010).

1.1. Automobilių kelių dangų konstrukcijų stiprumo kriterijai

Automobilių kelių konstrukciją sudaro danga ir žemės sankasa, atitinkamai dangos konstrukciją – dangos ir pagrindo sluoksnis (-iai), o žemės sankasa yra dangos konstrukcijos pagrindas. Dangos pagrindas turi atlaikyti eismo ir dangos

sluoksnių apkrovą bei ją paskleisti į žemės sankasą, todėl jis turi būti vientisas ir stabilus. Lietuvoje techniškai tinkamos ir ekonomiškai kelio dangos, atsižvelgiant į jų paskirtį, eismo apkrovą, gruntines sąlygas ir padėtį vietovėje, nustatomos pagal kelių techninį reglamentą KTR 1.01:2008 „Automobilių keliai“. Automobilių kelių konstrukcijos sandara ir sluoksnių paskirtis plačiau pateikta A priede.

Kelio danga yra veikiamą daugiakarčių trumpalaikių ir kartais ilgalaikių apkrovų (statinių, dinaminių), perduodamų nuo automobilių ratų. Šios apkrovos atskiruose dangos sluoksniuose sukelia įvairius įtempimus ir danga deformuojasi. Automobilio apkrova žemės sankasos gruntą aktyviojoje zonoje suspaudžia, dėl to ir kelio dangoje susidaro įlinkis. Kuo storesnė ir standesnė danga, tuo į didesnę plotą paskleidžiamas apkrovos slėgis ir tuo mažesni įtempiai atsiranda sankasos grunte. Dangos deformacijos, slėgiant automobilio ratui, pavyzdys pateiktas 2.1 paveiksle. Kelio dangos medžiaga viršuje yra suspaudžiama, o apačioje tempiama, todėl gali susidaryti plyšių. Rato ir dangos kontakto kraštuose atsiranda kirpimo įtempiai, dėl kurių, kai veikia didelės apkrovos, danga gali būti pralaužta. Horizontaliosios jėgos nerišliųjų medžiagų dangos pagrindo sluoksniuose ir žemės sankasos grunte gali sukelti neleistinus įtempimus, dėl to danga gali būti deformuota.



1.1 pav. Įlinkis ir deformacija kelio dangos konstrukcijoje veikiant statinei apkrovai:

1 – dangos deformacija; 2 – dangos suspaudimo zona; 3 – dangos tempimo zona; 4 – dangos kirpimo linija; 5 – sankasos grunto slėgio zona; 6 – grunto tankėjimas; 7 – grunto suslėgimo kryptis; 8 – grunto išspaudimas; 9 – dangos plyšiai; 10 – dangos įtempio zona; 11 – įlinkio zona

Fig. 1.1. Deflection and deformation in the road pavement structure under the effect of static load

Norint užtikrinti kelio dangos, kurią veikia automobilių apkrovos ir aplinkos veiksniai, stiprumą reikia, kad nė viename iš dangos konstrukcijos sluoksnių ar

žemės sankasoje nesusidarytų plastinių deformacijų, kad nebūtų pažeistas monolitinių dangos sluoksnių vientisumas ir kad tamprusis įlinkis, veikiant skaičiuojamajai apkrovai, nevirsytų leidžiamojo, nustatyto tyrimais ir dangų irimo įvairiomis eismo ir gamtinėmis sąlygomis stebėjimais. Skaičiuojant kelių dangų stiprumą reikia įvertinti tokius pagrindinius kriterijus: dangos sluoksnių iš nerišliųjų medžiagų arba iš gruntų atsparumą šlyčiai; monolitinių dangos sluoksnių atsparumą tempimui; visos dangos konstrukcijos atsparumą tampriam įlinkiui.

Dangų skaičiavimo pagal nurodytus kriterijus eiliškumas neturi įtakos skaičiavimų rezultatams. Esant dideliame perspektyviniame eismo intensyvumui ir mažam gruntų drėgniui, rekomenduotina skaičiavimus pradėti nuo atsparumo tampriam įlinkiui įvertinimo. Esant mažam perspektyviniame eismo intensyvumui ir dideliame gruntų drėgniui, pirmiausia reikėtų suskaičiuoti dangos sluoksnių iš nerišliųjų medžiagų arba iš gruntų atsparumą šlyčiai.

Kelio dangos konstrukcija laikoma tvirta, jeigu stiprumo atsargos koeficientas pagal kiekvieną iš išvardytų dangos stiprumo kriterijų yra lygus arba didesnis už reikiamą stiprumo koeficientą k_{st} , nustatytą įvertinus skaičiavimo patikimumo lygį:

$$k_{st} \leq E_b / E_r, \quad (1.1)$$

$$k_{st} \leq T_{leidžiamieji} / T, \quad (1.2)$$

$$k_{st} \leq R_s / \sigma_T, \quad (1.3)$$

čia E_b – bendras kelio dangos konstrukcijos tamprumo modulis; E_r – reikiamas kelio dangos konstrukcijos tamprumo modulis; $T_{leidžiamieji}$ – leidžiamieji tangentiniai įtempiai; T – tangentiniai įtempiai nuo veikiančių apkrovų; R_s – ribiniai leidžiamieji tempimo įtempiai monolitiniame dangos sluoksnyje; σ_T – skaičiuojamieji tempimo įtempiai nuo veikiančių apkrovų.

Stiprinant esamą asfaltbetoninę kelio dangą papildomais dangos sluoksniais, šių sluoksnių storį reikia pasirinkti ekonomiškai palyginant kelis galimus variantus, atitinkančius stiprumo sąlygas. Gali būti, kad pagal kurį nors vieną iš kriterijų stiprumo koeficientas bus gerokai didesnis už reikalaujamą. Jeigu visi nagrinėjami papildomų dangos sluoksnių variantai ekonomiškai lygiaverčiai, tai pasirinkti reikėtų tą, kurio vidutinis stiprumo koeficientas yra didžiausias.

Dauguma nestandžiosios dangos projektavimo metodų grindžiami prielaida, kad stiprioje bei atsparioje dangoje metams bėgant gali pasireikšti tik tampriosios deformacijos. Pagal kai kuriuos metodus leidžiama ir tam tikra ribota liekamųjų deformacijų sanakaupa (dažniausiai patobulintose ir nerišiose dangoje).

Tiriant tamprumo teorijos išvadas dar ne visada galima išsamiai analizuoti sudėtingą daugi sluoksnės kelio dangos, kurią veikia trumpalaikės, bet dažnai

besikartojančios apkrovos, konstrukciją, todėl nestandžiosios kelių dangos projektavimo metodų pasiūlyta daug.

Projektuojant dangas taikomi empiriniai metodai, pagal kuriuos nestandžioji danga projektuojama atsižvelgiant į kelių eksploataavimo patirtį, t. y. kai pagal analogiškus eismo sudėtį ir intensyvumą, taip pat vietovės gruntus ir aplinkos sąlygas pasirenkama konstrukcijos danga, kuri įrengta kokiame nors jau nutiestame kelyje. Nėra labai patikimi ir metodai, iš dalies pagrįsti eksperimentiniais tyrimais ir tamprumo teorijos išvadomis (eksperimentais dažniausiai nustatomi sankasos gruntų ir dangos medžiagų savybių rodikliai). Aukštų kategorijų kelių dangos projektuojamos taikant teorinius metodus, pagal kuriuos įtempiai dangoje bei žemės sankasoje, atsirandantys nuo apkrovų ir aplinkos veiksnių, analizuojami labai detalai.

Kai tinkamai įrengtą nestandžiąją dangą veikiančios daugkartinės apkrovos, perduodamos per automobilio ratus, atitinka dangos projekcinį stiprumą, dangoje pasireiškia tik tampriosios deformacijos. Jeigu keliu važiuoja automobiliai, kurių apkrova viršija projektinę, taip pat kai sankasos grunto atsparumas smarkiai sumažėja pavasarį ar rudenį, atsiranda nežymių plastinių deformacijų, o kai šių deformacijų sanauja didžiausio dangos susilpnėjimo metu viršija tam tikrą leidžiamąją deformaciją, danga pradeda irti (Palšaitis, Vidugiris 1999). Svarbiausi dangos rodikliai – stiprumas ir nelygumas. Jeigu danga nepakankamai stipri, joje susidaro vėžių ir pralaužų, labai padidėja pasipriešinimas ratų riedėjimui, kartais danga pasidaro visiškai nebepravažiuojama. Važiuojant nelygia danga, nuo smūgių genda ne tik automobiliai, bet ir pati danga, taip pat nuo to kenčia keleiviai ir pervežami kroviniai. Todėl danga turi būti pakankamai stipri, kad joje nesusidarytų nei vėžių, nei kitų pažaidų.

Pagal KPT SDK 07 (Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės KPT SDK 07 2007. Vilnius: Lietuvos automobilių kelių direkcija) dangos konstrukcijos skirstomos į septynias dangos konstrukcijos klases: SV, I, II, III, IV, V, VI. Dangos konstrukcijos klasė parenkama pagal projekcinę apkrovą A – ekvivalentinės 10 t svorio ašies apkrovų skaičiaus sumą.

Asfaltinių dangų konstrukcijos parenkamos pagal dangos konstrukcijos klasę. Visose dangų konstrukcijose žemės sankasos deformacijos modulis turi būti ne mažesnis kaip 45 MPa, išskyrus dangos konstrukcijas su žvyro danga. Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio deformacijos modulis turi būti 80–120 MPa, skaldos ar žvyro pagrindo sluoksnio deformacijos modulis – 120–150 MPa, jų stiprumas priklauso nuo dangos konstrukcijos klasės. Tipinės asfalto dangų konstrukcijos pateiktos „Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklėse KPT SDK 07“. Asfaltinės dangos stipris Lietuvoje nėra reglamentuojamas.

1.2. Automobilių kelių dangų konstrukcijų stiprumo nustatymas jas projektuojant

Automobilių kelių danga įrengiama įvairių sąlygų vietovėse, kuriose skiriasi žemės sankasų gruntų savybės, nevienodos vietovės drėkinimo sąlygos. Todėl dažnai dangos konstrukcija visame kelio ruože parenkama atsižvelgiant į panašiomis sąlygomis įrengtos dangos, kurioje eksploatacinės savybės ir stabilumas yra tinkami ilgą laikotarpį, ruožus. Tačiau toks kelių dangos projektavimas pagal eksploatacinį patyrimą nėra veiksmingas ekonominiu požiūriu. Dangų projektavimo metoduose svarbią reikšmę turi grunto stipris. Tačiau nemažai metodų neatsižvelgia į pasikartojantį automobilių ratų apkrovos poveikį dangai, nekreipiamą dėmesio į horizontaliąsias jėgas viršutiniuose dangos sluoksniuose (Atitinkančio Lietuvos sąlygas... 2001). Projektavimo metodai reikalauja, kad eismas būtų išreikštas automobilio apkrova į ašį arba ekvivalentinių standartinių ašių skaičiumi. Vienos ašies poveikis kelio dangai sparčiai didėja peržengus 80 kN ašies apkrovą. Šią priklausomybę galima išreikšti tokia formule:

$$ESA = \sum_N \left(\frac{A_i}{80} \right)^{k_{d.s.}}, \quad (1.4)$$

čia ESA – ekvivalentinių standartinių ašių skaičius (angl. *Equivalent Standard Axle Load's – Esal's*); A_i – automobilio ašinė apkrova, kN; 80 – standartinė ašinė apkrova; N – automobilio ašių skaičius; $k_{d.s.}$ – laipsnio rodiklis, įvertinantis dangos storį ir struktūrą.

ESA yra poveikio kelio dangai rodiklis, parodantis, kiek pasikeičia žalingas automobilio ašies poveikis dangai, lyginant su standartiniu 80 kN ašies poveikiu. Projektuojant Lietuvos kelius, didžiausioji ašies apkrova buvo 100 kN. Lietuvai paskelbus nepriklausomybę, šalies keliais pradėjo riedėti sunkesnė technika, todėl atsirado poreikis keisti didžiausiąją leidžiamąją ašies apkrovą iki 115 kN, nes tokia leidžiamoji ašies apkrova galioja daugelyje Europos valstybių, kai kuriose galioja ir 130 kN. Kelių dangos nėra pritaikytos tokioms ašių apkrovoms, todėl reikia papildomų lėšų šioms dangoms stiprinti. Blogėjant kelio dangos parametrams, intensyviau dėvisi transporto priemonės, didėja degalų sąnaudos, labiau teršiamas oras. Dėl to didėja dangos nelygumas, suyra danga, susidaro provėžų.

Šiame skyriuje trumpai apžvelgiami kai kurių Europos ir pasaulio šalių automobilių kelių nestandžiųjų dangų konstrukcijų projektavimo metodai. Šiuo metu Lietuvoje jokios aprobuotos dangų projektavimo metodikos nėra. Tie, kurie projektuoja kelio dangas, vadovaujami skirtingomis metodikomis. Čia plačiau aprašomi vienos svarbiausių metodikų, taikomų ir Lietuvoje:

- 1) AASHTO metodikos;
- 2) ELMOD metodas;
- 3) DORNII metodas.

Dauguma Europos šalių taiko analitinius dangų projektavimo ir stiprinimo poreikio nustatymo metodus, kurie konceptualiai yra labai panašūs. Jais remiantis skaičiuojami leidžiamieji įtempiai ir deformacijos kritiškuose kelio dangos pjūviuose, taikant tiesinę tamprumo teoriją. Nepaisant to, jie yra gana skirtingai taikomi – naudojami skirtingi įvadiniai duomenys apie klimatą, automobilių eismą, medžiagų savybes ir pan. (Asphalt Institute... 1991; Shell pavement...1978; Shook *et al.* 1982; Blab *et al.* 1998). Pavyzdžiui, skiriasi ratų apkrovų konfigūracijos, ekvivalentinės temperatūros vertės, skaičiuojamųjų apkrovų dažnis. Netgi tuo atveju, kai įvadiniai duomenys yra panašūs, rezultatai (suprojektuoti konstrukcijos sluoksnių storiai) gali labai skirtis.

Visi europietiškieji projektavimo metodai yra empiriškai kalibruoti, pritaikant juos šalių klimatiniams veiksniams, statybinei praktikai ir naudojamoms medžiagoms (Public Road... 1998; Standard SN 640 324... 1988; Standard SN 640 317... 1988; Guidelines for the standardisation... 1989). Tai sudaro sunkumų taikant metodus kitoms šalims.

Dauguma europietiškių projektavimo ir konstravimo metodų buvo suformuluoti daugiau kaip prieš 15 metų. Nuo to laiko eismo intensyvumai keliuose padidėjo ir prognozuojama, kad jie toliau nuolat didės. Tai pasireiškia tuo, kad, norėdamos sumažinti eismo trukdymus dėl kelio remonto darbų, kai kurios industrializuotos, tankiai apgyventos Europos šalys ėmė taikyti labai ilgus projektyvius periodus (iki 30 metų).

Įlinkiai, sukelti apkrovų nuo pravažiuojančių automobilių ašių svorio, yra viena iš pagrindinių dangų degradacijos priežasčių. Tampriojo įlinkio matavimai laikomi geriausiu šio poveikio įvertinimu. Todėl manoma, kad likusi dangos naudojimo trukmė gali būti empiriškai susieta su dangos tampriaisiais įlinkiais. Dažniausiai tam naudojamas deflektometras (angl. *Falling Weight Deflectometer*, FWD).

FWD taikomas detaliems dangos tyrimams projektiniu lygmeniu. Jis matuoja kelio reakciją į trumpalaikę apkrovą. Matavimo rezultatas – vadinamasis įlinkių dubuo, naudojamas kelio dangos sluoksnių deformacijos moduliams nustatyti.

Kritiniai įtempiai ir deformacijos gali būti apskaičiuojami arba pagal išmatuotus dangos įlinkius, arba pagal apskaičiuotus dangos sluoksnių deformacijos modulius. Likusiam kelio dangos naudojimo laikui įvertinti, kaip įprasta, naudojamos empirinės priklausomybės tarp kelio dangos įlinkių, deformacijos modulių, medžiagos nuovargio ar deformacijų. Likusio kelio dangos naudojimo laiko radimas yra atvirkštinis uždavinys kelio dangos projektavimui. Todėl tos priklausomybės, kurios naudojamos likusiam eksploatacijos laikui skaičiuoti, nors ir skirtingos įvairiose šalyse, yra dažnai panašios į priklausomybes, naudojamas dangoms projektuoti.

Šiuo metu pripažinta, kad likusio eksploatacijos laiko skaičiavimai nėra tikslus mokslas. Todėl skaičiavimų rezultatai neturėtų būti traktuojami vienareikšmiškai. Svarbu remtis ir kitais dangos struktūrinės būklės rodikliais, tokiais kaip vizualinė būklė ir bandinių (kernų) tyrimų duomenys. Atsiradus prieštaravimams tarp apskaičiuoto likusio naudojimo laiko ir kitų rodiklių, dažniausiai atliekami papildomi tyrimai, siekiant išspręsti susidariusią anomaliją.

Kelio dangos stiprinimas grindžiamas kelio dangos projektavimo ir konstravimo principais. Naujo viršutinio dangos sluoksnio storis (stiprinimui) projektuojamas taip, kad suteiktų kelio dangai trūkstamą stiprumą, reikalingą naudojimo laikui prailginti iki projekcinio.

Skačiuojant kelio dangos stiprinimo poreikį, taip pat kaip ir projektuojant naują kelio dangos konstrukciją, kelio dangos darbas vertinamas pagal tam tikrus nustatytus kriterijus. Juos galima suskirstyti į dvi grupes: fizinius ir eksploatacinius.

Užsienio šalyse taikomose metodikose pirmenybė teikiama eksploataciniams kriterijams, nors fiziniai kriterijai taip pat yra skaičiuojami. Svarbiausi veiksniai, aprašantys kelio dangos eksploatacinę kokybę, yra: išilginio profilio defektai; skersinio profilio defektai; dangos pleišėjimas; sankiba su ratu.

Visa šių kriterijų svarba buvo įvertinta Europos šalių projektuotojų (European Commission Directorate... 1999). Išanalizavus vertinimo rezultatus buvo nustatyta:

1. Viršutinio (dėvimojo) asfalto sluoksnio tamprumo modulis, neviršijant tamprųjų deformacijų, daro nedidelę įtaką eksploatacinėms kelio savybės. Pagrindiniais kriterijais laikytini šio sluoksnio atsparumas pleišėjimui ir atsparumas deformacijoms.
2. Apatiniam asfalto sluoksniui pagrindiniai taikytini kriterijai yra tamprumo modulis ir atsparumas pleišėjimui. Jeigu dangos konstrukcijoje naudojamas asfalto pagrindo sluoksnis, tai šie kriterijai taikytini ir jam.
3. Jeigu dangos konstrukcijoje naudojami standumu pasižymintys sluoksniai (pvz., sucementuotas pagrindo sluoksnis), tai labai svarbu užtikrinti reikiamą šių sluoksnių tamprumo modulį.
4. Dangos sluoksniams iš biriųjų medžiagų reikia užtikrinti reikiamą tamprumo modulį ir atsparumą deformacijoms.
5. Žemės sankasai reikia užtikrinti reikiamą tamprumo modulį ir sankasos gruntų nejautrumą šalčiui.

Fiziniai kriterijai skaičiuojami naudojant dangos irimo modelius, o eksploataciniai – dangos degradacijos modelius. Daugumoje šalių įvadiniai dangos degradacijos modelių duomenys yra dangos irimo modelių skaičiavimo rezultatai, todėl dangos degradacijos modelius taikyti be dangos irimo modelių neįmanoma.

Projektiniu lygmeniu taikomi dangų degradacijos modeliai prognozuoja dangos defektų atsiradimą įvertindami dangos irimo mechanizmą (arba principus). Tai leidžia pagal leidžiamuosius dangos eksploatacinius kriterijus (pvz., leidžiamasis dangos nelygumo padidėjimas per projekcinį laikotarpį, leidžiamasis plyšių

kiekis per leidžiamąjį laikotarpį ir pan.) suprojektuoti kelio dangos konstrukciją arba suskaičiuoti dangos stiprinimo poreikį.

Dangos degradacijos modeliai daugiausia įvertina dvi dangos irimo priežastis ir dėl to susidariusius defektus:

- medžiagos nuovargį, dėl kurio susidaro plyšių, atsirandančių asfalto sluoksnių apačioje ir kylančių į viršų; tokį medžiagos nuovargį sukelia kartotiniai įtempiai ir deformacijos nuo automobilių apkrovų ir temperatūrinių svyravimų;
- konstrukcijos deformacijas, dėl kurių susidaro vėžių ir kitos panašios deformacijos.

Atliekant dangos stiprinimo projektą, papildomas dėmesys skiriamas atsikartojančių plyšių susidarymo mechanizmui.

Tyrimai užsienio šalyse nustatė dar vieną dangos irimo mechanizmą, dėl kurio tam tikrose dangos konstrukcijose gali susidaryti didelė dalis plyšių. Tyrimai parodė, kad storose asfalto dangose dėl vienu metu veikiančių automobilių apkrovų ir temperatūrinių veiksnių susidaro plyšių, kurie atsiranda dangos paviršiuje ir skverbiasi gilyn. Dauguma dabartiniu metu naudojamų dangos degradacijos modelių šių plyšių neįvertina.

Daugumoje projektavimo metodų pagrindine vėžių susidarymo priežastimi laikomos deformacijos, kurios pirmiausia pasireiškia žemės sankasoje arba pagrindo sluoksniuose. Tačiau remiantis tyrimų, atliktų Jungtinėje Karalystėje, rezultatais, kelio dangų su storais bituminiais sluoksniais (storesniais nei 18 cm) koreliacijos tarp provėžų susidarymo ir kelio dangos storio nėra. Sprendžiant iš naujausių tyrimų rezultatų, tokiais atvejais provėžų susidarymą labiausiai veikia asfalto dangos sluoksniai.

Kitas svarbus faktas, analizuojamas vykdant šiuolaikinius tyrimus, yra tai, kad bėgant laikui bituminių mišinių standumas gerokai padidėja. Rezultatai, gauti bandant laboratorinius mėginius, rodo, kad bituminės dangos standėja dėl rišamosios medžiagos kietėjimo. Toks reiškinys buvo stebimas pirmuosius keletą metų po sluoksnių paklojimo. Standumo padidėjimas pasireiškia įtempių ir deformacijų, kurias sukelia automobilių ašinės apkrovos, sumažėjimu. Šį reiškinį patvirtina ir Lietuvoje atlikti tyrimai.

Austrijos kelio dangų statybą reglamentuoja penkių skirtingų apkrovų klasių ir dviejų skirtingų konstrukcijų tipų standartizuotas kelio dangų konstrukcijų katalogas. Nominalioji projektinė kelio eksploatacijos trukmė – 20 metų, po to dangą būtina stiprinti ar remontuoti. Kadangi dangos yra standartizuotos, nesilaikant analitinės procedūros, naujų medžiagų naudoti negalima. Standartizuotos dangos projektuojamos remiantis analitiniu skaičiavimu pagal tiesinį tamprumo modelį, siekiant apskaičiuoti horizontaliuosius tempimo įtempius bei deformacijas surištų sluoksnių dugne ir vertikaliosius įtempius ir deformacijas sankasoje, sukeltas standartinio rato 50 kN apkrovos. Šie įtempiai ir deformacijos naudojami trukmei iki kelio medžiagos nuovargio po standartinių 100 kN sukauptų apkrovų pasikar-

tojų skaičiaus prognozuoti. Esamas eismas, išreiškiamas komercinių automobilių skaičiumi, transformuojamas į standartinę ašinę apkrovą pagal ekvivalentiškumo principą. Skaičiuojama dvylikai skirtingų periodų per metus imat skirtingas asfaltbetonio temperatūras ir skirtingus pagrindo tamprumo modulius. Galiausiai bendras dangos irimas per metus apskaičiuojamas pagal Minerio hipotezę. Tada analitiniai skaičiavimo rezultatai redukuojami, įvertinant įvairiausių esamo kelių tinklo ruožų empirinius eksploatacinius duomenis. Reglamentas papildomas, modifikuojant analitinį modelį. Pasikeitus sąlygoms atsiranda sluoksnių nedidelių sustorėjimų.

Belgijoje kelio dangų projektavimo modelis grindžiamas daugiasluoksnės sistemos, susidedančios iš mechanškai homogeninių ir izotropinių sluoksnių, teorija. Siekiama išvengti asfalto dangos nuovargio ir struktūrinių sluoksnių deformacijų. Taikant šį metodą reikia žinoti medžiagų savybes, klimato įtaką ir transporto eismo apkrovas.

Danijos kelių dangos projektavimo metodas paremtas analitinėmis ir empirinėmis lygtimis. Pagal šį metodą kiekvienai kelio dangos medžiagai taikomi tam tikri tamprumo parametrai, o didžiausias dėmesys skiriamas naudojamų medžiagų savybėms. Tiesiamų kelių ruožai bandomi naudojant statinę siją, kad būtų nustatyti kiekvieno pagrindo sluoksnio ir sankasos grunto deformacijos moduliai. Yra patikrinami bet kokie nuokrypiai nuo standartinių dydžių ir nustatomas kiekvieno tipo medžiagos nevienalytiškumas. Bandymo metu randamos silpnos kelio dangos konstrukcijos vietos ir visas kelias padalijamas į struktūriniu požiūriu vienodus ruožus, kuriems būdingas skirtingas sankasos ir pagrindo burių medžiagų atsparumas. Visi sluoksniai apskaičiuojami taip, kad visą naudojimo laiką atlaikytų jiems tenkančias apkrovas važiuojant standartiniams sunkvežimiams, kurio vienas ratas sukelia 50 kN svorio apkrovą į dangą. Pirmame projektavimo etape rengiamas kelio dangos projektas remiantis įprastomis numatomų naudoti medžiagų savybėmis. Antrajame etape iš naujo analizuojant kelio konstrukciją remiamasi vietoje atliktais matavimais, todėl atsižvelgiama į nuokrypius nuo standartinių dydžių ir konkrečiam keliui sukuriama tikslesnis kelio dangos konstrukcijos projektas (Staged pavement design... 1995).

Suomijoje kelių dangos projektavimo metodas yra pusiau empirinis, pagrįstas Odemarko teorija. Turi būti žinomas kiekvieno sluoksnio medžiagos tamprumo modulis ir sluoksnio storis (Olsson 1983). Iš pradžių skaičiuojami tamprumo moduliai nuo statinės apkrovos, paskui įvertinami sluoksnių storiai ir medžiagos. Tipiniai tamprumo modulio dydžiai yra tokie: skaldytos uolos – 300 MPa, žvyro – 200 MPa, maišyto žvyro – 100 MPa, smėlio – 50 MPa, molio – 10 MPa. Asfalto tipinė tamprumo modulio reikšmė – 2500 MPa. Taikant šį projektavimo metodą nagrinėjama dvisluoksnė kelio danga. Jei yra daugiau nei du sluoksniai, laikomoji galia skaičiuojama dviem žemiausiems sluoksniams, paskui kitam sluoksniui ir taip tol, kol gaunama visos dangos konstrukcijos laikomoji galia. Kelio dangos

konstrukcijai projektuoti nustatomas ekvivalentinių standartinių ašių skaičius (ESA). Keliai klasifikuojami į šešias klases pagal ESAL sistemą. Nurodoma tam tikra kiekvienos kelių klasės laikomoji galia. Pradedant žemės sankasa, medžiagos ir sluoksnių storiai projektuojami tokie, kurie leidžia pasiekti nurodytą laikomąją galią. Yra pateikiamas mažiausias šalčiui atsparus sluoksnių storis priklausomai nuo žemės sankasos, šalčio indekso ir drenažo būklės.

Prancūzijoje dangoms projektuoti taikomas tiesinis, daugiasluoksnis plastiškumo modelis tempimo įtempiams ir deformacijoms apskaičiuoti surištų sluoksnių apačioje bei vertikaliosioms gniuždymo deformacijoms nesurištų sluoksnių viršuje, sukeltoms 130 kN ašies apkrovos į dangą. Skaičiuojama ekvivalentinėje 15 °C temperatūroje, kuri laikoma vidutine temperatūra. Sluoksnių storis parenkamas taip, kad apskaičiuoti įtempiai ir deformacijos neviršytų leidžiamųjų reikšmių kiekviename sluoksnyje. Šie leidžiamieji įtempiai ir deformacijos pasirinkti atsižvelgiant į medžiagos nuovargio savybes, dangos irimo riziką, sankasos laikomąją galią ir pataisos koeficientą. Irimo rizika priklauso nuo eismo, bet visuomet mažesnė negu 50 %. Esama keturių žemės sankasos laikomosios galios klasių. Pataisos koeficientas nustatomas iš daugybės dangų eksploatacinių savybių stebėjimų. Dangos projektuojamos 15 metų arba 20 metų eksploatacijos trukmei priklausomai nuo eismo intensyvumo (French Design Manual for Pavement Structures 1997).

Kelio dangų projektavimo metodas, taikomas *Švedijoje* (VAG 94), buvo sukurtas 1994 m. ir gali būti traktuojamas kaip empirinio ir fenomenologinio konstravimo pavyzdys. Tai reiškia, kad senas grynai empirinis metodas, paskutinį kartą persvarstytas 1984 m. (BYA 84), buvo sudarytas remiantis tiek inžinerine patirtimi, tiek teoriniais skaičiavimais. Tiesinis, daugiasluoksnis, tamprumo kelio dangos modelis taikomas leidžiamų horizontaliųjų tempimo įtempių bituminio rišamojo sluoksnio apačioje ir vertikalųjų gniuždymo deformacijų sankasos viršuje, išvystomų standartinės ašies (100 kN) svorio, lygiams skaičiuoti. Šios deformacijos pagal susikaupiantį standartinių ašių poveikį naudojamos eksploatacijos periodui iki nuovargio ir periodui iki dangos deformacijos nustatyti. Teoriniai skaičiavimai buvo atlikti skirtingiems metų laikams ir skirtingoms klimatinėms zonoms. Susikaupiančios pažaidos apskaičiuojamos pagal Minerio dėsnį. Projektavimo metodas taip pat turi empirinį analitinį metodą dangos išsipūtimui nuo šalčio traktuoti. Metodo įdomus tuo, kad pagal kelio kategorijas čia esama eksploatacijos kokybės reikalavimų tiek užbaigta statyti dangai, tiek atskiriems sluoksniams.

Kelio dangų projektavimo metodas, taikomas *Šveicarijoje*, pagrįstas AASHTO metodu, inžinerine patirtimi ir žiniomis, gautomis statant ir eksploatuojant Šveicarijos kelių tinklą. Projektavimo metodas nustato kiekvieno sluoksnio storį ir bendrą konstrukcijos storį taip, kad kelio dangos konstrukcija su priimtina eksploatacijos kokybe atlaikytų eismą 20 metų. Standartas galioja visiems ke-

liams, kuriais važiuoja transporto priemonės, ir automobilių aikštelėms. Kataloge pateikiamos skirtingos dangos struktūros kasdieniam 80 kN ašių svorių kartojimui tarp 10 ir 3000. Katalogas gali būti naudojamas tiek naujų kelio dangų statybai, tiek techninei esamų kelių priežiūrai (Standart SN 640 324 1988; Standart SN 670 140 1988).

Kelio dangų projektavimo metodas, taikomas *Jungtinėje Karalystėje*, pagrįstas analitiniu tyrimu. Jis buvo sukurtas 1984 m. Taikant šį metodą naudojamas daugiasluoksnis, tamprumo modelis, norint apskaičiuoti leidžiamus horizontaliuosius tempimo įtempius pagrindo sluoksnio dugne ir vertikalųjų gniuždymo deformacijų sankasos viršūnėje, sukeltų standartinių ratų apkrovų, lygius. Šios deformacijos naudojamos eksploatacijos periodui iki nuovargio ir periodui iki dangos deformacijos nustatyti pagal susikaupiantį standartinių ašių poveikį. Teoriniai skaičiavimai buvo atlikti remiantis standartine kelio dangos temperatūra, kuri faktiškai yra vidutinė. Eksperimentinio kelio 34 ruožų eksploatacijos kokybės duomenys buvo pritaikyti modelio pataisoms. Šie projektai laikomi turinčiais 85 % tikimybės išlikti eksploatuojami 20 metų prieš stiprinimą. Dabartinis metodas šiuo metu yra peržiūrimas. Didelės vartotojų sąnaudos, susidarančios dėl eismo spūsčių keliuose, rodo, kad apkrautuose keliuose būtų ekonomiškiau padidinti projekcinę eksploatacijos laiką iki 40 metų be struktūrinio stiprinimo.

Lenkijoje automobilių kelių dangoms projektuoti taikomas PJ-IBD metodas, parengtas Varšuvos kelių ir tiltų tyrimų institute. PJ-IBD metodo modelis, pagal kurį konstruojama danga, parengtas taikant prielaidą, kad danga sudaryta iš keturių sluoksnių (System oceny... 1989).

Visos dangos konstrukcijos storis apskaičiuojamas pagal tokias formules:

$$h = h_1 + h_2 + h_3 + h_4, \quad (1.5)$$

$$h_1 = 3 \cdot a \cdot b_1, \quad (1.6)$$

$$h_2 = 15 \cdot a \cdot b_2 \cdot c \cdot d_1, \quad (1.7)$$

$$h_3 = 10 \cdot a \cdot b_3 \cdot c \cdot d_2 \cdot e, \quad (1.8)$$

čia a – koeficientas, apibūdinantis kelio eismą; b_1 – koeficientas, nustatomas atsižvelgiant į asfalto mišinio, naudojamo dangos viršutiniam sluoksniui, rūšį; b_2 ir b_3 – koeficientai, nustatomi atsižvelgiant į medžiagų, naudojamų h_2 ir h_3 sluoksniams, rūšį ir kokybę; b_4 – koeficientas, nustatomas atsižvelgiant į h_4 sluoksnio medžiagą ir jo įrengimo būdą; c – koeficientas, nustatomas atsižvelgiant į didžiausią automobilio rato apkrovą; d_1 – koeficientas, nustatomas atsižvelgiant į sankasos grunto rūšį; d_2 – koeficientas, nustatomas atsižvelgiant į sankasos grunto rūšį, būklę ir vandens poveikio sąlygas; e – koeficientas, kuriuo apibūdinamos įvairių regionų klimatinės sąlygos.

Autorių Yoder ir Witczak teigimu (Shook *et al.* 1982), kad kelio dangų projektavimo metodika būtų racionali, reikia atsižvelgti į tris kriterijus:

1. Pasirinkta teorija, taikoma pasirinkto dydžio kelio dangų pažaidoms ir irimui prognozuoti.
2. Keliams tiesti naudojamų medžiagų savybių vertinimas, taikomas pasirinktai teorijai.
3. Nustatytas pasirenkamų parametrų ryšis su reikalingu eksploatacinių rodiklių lygiu.

Kiekvienas dangos konstrukcijos sluoksnis įvertinamas tam tikrais koeficientais, nuo kurių priklauso visas dangos konstrukcijos storis. Koeficientai parenkami iš lentelių arba diagramų. Tarkime, viršutinio dangos konstrukcijos sluoksnio storis h_1 priklauso nuo eismo intensyvumo ir asfalto mišinio rūšies, naudojamo viršutiniam asfalto sluoksniui. Kiti dangos konstrukcijų storiai atitinkamai priklauso nuo tam tikrų parametrų.

Šiuo metu Lietuvoje projektuojant automobilių kelių dangas vadovaujamosi skirtingomis metodikomis: amerikietiška AASHTO metodika bei DORNII dangų projektavimo metodika, sukurta remiantis rusiška VSN 46-83 automobilių kelių instrukcija.

1.2.1. Kelio dangų konstrukcijų projektavimas taikant DORNII metodą

Iš daugelio pasaulyje taikomų automobilių kelių nestandžiųjų dangų konstrukcijų projektavimo metodų Lietuvos sąlygomis buvo pasiūlytas DORNII metodas. Kelio dangas stiprinti planuojama pagal tuos pačius principus kaip ir projektuojant naujas dangas, tik įvertinama esama danga ir jos charakteristikos. Šios charakteristikos dažniausiai nustatomos eksperimentiškai. Jei turimi išmatuoti esamos kelio dangos įlinkiai, pagal DORNII metodą skaičiuojamas visos dangos konstrukcijos leidžiamasis tamprusis įlinkis (Межгосударственные отраслевые... 2001; Проектирование нежестких... 2002), o naujai įrengiamiems sluoksniams tikrinama, ar neviršijami leidžiamieji lenkimo metu kylantys įtempiai bei šlyties įtempiai.

Skaičiuojant kelio dangos stiprinimo parametrus reikalingas bendrasis dangos tamprumo modulis gali būti nustatomas įvertinus reikiamas kelio dangos savybes. Pradžioje nustatomas reikalingas kelio dangos tamprumo modulis, tada, žinant esamos dangos tamprumo modulį, apskaičiuojamas reikalingas stiprinimo sluoksnio tamprumo modulis.

Kelio konstrukcija turi atitikti stiprumo ir patikimumo reikalavimus, vertinant pagal tampriojo įlinkio kriterijų:

$$K_{st} \leq \frac{E_b}{E_r}, \quad (1.9)$$

čia K_{st} – kelio dangos stiprumo koeficientas; E_b – bendras konstrukcijos tamprumo modulis, MPa; E_r – reikalingas bendrasis (ekvivalentinis) konstrukcijos tamprumo modulis, įvertinantis dangos tipą, apkrovų intensyvumą, MPa.

Kelio dangos stiprumo koeficiento K_{st} minimalią reikšmę nustato leidžiamasis dangos patikimumo lygis K_p , apibūdinantis koeficiento dydį, kurį kelio danga turi turėti savo naudojimo periodo, t. y. periodo tarp kapitalinių dangos remontų, pabaigoje. Koeficientas K_{st} normuojamas pagal kelio kategoriją ir dangos tipą.

Įvairių konstrukcijų kelio dangas pagal jų stiprumą galima apibūdinti ekvivalentiniu tamprumo modulių, atitinkančiu ekvivalentinės viensluoksnės dangos, kurioje, veikiant projektinei apkrovai, susidaro tokia pat deformacija kaip ir daugiasluoksnėje dangoje tamprumo modulių.

Skačiuojant esama dangos konstrukcija ir jai stiprinti reikalingas papildomas sluoksnis nagrinėjama kaip dvisluoksnė danga, kurios viršutinio sluoksnio tamprumo modulis didesnis negu apatinio. Dvisluoksnės dangos bendrasis (ekvivalentinis) tamprumo modulis E_b nustatomas taip:

$$E_b = \frac{\left[1,05 - 0,1 \frac{h}{D} \cdot \left(1 - \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}} \right) \right] \cdot E_1}{0,71 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}} \cdot \arctg \left(\frac{1,35 h_e}{D} \right) + \frac{E_1}{E_2} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \arctg \frac{D}{h_e}}, \quad (1.10)$$

čia E_1 – stiprinimui reikalingo papildomo (viršutinio) dangos sluoksnio medžiagos tamprumo modulis, MPa; E_2 – esamos kelio dangos konstrukcijos ekvivalentinis tamprumo modulis, MPa; D – rato ir kelio dangos kontakto ploto, kuriame apkrova perduodama į dangą, skersmuo, mm; $h_e = 2h \cdot (E_1/6E_2)^{1/3}$ – ekvivalentinio sluoksnio storis iš ekvivalentinės medžiagos, kurios tamprumo modulis yra lygus E_2 , ir kuria pakeičiamas viršutinis h storio dangos sluoksnis taip, kad įtempiai šiame ekvivalentiniame sluoksnyje lieka tokie pat kaip ir dvisluoksnėje dangoje.

Reikalingas mažiausias bendrasis dangos tamprumo modulis E_r , nustatomas pagal empirinę priklausomybę, įvertinančią automobilių eismo poveikį, išreikštą per skaičiuojamąjį laikotarpį pravažiavusių suminiu standartinių automobilių skaičiumi $\sum N_p$, ir kelio kategoriją.

DORNII metodu, sudarytu remiantis instrukcija VSN 46–83 (Инструкция по проектированию... 1985), parengti dangų projektavimo normų MODN 2

(Межгосударственные отраслевые... 2001; ОДН 218.046-01... 2003) svarbiausi privalumai yra:

- dangos konstrukcijos stiprumas nustatomas pagal kelis kriterijus: leidžiamąjį tamprųjį įlinkį, šlyties atsparumą, dangos sluoksnių atsparumą tempimui lenkiant. Tai leidžia patikimai parinkti optimalias dangų konstrukcijas;
- įvertinamas kiekvienos transporto priemonės poveikis dangai;
- įvertinami aplinkos veiksniai: vietovės drėkinimo sąlygos, klimato poveikis;
- metodika leidžia sukurti automatizuoto dangų skaičiavimo programas ir jas naudojant parinkti racionaliausius dangų konstrukcijų variantus.

Kartu pažymėtina, kad metodika turi ir trūkumų, iš kurių svarbiausi yra šie:

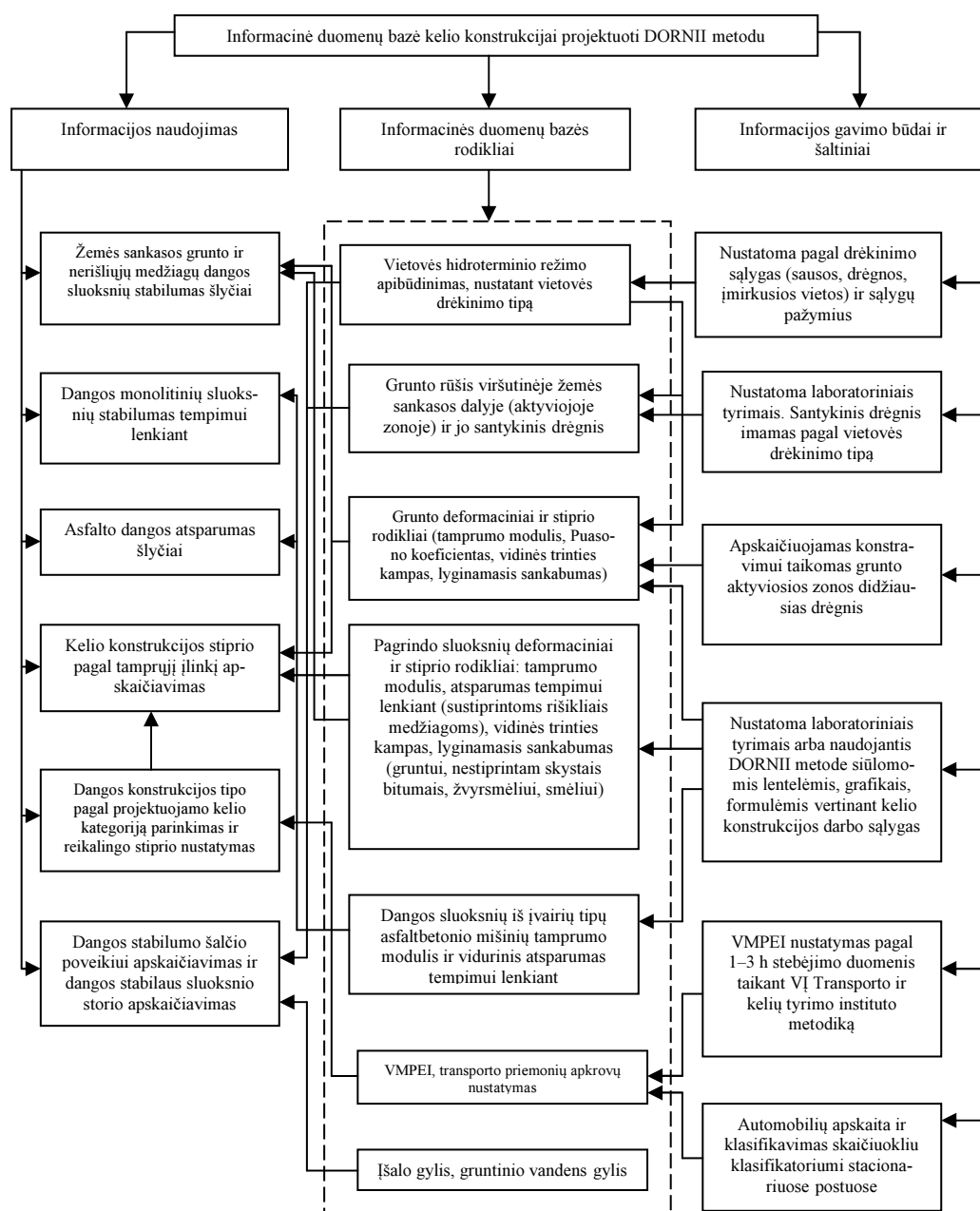
- įsigaliojus naujiems normatyviniams dokumentams, pakito reikalavimai dangos sluoksnių medžiagoms ir jų savybėms, gruntų klasifikavimui. Norint šiuos pokyčius įvertinti instrukcijos taikymo metodikoje, reikalingi išsamūs tyrimai;
- tas pats pasakytina apie pastaruoju metu pasikeitusias dangų konstrukcijų įrengimo, ypač rekonstruojamų dangų, technologijas, kiekybinius ir kokybinius autotransporto priemonių parko pokyčius. Visi šie pokyčiai apibūdinami rodikliais, kuriuos tikslinant reikia atlikti didelės apimties tiriamuosius darbus;
- projektuojant įvertinami tik fiziniai kriterijai – leidžiamieji įtempiai ir deformacijos, tačiau neįvertinami taip suprojektuotos dangos konstrukcijos eksploataciniai rodikliai ir jų kitimas per projekcinį periodą, t. y. kaip greitai tokia danga dėvės ir kokių defektų galima tikėtis eksploatacijos metu. Kaip rodo praktinė dangų eksploatavimo patirtis, nors naujų kelių dangos konstrukcija yra projektuojama 20-čiai metų, per tą laikotarpį kartais tenka atlikti nuo 1 iki 3–4 dangos remontų.

VGTV mokslininkų buvo atlikti teoriniai bei eksperimentiniai tyrimai siekiant pakeisti ir patikslinti žemės sankasos gruntų bei dangos konstrukcijos sluoksnių medžiagų duomenų bazes, kurios reikalingos automatizuotai projektuojant nestandžių dangų konstrukcijas DORNII metodu (Atitinkančio Lietuvos sąlygas... 2001). Trečiajame šio mokslinio tyrimo darbo etape nustatyti Lietuvos automobilių kelių dangų konstrukcijoms reikalingi minimalūs tamprumo moduliai.

Norint DORNII metodą pritaikyti dabartinėms Lietuvos automobilių kelių tiesimo, rekonstrukcijos bei taisymo sąlygoms buvo būtina patikslinti pagrindinius parametrus. Patikslinus šiuos duomenis, DORNII metodas gali būti sėkmingai taikomas projektuojant tiek naujai statomų kelių, tiek rekonstruojamų kelių asfalto dangų konstrukcijas.

Kelio dangos konstrukcijai projektuoti DORNII metodu reikalingos informacinės duomenų bazės (IDB) struktūra pateikta 1.2 paveiksle.

Nestandžių dangų konstrukcijų projektavimo programos skaičiavimų tikslumą vertėtų patikrinti įrengiant suprojektuotas dangų konstrukcijas ir atliekant jų atskirų sluoksnių bei visos konstrukcijos stiprio matavimus statiniais bei dinaminiais bandymų metodais.



1.2 pav. Kelio konstrukcijos projektavimo DORNII metodu IDB struktūra (Atitinkančio Lietuvos sąlygas... 2003)

Fig. 1.2. IDB composition of the design of road structure by DORNII method (Meeting conditions of Lithuania ... 2003)

Šio metodo pritaikymas automatizuotam automobilių kelių dangų projektavimui leido sukurti didelės apimties kelių tiesimo medžiagų ir apkrovų pagrindinių parametrų duomenų bazes, o tai labai palengvina, pagreitina ir supaprastina projektavimo darbus.

Metodo automatizavimas leido sukurti ir optimaliam projektavimui panaudoti sudėtingus matematinius modelius, leidžiančius iš daugelio stiprumo požįrių tinkamų dangų konstrukcijų variantų išrinkti ekonomiškiausią.

1.2.2. Automobilių kelių dangų projektavimas taikant „Dynatest“ ELMOD metodą

„Dynatest“ programa ELMOD skirta dangos konstrukcijos sluoksnių tamprumo moduliams nustatyti ir projektavimo veiksams atlikti (ELMOD... 1994). Programa, naudodama deflektometru FWD išmatuotus įlinkių dubenis, gali automatiškai įvykdyti užbaigtą struktūrinę analizę ir dangos konstrukcijos bei papildomo sluoksnio projektavimo veiksmus, pagrįstus projektuotojo nustatytais projektavimo parametrais.

Skaičiuojant ELMOD programa, gali būti naudojami šie parametrai: meteorologiniai parametrai, medžiagų charakteristikų parametrai, apkrovos, apkrovų tipai, sezoniškumo parametrai, dangos konstrukcijos sluoksnių storiai.

ELMOD programa atlieka tokias pagrindines funkcijas:

1. Skaičiuoja dviejų, trijų, keturių, penkių dangos konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulius, naudojant paprogrames:

- išlinkio spindulys – Odemarko ir Boussinesqo transformuotą modelį;
- įlinkio dubens pritaikymas integruojant įlinkių duomenis;

FEM/LET/MET metodais galima skaičiuoti dangos konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulius taikant:

- baigtinių elementų metodą (angl. *Finite Element Method*);
- linijinę tamprumo teoriją (angl. *Linear Elastic Theory*);
- ekvivalentinį dangos konstrukcijos sluoksnių storių metodą (angl. *Method of Equivalent Thicknesses*).

Šiais metodais apskaičiuojami dangos konstrukcijos sluoksnių tamprumo moduliai, gaunami panaudojus įlinkius, išmatuotus kiekviename FWD bandymo taške, ir panaudojus sankasos netiesiškumą arba visų sluoksnių netiesiškumą skaičiuojant FEM metodu (angl. *Final Element Method*). Programa pagal išmatuotus įlinkius gali nurodyti teorinį ekvivalentinio gylio iki standaus sluoksnio skaičiavimo būdą.

2. Apskaičiuoti dangos konstrukcijos sluoksnių tamprumo moduliai pritaikomi kiekvienam vyraujančiam sezonui. Jie gali būti modeliuojami pritaikant 12 sezonų veiksmus. Kiekvieną sezoną asfaltbetonio sluoksnio tamprumo moduliai

skaičiuojami kaip temperatūros funkcija, kai nerišliųjų medžiagų tamprumo moduliai (įskaitant sankasos gruntus) įvardijami kaip metų laiko funkcija sąryšyje su staigiu atlydžiu ar drėgnuoju periodu.

3. Minerio dėsnis taikomas konstrukcinėms ir (arba) funkcinėms dangos konstrukcijos pažaidoms sumuoti, kurios kiekvieną sezoną atsiranda dėl veikiančių apkrovų, dangos konstrukcijos nuovargio, dangos nelygumo, vėžių susidarymo. Tada programa skaičiuoja liekamąjį dangos amžių ir reikalingą papildomo sluoksnio storį, naudodama projektavimo periodo dangos konstrukcijos papildomo sluoksnio medžiagas.

Anksčiau Lietuvoje naudojama ELMOD kompiuterinė programa apytiksliai apskaičiuodavo kritinį kelio dangos konstrukcijos sluoksnį, liekamąjį amžių ir reikiamą dangos stiprinimo storį panaudojant deflektometru „Dynatest FWD 8000“ išmatuotus kelio dangos įlinkius, nes buvo neįvertinta klimato, temperatūros pokyčių įtaka, naudojamų medžiagų savybės. Kompiuterine programa ELMOD negalima buvo nustatyti ekvivalentinių tamprumo modulių kiekvieno dangos konstrukcijos sluoksnio viršuje, kuriuos reglamentuoja techninis reglamentas (Šiaudinis 2007). Norint įvertinti dangos būklę pagal galiojančių Lietuvoje norminių dokumentų reikalavimus, reikia apskaičiuoti ekvivalentinius tamprumo modulius dangos konstrukcinių sluoksnių paviršiuje.

Lietuvos sąlygoms pritaikyta daugiasluoksnės dangos tiesinės tamprumo plastiškumo teorijos pagrindu sukurta kompiuterinė programa ELMOD 5 dangos konstrukcijos tamprumo moduliui apskaičiuoti, leidžia surasti kritinį(ius) konstrukcijos sluoksnį(ius).

1.2.3. Automobilių kelių dangų projektavimas taikant AASHTO metodą

AASHTO (angl. *American Association of State Highway and Transportation Officials*) metodika grindžiama empirinėmis priklausomybėmis, sudarytomis remiantis AASHTO kelių tyrimo rezultatais. Projektuojama tam tikram ekvivalentinių 80 kN svorio ašių apkrovų (ESA) skaičiui ir kelio eksploatacinio tinkamumo indekso pokyčiui. Šioje metodikoje vertinama ir atsižvelgiama į: netikrumą, kad kelio danga pasieks savo projektinę naudojimo trukmę; standartinės eismo intensyvumo apkrovos bei eksploatacinės kokybės paklaidas; išskylas nuo šalčio; brinkimą ir kelio drenažą. Tam, kad suprojektuota danga atlaikytų numatomas eismo apkrovas, nustatomas reikalingas kelio dangos konstrukcijos modifikuotas stiprio rodiklis SNC ir apskaičiuojami atskirų sluoksnių storiai naudojant sluoksnių ekvivalentiškumą (AASHTO... 1993).

Lietuvoje šią metodiką taiko VĮ Transporto ir kelių tyrimo institutas. Vienas iš AASHTO projektavimo metodikos nagrinėjamų klausimų – konstrukcijos stiprumo vertinimas.

Dangos konstrukcijos stiprumui nustatyti naudojama dinaminė apkrova ir įlinkio dubens matavimai. Tai atliekama tokiais metodais:

- dangos konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulių nustatymo metodas;
- tiesioginio konstrukcijos stiprumo nustatymo metodas.

Abu metodai apibūdinami tais pačiais dydžiais, t. y. efektyviu struktūriniu atsparumu SCN_{eff} , todėl pasirenkant vieną iš jų reikia žinoti kiekvieno metodo privalumus ir trūkumus.

Tarkime, danga yra apkrauta dinamine apkrova. Apkrova dangos konstrukcijoje pasiskirsto dubens pavidalo zonomis. Zonos nuolydis keičiasi kiekviename dangos sluoksnyje priklausomai nuo sluoksnio medžiagos santykinio stiprumo ar tamprumo modulio. Moduliu didėjant įtempiams pasiskirsto didesniame plote ir gaunama įlinkių diagrama. Svarbus yra atstumas nuo apkrovos, kuriame įtempių zona kerta žemės sankasos ir apatinio pagrindo sluoksnio sąlyčio liniją. Matuojant įlinkių dubenį, bet kuris dangos paviršiaus įlinkis ties apkrova ar už jos yra sukeltas tik žemės sankasoje susidariusių įtempių. Todėl išoriniai įlinkių dubens rodmenys, veikiant dinaminei apkrovai, perteikia žemės sankasos savybes. Kiekvienam dangos tipui yra nustatytas minimalus atstumas, kuriame išdėstomi įlinkio davikliai, tam kad užtikrinti jog įlinkiui neturės įtakos viršutiniai dangos sluoksniai. Taikant dangos sluoksnių tamprumo modulių nustatymo metodą, išmatuojamas įlinkių dubuo ir apskaičiuojami visų sluoksnių tamprumo moduliai.

Tiesioginis konstrukcijos stiprumo nustatymo metodas grindžiamas tuo, kad suminis stiprumas, priklausantis nuo kiekvieno sluoksnio tamprumo modulio ir sluoksnio storio, nusako bendrą dangos konstrukcijos stiprumą. Didžiausias įlinkis apkrovos centre apibūdinamas kaip dviejų skirtingų dangos parametrų rezultatai:

- dangos konstrukcijos stiprumo;
- žemės sankasos grunto deformacijos modulio.

Todėl teigiama, kad dangos konstrukcijos stiprumas yra didžiausiojo įlinkio ir žemės sankasos deformacijos modulio funkcija.

Kelio dangos konstrukcijos modifikuoto stiprumo rodiklio (SNC) nustatymas taikant AASHTO metodiką

Atlikus dangos įlinkių matavimus, apskaičiuojami atskirų dangos sluoksnių tamprumo ir žemės sankasos deformacijos moduliai. Pagal apskaičiuotus tamprumo modulius nustatomas atskirų sluoksnių stiprio rodiklis a .

Žemės sankasos deformacijos modulio ir Kalifornijos santykinio atsparumo rodiklio (CBR) priklausomybė išreiškiama Emery formule (AASHTO... 1993):

$$E_{sg} = 41,19 \cdot CBR^{0,385}, \quad (1.11)$$

čia E_{sg} – žemės sankasos deformacijos modulis, MPa; CBR – Kalifornijos santykinio atsparumo rodiklis.

Visų dangos konstrukcijos sluoksnių stiprio rodiklis SN apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$SN = 0,0394(a_1 \cdot H_1 + a_2 \cdot H_2 \cdot d_2 + a_3 \cdot H_3 \cdot d_3 + a_n \cdot H_n \cdot d_n) = 0,0394 \sum_{i=1}^n a_i \cdot H_i \cdot d_i \quad (1.12)$$

čia: a_i – i -tojo sluoksnio stiprio rodiklis; H_i – i -tojo sluoksnio storis, mm; d_i – i -tojo sluoksnio drenavimo koeficientas; n – dangos konstrukcijos sluoksnių skaičius.

Sankasos grunto stiprumo rodiklis ($SNSG$) apskaičiuojamas pagal formulę:

$$SNSG = 3,51 \log CBR - 0,85(\log CBR)^2 - 143. \quad (1.13)$$

Taigi kelio dangos konstrukcijos modifikuotas stiprumo rodiklis yra:

$$SNC = SN + SNSG. \quad (1.14)$$

1.3. Praktikoje taikomų kelio dangos konstrukcijos stiprumo matavimo metodų apžvalga

Kelio konstrukcijos stiprumas – vienas pagrindinių rodiklių, lemiančių gebėjimą atlaikyti transporto priemonių apkrovas. Nestandžiųjų kelio konstrukcijų atskirų sluoksnių ir visos konstrukcijos stiprumas gali būti apskaičiuotas jas projektuojant. Rekonstruojant ir tiesiant automobilių kelius periodiškai reikia tikrinti įrengtų kelių konstrukcijų sluoksnių stiprumo atitiktį projektiniam stiprumui. Stiprumo kontrolei atlikti taikomi įvairūs kelio konstrukcijų sluoksnių stiprumo nustatymo metodai.

Kelių dangos ir jos konstrukcijos atskirų sluoksnių stiprumas Lietuvoje reglamentuojamas statiniu deformacijos modulių. Dažniausiai deformacijos modulis nustatomas neardomaisiais statiniais ir dinaminiais metodais (Vaitkus *et al.* 2005). Statiniu metodu nustatant kelio dangos deformacijos modulį naudojama Benkelmano sija (nestandžiosioms dangoms tirti) ir statinis štampas (dangos pagrindo sluoksniams iš nerišliųjų medžiagų). Taikant dinaminį metodą naudojami tokie prietaisai: lengvas dinaminis prietaisas (angl. *Light Falling Weight Deflectometer*, LWD) (dangos pagrindo sluoksniams iš nerišliųjų medžiagų) ir krintančio svorio

deflektometras (angl. *Falling Weight Deflectometer*, FWD) (visiems dangos konstrukcijos sluoksniams). Atliekant matavimus dinaminiais prietaisais, apkrova sukelia krintančio cilindro smūgiu per labai trumpą laiko tarpą į tam tikrą plotą. Dinaminė apkrova sukelia dangos konstrukcijos įlinkius. Atliekant matavimus statiniu prietaisu, tam tikras dangos konstrukcijos plotas yra laipsniškai apkraunamas ir nukraunamas. Kelio konstrukcijos sluoksnių stiprumo nustatymo metodai plačiau aprašomi 2 ir 3 skyriuje, dangos konstrukcijos stiprumui nustatyti naudojami prietaisai išsamiau aprašyti B priede.

Užsienio šalių mokslininkai automobilių kelių dangų konstrukcijų darbą realiomis sąlygomis bando įvertinti įrengiant ir tiriant jas specialiuose bandymų poligonuose. Vienas didžiausių kelio dangų konstrukcijų bandymo poligonų buvo įrengtas 1989 m. Prancūzijos kelių ir tiltų tyrimų centre (Road Transport Research... 1991). Čia įvairių Europos šalių mokslininkai tyrė ir vertino trijų skirtingų kelio dangų konstrukcijų darbą. Dvi nestandžios ir viena standi kelio dangų konstrukcijos buvo tiriamos apkraunant jas skirtingo dydžio apkrovomis, fiksuojant dangų sluoksniuose įrengtų įtempių, slėgio, temperatūros ir drėgmės daviklių rodmenis, nustatant kelio dangos viršutiniuose sluoksniuose atsirandančių defektų vystymosi tendencijas ir pan.

2006–2007 m. kelio dangų konstrukcijų tyrimai, naudojant šešis skirtingus daviklius, buvo atlikti Maino universitete (Lauren, Swett 2007). Davikliai buvo įrengti skirtinguose kelio dangos konstrukcijos sluoksniuose, siekiant nustatyti sezoniškumo įtaką kelio dangos konstrukcijos stiprumui.

Kelio dangos eksperimentinių konstrukcijų tyrimai, siekiant nustatyti jų atskirų sluoksnių stiprumo kitimą konstrukcijos užšalimo ir atšilimo periodais, buvo atlikti JAV (Vincent *et al.* 1992). Čia krintančio svorio deflektometru FWD buvo tiriamos kelio dangų konstrukcijos skirtingais metų periodais, siekiant nustatyti atskirų sluoksnių atsparumą šalčio poveikiui.

Kelio dangos konstrukcijų darbo realiomis sąlygomis modelius išsamiai analizuoja Danijos technikos universiteto profesorius P. Ullidtz (1998). Šis mokslininkas analizuoja dangos konstrukcijos tamprumą, įtempių pasiskirstymą, modelius, nuo kurių priklauso kelio dangos naudojimo trukmė, jos būklė, defektų atsiradimo ir vystymosi tendencijas.

Sunkių krovinių automobilių poveikį kelio dangų konstrukcijoms plačiai išnagrinėjo Cambridge universiteto mokslininkas D. Cebon (1993). Jis nagrinėjo sunkių transporto priemonių sąveiką su kelio dangos konstrukcija, dangos konstrukcijos sluoksniuose atsirandančių pažeidimų vystymąsi, defektų formavimosi priklausomybę nuo apkrovos judėjimo greičio, padangų tipo ir kitų veiksnių.

Pasaulyje labai daug dėmesio skiriama FWD, kuriuo atliekami ir detalūs kelio konstrukcijos tyrimai (Deblois *et al.* 2010). Korėjos mokslininkai nagrinėjo asfalto dangos konstrukcijos vientisumo vertinimo metodą, kuriuo įvertinamos modeliavimo paklaidos dėl medžiagos savybių neapibrėžtumo. Tuo tikslu grunto

sluoksnių tamprumo moduliui apskaičiuoti naudotas dirbtinių neuronų tinklas ir krintančio svorio deflektometru (FWD) išmatuotų įlinkių duomenys. Atliktas išsamus medžiagų savybių neapibrėžtumo įtakos duotos dangos konstrukcijos modeliavimui tyrimas taikant Monte Karlo imitavimo metodą. Rezultatai parodė, kad labai svarbus dalykas yra smūginių apkrovų amplitudė, sluoksnio storis ir Puasono koeficientas, kurie turi didesnę įtaką didžiausiesiems įlinkiams negu kiti parametrai (Jin Hak Yi *et al.* 2010).

Tęsiant tyrimus VGTU mokslininkams ir vertinant oro bei asfaltbetonio dangos temperatūros pokyčius įlinkių matavimo metu pastebimas didelis poveikis asfaltbetonio sluoksnio tamprumo moduliui. Asfalto dangos sluoksnių standumas, taip pat krintančio svorio deflektometru nustatytos E_0 modulių reikšmės priklauso nuo dangos temperatūros. Kai asfalto dangos stipris matuojamas skirtingu metų laiku skirtingomis aplinkos sąlygomis, tokių matavimų E_0 modulių reikšmės turi būti redukuojamos priimtai standartinei temperatūrai. Eksperimentiniame asfalto dangų konstrukcijų ruože atliktu eksperimentiniu tyrimu patikslintas temperatūrinis redukcijos koeficientas. Šio koeficiento naudojimas leidžia krintančio svorio deflektometru nustatytas asfalto dangos sluoksnių standumo vertes redukuoti standartinei $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai. Tokiu būdu įvertinama asfalto dangos sluoksnio temperatūros įtaka asfalto standumui ir tamprumo moduliui (Motiejūnas *et al.* 2010).

Pasaulyje plačiai naudojami statinis ir dinaminis neardomieji dangų konstrukcijų deformacijos modulio nustatymo metodai. Nuo 1996 m. Estijoje kelio dangos konstrukcijos būklei/stiprumui nustatyti naudojamas krintančio svorio deflektometras FWD. A. Avik atliko kelio dangos konstrukcijos stiprumo tyrimų analizę/vertinimą ir pritaikė FWD naudojimą Estijos sąlygoms (2003).

Panašūs tyrimai atlikti daugelio užsienio mokslininkų, tačiau jie dažniausiai naudoja tik kelis matavimo prietaisus ir juos lygina tarpusavyje (Ma Feng, Fu Zhen 2010). Irano mokslininkai savo straipsnyje plačiau apžvelgia, kaip nešiojamasis krintančio svorio deflektometras PFWD (angl. *Portable Falling Weight Deflectometer*) naudojamas kelio dangų sluoksnių tamprumo moduliams nustatyti. Papildomai atlikti Kalifornijos santykinio atsparumo rodiklio CBR (angl. *California Bearing Ratio*) nustatymo eksperimentiniai tyrimai. Atliekant lauko tyrimus naudoti skirtingi PFWD parametrai: krintantis svoris, kritimo aukštis, plokštės skersmuo ir papildomai išdėstyti geofonai. PFWD nustatyti tamprumo moduliai palyginti su tamprumo moduliais, išmatuotais naudojant krintančio svorio deflektometrą FWD. Nustatyta, kad PFWD matavimo rezultatams didelę įtaką turi kritimo masė ir apkrovimo plokštės matmenys. Gauti eksperimentinių tyrimų rezultatai parodė, kad PFWD, FWD ir CBR matavimai gerai koreliuoja tarpusavyje (Kavussi *et al.* 2010).

Danijos kelių direkcija 2003 m. atliko eksperimentinius tyrimus trimis skirtingais matavimo prietaisais: statine sija (angl. *Static Plate Bearing*), FWD ir

mini FWD (angl. *Mini Falling Weight Deflectometer*). Gautų duomenų rezultatai parodė labai gerą tarpusavio ryšį tarp statinės sijos ir FWD. Mini FWD taip pat parodė gerus rezultatus, tačiau šis prietaisas dažniau naudojamas ant gruntų arba tose vietose, kur FWD naudoti negalima (Hildebrand, Baltzer 2003).

Šiuo metu Vengrijoje naudojami dviejų tipų lengvieji krintančio svorio deflektometrai LFWD (angl. *Light Falling Weight Deflectometer*). Tai vokiečių gamybos prietaisai („Zorn“, „HMP“ ir „Wemex“), kurie statybos rinkoje pasirodė septintojo dešimtmečio pabaigoje, ir mažos plokštės prietaisais B&C (angl. *Small-Plate Device*), kurį 2003 m. sukūrė kompanija „Adreas Ltd“. Šie prietaisai yra panašūs tiek forma, tiek konstrukcija. Abiejų tipų prietaisai naudojami žemės sankasos, grunto, pylimo sluoksnių ir užpylimų laikomajai galiai nustatyti.

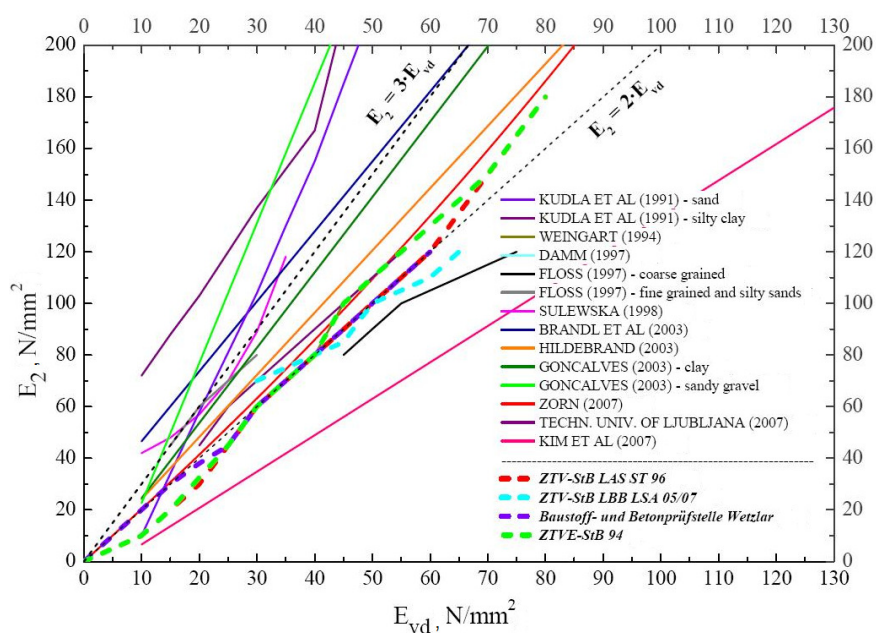
Kol kas šie prietaisai nėra plačiai naudojami, nes dinaminis modulis nėra pripažintas pylimų ir žemės sankasos sluoksnių kokybei vertinti ir kokybės kontrolei atlikti. Todėl minėti prietaisai naudojami gana retai, daugiausia nedidelės svarbos vietose (pvz., kelkraščiuose) ar grioviuose, kur bandymas statine plokštės apkrova būtų per daug sudėtingas.

Tam, kad būtų galima panaudoti šiuos dinامينius prietaisus matavimams ant kitų kelio dangos konstrukcijos sluoksnių, buvo pradėtas tyrimas siekiant nustatyti išmatuoto dinaminio modulio ir statinio modulio priklausomybę. Naujosios dinaminės tikslinės reikšmės suteiktų galimybę atlikti kokybės kontrolę ir įvertinti tiriamojo sluoksnio laikomąją galią ne tik bandant statine plokštės apkrova, kuris reikalauja daug laiko ir pastangų, bet ir dinaminiais prietaisais (Tompai 2008).

Priklausomybės tarp statinių ir dinaminų matavimo metodų tyrimų, atliktų užsienio šalių mokslininkų, rezultatų apibendrinimas pateiktas 1.3 paveiksle.

Tiesioginės priklausomybės nustatymo formulės praktikoje naudojamos retai, dažniausiai ribinės vertės pateikiamos tiek E_2 (bandymo statine plokštės apkrova statinis modulis), tiek E_{vd} (dinaminis modulis). Keturiuose skirtinguose Vokietijos standartuose nurodomos panašios ribinės vertės, kurios pateiktos 1.3 paveiksle (ryškia brūkšniuota linija). Taip pat galima pastebėti, kad statinio apkrovos plokšte išmatuoto modulio reikšmė mažiausiai du kartus viršija E_{vd} modulį. Kai kurie rezultatai rodo dar didesnę santykį. Tik dviejuose literatūros šaltiniuose nurodytas mažesnis santykis nei du, tačiau abu literatūros šaltiniai remiasi modulio reikšmėmis, išmatuotomis tik keliuose taškuose ir mažais atstumais.

Akivaizdu, kad visuose Vokietijos standartuose pateiktos dinaminės reikšmės yra arti koreliacijos linijos, nurodančios santykį du. Tai reiškia, kad visuose žinomuose standartuose, pateikiant dinaminio modulio E_{vd} ribines reikšmes, taikomas žemiausias priklausomybės santykis (ar net šiek tiek žemesnis).



1.3 pav. Įvairių pasaulio šalių atliktų tyrimų rezultatai tarp statinių ir dinaminių matavimo metodų (Tompai 2008)

Fig. 1.3. Correlation results found in international literature (Tompai 2008)

Tiesioginė priklausomybė tarp dinaminių ir statinių modulių praktikoje nustatoma retai. Priklausomai nuo tiriamo sluoksnio reikalingo sutankinimo laipsnio dažniausiai nurodomos tikslinės atskirų kelio dangos konstrukcijos ir sankasos sluoksnių reikšmės. Tiesioginę priklausomybę nustatyti leidžiama Austrijoje, o tikslinės E_2 ir E_{vd} modulių reikšmės patvirtintos Vokietijoje, Slovėnijoje ir kai kuriose kitose šalyse.

Pirmuosius savo tyrimų rezultatus, naudojant lengvą krintančio svorio deflektometrą ZFG 01 (pagal TP BF-StB Technical Specification for Soil and Rock in Road Construction... 1997) (angl. *Light Falling Weight Deflectometer ZFG 01*), 2004 m. savo moksliniame straipsnyje paskelbė M. J. Sulewska (2004). Ji nustatė funkcines priklausomybes tarp dinaminio ir statinio deformacijos modulio $E_D = f(I_S)$, $E_D = f(E_1)$, $E_D = f(E_2)$, pateikė išvadą, kad ši prietaisą galima naudoti kaip kontrolinį deformacijos moduliui nustatyti ant smėlio žvyro sluoksnių.

M. J. Sulewska (2010) nagrinėjo gruntų sutankinimo kontrolę pylimuose lengvais krintančio svorio deflektometrais. Bandymai buvo atliekami ant nesurištųjų kelio konstrukcijos sluoksnių Šiaurės Rytų Lenkijoje. Deformacijos modulis buvo matuojamas prietaisu ZFG 02 (angl. *Light Falling Weight Deflectometer ZFG 02*). Šio tyrimo tikslas – rasti koreliaciją tarp deformacijos modulio, išma-

tuoto krintančio svorio deflektometru ZFG 02, ir sutankinimo rodiklio. Atlikus rezultatų analizę, padaryta išvada, kad norint stiprinti sutankinimo kontrolės tikslumą, reikia atlikti kalibravimo tyrimą, dinaminio deformacijos modulio ribinės reikšmės turi būti nustatomos atsižvelgiant į sutankinimo rodiklį.

Kelio konstrukcijos stiprumo vertinimą krintančio svorio deflektometru analizavo estų mokslininkai Aavik, Paabo, Kaal. Jie siekė parašyti dangos ekvivalentinio tamprumo modulio skaičiavimo lygtį pagal FWD matavimų duomenis, paskui duomenis naudojant lyginimui su reglamentavimo dokumentais. Gauta priklausomybė tarp dangos tamprumo modulio ekvivalento ir FWD išmatuotų įlinkių, nustatyta ekvivalentinio tamprumo modulio skaičiavimo lygtis pagal FWD matavimų duomenis, matematiškai ir statistiškai pagrįsta aplinkos veiksnių įtaka ekvivalentinio tamprumo modulio koregavimui (Aavik *et al.* 2006).

Lietuvoje taip pat buvo atlikti panašūs dangos konstrukcijų būklės tyrimai, kuriuos atliko G. Šiaudinis savo moksliniame darbe „Lietuvos automobilių kelių nestandžiųjų dangų konstrukcijų stiprumo nustatymo metodai“, eksperimentiškai ištyrė Lietuvos automobilių kelių dangos konstrukcijų stiprumo kaitą, įvertinant Lietuvos klimato sąlygas (Šiaudinis 2007). 2003–2007 m. G. Šiaudinis atliko įlinkių matavimus pasirinktuose eksperimentiniuose kelių ruožuose. Kiekvienais metais nuo ankstyvo pavasario iki vėlyvo rudens buvo atliekami FWD matavimai (išskyrus įšalo periodą) 3–4 kartus per mėnesį pavasario ir rudens laikotarpiais bei 1–2 kartus per mėnesį vasaros laikotarpiu. Matavimų tikslas – apskaičiuoti dangos konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulius ir rasti ryšį tarp modulių, apskaičiuotų iš įlinkių, matuotų bet kuriuo metų laiku ir silpniausio periodo laiku. Sudaryti tamprumo modulio reikšmių metinių pokyčių tendencijų kreives, remiantis deflektometru matuojamais įlinkiais, ir panaudoti gautas priklausomybes siekiant paversti bet kuriuo metų laiku išmatuotą įlinkį ir apskaičiuotą ekvivalentinio tamprumo modulio reikšmę dydžiu, atitinkančiu silpniausią kelio dangos ruožą, taip pat laikotarpį, kai danga yra mažiausio stiprumo.

Eksperimentiniams tyrimams parinktų automobilių kelių ruožų dangų konstrukcijų sluoksnių tamprumo moduliams apskaičiuoti buvo panaudoti:

- išmatuoti kiekvieno eksperimentinio kelio ruožo dangų konstrukcijų sluoksnių storiai;
- deflektometru „Dynatest FWD 8000“ išmatuoti dangos konstrukcijos įlinkiai;
- išmatuotas įlinkis apkrovos plokštės centre, redukuotas standartinei +20 °C asfaltbetonio dangos temperatūrai.

Tyrimų metu buvo įvertinta temperatūros įtaka tyrimų rezultatams ir kelio dangos sluoksnių storiai tyrimų vietose.

Skaičiavimai buvo atliekami ELMOD 5 kompiuterine programa, kuri naudoja „Dynatest“ FWD 8000 įlinkių matavimo reikšmes dangos konstrukcijos sluoksnių tamprumo moduliui skaičiuoti. Buvo apskaičiuoti skaldos pagrindo

tamprumo moduliai, šalčiui atsparaus sluoksnio tamprumo moduliai ir sankasos grunto deformacijos moduliai.

Atlikus šį tyrimą, nustatyta, kad FWD prietaisą įmanoma panaudoti deformacijos moduliams nustatyti. Oro ir asfaltbetonio dangos temperatūros pokyčiai matuojant įlinkius daro didelį poveikį asfaltbetonio sluoksnio tamprumo moduliui. Sezoniniai pokyčiai, neatsižvelgiant į temperatūros svyravimus, sukelia kritulių kiekio svyravimus ir veikia dangos konstrukcijos drenavimo sąlygas. Lietuvoje kritiškiausias yra pavasario periodas, kai žemės sankasa ir kelio konstrukcija atšyla, konstrukcijos sluoksniai būna labiausiai prisotinti vandens. Vanduo kelio dangos konstrukcijoje, ypač sluoksniuose iš biriųjų medžiagų, daro įtaką jų stiprio rodikliams. Visų dangos konstrukcijų klasių didžiausiojo tamprumo modulis pasiekiamas birželio–rugpjūčio mėnesiais. Pagal ketverių metų eksperimentinių tyrimų rezultatus Lietuvos keliuose dėl sezoninių klimato veiksnių įtakos nustatytas kelio dangos konstrukcijos stiprio sumažėjimas.

Remiantis kitose šalyse ir Lietuvoje atliktais tyrimais, galima daryti prielaidą, kad pastebimas aiškus matavimo duomenų, gautų statiniu ir dinaminiu prietaisais, ryšys (AASHTO Guide for Design... 1993; Guidelines for Road Network... 2005, Šiaudinis 2006). Matavimo metodų analizė rodo dėsningą naudotų prietaisų priklausomybę, todėl negalima vienareikšmiškai nuspręsti, kuris metodas iš tikrųjų yra geriausias ir priimtinausias.

Siekiant nustatyti ir palyginti statiniu bei dinaminiu metodu atliktų bandymų rezultatų tikslumą, pirmieji tyrimai buvo atlikti 2004 m. kelio A5 Kaunas–Marijampolė–Suvalkai ruožo nuo 16,10 iki 16,40 km (Garliavos skirtingų lygių sankryža) pasirinktuose 20-yje taškų. D priede pateikti šio tyrimo matavimo duomenys, o 3-iajame ir 4-ajame skyriuje – matavimo rezultatai ir jų vertinimas. Matavimai buvo atliekami tiesiant kelią, tai leido atskirai išmatuoti kiekvieno kelio konstrukcijos sluoksnio įlinkius ir apskaičiuoti jų deformacijos modulius. 2007 m. buvo įrengtas eksperimentinis dangų konstrukcijų bandomasis ruožas, kuriame ir buvo atlikti šio darbo eksperimentiniai tyrimai. Tolesni šio bandomojo ruožo tyrimų rezultatai, jų analizė ir vertinimas leis parinkti tinkamiausią matavimo metodą atskiriems kelio dangos konstrukcijos sluoksniams.

1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir darbo uždavinių formulavimas

1. Svarbiausias kelio dangos konstrukcijos rodiklis yra stiprumas. Norint užtikrinti kelio dangos konstrukcijos, veikiamos automobilių apkrovų ir aplinkos veiksnių, stiprumą reikia, kad nė viename iš dangos konstrukcijos sluoksnių ar žemės sankasoje nesusidarytų plastinių deformacijų, kad nebūtų pažeistas monolitinių dangos sluoksnių vientisumas, kad tamprusis įlinkis, veikiant skaičiuojama-

jai apkrovai, neviršytų leidžiamąjį, nustatyto tyrimais ir dangų irimo įvairiomis eismo bei gamtinėmis sąlygomis stebėjimais. Skačiuojant kelių dangų stiprumą reikia įvertinti tokius pagrindinius kriterijus: dangos sluoksnių iš nerišliųjų medžiagų arba iš gruntų atsparumą šlyčiai; monolitinių dangos sluoksnių atsparumą tempimui; visos dangos konstrukcijos atsparumą tampriajam įlinkiui.

2. Dauguma Europos šalių taiko analitinius dangų projektavimo ir stiprinimo poreikio nustatymo metodus, kurie konceptualiai yra labai panašūs. Visi projektavimo metodai, taikomi Europoje ir pasaulyje, yra parinkti atsižvelgiant į klimato veiksnius ir medžiagas, naudojamas paskiroje šalyje. Taikant kitose šalyse paplitusius kelių dangų stiprio tyrimo modelius būtina juos priderinti prie konkrečios šalies specifikos.

3. Išanalizuoti Lietuvoje ir kitose Europos šalyse taikomi statiniai ir dinaminiai stiprumo matavimo metodai. Tačiau Lietuvoje bei daugelyje šalių įrengiant ir projektuojant kelio konstrukcijas, jų sluoksnių paviršiaus deformacijos modulis išmatuojamas statine sija. Remiantis atlikta tiriamųjų darbų analize galima teigti, kad pastebimas aiškus matavimo duomenų, gautų statiniais ir dinaminiais matavimo metodais, ryšys, tačiau negalima vienareikšmiškai nuspręsti, kuris metodas iš tikrųjų yra geriausias ir priimtinausias.

Darbo tikslui, kuris suformuluotas įvadinėje dalyje, pasiekti reikia išspręsti šiuos uždavinius:

1. Išnagrinėti dangos konstrukcijų stiprumo matavimo metodus.
2. Eksperimentiškai ištirti Lietuvos automobilių kelių dangos konstrukcijų stiprumą taikant statinį ir dinaminį matavimo metodus.
3. Nustatyti ryšį tarp statinių ir dinaminių matavimo metodų rezultatų.
4. Pagrįsti tinkamiausią matavimo metodą atskiriems kelio konstrukcijos sluoksniams (išskyrus viršutinius dangos konstrukcijos sluoksnius).

Automobilių kelių konstrukcijų stiprumo parametrų tyrimo metodai

Skyriuje atlikta įvairių veiksnių įtakos kelio konstrukcijos stiprumui analizė. Išanalizuoti statiniai ir dinaminiai kelio konstrukcijos stiprumo nustatymo ir matavimo metodai, nustatyta priklausomybė tarp statinių ir dinaminių matavimo metodų, išnagrinėtas žalingas važiuojančių automobilių ašinių apkrovų poveikis kelio dangai, kelio dangos stiprumo ir būklės priklausomybė nuo aplinkos temperatūros ir kritulių sezoninių pokyčių.

Skyriaus tematika paskelbti penki autoriaus straipsniai (Bertulienė *et al.* 2008, 2010; Лауринавичюс *et al.* 2010, 2011; Leonovich *and* Bertulienė 2011).

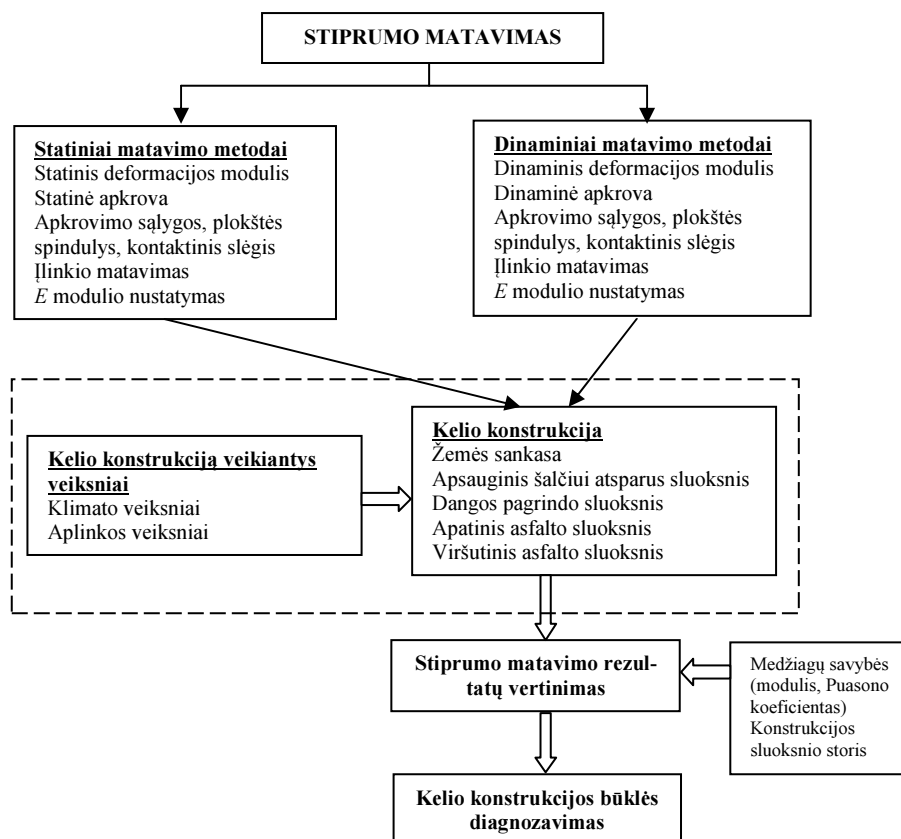
2.1. Kelio konstrukcijos stiprumą įvertinantys metodai ir modeliai, tamprumo ir deformacijos modulio nustatymas

Kelio dangos stiprumas – tai kelio dangos atsparumas įtempiams ir deformacijoms nuo transporto apkrovų ir klimato sąlygų. Kelio dangos stiprumas vizualiai

yra nepastebimas dydis. Tai ypač svarbus kelio dangos būklės diagnozavimo rodiklis. Įrengti naujus papildomus asfalto dangos sluoksnius labai brangu. Todėl informacija apie kelio dangos stiprumą padeda planuoti jos taisymo darbus, atsižvelgiant į transporto srauto intensyvumą ir jo sudėtį.

Kelio danga yra vienas svarbiausių struktūrinių kelio elementų. Ją nuolat veikia statinės ir dinaminės eismo apkrovos bei klimato kaita.

Iš pastaruoju metu pasaulinėje praktikoje taikomų metodų kelio dangos stiprumui įvertinti pats veiksmingiausias būdas paremtas įlinkių matavimu (2.1 pav.). Įvairių šalių mokslo tiriamuosiuose darbuose išaiškintos priklausomybės tarp apkrovos, kelio dangos tampriojo įlinkio ir dangos sluoksnių storių tamprumo modulių. Šios priklausomybės, nustatytos naudojant vienodo didumo apkrovą, gali būti naudojamos įvertinat kelio konstrukcijos stiprumą.



2.1 pav. Stiprumo matavimo metodai, grindžiami įlinkio matavimu
Fig. 2.1. Strength measuring methods based on deflection measurement

Bandymo metodas leidžia nustatyti: jėgos amplitudę ir jos trukmę, kuri apytikriai lygi automobilio rato apkrovos poveikio į kelio dangą trukmei; įvertinti netiesinę ir tampriai plastinę deformacijos vertę, išmatuoti įlinkius ir taškuose, nutolusiuose nuo apkrovos centro.

Įtempiai dangos konstrukcijos sluoksniuose ir žemės sankasos grunte nuo transporto priemonių poveikio nustatomi pagal tamprumo teorijos formules. Daugiasluoksniė dangos konstrukcija redukuojama į viensluksnė. Svarbiausiai įtempiai nuo pačios dangos konstrukcijos nustatomi formule (Lietuvos automobilių kelių... 2007):

$$\sigma = \gamma_{vid} \cdot z, \quad (2.1)$$

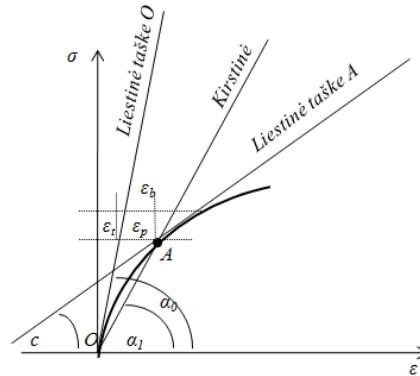
čia γ_{vid} – dangos konstrukcijos, slūgsančios ant nagrinėjamojo taško, vertinis lyginamasis svoris; z – atstumas nuo dangos paviršiaus iki nagrinėjamojo taško.

Tamprumo modulis – matematinė objekto ar medžiagos tampriojo deformavimo, veikiant išorinei jėgai, išraiška.

Tampriąsias ir sumines deformacijas galima apibūdinti tamprumo ir deformacijų moduliais. Tamprumo diagramoje σ – ε (2.2 pav.) E_b atitinka įtempių ir deformacijų kreivės liestinės, nubrėžtos per koordinatų pradžios tašką O , posvyrio kampo tangentas:

$$E_b = \operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{\sigma_b}{\varepsilon_l} = \operatorname{const}. \quad (2.2)$$

čia σ_b – įtempiai, veikiantys dangos konstrukciją; ε_l – tampriosios deformacijos, atsirandančios kelio konstrukcijoje dėl įtempių.



2.2 pav. Tamprumo modulio diagrama

Fig. 2.2. Diagrame of elastic modulus

Tamprumo modulio sąvoka taikoma akimirkinei apkrovai. Kai įtempiai nedideli, akimirkinės ir trumpalaikės apkrovos diagramos σ – ε beveik sutampa.

Kadangi įtempių ir deformacijų ryšio išraiška yra netiesinė, sumines medžiagos deformacijas galima apibūdinti deformacijų moduliu E'_b :

$$E'_b = \operatorname{tg} \alpha = \frac{d\sigma_b}{d\varepsilon_b}, \quad (2.3)$$

čia σ_b – įtempiai, veikiantys dangos konstrukciją; ε_b – suminės deformacijos, atsirandančios kelio konstrukcijoje dėl įtempių.

Asfaltbetonio deformacijos modulis yra kintamas. Įtempiams arba jų veikimo trukmei didėjant, deformacijos modulis mažėja.

Deformacijų modulį skaičiuojant pagal 2.3 formulę, reikia žinoti σ – ε lygtį $\sigma_b = f(\varepsilon_b)$, tačiau ją sudaryti galima tik eksperimentiniu būdu.

Dar naudojamas deformacijų modulis E'_b , kurį atitinka kirstinės, nubrėžtos per σ – ε kreivės bet kurį tašką A ir koordinatinių pradžių kampo α_1 tangentas:

$$E'_b = \operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\sigma_b}{\varepsilon_b}. \quad (2.4)$$

Deformacijos modulis E'_b yra mažesnis už tamprumo modulį E_b . Tarp jų yra ryšys.

$$\sigma_b = \varepsilon_f E_b \text{ ir } \sigma_b = \varepsilon_f E'_b, \text{ todėl}$$

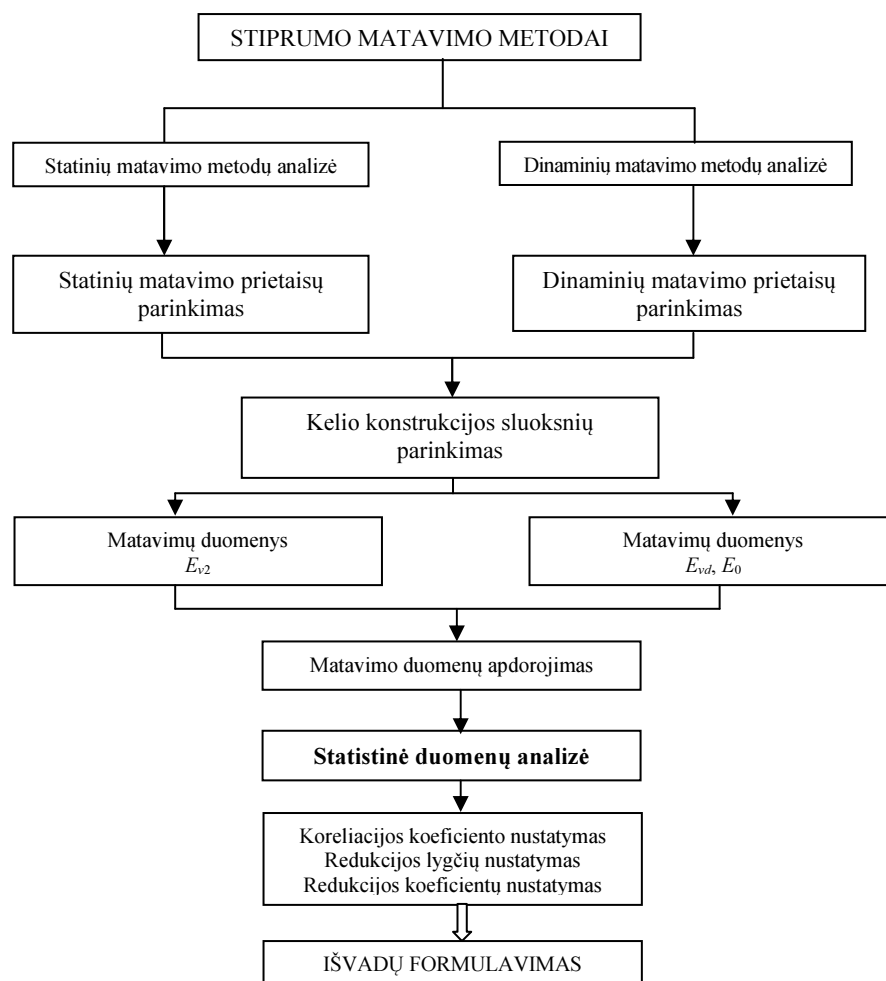
$$\varepsilon_f E_b = \varepsilon_b E'_b, \text{ iš čia } E'_b = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_b} E_b = \gamma E_b,$$

čia $\gamma = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_b}$ tampriosios ir suminės deformacijos santykis, vadinamas tamprumo koefi-

cientu. Teoriškai tamprumo koeficientas kinta $\gamma = 0$ (idealiai plastiškos medžiagos) iki $\gamma = 1$ (idealiai tamprios medžiagos).

Vertinant kelio dangos konstrukcijos atskirų sluoksnių stiprumą kilo būtinybė nustatyti ryšį tarp deformacijos modulių, apskaičiuotų iš kelio dangos konstrukcijos įlinkių, gautų su statiniais ir dinaminiais prietaisais. Statinių ir dinaminių matavimo metodų lyginamasis modelis pateiktas 2.3 paveiksle.

Kelio dangos konstrukcija yra sudėtinga konstrukcinių sluoksnių visuma, veikiamą įvairių klimatinių, aplinkos veiksnių, statinių ir dinaminių transporto apkrovų. Norint analizuoti joje vykstančius reiškinius, reikia įvertinti visus kelią ir jį supančią aplinką lemiančius parametrus.



2.3 pav. Stiprumo matavimo metodų, paremtų įlinkio matavimu, lyginamasis modelis

Fig. 2.3. Model for the comparison of strength measuring methods based on deflection measurement

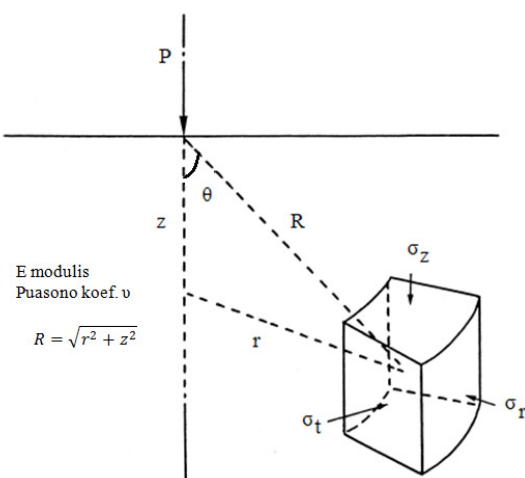
Kelio irimą lemia: geometriniai kelio parametrai, eksploatacinės kelio dangos savybės, kelio dangos konstrukcija; automobilių eismas, apkrovos; aplinka – klimatas, hidrologija.

2.1.1. Nestandžiųjų dangų konstrukcijos veikiant apkrovai nustatymo modeliai

Businesko (Boussinesq's) lygtys

Pirmąjį dangų konstrukcijos apkrovos reakcijos nustatymo modelį 1885 m. sukūrė J. Busineskas. Jis ištyrė dangos reakciją į apkrovą ir pasiūlė daug lygčių, kurios pavadintos Businesko lygtimis. Jos naudojamos apskaičiuojant įtempius, deformacijas ir įlinkius, sukeltus veikiant sutelktajai apkrovai. Šiame modelyje Busineskas padarė prielaidą, kad dangos sluoksnis yra vienaarūšė, izotropinė, tiesiškai tampri puserdvė. 2.4 paveiksle pateiktas Businesko lygčių žymėjimas poliarinėje koordinatinių sistemoje (z reiškia gylį, o r – horizontalus atstumas tarp apkrovos P ir taško, kuriame tikimasi dangos reakcijos į apkrovą).

2.1 lentelėje pateiktos kelios Businesko lygtys sutelktajai apkrovai P apskaičiuoti.



2.4 pav. Businesko lygčių žymėjimas poliarinėje koordinatinių sistemoje (Ullidta 1987)

Fig. 2.4. Notation for Boussinesq's equations in polar coordinates (Ullidta 1987)

Businesko kontrolinio sluoksnio modelis tikriausiai yra paprasčiausias dangos konstrukcijos modelis. Pradžioje jis buvo sukurtas statinei sutelktajai apkrovai. Vėliau integravimo būdu buvo išvestos lygtys ir tolygiai išskirstytai apkrovai. Nors prielaidos, padarytos kuriant šį modelį, atrodo hipotetinės ir nereališios, daugelis mokslininkų įrodė, kad koreliacija tarp Businesko lygtimis apskaičiuotų įlinkių ir išmatuotų įlinkių yra gera.

2.1 lentelė. Businessko lygtys sutelktajai apkrovai apskaičiuoti (Ullidta 1998)

Table 2.1. Boussinesq's equations for a concentrated load (Ullidta 1998)

<i>Normaliniai įtempiai</i>
$\sigma_r = \frac{P}{2\pi R^2} \left(3 \cos \theta \cdot \sin^2 \theta - \frac{1-2\nu}{1+\cos \theta} \right)$ $\sigma_t = \frac{(1-2\nu)P}{2\pi R^2} \left(-\cos \theta - \frac{1}{1+\cos \theta} \right)$ $\sigma_z = \frac{3P}{2\pi R^2} \cdot \cos^3 \theta$
<i>Normalinės deformacijos</i>
$\varepsilon_r = \frac{(1+\nu)P}{2\pi R^2 E} \left(-3 \cos^3 \theta + (3-2\nu) \cdot \cos \theta - \frac{1-2\nu}{1+\cos \theta} \right)$ $\varepsilon_t = \frac{(1+\nu)P}{2\pi R^2 E} \left(-\cos \theta + \frac{1-2\nu}{1+\cos \theta} \right)$ $\varepsilon_r = \frac{(1+\nu)P}{2\pi R^2 E} (3 \cos^3 \theta - 2\nu \cos \theta)$
<i>Šlyties įtempis</i>
$\tau_{rz} = \frac{3P}{2\pi R^2} \cdot \cos^2 \theta \cdot \sin \theta$
<i>Šlyjamoji deformacija</i>
$\gamma_{rz} = \frac{(1+\nu)P}{\pi R^2} (\cos^2 \theta \cdot \sin \theta)$
<i>Poslinkiai</i>
$d_r = \frac{(1+\nu)P}{2\pi RE} \left(\cos \theta \sin \theta - \frac{(1-2\nu) \sin \theta}{1+\cos \theta} \right)$ $d_z = \frac{(1+\nu)P}{2\pi RE} (2(1-\nu) + \cos^2 \theta)$

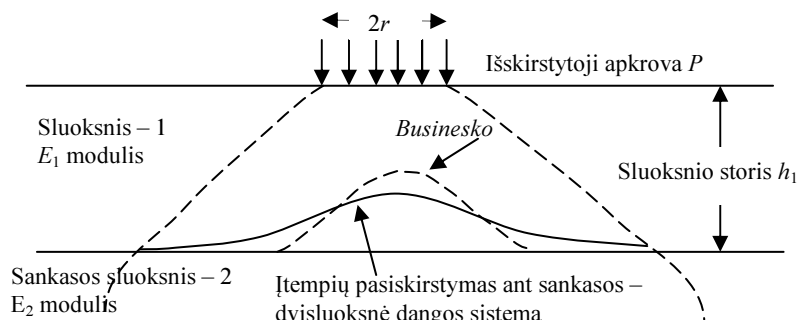
Didžiausias šio modelio pranašumas tas, kad jis nesudėtingas ir kad juo remiantis buvo sukurti keli šiuo metu tebenaudojami dangų konstrukcijos modeliai.

Dvisluoksnės dangos teorija

Paprastai nestandžiąją kelio dangą sudaro keletas sluoksnių. Todėl, naudojant Businessko kontrolinio sluoksnio modelį, neįmanoma tiksliai sumodeliuoti nestandžiosios dangos konstrukcijos – reikalingas geresnis modelis. Burmisteris (Burmister) sukūrė modelį, skirtą dvisluoksnės nestandžiosios dangos analizei (Burmister 1943). Kuriant šį modelį buvo padarytos kelios esminės prielaidos siekiant apskaičiuoti įtempius, deformacijas ir įlinkius. Burmisterio padarytos prielaidos buvo šios:

– Kiekvieno sluoksnio medžiaga yra vienarūšė, izotropinė ir tiesiškai tampri (tamprumo modulis E , Puasono (Poisson's) koeficientas ν).

- Šoninė viršutinio dangos sluoksnio kryptis yra beribė, vertikalioji kryptis turi baigtinį gylį. Apatinio dangos sluoksnio horizontalioji ir vertikalioji kryptis yra beribė.
- Visi sluoksniai yra vienodo storio. Visų sluoksnių medžiaga svorio neturi.
- Sluoksniai turi nuolatinį kontaktą. Įtempiai ir deformacijos neviršija tarpusluoksnių tam tikrų ribų.
- Dangos paviršiuje šlyties jėgų nėra. Apkrova į dangą apibūdina tolygiai išskirstytas slėgis.
- Į dinامينius ir šilumos poveikius neatsižvelgiama.



2.5 pav. Burmisterio dvisluoksnės dangos sistema (Burmister 1943)

Fig. 2.5. Burmister's two layer system (Burmister 1943)

Pagal Burmisterio teoriją įtempiai ir įlinkiai priklauso nuo modulių santykio (E_1/E_2), čia E_1 – viršutinio sluoksnio modulis, E_2 – sankasos grunto sluoksnio modulis. Burmisteris parengė diagramą, skirtą paviršiaus įlinkiams apskaičiuoti dvisluoksnės dangos sistemoje. Įlinkių nustatymo lygtys yra šios:

įlinkis po nestandžiąja plokšte:

$$\Delta = 1,5 \frac{P \cdot a}{E_2} F_2$$

įlinkis po standžiąja plokšte:

$$\Delta = 1,18 \frac{P \cdot a}{E_2} F_2$$

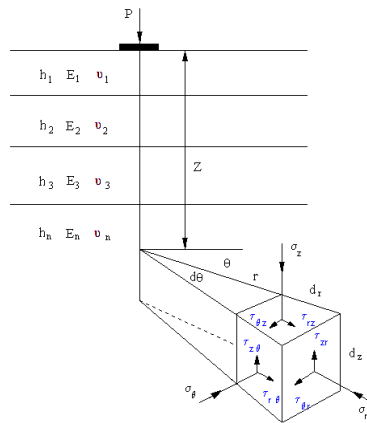
čia P – bendroji apkrova ant apskritos plokštės; a – plokštės spindulys, E_2 – apatinio sluoksnio tamprumo modulis; F_2 – įlinkių koeficientas, priklausantis nuo E_1/E_2 ir a/h_1 reikšmių; h_1 – viršutinio sluoksnio storis.

Daugiasluoksnės dangos teorija

Norėdamas sudaryti geresnį nestandziųjų dangų modelį, Burmisteris praplėtė savo dvisluoksnės dangos teoriją ir perėjo prie trisluoksnės dangos sistemos. Vė-

liau Acumas ir Foxas (Acum, Fox 1951), remdamiesi Burmisterio teorija, sudarė normalinių ir radialinių įtempių tiksluosius sprendinius trisluoksnės dangos sistemoje. Jų sukurtuose modeliuose naudotos ir Burmisterio teorijos hipotezės. Vėliau kiti mokslininkai sprendinius patobulino įvesdami platesnio diapazono sprendinių parametrus. Buvo sudaryti horizontaliųjų įtempių sprendiniai trisluoksnės dangos sistemoje. Šiuose moksliniuose tyrimuose visiems sluoksniams vertinti buvo taikytas Puasono koeficientas, lygus 0,5.

Schiffmanas pateikė įtempių ir poslinkių sprendinį daugiasluoksnės dangos tamprumo sistemoje. Tai buvo laikoma perversmu nestandžiųjų dangų analizės srityje. Ankstesniuose tyrimuose buvo apsiribota vien tik koncentruotąja apkrova ar tolygiai išskirstyta apkrova, o dangos reakcija į netolygiąsias ir tangentineis apkrovas nebuvo vertinama. Schiffmano teorija suteikė galimybę apskaičiuoti įtempius ir poslinkius veikiant įvairaus tipo apkrovoms, tokioms kaip netolygiosios, tangentinės ar standžiosios apkrovos. 2.6 paveiksle pateiktas daugiasluoksnės dangos tamprumo modelio žymėjimas cilindrinėje koordinatėse. Kiekvienas sluoksnis turi savo tamprumo modulį (E), Puasono koeficientą (ν) ir storį.



2.6 pav. Daugiasluoksnės dangos tamprumo modelio žymėjimas cilindrinėje koordinatėse sistemoje (Huang 2004).

Fig. 2.6. Notation for multi-layer elastic model in cylindrical coordinates (Huang 2004)

Daugiasluoksnės dangos analizės kompiuterinės programos

Tobulėjant kompiuterinėms technologijoms buvo sukurta nemažai kelio dangos analizės kompiuterinių programų, kurių pagrindas – daugiasluoksnės dangos tamprumo teorija. Kompiuterinės programos, naudojamos dangos analizei ir projektavimui, yra šios: BISAR, CHEVRON, KENLAYER, ELSYM5, Everstress ir

WESLEA. Paprastai šios programos padeda apskaičiuoti įtempius, deformacijas ir įlinkius veikiant apvalioms paviršiaus apkrovoms. Šių programų įvesties duomenys yra: medžiagų savybės (modulis ir Puasono koeficientas), sluoksnių storis, apkrovos sąlygos (apkrovos dydis, spindulys, ar kontaktinis slėgis). Gaunama informacija apie įtempius, deformacijas ir įlinkius.

2.2 lentelė. Daugiasluoksnės dangos analizės kompiuterinės programos

Table 2.2. Multi-layer Computer Programs

Programa	Aprašas
<i>BISAR</i>	Sukurta remiantis tiesine tamprumo teorija. BISAR 3.0 naudojama apskaičiuojant įtempių ir deformacijų profilius, įlinkius ir pasislinkimą tarp sluoksnių, remiantis šlytimi ties sluoksnių sankirta
<i>CHEVRON</i>	Sukurta remiantis tiesine tamprumo teorija. Programa leidžia analizuoti daugiau nei 10 sluoksnių ir iki 10 rato apkrovų
<i>KENLAYER</i>	Sukurta remiantis Burmisterio dangos sluoksnių tamprumo teorija. Leidžia apskaičiuoti daugiausia 19 sluoksnių reakciją į apkrovas 190-yje taškų
<i>ELSYM5</i>	Sukurta remiantis tiesine tamprumo teorija. Leidžia analizuoti daugiausia 5 sluoksnių dangos konstrukciją, 20 kartotinių rato apkrovų
<i>Everstress</i>	Programa leidžia nustatyti įtempius, deformacijas ir įlinkius sluoksninėje tampriojoje sistemoje (pusiau beribėje), veikiant apvalioms paviršiaus apkrovoms. Galima analizuoti iki 5 sluoksnių, 20 apkrovų ir 50 vertinimo taškų
<i>WESLEA</i>	Dabartinė versija leidžia analizuoti daugiau nei 10 sluoksnių ir daugiau nei 10 apkrovų

Baigtinių elementų metodas

Baigtinių elementų metodas – tai skaitinis metodas, taikomas dangos konstrukcijos įtempių, deformacijų ir poslinkių analizei. ILLI-PAVE programa, kurią sukūrė Raadas ir Fifueroa (1980), yra dviejų matmenų (2-D) baigtinių elementų programa, dažniausiai naudojama nestandžiųjų dangų analizei. Šios 2-D baigtinių elementų programos pranašumas tas, kad ji leidžia naudoti netiesines sudėtingas priklausomybes, kurios apibūdina netiesinio tamprumo, klampaus tamprumo ar plastiškumo būvį. Kitą baigtinių elementų programą, pavadintą 3D-Move, sukūrė Siddharthanas (Siddharthan *et al.* 1998), remdamasis kontinuumo mechanika. Baigtinių elementų metodo pranašumas tas, kad jis leidžia įvertinti nestandžiųjų kelio dangų dinaminę reakciją. Nestandžiųjų dangų analizei atlikti sukurta nemažai kitų baigtinių elementų programų (t. y. CAPA-3D, CESAR-LCPC, Mich-PAVE ir FeBack). Dėl baigtinių elementų metodo sudėtingumo baigtinių elementų programos taikomos tik tiesioginei dangų konstrukcijų analizei. Šios programos neleidžia atlikti tamprumo modulio perskaičiavimo pagal paviršiaus įlinkių duomenis.

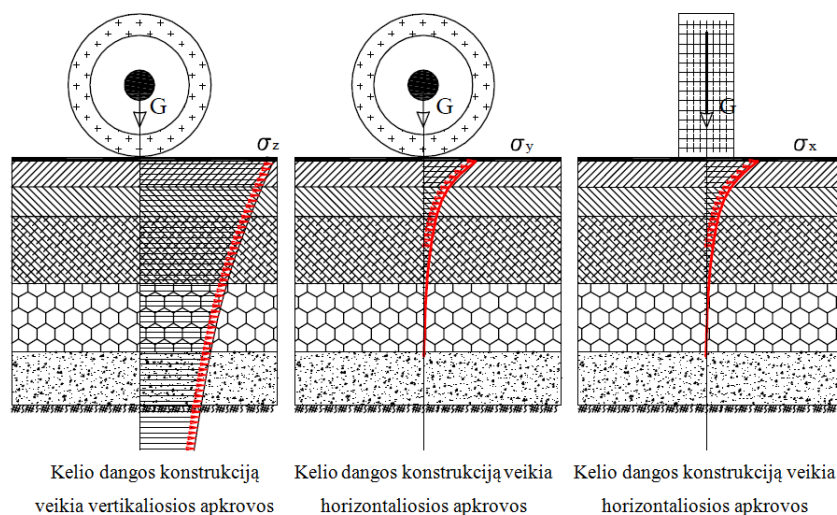
Pastaruoju metu daugiasluoksnės dangos tamprumo teorija yra plačiausiai naudojamas dangų konstrukcijų modelis projektuojant ir analizuojant dangas. Remdamiesi bandymais, atliekamais naudojant krintančio svorio deflektometrą (FWD), inžinieriai gali apskaičiuoti dangos sluoksnio standumą ir įvertinti fizines dangos savybes. Taikant dinامينius matavimo metodus surinkti duomenys apie skirtingo tipo dangas skirtingu metų laiku gali būti naudojami prognozavimo modelio pagrįstumui ir tikslumui patikrinti įvairiose situacijose.

2.1.2. Statiniai ir dinaminiai stiprumo matavimo metodai

Statiniai kelio konstrukcijos ir konstrukcijos sluoksnių stiprumo nustatymo metodai

Dangos konstrukcijos stiprumui nustatyti taikomi įvairūs stiprumo nustatymo metodai. Praktiniu požiūriu paprasčiausias yra statinis stiprumo matavimo metodas. Atliekant matavimus statiniais matavimo metodais kelio dangos konstrukcijos tam tikras plotas yra laipsniškai apkraunamas ir nukraunamas. Apskritai galima išskirti kelis rodiklius, apibūdinančius statinį kelio dangos stiprumą (2.7 pav.). Tai yra konstrukcijos sugebėjimas priešintis:

- vertikaliesiems įtempiams (σ_z);
- horizontaliesiems įtempiams (σ_x , σ_y).



2.7 pav. Kelio dangos konstrukciją veikiančios vertikaliosios ir horizontaliosios apkrovos

Fig. 2.7. Vertical and horizontal loads affecting the road pavement structure

Gebėjimas priešintis vertikaliesiems įtempiams išreiškiamas bendru reikalaujamu tamprumo modulių; horizontaliesiems įtempiams – leidžiamo pasipriešinimo poslinkiui dydžiu. Išsamios informacijos apie statinį stiprumo matavimo metodą gali suteikti metodika, nukreipta į kompleksinį visų jos sudedamųjų dalių vertinimą.

Statinių kelio dangos konstrukcijos stiprumo vertinimo metodų esmė – sukurti kelio dangos paviršiuje sąlyginį spaudimą, kuris pagal reikšmę atitinka po štampu sukeltamos automobilio rato apkrovos poveikį arba sudvejintų automobilių ratų poveikį. Pirmuoju atveju poveikis dangos paviršiui perduodamas per standų štampą plotu, kuris lygus skaičiuojamam automobilio rato pėdsako atspaudui. Atsižvelgiant į tamprumo įlinkį apskaičiuojamas bendras tamprumo modulis pagal šią formulę:

$$E_i = \frac{P \cdot D}{l} (1 - \mu^2), \quad (2.5)$$

čia P – automobilio rato slėgis į dangą, Pa; D – štampo skersmuo, m; l – privestinis dangos įlinkis, m; μ – Puasono koeficientas.

Kelio dangos konstrukcijos stiprumui nustatyti rekomenduojama taikyti dviąsį automobilį, kuriame užpakalinio rato apkrova yra 30–50 kN (ОДН 218.1.052-2002 Оценка... 2003). Atliekant bandymą automobiliu, kurio svorio parametrai skiriasi nuo apskaičiuotos apkrovos parametrų, gauti rezultatai tikslinami pagal šią formulę:

$$E_i = 0,36 \frac{Q_k}{l}, \quad (2.6)$$

čia E_i – kelio dangos konstrukcijos tamprumo modulis, MPa; Q_k – automobilio rato apkrova, kN; l – privestinis dangos įlinkis, cm.

Kaip matyti iš (2.5) formulės, yra numanoma linijinė bendro tamprumo modulio priklausomybė nuo dangos paviršiaus įlinkio reikšmės. Atliekant matavimus ir apdorojant bandymų rezultatus reikėtų įvertinti gamtinių – klimatinų veiksnių įtaką. Tokiu atveju reiktų remtis tipine konstrukcijos būkle, apibūdinama tamprumo modulių:

$$E = A - B \left(\lg \sum_{i=1}^m \frac{t_{E_i}}{10} - 0,4 \right), \quad (2.7)$$

čia: A ir B – empiriniai koeficientai, priklausantys nuo kelio dangos konstrukcijos tipo, skaičiuojamosios apkrovos ir nuo klimatinų veiksnių; m – atliktų matavimų

skaičius per metus; E_i – kelio dangos konstrukcijos tamprumo modulis kontroli-niame taške tam tikru laiko momentu, MPa; t_{E_i} – būsenos trukmė.

Apžvelgtų bandymų metu apibūdinamas vidutinis statistinis kelių konstrukci-jos tamprumo modulis dangos konstrukcijos naudojimo laikotarpiui. Remiantis tyrimų duomenimis, galima įvertinti tik kelio dangos konstrukcijos gebėjimą pa-sipriešinti pagrindiniams vertikaliesiems įtempiams. Šis vertinimas neleidžia iki galo apibūdinti kelio konstrukcijos būklę prognozuojant ją tolesnio silpnėjimo atžvilgiu.

Bendras visų statinių metodų trūkumas tas, kad panašiais metodais neįma-noma įvertinti kelių konstrukcijos gebėjimo iš esmės suvokti dinaminį poveikį, kuris atsiranda dėl realaus automobilių transporto judėjimo (Илиополов *et al.* 2001, 2002, 1996; Илиополов, Ляпин 1997).

Dauguma skaičiavimo metodų, taikomų JAV ir Vakarų Europos šalyse (Lid-lo (JAV Asfalto institutas) ir kt.), remiasi empirinėmis priklausomybėmis nuo žemės sankasos grunto stiprumo (CBR), apkrovos ir kelio dangos konstrukcijos sluoksnių storio. Vienas pagrindinių skaičiuojamųjų dangų konstrukcijos stipru-mo metodų laikomas Šuk ir Finn metodas, pagrįstas AASHO eksperimentų anali-ze (1.3 skyrius).

Dauguma kelio dangos apskaičiavimo schemų, priimtų užsienyje, pagrįstos šia priklausomybe. Teorinių žinių trukumą kompensuoja didelis eksperimentinių duomenų kiekis. Rusijoje dangos konstrukcijos skaičiavimo schema nustatoma pagal kelio konstrukcijos atitiktį stiprumui ir patvarumui, kai tenkinama sąlyga:

$$E_b \geq E_{\min} k_p, \quad (2.8)$$

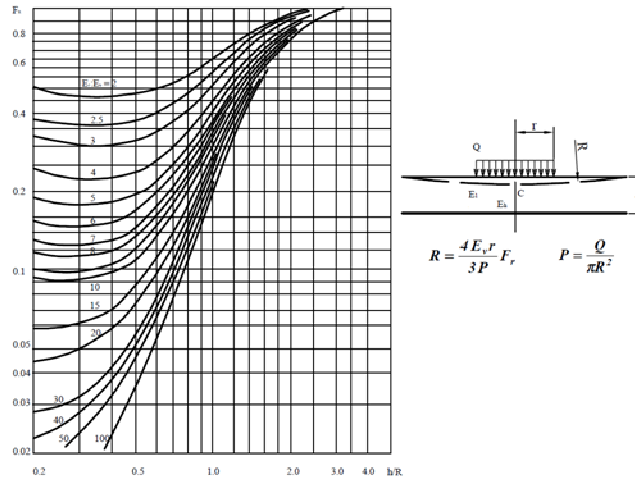
čia k_p – stiprumo koeficientas pagal tampraus įlinko kriterijų; E_b – bendras skai-čiuojamasis tamprumo modulis, MPa; $E_{\min}$ – minimalus bendras tamprumo modu-lis, MPa.

$$E_{\min} = 98,65 [\lg(\sum N_p) - c], \quad (2.9)$$

čia $\sum N_p$ – suminis apkrovų skaičius naudojimo laikotarpiu; c – empirinis para-metras, imamas kaip priklausomybė nuo skaičiuojamosios ašies apkrovos.

Skaičiavimo schema remiasi statiniais tamprumo teorijos pagrindais. Nepai-sant to, kad į kelio dangos stiprumo skaičiavimą įtraukiamas dinaminis koeficien-tas, ši metodika reikalauja tam tikrų patikslinimų. Kelio konstrukcijos bendro tamprumo modulio statistinė priklausomybė nuo kokybinės ir kiekybinės bendros apkrovos sudėtinės dalies aiškiai neapibrėžia nuovargio procesų nuo dinaminio poveikio vystymosi intensyvumo.

Dauguma užsienio šalių skaičiavimo ir kelio dangos vertinimo metodikų yra pritaikytos kelių konstrukcijos įlinkio dubens geometrijai. Vokietijoje pastarojo šimtmečio 8-ajame dešimtmetyje buvo naudojama skaičiavimo schema, atsižvelgianti į įlinkio dubens po automobilio ratu kreivės spindulį (2.8 pav.):



2.8 pav. Kreivės spindulio R nustatymas pagal Odemarką
Fig. 2.8. Determination of the curve radius R according to Odemark

$$R = \frac{4E_v r}{3P} F_r, \quad (2.10)$$

čia R – dangos konstrukcijos kreivės spindulys, m; E_v – dangos konstrukcijų sluoksnių tamprumo modulis, MPa; P – automobilio rato slėgis į dangą, MPa; r – plokštės skersmuo, m; F_r – koeficientas, nustatomas pagal nomogramą priklausomai nuo viršutinio ir apatinio dangos konstrukcijos sluoksnių ir h/r .

Supaprastintą kreivės spindulio skaičiavimą pasiūlė V. I. Barzdo. Tariaama, kad plokščias dangos paviršius, pridėjus apkrovą, tam tikru atstumu nuo įkrovimo centro taptų cilindriškas:

$$R = \frac{L^2}{8U}, \quad (2.11)$$

čia L – atstumas tarp dviejų taškų, m; U – dangos įlinkis, m.

Statiniai kelio konstrukcijos stiprumo skaičiavimo ir vertinimo metodai remiasi didžiausiais normaliniais ir tangentiniais įtempiais. Pagal šiuos kriterijus

irimas vyksta plėšimo (pagal didžiausias normalinius įtempius) ir kirpimo būdu (pagal didžiausią tangentinį įtempį) (Смирно 1993).

$$\sigma_e = \sigma_3,$$

$$\sigma_e = \sigma_1 - \sigma_3,$$

$$E_f = \frac{1+\nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2], \quad (2.12)$$

čia $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – pagrindiniai įtempiai, Pa; σ_e – ekvivalentinis įtempis, Pa; E_f – konkreti formos keitimo energija, Dž; ν – Puasono koeficientas; E – tamprumo modulis, Pa.

Visos statinės skaičiavimo schemas ir vertinimo metodai taikytini nustatant kelio konstrukcijos stiprumą, kelio konstrukcijos gebėjimą atlaikyti didėjančias automobilių transporto apkrovas ir taip išvengiant spartaus dangos konstrukcijos irimo. Pagal gautus statinius stiprumo matavimo duomenų rezultatus, gaunamus naudojant dinامينius koeficientus ir atsižvelgiant į sparčiai augančius automobilių transporto srautus ir didėjančias apkrovas – tai empirinis perėjimas nuo statinių tamprumo teorijos sprendimų prie nepakankamai ištirtų kelių konstrukcijų irimo nuo dinaminio įtempių poveikio. Prastėjant dangos paviršiui, dinaminis automobilių transporto poveikis didėja. Tai pasireiškia pirmiausia energijos, kurią priima kelių konstrukcija, didėjimu. Tuomet akivaizdi tampa mikrostruktūrinių kelio konstrukcijos skirtingų elementų ryšių keitimosi ir irimo tendencija.

Be abejo, smulkūs pažeidimai laikui bėgant turi įtakos bendrojo kelio dangos tamprumo modulio reikšmei, nustatamai statiniais bandymais, tačiau negali būti objektyviu kelių konstrukcijos susidėvėjimo lygio (nuovargio procesų išsivystymo lygmens ir pobūdžio) įvertinimu arba būti tolesnės kelio konstrukcijos būklės keitimosi laikui bėgant prognozės pagrindu (vertinti jos dinaminį potencialą).

Idealiu atveju būklės įvertinimo metodika turi išaiškinti stiprumo sumažėjimo priežastis, gana aiškiai skiriant atskirų elementų būklę: dangos, pagrindo ir žemės sankasos sluoksnių, kas kiekvienu atveju leis paskirti efektyviausią remonto priemonių kompleksą. Standartinis stiprumo didinimo sprendimas, įrengiant stiprinimo sluoksnį, gali pasirodyti neefektyvus žemės sankasos grunto susilpnėjimo arba pagrindo sluoksnių suirimo atvejais. Šiuo atveju statiniai būklės įvertinimo būdai yra neinformatyvūs.

Statiniai kelių konstrukcijų konstravimo ir stiprumo įvertinimo metodai turi tokių trūkumų:

- statiniai būdai leidžia nustatyti kelių konstrukcijų sugebėjimą atlaikyti apkrovas, gerokai viršijančias apkrovas, atsirandančias nuo automobilių transpor-

to, ir yra neinformatyvūs vertinant nuovargio procesų išsivystymo lygį kelio dangos konstrukcijos sluoksniuose;

– statiniai bandymų metodai neleidžia nustatyti kelio konstrukcijos stiprumo sumažėjimo priežasties, apribojant efektyvių sprendimų priėmimą prognozuojant automobilių kelių remontą ir priežiūrą.

Dinaminiai kelio konstrukcijos stiprumo matavimo metodai

Norint objektyviai įvertinti kelio dangos būklę, tikslinga naudoti poveikį, analogišką realiam transporto judėjimui. Skirtingai nuo statinių matavimo metodų vertinimų, dinaminiai metodai gali įvertinti apkrovas nuo judančio transporto.

Atliekant matavimus dinaminiais matavimo metodais apkrova sukelia krintančio masyvaus cilindro smūgiu per labai trumpą laiko tarpą, kuris sukelia dangos sluoksnių deformacijas. Dinaminis poveikis Q_d ir apkrovimo trukmė T_f apskaičiuojamos pagal priartintas formules (Илюполов, Ляпин 1997):

$$Q_d = Mg \sqrt{\frac{2H}{\delta}} k_d, \quad (2.13)$$

$$k_d = 0,5 \left(l + \frac{l'}{l} \right), \quad (2.14)$$

$$T_f = \pi \sqrt{\frac{\delta}{g}} \cong 0,1 \sqrt{\delta}, \quad (2.15)$$

čia M – krintančio svorio masė, kg; g – laisvasis krintančio svorio pagreitis, m/c^2 ; H – krintančio svorio aukštis, cm; δ – rodiklis, įvertinantis pakabos kietumą, m; k_d – krintančio svorio energijos netekimo koeficientas; l, l' – vertikaliosios deformacijos nuo pirmojo ir antrojo krintančio svorio smūgio, cm.

Grunto po apkrovos plokšte apskaičiuotas dinaminis deformacijos modulis E_{vd} skiriasi nuo deformacijos modulio E_{v2} , nustatyto pagal statinio bandymo antrinę apkrovą. Šiuo bandymo metodu galima nustatyti dinaminį deformacijos modulį E_{vd} nuo 10 MN/m^2 iki 125 MN/m^2 .

Dinaminiu deformacijos moduliui E_{vd} apibūdinama grunto deformacija veikiant nustatyto dydžio smūginei apkrovai. Išmatavus grunto po apkrovos plokšte deformaciją s , modulio reikšmė randama pagal šią formulę:

$$E_{vd} = 1,5 \cdot r \cdot \frac{\delta}{s}, \quad (2.16)$$

čia r – apkrovos plokštės spindulys cm; δ – dinaminė apkrova, lygi $0,1 \text{ MN/m}^2$; s – grunto po apkrovos plokšte deformacija mm.

Dinaminis deformacijos modulis E_{vd} MN/m² randamas iš (2.16) formulės. Žinant nustatytą dinaminės apkrovos po plokšte dydį δ , plokštės skersmenį ir išmatuotą deformacijų vidutinę reikšmę s , mm, dinaminį deformacijos modulį galima rasti iš (2.17) formulės:

$$E_{vd} = \frac{22,5}{s}, \quad (2.17)$$

Dinaminio deformacijos modulio E_{vd} pervedimo į statinį deformacijos modulį E_{v2} Lietuvoje rekomenduojamos reikšmės, remiantis LST 1360.5:1995 „Automobilių kelių gruntai. Bandymo metodai. Bandymas štampu“, nurodytos C priede.

Atlikus matavimus dinaminio matavimo metodu, gautas tamprus įlinkis yra privedamas prie lyginamojo pavidalo (statinio įlinkio) naudojant regresinės priklausomybės koeficientus (ОДН 218.1.052-2002 Оценка прочности... 2003):

$$l_f = X_1 l_d + X_2, \quad (2.18)$$

čia l_f – faktinis įlinkis, mm; l_d – įlinkis, nustatytas dinaminio prietaisu, mm; $X_{1,2}$ – empiriniai regresinės priklausomybės koeficientai.

Poveikis, generuojamas krintančio krūvio, tiksliau atitinka realias apkrovas judant automobilių transportui, bet pasitelktas rezultatų apdorojimo vertinimas ne visiškai išnaudoja informatyvius dinaminį įtempį, pastebimus bandymų metu, pranašumus. Dangos paviršiaus įlinkis po štampu ne visiškai atspindi konstrukcijos gebėjimą pasipriešinti vertikaliesiems trumpalaikiams poveikiams, nes šiuo atveju ignoruojami įlinkio dubens, apibūdinančio bendrą jo lenkimo kietumą, dydis ir spindulys.

Maskvos kelių institute (МАДИ) buvo sukurtas prietaisas, apibūdinamas kaip mažų gabaritų dinaminio aptvimo įrengimas, skirtas kelio dangos stiprumui įvertinti (Дороги России 21 века... 2003). Šis įrenginys išsiskiria tuo, kad jis naudoja mažesnės masės krintantį svorį. Užsienyje dinaminiai kelių konstrukcijų stiprumo įvertinimo metodai yra gana plačiai taikomi. Tarptautinėje klasifikacijoje yra skiriami krintančio svorio (FWD) ir judančio rato (RWD, angl. *Rear Wheel Deflectometer*) deflektometrai. Šie metodai ir techninės priemonės plačiai išplito Olandijoje, Suomijoje, Danijoje, Švedijoje, Prancūzijoje, JAV ir kitose šalyse (Современные автоматизированные... 2002).

Pavyzdžiui, deflektometras (pagamintas Danijoje) užtikrina iki 60 matavimų per valandą ir pasižymi plačiu apkrovų diapazonu (nuo 7 iki 120 kN). Įrengimas pasireiškia kaip vienašė priekaba, kurioje sumontuotas krintančių apkrovų mechanizmas. Analitinės-empirinės stiprumo nustatymo metodikos, įdiegtos programinėje įrangoje, naudojimas leidžia diagnozuoti kelių konstrukcijų patvarumą remiantis įlinkio dubens parametrais. Dinaminė apkrova, sukelia deflektometro (pagaminto Prancūzijoje), yra analogiška krovinio automobilio, kurio masė –

30 tonų, judančio 60 km/val. greičiu, poveikiui. Apkrovą sukuria krovinys, krintantis ant amortizuojančios spyruoklės, esančios ant apkrautos plytos. Davikliai, esantys plokštėje, matuoja smūgio stiprumą ir dangos paviršiaus įlinkį. Gautas santykis tarp smūgio stiprumo ir dangos paviršiaus deformacijos leidžia nustatyti bendrą matuojamos dalies tamprumo modulį. Vidutinis įrengimo našumas – 25 išmatavimai per valandą esant trimis smūgiams kiekviename taške.

Judančio rato deflektometrai atlieka matavimus, judėdami įprastais, kaip ir automobiliai, važiavimo greičiais. Dažniausiai panašūs įrengimai būna su ilga puspriekabe (iki 14 m), kurioje yra matavimo įranga: lazerinis skeneris, maitinimo šaltinis ir galinga skaitmeninė informacijos apdorojimo sistema. Įlinkio dubens parametrai nustatomi suliginant dangos paviršiaus profilius iki puspriekabės apkrovimo užpakaliniu ratu ir veikimo vietos pjūvyje. Matavimą užtikrina optiniai skenerių mazgai, vykdančys lazerinio spinduliavimo amplitudinę moduliaciją nuo paviršiaus atspindėto signalo fazės matavimu. Komplekso programinė įranga leidžia apskaičiuoti tikėtinas deformacijas remiantis kelio dangos sluoksnių duomenimis, ir iteratyviu būdu pasiekti prognozuojamų ir išmatuotų duomenų suderinimą. RDW įrengimai yra ypač sudėtingi lazerinių skenerių gamybos požiūriu, vartoja daugiau energijos suvartojimu, jų didelė kaina.

Kitas kelio dangos įlinkio matavimo prietaisas, išrastas Danijos specialistų, pasižymi dideliu greičiu (HSD, angl. *High Speed Deflectometer*). Tačiau, skirtingai nuo įrengimų su krintančiu svoriu, jis matuoja ne vertikaliuosius dangos paviršiaus taškų poslinkius, bet jo deformacijos greitį lazeriniais davikliais su tolesniu integravimu. Kintamoji apkrova sukurama perkeliant krovinį išilgai platformos nuo kabinos užpakalinio automobilio tilto link. Įrengimo judėjimo greitis matavimų metu sudaro iki 70 km/h. Iš įrengimo trūkumų pažymėtinas matuoklio kalibravimo sudėtingumas, nes būtina atsižvelgti į padangų ir RESSOR prietaiso suspaudimo įtaką.

Išnagrinėti užsienio metodai ir prietaisai pagrįsti dinamikos užduočių sprendimu ir matavimų bei skaičiavimų metu įvertina kelio dangos įlinkio charakteristikas. Būtina pažymėti, kad progresyvinės priemonės naudoja dinaminį poveikį, o brangiausi ir didžiausio našumo įrengimai pagrįsti judančio automobilio poveikio duomenimis. Plėtojamų krypčių trūkumai – didelė įrangos kaina ir rimti techniniai sunkumai, susiję su matavimo prietaisų kalibravimu.

Eksperimentinių tyrimų rezultatų apdorojimas, veikiant krintančiam svoriui, užsienio šalių stiprumo vertinimo metoduose privedamas prie tampriai plastinės deformavimo teorijos „atvirkštinio sprendimo“ su gabaline-linijine diagrama $\sigma - \varepsilon$ (2.2 pav.), aproksimuojančia realiąją atitinkamos medžiagos diagramą. Vienas iš būdingų tokio sprendimo pavyzdžių – technologija, pasiūlyta Projektų ir tyrimų laboratorijos ir Purdue universiteto Statybos inžinerijos fakulteto (JAV) specialistų (ABAQUS... 1992).

Šios metodikos pagrindas – eksperimentinių tyrimų duomenys, gauti krintančio svorio poveikio metu. Tamprumo moduliai nustatomi remiantis maksimalio-

mis vertikaliųjų poslinkių reikšmėmis apkrovos pridėjimo centre ir skirtingais atstumais nuo jo. Kelio dangos sluoksnių tamprumo moduliai apibūdinami modeliuojant trimatį baigtinių elementų tinklą, atsižvelgiant į realųjį įtemptai deformuotos būklės pasikeitimą, atkurtą pagal maksimalias persikėlimų reikšmes kiekviename skaičiavimo daviklyje. Krintančio svorio poveikis modeliuojamas kaip vertikaliosios jėgos pasikeitimas dangos paviršiuje, srityje, apribotoje taisyklingo aštuonkampio, kurio plotas yra 0,723 m. Vertimo poveikio trukmė imama kaip lygi 30 cm, jo pasikeitimas pateiktas kaip 32 diskretiniai požingsniai.

Norint nustatyti kelio konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulius nagrinėjamu metodu, būtina, kad realus skaičiavimo modulis įvertintų tiek medžiagų savybes, tiek realiąją kelio dangos konstrukciją. Skaičiuojama sprendžiant atvirkštinį uždavinį: remiantis žinoma įtempio deformuotos kelių konstrukcijos būklės keitimosi dinamika, modelio geometrija ir vertimo poveikiu, nustatomos šias sąlygas tenkinantys sluoksnių tamprumo modulių deriniai. Rezultatų, gautų naudojant skaičiavimo programas, sugretinimas tiek su „tiesioginiu“, tiek su „atvirkštinio skaičiavimu“ leido išaiškinti akivaizdų dinaminės analizės pranašumą prieš statinius metodus. Sluoksnių sistemos analizė naudojant tiesioginio skaičiavimo programą, esant ekvivalentiškam statiniam poveikiui, su medžiagų tamprumo modulių, iš anksto nustatytu trimatės baigtinių elementų sistemos dinaminės analizės būdu, parodo mažesnę skaičiavimų rezultatų atitikimo realias reikšmes. Procentinė kiekvieno konstrukcinio sluoksnio paviršutiniškų poslinkių dalis sugretinta su analogiška, nustatyta dinaminės analizės metu.

Dinaminių metodų duomenų skaičiavimas atima daug laiko, net naudojant šiuolaikiškas elektroninės skaičiavimo technikos priemones. Todėl visi matematiniai šiuolaikiškų didelio našumo krintančio svorio įrengimų modeliai orientuoti į bendro kelių konstrukcijos tamprumo modelio apskaičiavimą.

Dinaminiai matavimo metodai pralenkia statinius, tiek gaunamų rezultatų tikslumu, tiek eksperimentų vykdymo mobilumu. Bet svarbiausias dinaminių metodų krypties privalumas, be abejo, yra jų adekvatumas realioms apkrovoms ir automobilių transporto poveikiams. Plati dinaminės analizės taikymo patirtis kelio dangos bandymų metu įrodo šios krypties vystymosi perspektyvumą stiprumo vertinimo srityje. Informatyviausia yra dinamiškai apkrautos kelių konstrukcijos stiprumo būklės analizė.

2.2. Priklausomybės tarp statinių ir dinaminių matavimo metodų nustatymas

Įvairiose pasaulio šalyse atliktuose mokslo tiriamuosiuose darbuose išaiškintos priklausomybės tarp apkrovos kelio dangai dydžio, kelio dangos įlinkio ir konstrukcinių dangos sluoksnių deformacijos modulių. Šios priklausomybės, apskai-

čiuotos naudojant standartinę apkrovą, gali būti taikomos įvertinat dangos stiprumą. Vertinant kelio dangos stiprumą, eksperimentiniuose kelių ruožuose matuojami įlinkiai.

Vertinant kelio dangos konstrukcijos atskirų sluoksnių stiprumą statiniais ir dinaminiais matavimo metodais kilo būtinybė nustatyti ryšį tarp deformacijos modulių, apskaičiuotų iš kelio dangos konstrukcijos įlinkių, gautų statinių ir dinaminių matavimų prietaisais.

Kol kas dinaminis metodas Lietuvoje ir kai kuriose užsienio šalyse nėra plačiai taikomas, nes dinaminis modulis nėra pripažintas kelio dangos konstrukcijos sluoksnių kokybės vertinimui ir kontrolei atlikti. Todėl minėto metodo matavimo prietaisai naudojami gana retai, daugiausia nedidelės svarbos vietose, kur bandymas statine plokštės apkrova būtų per daug sudėtingas.

Tam, kad būtų galima naudoti šiuos dinaminis prietaisus matavimams, ant apatinių kelio dangos konstrukcijų sluoksnių buvo pradėti tyrimai siekiant nustatyti išmatuoto dinaminio modulio ir statinio modulio priklausomybę.

Svarbiausias tokių tyrimų tikslas – nustatyti priklausomybę tarp statinių ir dinaminių modulių. Kadangi tiesioginės priklausomybės nustatymo formulės praktikoje naudojamos retai, siekiama nustatyti redukcijos koeficientus dinaminėms reikšmėms.

Kitaip tariant, netolimoje ateityje kokybės vertinimas, pagrįstas dinaminiais moduliais, galėtų pakeisti plačiai naudojamą lėtą ir sudėtingą bandymą statine plokštės apkrova. Naudojant šiuos rezultatus būtų galima sukurti ir pritaikyti naujus dinaminis projektavimo metodus.

Pirmieji eksperimentiniai tyrimai atlikti 1995 m. Jų tikslas – nustatyti dinaminių prietaisų priklausomybę tarp dinaminio modulio E_{vd} ir gerai žinomo bandymo statine plokštės apkrova modulio E_2 (Measurement of load bearing 1995). Gavus 64 matavimų rezultatus ant žemės sankasos ir grunto sluoksnių, įrengtų iš įvairių medžiagų, buvo pasiūlyta bendroji priklausomybės nustatymo formulė. Ši formulė (kartais vadinama Baksio formule) vis dar žinoma ir aptinkama kai kuriuose laboratoriniuose įrašuose:

$$E_{vd} = 0,52 \cdot E_2 + 9,1. \quad (2.19)$$

Buvo atlikta ir daugiau analogiškų bandymų, tačiau autoriai nepateikė siūlytų formulėi koreguoti.

Kiss L., Molnár J. P., Türk I. savo darbe paskelbė atliktų lyginamųjų matavimų rezultatus, tačiau nebuvo nustatyta jokia artima priklausomybė tarp prietaisų (Kiss *et al.* 2003).

2005 m. mokslininkas Ézsiás (2005) atliko bandymus kelyje ir nustatė priklausomybę tarp lengvo krintančio svorio deflektometro B&C prietaisu nustatyto dinaminio žemės sankasos modulio E_d ir statinio žemės sankasos modulio. Gauti rezultatai, susiję su deginimo krosnių šlaku (2.20 lygtis), parodė gerą koreliaciją,

o rezultatai, susiję su mologuojamu smulkiu smėliu, buvo palyginti prasti (2.21 lygtis):

$$E_d = 1,4397 \cdot E_2 + 7,3819 \quad (R^2 = 0,98) \text{ degimo šlakas.} \quad (2.20)$$

$$E_d = 0,6426 \cdot E_2 + 19,796 \quad (R^2 = 0,38) \text{ mologasis smulkus smėlis.} \quad (2.21)$$

Igyvendindami M7-M70 magistralės projektą (Almássy, Subert 2006) atliko 58 matavimus ant smėlingo žvyro sankasos ir paskelbė gautus rezultatus. Jie nustatė koreliaciją (2.22), tačiau nepasiūlė platesnio jos pritaikymo.

$$E_2 = 8,906 \cdot E_d \quad (R^2 = 0,76). \quad (2.22)$$

Tiesioginė priklausomybė tarp dinaminių ir statinių modulių praktikoje nustatoma retai. Dažniausiai atskiriems pylimo ir sankasos sluoksniams nurodomos tikslinės reikšmės, priklausomai nuo tiriamo sluoksnio reikalingo sutankinimo laipsnio. Tiesioginę priklausomybę leidžiama nustatyti Austrijoje, o tikslinės E_2 ir E_{vd} modulių reikšmės patvirtintos Vokietijoje, Slovėnijoje ir kai kuriose kitose šalyse.

JAV mokslininkai atliko tyrimus ir pateikė matavimo rezultatus, gautus LWD ir FWD stiprumo matavimo prietaisais ant kelio dangos pagrindo sluoksnių. (Siekmeie *et al.* 2000). Šių tyrimų rezultatai parodė stiprų ryšį tarp E_{LWD} ir E_{FWD} modulių reikšmių. Nustatyta, kad labai svarbu užtikrinti vienodas matavimo sąlygas ir pasirinkti konstrukcijas, įrengtas iš panašių medžiagų.

Sulewska (1998, 2004) atliko tyrimų duomenų analizę atlikus stiprumo matavimus ant smėlio ir žvyro sluoksnio tarp E_{LWD-Z3} (dinaminio matavimo prietaiso ZORN E modulis), $R\%$ (santykinis sutankinimo rodiklis, pagal standartinį proktoro tankį) ir E_{v1} , ir E_{v2} (statinis modulis). Regresinė analizė parodė gerą priklausomybę tarp E_{LWD-Z3} ir E_{v1} bei E_{v2} , koreliacijos koeficientas ne mažesnis nei 0,8.

Vokietijos kelių tiesimo standartai (ZTVA-StB 1997) rekomenduoja 2.3 lentelėje pateiktas E_{LWD} pervedimo į statinį deformacijos modulį E_{v2} reikšmes, kitas vokiečių mokslininkas (Weingart 1993) pateikia keletą pervedimo reikšmių siūlymų, remdamasis atliktais dinaminio prietaiso ZORN bandymais (2.4 lentelė), taip pat siūlomos statinio ir dinaminio modulio lyginimo sąlygos $2,2 \leq E_{v2} / E_{LWD-Z3} \leq 2,6$.

2.3 lentelė. Rekomenduojamos dinaminio modulio E_{LWD} (matuojant 300 mm skersmens plokšte) pervedimo į statinį E_{v2} reikšmės (ZTVA-StB 1997)

Table 2.3. Recommended values of E_{v2} and LWD dynamic modulus for acceptance (ZTVA-StB 1997)

E_{v2} , MPa	120	100	80	45
E_{LWD} , MPa	60	50	40	25

2.4 lentelė. Rekomenduojamos dinaminio modulio E_{LWD-Z3} pervedimo į statinį E_{v2} reikšmės (Weingart 1993)

Table 2.4. Recommended values of E_{v2} and dynamic modulus using Zorn LWD for acceptance (Weingart 1993)

E_{v2} , MPa	150	120	100	80	60	45	Papildoma sąlyga $s/v < 3,5$ ms
E_{LWD-Z3} , MPa	70	55	45	40	30	25	

Remiantis Vengrijos, Vokietijos (tikslinių reikšmių lentelės sudarytos remiantis techniniais reikalavimais: Additional Technical Requirements and Instructions for Excavations in Road Constructions... 1994; DIN 18134 Building Ground. Tests and Test Methods. Load with plate... 1993) ir kitų šalių patirtimi, siūloma tikslinių reikšmių lentelę. 2.5 lentelėje pateiktos skirtingos E_{vd} ir E_d reikšmės reikalingoms E_2 reikšmėms. Tyrimų vietoje pasiekus nustatytą dinaminį modulį, galima pagrįsti reikalingą statinį sluoksnio modulį. Galima ir interpoliacija tarp duotųjų reikšmių.

2.5 lentelė. Tikslinės reikšmės skirtingiems grunto ir sankasos sluoksniams (Tompai 2008)

Table 2.5. Target values for different subsoil and subgrade layers (Tompai 2008)

E_2 , N/mm ²	E_{vd} , N/mm ²		E_d , N/mm ²	
	Stambiagrūdžiai ir smulkiagrūdžiai gruntai, sankasos skaldos sluoksniai, mechanškai sustiprinti pagrindo sluoksniai	Molingieji gruntai	Stambiagrūdžiai ir smulkiagrūdžiai gruntai, sankasos skaldos sluoksniai, mechanškai sustiprinti pagrindo sluoksniai	Molingieji gruntai
120	10	10	170	250
100	0	0	140	200
80	80	80	120	140
60	70	75	90	100
40	50	55	60	65
25	35	40	20	30
—	25	20	—	—

Dauguma Lietuvos normatyvinių dokumentų parengti vadovaujantis vokiečių normatyviniais dokumentais ir standartais. Šiuo metu remiantis LST 1360.5:1955 „Automobilių kelių gruntai. Bandymo metodai. Bandymas šlampu“ Lietuvoje naudojamosi rekomenduojamomis apytikrėmis dinaminio deformacijos modulio E_{vd} pervedimo į statinį deformacijos modulį E_2 reikšmėmis (reikšmių lentelė pateikta C priede). Todėl labai svarbu pagrįsti tinkamiausią matavimo metodą atskiriems dangos konstrukcijos sluoksniams ir pagal gautus tyrimų rezultatus pasiūlyti redukcijos koeficientų reikšmes kiekvienam dangos konstrukcijos sluoksniui.

Dinaminiu metodu gautos reikšmės suteiktą galimybę atlikti kokybės kontrolę ir įvertinti tiriamojo sluoksnio laikomąją galią ne tik bandymu statine plokštės apkrova, kuris reikalauja daug laiko ir pastangų, bet ir dinaminiais prietaisais. Tačiau būtinos dar detalesnės statistinės analizės, nes šio pasiūlymo patikimumui padidinti reikia daugiau duomenų iš daugiau matavimo vietų.

Platesnis minėtų dinaminių prietaisų naudojimo mastas palengvintų rangovams, laboratorijoms ir kelių ir geležinkelių statybos inžinieriams atlikti greitą ir nuolatinę pylimų, sankasų, grunto sluoksnių ir užpylimų kokybės kontrolę.

2.3. Automobilių kelio konstrukciją veikiantys veiksniai

2.3.1. Automobilių apkrovų poveikis kelio dangos konstrukcijos būklei ir ilgaamžiškumui

Kelio danga yra veikiamą daugkartinių trumpalaikių ir kartais ilgalaikių apkrovų, perduodamų nuo automobilių ratų. Šios apkrovos atskiruose dangos sluoksniuose sukelia įvairių įtempių, ir danga deformuojasi.

Transporto priemonei važiuojant keliu, dangą veikia vertikaliosios ir horizontaliosios jėgos. Vertikaliosios jėgos poveikis priklauso nuo transporto priemonės svorio, o horizontaliosios arba tangentinės, veikiančios išilgai arba skersai važiavimo krypties, nuo važiavimo greičio, pagreičio, padangų sukibimo su kelio danga, kelio nuolaidumo ir stabdymo būdo. Horizontalieji įtempiai atskirais atvejais gali pasiekti vertikaliųjų įtempių reikšmes. Dangos paviršiuje pasitaiko nelygumų, todėl per juos važiuojant pastebimi ratų bei kėbulo svyravimai ir vertikaliųjų bei horizontaliųjų jėgų poveikis keičiasi. Kai danga nelygi, pašokus ratui slėgis į dangą labai sumažėja ar net išnyksta, ratui krintant (dinamiškai smogiant), slėgis gali padidėti iki kelių ir daugiau kartų.

Kelio dangos ir apkrovų nuo transporto priemonių ratų sąveiką galima apibrėžti keliais rodikliais:

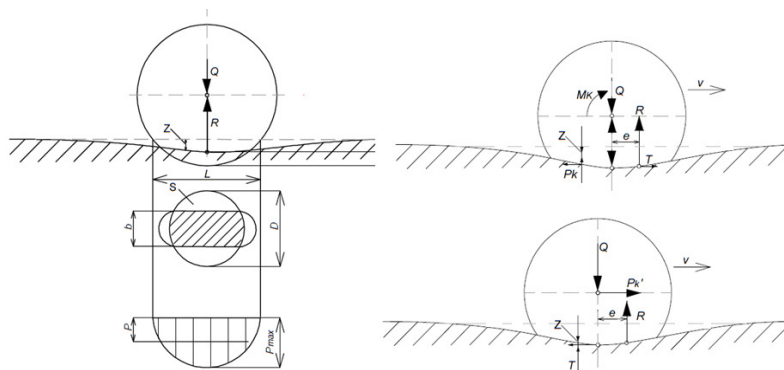
- apkrovos dydžiu;
- vidutiniu slėgiu, atsirandančiu rato pėdsako zonoje;
- apkrovos veikimo dažniu;
- pasipriešinimu svyravimams;
- rato ir kelio dangos sukibimu.

Esant lygiam paviršiui, transporto priemonių ratų poveikį kelio dangai galima apibūdinti kaip trumpalaikę statinę apkrovą. Jos poveikio į kelio dangą laikas yra 0,01–0,5 s priklausomai nuo transporto priemonės važiavimo greičio. Transporto priemonės apkrovos poveikį kelio dangai galima įvertinti pagal formulę:

$$K_{sum} = \sum_{i=1}^m (G_i / G_p)^{4,4}, \quad (2.23)$$

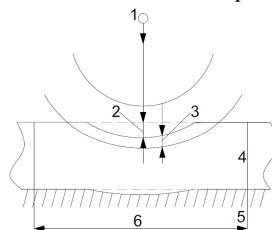
čia m – transporto priemonės ašių skaičius; G_i – transporto priemonės ašies apkrova, MPa; G_p – skaičiuojamoji ašies apkrova, MPa.

Veikiant apkrovai kelio danga išlinksta (2.9 pav.), bet apkrovą nuėmus danga grįžta į pradinę padėtį. Važiuojant sunkiasvoriams automobiliams, įlinkiai padidėja ir išsiplečia į visas puses. Įlinkis juda automobilio judėjimo kryptimi. Vykstant intensyviai transporto priemonių eismui, įlinkiai gali apimti visą važiuojamąją kelio dangos dalį. Jei danga po apkrovų nespėja sugrįžti į pradinę padėtį, atsiranda įvairaus pobūdžio plastinių deformacijų (Инструкция по проектированию... 1985).



2.9 pav. Schema jėgų, perduodamų į kelio dangą nuo transporto priemonių ratų:
 Q – apkrova, perduodama į kelio dangą transporto priemonei stovint, MPa; R – normalinė kelio dangos reakcija; S – rato pėdsako plotas, cm; p – vidutinis kontaktinis slėgis: $p = Q/S$, D – priimamas rato pėdsako plotas: $D = 1,13\sqrt{Q/p}$

Fig. 2.9. The scheme of forces transferred to the road pavement by vehicle wheels

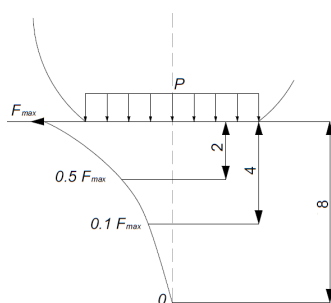


2.10 pav. Įlinkio kelio dangoje susidarymas nuo transporto priemonės apkrovos
 1 – transporto priemonės ratas; 2 – kelio dangos įlinkis; 3 – padangos deformacija;
 4 – kelio danga; 5 – žemės sankasa

Fig. 2.10. Deflection of road pavement caused by vehicle load
 1 – vehicle wheel, 2 – road pavement deflection, 3 – tyre deformation, 4 – road pavement,
 5 – subgrade

Didėjant transporto priemonių važiavimo greičiui, rato poveikis į kelio dangą sutrumpėja ir žalingas poveikis sumažėja. Tačiau tai būdinga tik lygioms dangoms. Esant kelio dangoje nelygumų, atsiranda dinaminių apkrovų deformacijos. Horizontalieji (tangentiniai) tempimo įtempiai (2.11 pav.), atsirandantys tokiu atveju, turi nemažą įtaką plastinių deformacijų atsiradimui (Инструкция по проектированию... 1985).

Tokios deformacijos būdingos plonoms asfalto dangoms, kurių storis yra mažesnis nei 8 cm. Storesnėse asfalto dangose tangentinių įtempių poveikis nėra didelis, nes jis apatiniuose dangos sluoksniuose greitai užgęsta.

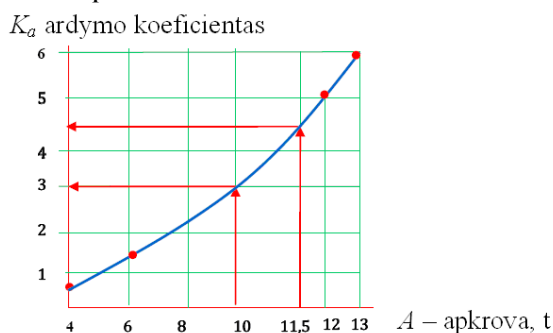


2.11 pav. Tangentinių įtempių epiūra
Fig. 2.11. Curve diagram of tangential stresses

Transporto priemonių, o ypač sunkiasvorių, eismas daro žalingą poveikį kelių dangoms. Nuo kelių važiuojančių transporto priemonių skaičiaus ir jų ašinių apkrovų dydžio bei bendrosios transporto priemonių masės priklauso dangos būklė ir ilgaamžiškumas. Didesnės ašinės apkrovos sparčiau blogina dangos būklę – atsiranda plyšių, duobių, vėžių, spartesnė asfalto dangos erozija. Ypač pavojingos ašinės apkrovos, viršijančios leidžiamąsias projektines ašines apkrovas.

Apkrovos ir įtempiai, atsirandantys kelio dangos konstrukcijoje, tiesiogiai priklauso nuo apkrovos į ašį, ratų skaičiaus ant ašies bei oro slėgio padangose. Lietuvoje didžiausią leidžiamąją apkrovą į ašį, kuri yra 11,5 t, reglamentuoja Kelių priežiūros ir plėtros programos finansavimo įstatymas ir KTR 1.01:2008. Viengubi ratai daro didesnę neigiamą poveikį kelio dangai, palyginti su dvigubais. Kai kuriais vertinimais, šis poveikis yra didesnis nuo 1,2 iki 4 kartų. Oro slėgis automobilių ratuose gali kisti labai plačiai. Techninė automobilio būklė, automobilio pakaba ir padangų protektorius taip pat veikia kelio dangos konstrukciją. Kelio dangos priklausomybė nuo apkrovos pateikta 2.12 pav. (Васильев, Сиденко 1990). Kaip matyti, kuo didesnė apkrova, tuo didesnis dangos ardymo koeficientas. Kai apkrova yra 11,5 tonos į ašį, dangos ardymo koeficientas yra 4,5. Krašto keliams padidinus leidžiamąją apkrovą į ašį, jų ardymo koeficientas

padidės 1,5 karto. Aišku, tai galėtų atsitikti tik tuo atveju, jeigu padaugės automobilių su padidinta ašine apkrova.



2.12 pav. Kelio dangos ardymo koeficiento kitimo priklausomybė nuo apkrovos

Fig. 2.12. Dependency of road pavement failure coefficient on the load

Transporto poveikis dangoms įvertinamas santykiniais dydžiais – automobilio ašiai tenkančią apkrovą dalijant iš standartinės ašinės apkrovos.

Ašinės apkrovos kelio dangai daromai žalai įvertinti naudojamas rodiklis ESA – ekvivalentinis standartinių ašių skaičius. Remiantis šiuo rodikliu standartinės 80 kN ašies poveikis dangai yra lygus 1. Didėjant apkrautos ašies masei, poveikis kelio dangai didėja.

Krovininiai automobiliai daro didžiausią neigiamą poveikį dangai, nes jų ašių apkrovų poveikis yra daug didesnis nei bendro eismo intensyvumo poveikis.

2.3.2. Aplinkos veiksniai ir jų įtaka kelio dangos konstrukcijai

Aplinkos veiksniai daro didelę įtaką kelio dangos konstrukcijai ir kelio charakteristikoms. Svarbiausius aplinkos veiksnius galima priskirti vienam iš šių dviejų: klimatui ir laikui. Ardomas klimato veiksnių poveikis kartais būna kur kas didesnis nei eismo (Robert, Srombom 1987). Duomenys apie klimatą apibūdina oro temperatūrą ir jos kitimą per metus, kritulių kiekį, oro sąlygas žiemą.

Temperatūros svyravimai turi trejų poveikį medžiagoms ir visai dangos konstrukcijai:

- asfalto dangos sluoksnio tamprumo modulis, kylant jos temperatūrai, mažėja, o temperatūrai krintant – didėja. Šis veiksnys yra svarbus vėžių atsiradimui;
- asfalto danga, kylant jos temperatūrai, plečiasi, o temperatūrai krintant traukiasi. Dangoje gali atsirasti struktūrinių ir normalinių (dažniausiai orientuotų skersine kryptimi) plyšių;
- temperatūrai nukritus žemiau 0 °C, dangos konstrukcijoje esantis vanduo užšąla. Kelio konstrukcijos sluoksniuose iš biriųjų medžiagų užšalęs vanduo gali su-

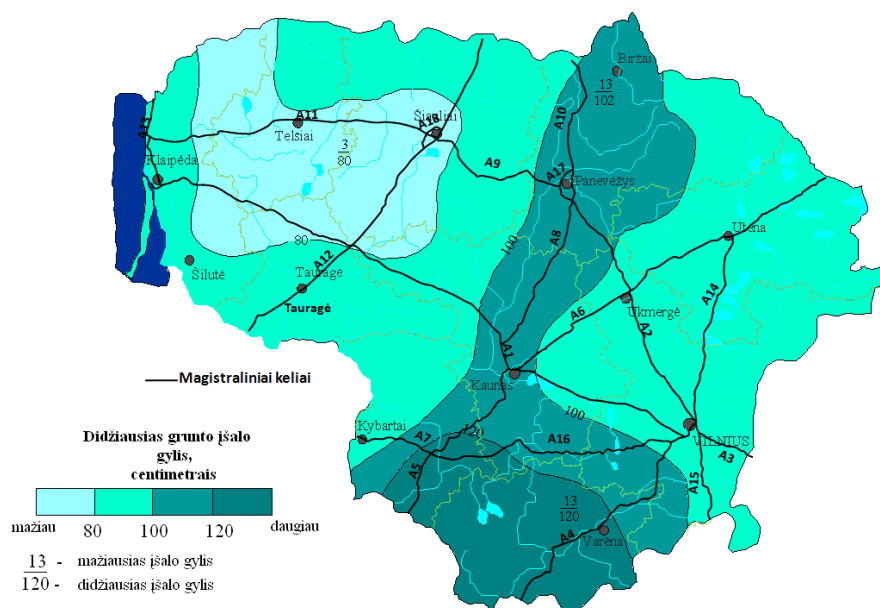
daryti iškyšas. Rišikliais apdorotuose sluoksniuose vanduo susikaupia tam tikrose ertmėse – plyšiuose, išdaužose ir pan., todėl užšalęs jis skatina šių pažaidų plėtotę.

Metiniame kelio darbo cikle išskiriami keturi periodai. Rudens periodu kelio danga ir kelio konstrukcija atvėsta, iš dalies padidėja drėgnumas ir sumažėja grunto tankis. Paisant drėkinimo šaltinių intensyvumo ir automobilių eismo sąlygų, šiuo periodu gali vykti dangos sėdimas. Žiemos periodas prasideda šalant kelio dangai ir jos konstrukcijai. Vandens plėvelė, gaubianti grunto dalelytes, virsdama ledu, storėja. Todėl viršutinių kelio konstrukcijos sluoksnių drėgmė ir temperatūra būna mažesnė nei viršutinių sluoksnių. Tai verčia drėgmę iš žemutinių konstrukcijos sluoksnių migruoti į viršutinius sluoksnius. Kelio konstrukcijos grunto drėgmė pamažu didėja ir pasiekia maksimalias reikšmes šalto žiemos periodo pabaigoje. Čia pastebimas minimalus sezoninis grunto tankis ir maksimalus sušalusio grunto atsparumas. Antrame periode galima tikėtis grunto šalimo ir brinkimo reiškinių. Trečiasis pavasario periodas prasideda atitirpstant kelio konstrukcijai. Čia vyksta intensyvus drėgmės persiskirstymas aktyvioje zonoje. Drėgmė pasiekia maksimalią reikšmę, o tankis ir atsparumas – minimalią atšilusio grunto reikšmę. Trečiame periode padidėja kelio konstrukcijos ir dangos sėdimo tikimybė. Ketvirtame vasaros periode, ledui atitirpus, pamažu kelio konstrukcija džiūsta: drėgmė mažėja, o grunto tankis ir atsparumas didėja.

Grunto temperatūra ir įšalas priklauso ne tik nuo temperatūrą veikiančių veiksnių, bet ir nuo grunto tipo bei mechaninės sudėties, drėgnumo, šiluminių savybių, gruntinio vandens slūgsojimo gylio, augalijos ir sniego dangos. Lyginant su oro temperatūra, dirvos paviršius vasarą vidutiniškai 3–6 °C šiltesnis, o žiemą keliomis dešimtosiomis laipsnio dalimis šaltesnis.

Nuolatinis įšalas susidaro gruodžio mėnesio pirmąjį ir antrąjį dešimtadienį. Pavasarį, vidutiniškai balandžio pirmąjį dešimtadienį, įšalas išeina. Anksčiausiai dirvos atitirpsta pajūryje ir pietvakariuose, vėliausiai – šiaurės rytuose (Statybinė klimatologija RSN 156-94. Vilnius: Aplinkos ministerija, 1995. 136 p.). Kai pavasaris labai šaltas, o įšalas būna gilus, dirvos atitirpsta tik balandžio pabaigoje. Didžiausią gylį įšalas pasiekia žiemos pabaigoje (vasario–kovo mėn.). Didžiausio įšalimo gylio žemėlapis pavaizduotas 2.13 paveiksle.

Temperatūros pokyčiai kelio konstrukcijoje sudaro specifinį šiluminį režimą, kuris skiriasi nuo aplinkinės vietovės šiluminio režimo. Kelio konstrukcijoje vykstantys šilumos mainai yra sudėtingi difuziniai procesai, susiję su drėgmės mainais žemės sankasoje ir dangos konstrukcijoje. Kelio konstrukcijos temperatūra, sąveikaudama su kitais veiksniais (drėgme, transporto eismu) gali pakenkti kelio konstrukcijos stabilumui. Temperatūra yra vienas iš veiksnių, skatinančių žiemos iškyšų susidarymą kelio konstrukcijoje, kai deformuojama žemės sankasa arba net ir danga, be to, tiek aukštoje, tiek žemoje temperatūroje pasikeičia deformacinės kelio dangos medžiagų savybės.



2.13 pav. Didžiausias ir mažiausias grunto įšalimo gylis centimetrais (Juknevičiūtė *et al.* 2008)

Fig. 2.13. Maximum and minimum depth of frozen ground in centimeters (Juknevičiūtė *et al.* 2008)

Kelio dangos stiprio ir atskirų sluoksnių tamprumo modulio priklausomybė nuo sezoniškumo įvertinama ir projektuojant papildomus dangos konstrukcijos sluoksnius dangų stiprinimo atvejais. Tuo tikslu naudojami skirtingi aplinkos rodikliai skirtingais metų laikais (Fonad *et al.* 2002; Shoop *et al.* 2008; Wistuba *et al.* 2002).

Temperatūros svyravimų sukeltas neigiamas poveikis taip pat gali būti priskirtas ir prie vandens arba drėgmės sukeliamų neigiamų poveikių. Kitas vandens, esančio dangos konstrukcijoje, sukeltas neigiamas poveikis yra tas, kad jis sumažina pagrindo sluoksnių iš biriųjų medžiagų tamprumo modulį, o kartu ir jų stiprumo savybes – atsparumą šlyčiai ir normaliniams įtempiams (Braga 2005).

Temperatūra veikia: plastines asfalto savybes; temperatūrinius asfalto įtempius; žemės sankasos grunto įšalimą ir atšilimą.

Pagrindinis asfalto kaip kelių statybinės medžiagos trūkumas yra didelis jo savybių priklausymas nuo temperatūros. Didėjant temperatūrai, mažėja bitumo, esančio asfalto mišinyje, klampa, o tai susilpnina ir ryšius tarp mineralinių medžiagų ir sumažina asfalto stiprumą.

Temperatūros svyravimai kartu su drėgme arba tiesiog krituliais sukelia dangos apledėjimą. Tiesiogiai šis reiškinys nėra laikomas kaip turintis neigiamą po-

veikį kelio dangai, tačiau norint užtikrinti saugias vairavimo sąlygas apledėjusi danga apdorojama druskomis arba jų tirpalais, o šios sukelia asfaltbetonio eroziją, dėl to gali atsirasti tokių pažaidų, kaip lukštenimasis ir iškorėjimas, o vėliau išdaužos.

Dangos konstrukcijoje (dažniausiai pagrindo sluoksniuose iš mineralinių medžiagų) užšalęs vanduo skatina išskylių susidarymą. Įšalui išėjus, konstrukcija tose vietose smarkiai susilpnėja dėl dangos sluoksniuose susidariusių oro ertmių, todėl greitai atsiranda plyšių ir duobių.

Drėgmės, patekusios į dangos struktūrą, poveikis kelio dangai:

- sumažina nesurištų granuliuotų medžiagų atsparumą;
- sumažina žemės sankasos gruntų stiprumą;
- sukelia smulkių medžiagos dalelių išsiurbimą, dėl to sumažėja dangos stabilumas.

Drėgno periodo metu sumažėjus žemės sankasos grunto ir dangos pagrindo stipriui, sumažėja ir visos dangos konstrukcijos stipris (Zollars *et al.* 2002).

Sezoniniai pokyčiai be temperatūros svyravimų lemia kritulių kiekio svyravimus ir veikia dangos konstrukcijos drenavimo sąlygas. Teigiama, kad Lietuvoje kritiškiausias yra pavasario periodas, kai iš žemės sankasos ir kelio konstrukcijos išeina įšalas (apie kovo mėnesį), ir konstrukcijos sluoksniai yra labiausiai prisotinti vandens. Vanduo dangos konstrukcijoje, ypač sluoksniuose iš biriųjų medžiagų, daro įtaką jų tamprumo moduliui, o kartu ir atsparumą apkrovoms. Tačiau drenavimo sąlygas lemia ir kai kurie techniniai kelio parametrai – skersinis profilis (sankasos aukštis, griovių gylis), dangos konstrukcija (šalčiui atsparaus drenuojančio sluoksnio storis), darbų ir medžiagų kokybė (filtracijos koeficientas ir pan.).

Daugiau ar mažiau neigiamų klimato poveikių galima išvengti arba bent juos sušvelninti. Laikui priskiriamas toks aplinkos poveikis:

- paklota asfaltbetonio danga dėl bitumo oksidacijos ima kietėti ir trauktis, šis procesas praktiškai nenutrūksta iki kelio dangos naudojimo laikotarpio pabaigos;
- asfaltbetonio dangų bitumą veikianti saulės radiacija, taip pat ant dangos patenkančios cheminės medžiagos (ekspluataciniai automobilių skysčiai, druskos ir pan.) sukelia chemines reakcijas, todėl didėja bitumo trapumas, kartu polinkis rasti plyšiams ir išsisluoksniuoti;
- veikiant transporto, šalčio ir atšilimo ciklams, žemės sankasos gruntai, pagrindo sluoksnių medžiagos palaipsniui suyra – dūla.

Dangos konstrukcijos biriųjų pagrindų sluoksnių ir žemės sankasos gruntų stiprumui lemiamą įtaką turi sezoniniai drėgmės pokyčiai. Šiuo požiūriu kritinė padėtis susidaro pavasario polaidžio metu.

Kelio dangos konstrukcijos pagrindo sluoksnių tamprumo ir sankasos deformacijos modulių reikšmės, apskaičiuotos pagal skirtingu metų laiku atliktų dan-

gos įlinkių matavimo duomenis, turi būti paskaičiuojamos įvertinant kiekvieno sluoksnio sezoninio poveikio koeficientus k_{sez} .

Atlikus klimato įtakos kelių dangų konstrukcijų stiprumui tyrimų rezultatų analizę galima teigti:

- kelio dangos asfaltbetonio sluoksnių standumas, taip pat šių sluoksnių tamprumo modulių reikšmės išimtiniai priklauso nuo dangos temperatūros;
- dangos konstrukcijos biriųjų pagrindų sluoksnių ir sankasos gruntų stiprumui lemiamą įtaką turi sezoniniai drėgmės pokyčiai. Kritinė padėtis susidaro pavasario polaidžio metu, sumažėja pagrindo sluoksnių iš biriųjų medžiagų tamprumo modulis, o kartu ir jų stiprumo savybės;
- daugeliu atvejų kritinis dangos stiprumo periodas Lietuvos sąlygomis yra pavasario polaidžio periodas, kai dangos konstrukcija atšyla, o pagrindo sluoksniai prisotinti vandens. Dangos konstrukcijos pagrindo sluoksniuose susikaupęs vanduo turi didelę įtaką tamprumo moduliams, o kartu ir jų stiprumo savybėms.

Remiantis Lietuvoje atliktais tyrimais (Lietuvos automobilių kelių asfaltbetonio... 2007) pateikiamos nustatytos dangos stiprumo kritinės sezonų koeficientų reikšmės (2.6 ir 2.7 lentelės), kurios priskiriamos Lietuvos klimato rajonams.

2.6 lentelė. Sezonų koeficientų k_{sez} reikšmės Lietuvos klimato rajonuose pagal apskaičiuotus dangos konstrukcijos sluoksnių tamprumo ir sankasos deformacijos modulius (Lietuvos automobilių kelių asfaltbetonio... 2007)

Table 2.6. Values of seasonal coefficients k_{sez} in the Lithuanian climate regions based on the calculated modulus of elasticity of the structural pavement layers and on deformation modulus of the subgrade (Lithuanian road ... TKTI, 2007)

Lietuvos klimato rajonas	Žemaičių			Vidurio žemumos			Pajūrio			Pietryčių aukštumos		
Dangos konstrukcijos sluoksnis	Vidutinis minimalus k_{sez} koeficientas	Patikimumo intervalas		Vidutinis minimalus k_{sez} koeficientas	Patikimumo intervalas		Vidutinis minimalus k_{sez} koeficientas	Patikimumo intervalas		Vidutinis minimalus k_{sez} koeficientas	Patikimumo intervalas	
		nuo	iki		nuo	iki		nuo	iki		nuo	iki
Skalda	0,62	0,58	0,71	0,76	0,43	0,94	–	–	–	0,68	0,54	0,86
Šalčiui atsparus	0,58	0,46	0,65	0,68	0,48	0,92	–	–	–	0,68	0,34	0,86
Sankasa	0,56	0,46	0,70	0,64	0,52	0,87	–	–	–	0,7	0,43	0,83

2.7 lentelė. Sezono koeficientų $k_{sez(AASHTO \text{ metodika})}$ reikšmės Lietuvos klimato rajonuose pagal apskaičiuotus struktūrinius SN, SNC, SNSG stiprio rodiklius (AASHTO metodika) (Lietuvos automobilių kelių asfaltbetonio... 2007)

Table 2.7. Values of seasonal coefficients $k_{sez(AASHTO \text{ methodology})}$ in the Lithuanian climate regions based on the calculated structural strength indicators SN, SNC, SNSG (AASHTO methodology) (Lithuanian road ... TKTI, 2007)

Lietuvos klimato rajonas	Žemaičių			Vidurio žemumos			Pajūrio			Pietryčių aukštumos		
Dangos konstrukcijos sluoksnis	Vidutinis minimalus $k_{sez(AASHTO)}$ koeficientas	Patikimumo intervalas		Vidutinis minimalus $k_{sez(AASHTO)}$ koeficientas	Patikimumo intervalas		Vidutinis minimalus $k_{sez(AASHTO)}$ koeficientas	Patikimumo intervalas		Vidutinis minimalus $k_{sez(AASHTO)}$ koeficientas	Patikimumo intervalas	
		nuo	iki		nuo	iki		nuo	iki		nuo	iki
SN	0,74	0,69	0,80	0,73	0,44	0,94	–	–	–	0,77	0,62	0,90
SNSG	0,84	0,82	0,88	0,88	0,76	0,98	–	–	–	0,85	0,63	0,97
SNC	0,77	0,73	0,81	0,77	0,50	0,95	–	–	–	0,80	0,65	0,93

Sezoniniai aplinkos pokyčiai įvertinami taikant įvairius koeficientus, kurie priklauso nuo klimato juostos. Klimato juostą lemia du pagrindiniai rodikliai: metinis temperatūros svyravimas ir vidutinis metinis kritulių kiekis.

2.4. Antrojo skyriaus išvados

- Atlikus statinių ir dinaminių bandymo metodų analizę galima teigti:
 - Bendras visų statinių metodų trūkumas yra tas, kad panašiais metodais neįmanoma įvertinti kelių konstrukcijos gebėjimo iš esmės suvokti dinaminę poveikį, kuris atsiranda dėl realaus automobilių transporto judėjimo.
 - Statiniai metodai leidžia nustatyti kelių konstrukcijų gebėjimą atlaikyti apkrovas, atsirandančias nuo automobilių transporto, ir yra neinformatyvūs vertinant nuovargio procesų išsivystymo lygį kelio dangos konstrukcijos sluoksniuose.
 - Statiniai bandymų metodai neleidžia nustatyti kelio konstrukcijos stiprumo sumažėjimo priežasties, apribojant efektyvių sprendimų priėmimą prognozuojant automobilių kelių remontą ir priežiūrą.
- Atlikus statinių ir dinaminių bandymo metodų analizę galima teigti:
 - Dinaminių metodų duomenų skaičiavimas reikalauja gana daug laiko net naudojant šiuolaikiškas elektroninės skaičiavimo priemones, todėl skaičiuojamas bendras kelio konstrukcijos tamprumo modulis.

- Dinaminiai matavimo metodai pralengia statinius tiek gaunamų rezultatų tikslumu, tiek eksperimentų vykdymo mobilumu. Bet svarbiausias dinaminio metodo privalumas, tai, be abejo, jų atitiktis realioms apkrovoms ir automobilių transporto poveikiams. Plati dinaminės analizės taikymo patirtis kelio dangos bandymų metu įrodo šios krypties vystymosi perspektyvumą stiprumo vertinimo srityje. Informatyviausia yra dinamiškai apkrautos kelių konstrukcijos stiprumo būklės analizė.

- Netolimoje ateityje kokybės vertinimas, pagrįstas dinaminiais moduliais, galėtų pakeisti plačiai naudojamą lėtą ir sudėtingą bandymą statine plokštės apkrova. Remiantis šiais rezultatais būtų galima sukurti ir panaudoti naujus dinaminio projektavimo metodus.

- Naujosios dinaminės tikslinės reikšmės suteiktų galimybę atlikti kokybės kontrolę ir įvertinti tiriamojo sluoksnio laikomąją galią ne tik bandymu statine plokštės apkrova, kuris reikalauja daug laiko ir pastangų, bet ir dinaminiais prietaisais. Tačiau būtinos dar detalesnės statistinės analizės, šio siūlymo patikimumui padidinti reikia daugiau duomenų iš daugiau matavimo vietų.

3. Kelių veikiančios, nuo automobilio svorio susidariusios apkrovos, perduodamos dangai per automobilių ratus, sukelia kelyje deformacijas ir įtempius, kurių ilgalaikis poveikis kartu su aplinkos sąlygų įtaka lemia kelio parametrų kitimą nuo projektinių ir pažaidų kelyje atsiradimą. Automobilių sukeliamos apkrovos veikia visą konstrukciją, todėl norint, kad konstrukcijos naudojimo laikas atitiktų projektines sąlygas, visi konstrukcijos sluoksniai turi būti tinkamai parinkti ir įrengti.

4. Atlikus klimato įtakos kelio konstrukcijos stiprumui tyrimų rezultatų analizę galima teigti:

- Kelio dangos asfalto sluoksnių standumas, taip pat šių sluoksnių tamprumo modulių reikšmės išimtiniai priklauso nuo dangos temperatūros.

- Dangos konstrukcijos biriųjų pagrindų sluoksnių ir sankasos grunto stiprumui lemiamą įtaką turi sezoniniai drėgmės pokyčiai. Kritinė padėtis susidaro pavasario polaidžio metu, sumažėja pagrindo sluoksnių iš biriųjų medžiagų tamprumo modulis, o kartu ir jų stiprumo savybės.

- Daugeliu atvejų kritinis dangos stiprumo periodas Lietuvos sąlygomis yra pavasario polaidžio periodas, kai dangos konstrukcija atšyla, o pagrindo sluoksniai prisotinti vandens. Dangos konstrukcijos pagrindo sluoksniuose susikaupęs vanduo turi didelę įtaką tamprumo moduliams, o kartu ir jų stiprumo savybėms.

- Didžiausią įtaką kelio dangoms turi teigiamų ir neigiamų temperatūrų kaita. Tiek žemoje, tiek aukštoje temperatūroje pasikeičia dangos medžiagų deformacinės savybės (plastinės).

- Drėgno periodo metu sumažėjus žemės sankasos grunto ir dangos pagrindo stipriui, sumažėja ir visos dangos konstrukcijos stipris.

Kelio konstrukcijos stiprumo matavimo metodų eksperimentiniai tyrimai

Skyriuje analizuojami kelio konstrukcijos stiprumo matavimo eksperimentiniai tyrimai, bandomojo ruožo eksperimentiniams tyrimams parinkimas ir įrengimas, dangos konstrukcijos parametrų tyrimo metodika ir naudojama įranga. Atlikta tyrimų ant žemės sankasos ir dangos konstrukcijos apatinių sluoksnių analizė.

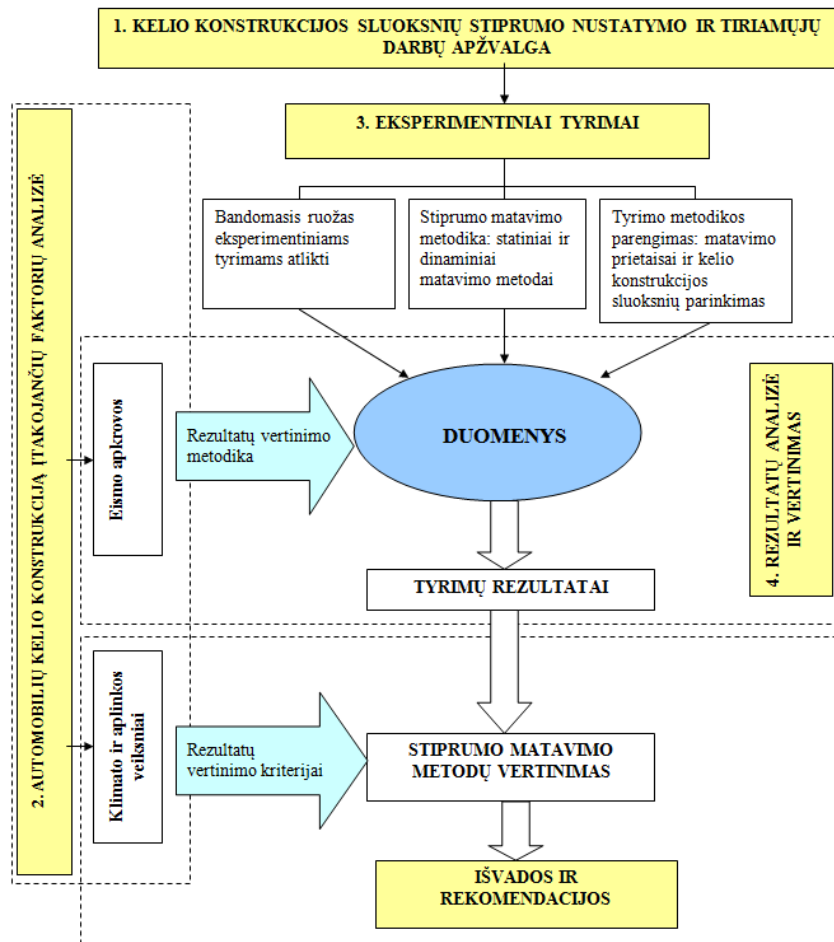
Skyriaus tematika paskelbti šeši autorės straipsniai (Kniukšaitė 2006, 2007; Bertulienė *et al.* 2008; Laurinavičius *et al.* 2009; Bertulienė *et al.* 2010; Bertulienė, Laurinavičius, Vaitkus 2010).

3.1. Eksperimentinių tyrimų planas

Siekiant nustatyti ir palyginti statiniu ir dinaminiu metodu atliktų bandymų rezultatų tikslumą, pirmiausia reikia išanalizuoti kelio dangos konstrukcijos nustatymo metodus, atlikti panašių mokslo darbų apžvalgą. Atlikti automobilių kelių dangos konstrukciją veikiančių veiksnių, tokių kaip eismo apkrovos, klimato ir aplinkos

veiksnių poveikio analizę. Kelio konstrukcijų stiprinimo poreikis skatina diegti naujas kelių rekonstrukcijos technologijas, ieškoti naujų kelio dangos konstrukcijos sluoksnių įrengimo variantų, tirti konstrukcijas realiomis jų eksploataavimo sąlygomis. Būtent todėl lyginamieji matavimai buvo atlikti kelyje ir bandomajame ruože. Pirmą kartą tyrimai atlikti 2004 m. parinktame kelio A5 Kaunas–Marijampolė–Suvalkai ruože nuo 16,10 iki 16,40 km (Garliavos skirtingų lygių sankryža), o 2007 m. tolesniems tyrimams Pagiriuose naujai įrengtas bandomasis ruožas.

Eksperimentinių tyrimų etapai pateikti 3.1 paveiksle.



3.1 pav. Eksperimentinių tyrimų etapai
Fig. 3.1. The stages of experimental research

Norint teoriškai pagrįsti statinių ir dinaminių matavimo metodų tinkamumą ir matavimo prietaisų suderinamumą kelio dangos konstrukcijos atskirų sluoksnių stiprumui matuoti bei parinkti patikimiausią, reikia atlikti šiuos eksperimentinius tyrimus:

- atlikti kelio dangos konstrukcijos stiprumo matavimo tyrimus kelyje ir bandomajame ruože;
- eksperimentiškai ištirti kelio dangos konstrukcijos stiprumą skirtingais matavimo metodais taikant statinius ir dinامينius matavimo metodus;
- atlikti skirtingais matavimo prietaisais gautų matavimo rezultatų vertinimą;
- pagrįsti tinkamiausią matavimo metodą atskiriems kelio konstrukcijos sluoksniams.

Eksperimentinių tyrimų metodika, rezultatai ir jų analizė pateikti 3.2–3.4 poskyriuose.

3.2. Bandomojo ruožo eksperimentiniams tyrimams įrengimas

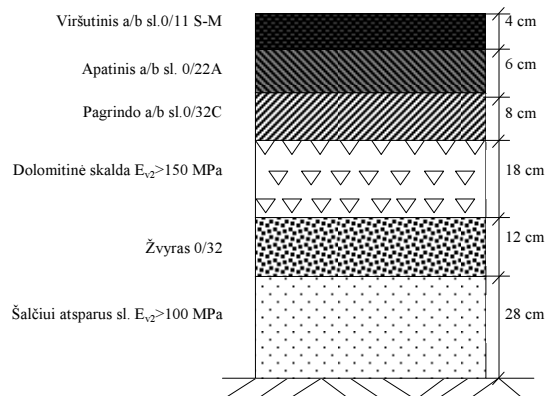
Automobilių kelių konstrukcijų stiprumas tiesiogiai priklauso nuo kelio žemės sankasos stiprumo, dangos konstrukcijos storio ir sudėties. Vienodo storio (tos pačios dangos konstrukcijos klasės) dangų konstrukcijų, įrengtų iš skirtingų medžiagų, stiprumas labai skiriasi. Didelio stiprumo arba itin gerų savybių medžiagų (pvz., granito, modifikuoto bitumo ir pan.) naudojimas dangos pagrindo bei dangos sluoksniams įrengti didina kelio tiesimo sąnaudas. Todėl nuolatos ieškoma būdų, kaip įrengti reikiamo stiprumo ir tvarumo dangos konstrukciją naudojant vietines pigesnes kelių tiesimo medžiagas arba naudojant brangias, didelio stiprio medžiagas pasiekti kuo didesnę ekonominę efektą.

Pirmą kartą Lietuvoje 2004 m. VĮ „Transporto ir kelių tyrimo institutas“ kartu su Vilniaus Gedimino technikos universitetu atliko lyginamuosius stiprumo matavimus ant kelio dangos konstrukcijos. Šios disertacijos autorė atliko lyginamųjų matavimo duomenų analizę ir vertinimą. Darbui atlikti buvo parinktas kelio A5 Kaunas–Marijampolė–Suvalkai ruožas nuo 16,10 iki 16,40 km (Garliavos skirtingų lygių sankryža) pasirinktuose 20-yje taškų. Matavimai buvo atliekami kelio statybos metu, o tai leido atskirai išmatuoti kiekvieno kelio konstrukcijos sluoksnio įlinkius ir apskaičiuoti jų deformacijos modulius.

Siekiant užtikrinti atskirų prietaisų matavimo duomenų patikimumą kelio dangos konstrukcijos įlinkiai buvo matuoti vienodomis klimatinėmis sąlygomis laikantis kiek įmanoma trumpesnio laiko intervalo.

Matuojant kelio dangos konstrukcijos įlinkius buvo fiksuojamos oro, kelio dangos paviršiaus ir asfalto dangos sluoksnio temperatūros. Bandomojo ruožo kelio konstrukcija pateikta 3.2 paveiksle, matavimų schema – F priede.

Atlikus matavimus iš įlinkių reikšmių buvo skaičiuojami deformacijų moduliai. E_{v2} modulis gautas iš matavimų su statine sija „Strassentest“. Deformacijos moduliai E_d (apskaičiuoti programa ELMOD įvertinant kelio dangos konstrukcijos sluoksnių storių) ir E_0 (apskaičiuoti deflektometro neįvertinant kelio dangos konstrukcijos sluoksnių storių) suskaičiuoti iš deflektometro „Dynatest FWD 8000“ išmatuotų įlinkių reikšmių.



3.2 pav. Eksperimentinio ruožo Kauno miesto vakariniame aplinkelyje dangos konstrukcija
Fig. 3.2. The structure of experimental pavements in Kaunas west bypass

Kelio konstrukcijos kiekvieno sluoksnio stiprumas buvo nustatomas šiais matavimo prietaisais: statine sija „Strassentest“, dinaminio prietaisu „Dynatest FWD 8000“ (toliau – FWD), dinaminio prietaisu LWD „Prima 100“ (toliau – LWD), dinaminio prietaisu „ZORN ZSG 02“.

Matavimo rezultatų duomenys ir analizė pateikti ketvirtajame skyriuje, o matavimų duomenys pateikti D priede. Atlikus tyrimus ir išanalizavus gautus rezultatus, nustatyta, kad:

1. Rezultatų sklaida yra didelė. Koreliacija tarp atskirų prietaisų skiriasi: vienu prietaisu matavimo rezultatų deriniai yra patikimesni ant apatinių dangos konstrukcijos sluoksnių, kitų – ant viršutinių dangos sluoksnių. Matavimus atliekant ant silpnesnių dangos konstrukcijos sluoksnių patikimesni rezultatai gaunami su „LWD“, ant asfalto sluoksnių patikimesni rezultatai su „FWD“.

2. Tarp visų naudotų prietaisų yra dėsninga priklausomybė. Gautiems rezultatams didelę įtaką turi oro sąlygos: oro temperatūra, drėgmė, grunto savybės (tipas, drėgmė) ir matavimo taškas.

3. Siekiant gauti patikimus matavimo rezultatus ir nustatyti, kuris prietaisas tinkamiausias kiekvienam dangos konstrukcijos sluoksniui, būtina atlikti papildomus matavimus naujuose ruožuose, užtikrinant panašias matavimo sąlygas skirtingais prietaisais.

Tęsiant mokslinius tyrimus bei ieškant tinkamiausių ir ekonomiškai efektyvių kelių dangos konstrukcijų, kurių funkcionavimas būtų tiriamas jas eksploatuojant natūraliomis sąlygomis ir esant konkrečiam sunkiasvorio transporto eismo intensyvumui, atliekamas šis mokslo tiriamasis darbas.

2007 m. Pagirių gyvenvietėje, privažiavimo prie karjero kelyje, buvo įrengtas pirmas eksperimentinių dangų konstrukcijų bandomasis ruožas, vadinamas „Lietuvos automobilių kelių eksperimentinių dangų konstrukcijų bandomasis ruožas“. Bandomajam ruožui įrengti parinkta vieta Pagirių gyvenvietėje atitinka visas tokiam eksperimentui reikalingas sąlygas: turi pakankamą krovinio transporto eismo intensyvumą, yra atviroje vietovėje, neturi horizontaliųjų kreivių plane bei vertikalinių kreivių išilginiame profilyje, pasižymi vienodomis drėkinimo sąlygomis visoje ruožo trasoje.

Įrengto eksperimentinių dangų konstrukcijų bandomojo ruožo skersinio profilio parametrai atitinka III kelio kategoriją, dangos konstrukcija III dangos konstrukcijos klasę pagal STR 2.06.03:2001. Bandomąjį ruožą, kurio bendras ilgis – 710 m, sudaro 23 vienodo ilgio (30 m) ir vienas 20 m ilgio ruoželiai. Kiekviename ruoželyje įrengta skirtingos sudėties dangos konstrukcija. Trys 30 m ilgio ruoželiai yra vienodos dangos konstrukcijos, tačiau jose įrengtos skirtingų rūšių geosintetinės medžiagos asfalto ir dangos pagrindo sluoksniuose. Tyrimams kaip pagrindinė pasirinkta labiausiai naudojama dangos konstrukcija. Pagrindinės įrengtos dangos konstrukcijos skersinis profilis ir reikalaujamas dangos pagrindo ir žemės sankasos statinio deformacijos modulio reikšmės pateiktos 3.3 pav., visos bandomojo ruožo konstrukcijos – G priede.

Kitos dangų konstrukcijos parinktos varijuojant visų dangos konstrukcijos sluoksnių medžiagas, lyginant su bazine konstrukcija.

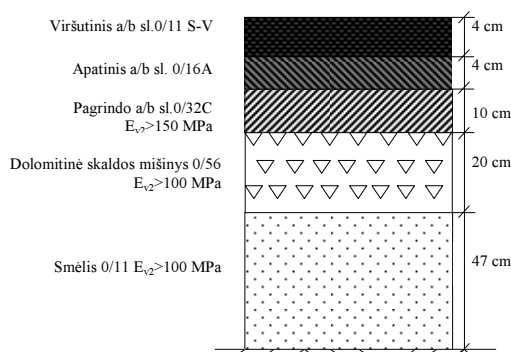
Šalčiui atspariam sluoksniui be pagrindinės smėlio frakcijos 0/11 panaudotas ir smėlio frakcijos 0/4.

Dangos pagrindo sluoksniui be pagrindinės medžiagos – dolomitinės skaldos mišinio frakcija 0/56 naudota:

- granitinės skaldos mišinys 0/56;
- granitinės skaldos ir smėlio mišinys 0/32;
- žvirgždo skaldos mišinys 0/32;
- žvyro ir smėlio mišinys 0/32;
- granuliatas – frezuotas asfaltbetonis.

Asfalto pagrindo sluoksnio pagrindinė medžiaga – asfaltbetonis 0/32 C dolomitinės skaldos pagrindu. Taip pat naudota:

- 0-32 C žvirgždo skalda;
- 0/32 C dolomitinė skalda ir žvirgždo skalda.



3.3 pav. Pagrindinė eksperimentinių dangų konstrukcija
Fig. 3.3. The base structure of experimental pavements

Asfalto apatinio sluoksnio pagrindinė medžiaga – asfaltbetonis 0/16 A dolomitinės skaldos pagrindu. Kituose variantuose naudota:

- 0/16 A (bitumas PMB);
- 0/16 A (granitinė skalda 11/16 ir dolomitinė skalda 5/8);
- 0/16 A (granitinė skalda 8/11, 11/16 ir žvirgždo skalda (smulkios dalys));
- 0/16 A (dolomitinė skalda 8/11, 11/16 ir žvirgždo skalda (smulkios dalys));
- 0/16 A (granitinė skalda ir smėlis);
- 0/16 A (granitinė skalda);
- 0/16 A (žvirgždo skalda).

Dėvimojo asfalto sluoksnio pagrindinė medžiaga – asfaltbetonis 0/11 S-V.

Kiti variantai:

- 0/11 S-M;
- 0/11 S-M su bitumu PMB;
- *Confalt*.

Bandomojo kelio ruožo žemės sankasos ir dangos konstrukcijos pagrindo sluoksnių stiprumui nustatyti buvo naudojami keturi skirtingi prietaisai, kurie skiriasi ir savo matavimo metodika, ir veikimo principais (3.3 skyrius).

Bandomojo kelio ruožo žemės sankasos, apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio ir dangos konstrukcijos pagrindo sluoksnių stiprumui (kairė kelio pusė) nustatyti buvo naudojami keturi skirtingi prietaisai: dinaminiai – deflektometras FWD „Dynatest 8000“, LWD „Prima 100“, ZORN ZSG 02; statiniai – statinis štampas „Strassentest“. Dešinėje kelio pusėje – deflektometras FWD ir statinis štampas „Strassentest“.

Matavimai ant kiekvieno dangos konstrukcijos sluoksnio buvo atliekami pagal tą pačią pasirinktą schemą (matavimo taško vieta skiriasi $\pm 0,5$ m) tomis pačiomis oro sąlygomis, matavimai atlikti rugpjūčio mėnesį (E priedas). Įlinkiai deflektometru FWD „Dynatest 8000“ ir Benkelmano sija „Infratest“ (naudojama

tik ant asfalto sluoksnių) buvo matuojami su 50 kN apkrova (Čygas *et al.* 2008). Matavimo duomenų rezultatai pateikti E priede.

3.3. Kelio konstrukcijos parametrų tyrimo metodika ir naudojama įranga

Kelio dangos bei jos konstrukcijos atskirų sluoksnių stiprumas Lietuvoje reglamentuojamas statiniu deformacijos moduliu. Dažniausiai deformacijos modulis nustatomas neardomaisiais statiniais ir dinaminiais metodais. Statiniu metodu nustatant kelio dangos deformacijos modulį naudojamas statinis šampas (dangos pagrindo sluoksniams iš nerišliųjų medžiagų) (LST 1360.5:1995 Automobilių kelių gruntai... 1995). Taikant dinaminį metodą naudojami tokie prietaisai: lengvas dinaminis prietaisas (dangos pagrindo sluoksniams iš nerišliųjų medžiagų) (Bandymo dinaminio prietaisu instrukcija 1995) ir krintančio svorio deflektometras (visiems dangos konstrukcijos sluoksniams) (Dynatest 8000 FWD Test System 1995). Atliekant matavimus dinaminiais prietaisais apkrova sukelia krintančio cilindro smūgiu per labai trumpą laiko tarpą į tam tikrą plotą. Dinaminė apkrova sukelia dangos konstrukcijos įlinkius. Atliekant matavimus statiniu prietaisu tam tikras dangos konstrukcijos plotas yra laipsniškai apkraunamas ir nukraunamas.

Įrengiant eksperimentinių dangų konstrukcijų bandomąjį ruožą Pagiriuose, atskirų dangos konstrukcijos sluoksnių ir visos konstrukcijos deformacijos moduliai kaip ir bandomajame ruože Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (16,10–16,40 km) buvo nustatomi statiniais ir dinaminiais metodais naudojant tokius prietaisus:

statinis metodas:

- 1) statinė sija (šampas) „Strassentest“;

dinaminis metodas:

- 2) lengvas dinaminis prietaisas „ZORN ZSG 02“;
- 3) krintančio svorio deflektometras LWD „Prima 100“;
- 4) krintančio svorio deflektometras FWD „Dynatest 8000“.

Statinis šampas yra seniausias ir plačiausiai naudojamas prietaisas dangų konstrukcijų stiprumui nustatyti. Statiniu šampu matuojamas kelio dangos įlinkis, atsirandantis nuo 60 kN statinės apkrovos, veikiančios 300 mm skersmens plokštę. Matuojant statiniu šampu (3.4 pav.), dangos konstrukcijos sluoksnis spaudimo plokšte laipsniškai apkraunamas ir nukraunamas, paskui bandymas vėl kartojamas. Šis prietaisas naudojamas dangos konstrukcijos nerišliųjų medžiagų sluoksniams. Statinio šampo bandymą galima taikyti stambiagrūdžiams, įvairiagrūdžiams, kietiems smulkiagrūdžiams gruntams. Greitai džiūstančių smėlių, suslūgusių arba laikinai suminkštėjusių gruntų, taip pat gruntų, kurių viršutinė dalis suardyta, bandymas atliekamas pašalinus šį gruntą. Tiriamojo grunto tankis

turi likti nepakitęs. Tiriant smulkiagrūdžius gruntus (molį), šį metodą galima taikyti, kai gruntai yra kietos konsistencijos (LST 1360.5:1995 Automobilių kelių gruntai... 1995).



3.4 pav. Statinis štampas „Strassentest“

Fig. 3.4. Static beam Strassentest

Grunto deformacijos modulis E_v yra grunto gebėjimo deformuotis parametris dydis. Jo reikšmės, turint pirmojo ir kartotinio apkrovimo nusėdimo kreivę, apskaičiuojamos pagal kirstinės nuolydį tarp taškų 0,3 σ_{lmax} pagal lygtį:

$$E_v = 1,5 \cdot r \cdot \frac{\Delta \sigma}{\Delta s}, \quad (3.1)$$

čia E_v – deformacijos modulis, MPa; r – apkrovos štampo spindulys, mm; $\Delta \sigma$ – įtempių pokytis po štampu centre, mm; Δs – grunto deformacijos pokytis štampo centre, mm.

Grunto standumo rodiklis yra įtempių santykis su jų sukeltąja deformacija:

$$k_s = 1000 \cdot \frac{\sigma_0}{s}, \quad (3.2)$$

čia k_s – grunto standumo rodiklis, MN/m; σ_0 – vidutiniai įtempiai po štampu, MN/m²; s – grunto deformacija štampo centre, mm.

Jis nustatomas pagal pirmojo apkrovimo deformacijos kreivę.

Didžiausią apkrovą, kurią numatoma taikyti, arba didžiausią grunto deformaciją, kurią reikia pasiekti atliekant bandymą, priklauso nuo bandymo tikslo, nuo grunto savybių ir spaudimo plokštės skersmens. Tiesiant kelius, deformacijos modulis E_v nustatomas naudojant 300 mm skersmens spaudimo plokštę. Apkrova didinama tol, kol pasiekama 5 mm nuosėdis arba grunto įtempiai po spaudimo

plokšte yra apie $0,5 \text{ MN/m}^2$. Spaudimo plokštė nukraunama didžiausią apkrovą mažinant 50 %, 25 % ir visiškai nukrovus. Visiškai nukrovus spaudimo plokštę, atliekamas antrasis apkrovimo ciklas iki priešpaskutinės pirmojo ciklo apkrovos.

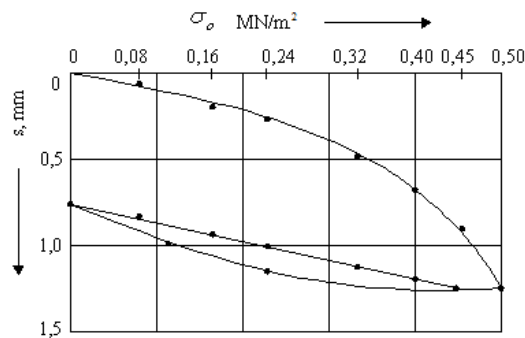
Deformacija apskaičiuojama pagal (3.3) lygtį:

$$s = s_M \cdot \frac{h_p}{h_M}, \text{ MN/m}^3, \quad (3.3)$$

čia s_M – indikatoriaus duomenys, mm; h_p – atstumas nuo indikatoriaus iki lankstos, m; h_M – atstumas nuo lankstos iki plokštės centro.

Spaudimo įtempių ir deformacijų priklausomybė parodyta 3.5 paveiksle.

Pagal apkrovimų ciklą matavimo duomenis sudaroma grunto deformacijos kreivė. Apkrovimo ir nukrovimo ciklams atskirti šios kreivės ruožai žymimi atitinkamomis krypčių rodyklėmis.



3.5 pav. Deformacijos kreivė

Fig. 3.5. Curve of deformation

Tiriant gruntus, kurių deformacijos modulis labai didelis, reikia stebėti, ar 762 mm skersmens spaudimo plokštė neišlinksta. Spaudimo plokštės vidurio deformaciją reikia kontroliuoti naudojant papildomus matavimo indikatorius ir jutiklius.

Grunto tankumui apibūdinti, be deformacijos modulio, dar analizuojama ir deformacijos kreivės forma bei kryptis.

Apskaičiuojant deformacijos modulį, vadovaujamasi grunto deformacijos kreive, kuri apibūdinama šiuo antrojo laipsnio daugianariu:

$$s = a_0 + a_1 + \sigma_0 + a_2 \cdot \sigma_0^2, \quad (3.4)$$

čia σ_0 – grunto įtempiai po plokšte, MN/m^2 ; s – deformacija plokštės centre, mm; a_0, a_1, a_2 – antrojo laipsnio daugianario konstantos.

Pirmojo apkrovimo ciklo deformacijos kreivės konstantai nustatyti į $s = 0$ tašką neatsižvelgiama, t. y. $a_0 = 0$.

Deformacijos modulis apskaičiuojamas pagal deformacijos kreivę iš jos $0,3 \cdot \sigma_{l\max}$ ir $0,7 \cdot \sigma_{l\max}$ ruožo kirstinės:

$$E_v = 1,5 \cdot r \cdot \frac{1}{a_1 + a_2 + \sigma_{l\max}}, \quad (3.5)$$

čia r – apkrovos štampos spindulys, mm; $\sigma_{l\max}$ – pirmojo apkrovimo ciklo deformacijos moduliui taikomas 1-as indeksas, antrojo apkrovimo ciklo – 2-as indeksas.

Bandymas lengvu dinaminio prietaisu (3.6 pav.) atliekamas tikrinant gruntų ir pagrindų konstrukcinių sluoksnių, įrengtų iš biriųjų medžiagų stiprumą. Šis metodas geriausiai tinka stambiagrūdžiams ir mišriesiems gruntams, kurių dalelės ne didesnės kaip 63 mm. Bandymo lengvu dinaminio prietaisu apkrova sukelia krintančio cilindro smūgiu. Apkrovos trukmė siekia apie 18 ms. Tai sukelia grunto deformaciją. Nustatytas dinaminis deformacijos modulis E_{vd} skiriasi nuo statinio deformacijos modulio E_{v2} , nustatyto statinio štampos bandymu. Dinaminiam deformacijos moduliui nustatyti naudojamas nešiojamasis prietaisas su krintančiu cilindru ir 300 mm skersmens apkrovos plokšte.

Šiuo bandymo metodu galima nustatyti dinaminį deformacijos modulį E_{vd} nuo 10 MN/m^2 iki 125 MN/m^2 (Bandymo dinaminio prietaisu instrukcija 1995). Deformacijos modulis nustatomas pagal (3.7) formulę.

$$E_{vd} = 1,5 \cdot r \cdot \frac{\delta}{s}, \quad (3.6)$$

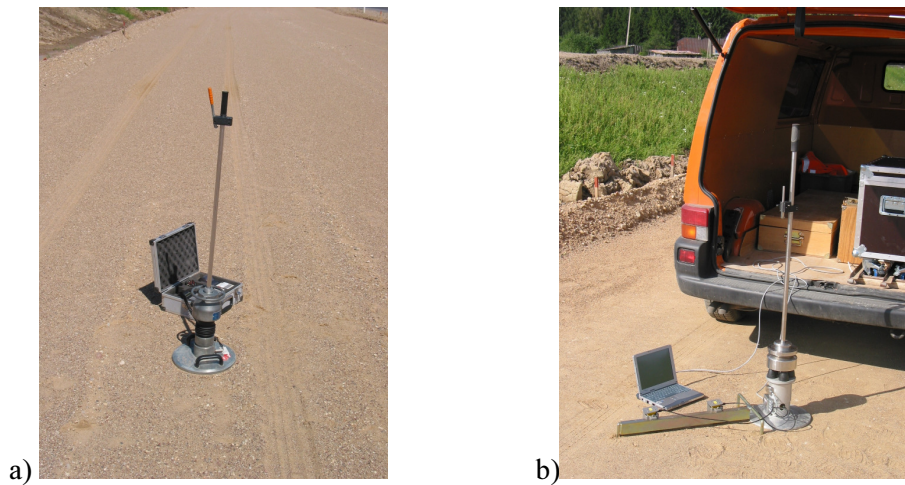
čia r – apkrovos plokštės spindulys, cm; δ – dinaminė apkrova, lygi $0,1 \text{ MN/m}^2$; s – grunto po apkrovos plokšte deformacija, mm.

Bandymas krintančio svorio deflektometru „Mini FWD“ (3.6 pav.) – tai toks bandymo būdas, kai smūgio jėga gruntui perduodama per standžią plokštę, ir sukelia dinaminę apkrovą δ , kuri lygi $0,1 \text{ MN/m}^2$.

Bandymų prietaisas susideda iš:

- apskritimo formos standžios plokštės, kurios skersmuo 300 mm (priklausomai nuo konstrukcijos gali būti naudojama ir 200 mm, 100 mm skersmens plokštė);
- prietaiso, apkrovos plokštės deformacijai matuoti;
- apkrovos įtaiso, susidedančio iš krintančio cilindro, amortizatoriaus ir kreipiamojo vamzdžio su atkabinimo įtaisų.

Trimis smūgiais paruošiama matavimo vieta, kad plokštė geriau priglustų prie grunto. Svoris paleidžiamas laisvai kristi iš nustatyto aukščio ir, po kiekvieno smūgio jam atsokus nuo amortizatoriaus, sugaunamas.



3.6 pav. Dinaminiai prietaisai: a – „Mini FWD Prima 100“; b – „ZORN ZSG 02“
Fig. 3.6. Dynamic devices: a – „Mini FWD Prima 100“; b – „ZORN ZSG 02“

Ijungus deformacijos matavimo prietaisą atliekami trys smūgiai ir išmatuojamos atitinkamos deformacijos.

Dinaminis deformacijos modulis E_{vd} , MN/m², randamas iš (3.6) formulės. Žinant nustatytą dinaminės apkrovos po plokštę dydį $\delta = 0,1$ MN/m², plokštės skersmenį $2 \cdot r = 300$ mm ir išmatuotų deformacijų vidutinę reikšmę s , mm, dinaminį deformacijos modulį galima rasti iš (3.7) formulės:

$$E_{vd} = 22,5 / s, \quad (3.7)$$

čia s – grunto po apkrovos plokštės deformacija, mm.

Automobilių kelių bei gatvių dangų konstrukcijoms modeliuoti buvo sukurtas krintančio svorio deflektometras (FWD), kuris matuoja įlinkius veikiant trumpalaikiai apkrovai. Šio metodo pranašumai: negadinama matuojamoji kelio danga, prietaisas valdomas vieno žmogaus, tikslūs ir greitai atliekami matavimai (iki 60 matavimo taškų per valandą), didelis apkrovų diapazonas (7–120 kN); pritaikytas daugelio kelio dangų matavimams – nuo paprastų kelių iki oro uosto dangų bandymų (Hudson *et al.* 1987; Hoffman *et al.* 1982).

Deflektometras yra vienas iš pagrindinių tyrimo prietaisų kelio dangos konstrukcijos stiprumui nustatyti, nes jis leidžia įvertinti dangos gebėjimą atlaikyti automobi-

lių apkrovų poveikį. Šis prietaisas gali būti naudojamas kelių tinklo arba atskirų kelių ar jų ruožų stiprio rodikliams nustatyti (Dynatest 8000 FWD Test System 1995).

Pagrindiniai veiksniai, darantys įtaką dangos įlinkiui matuojant su FWD: dangos sluoksnio storis; medžiagos rūšis; medžiagos kokybė; žemės sankasos stiprumas; aplinkos sąlygos; dangos konstrukcijos stabilumas (Texas department of transportation 2008).

Dinaminis dangos deformacijos modulio nustatymo prietaisas FWD (3.7 pav.) sukuria pusės sinusoidės formos, vieno „smūgio“ apkrovą (trukmė 25–30 ms), kuri labai panaši į judančio rato apkrovą. Apkrovos reguliavimo intervalas – 7–120 kN. Apkrovą fiksuoja centre įmontuotas dinamometro daviklis, prijungtas prie apkrovos plokštės, pakabintos ant šarnyrų (3.8 pav.). Kelio dangos įlinkiai fiksuojami 7–9 įlinkių davikliais (3.9 pav.). Matavimo įrenginys aprūpintas automatine mechanine sistema (taip pat ir apkrovos kritimo aukščio pasirinkimas). Matavimo įrenginio sistemos procesorius „Dynatest 8000“ susideda iš mikroprocesoriaus kontrolės ir signalų apdorojimo įrenginio. Jis prijungtas prie deflektometro priekabos ir kompiuterio. Procesoriuje yra sistemos būklės stebėsenos sistema, todėl puikiai užtikrina matavimų tikslumą. Įlinkiai matuojami absoliučiu $2\% \pm 2$ mikrometrų tikslumu ir standartiniu santykiniu $1\% \pm 1$ mikrometro tikslumu. Įrenginio skiriamoji geba įlinkių matavimams – 1 mikronas. Apkrova matuojama ne mažesniu nei $2\% \pm 0,3$ kN tikslumu. Įrenginio skiriamoji geba apkrovai yra nuo 0,03 iki 0,2 kN. Matuojant kelių dangos konstrukcijos įlinkius dinaminio prietaisu, apkrova sukelia masyvaus cilindro smūgiu, kuris per labai trumpą laiko dalį sukelia konstrukcijos sluoksnio poslinkį.



3.7 pav. Deflektometras FWD

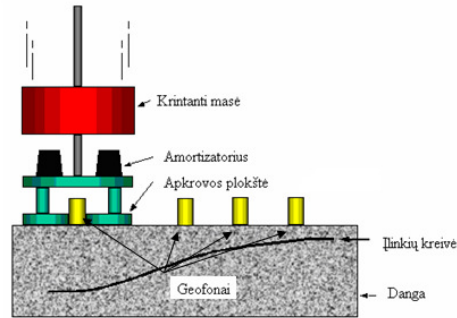
Fig. 3.7. Falling Weight Deflectometer (FWD)

Tyrimų metu išmatuojami kelio dangos įlinkiai, apskaičiuojami kelio dangos konstrukcinių sluoksnių tamprumo moduliai, įtempių pasiskirstymas apkrovos

zonoje, nustatomas kelio dangos liekamasis amžius ir kritinis kelio dangos konstrukcijos sluoksnis (Dynatest 8000 FWD Test System 1995).

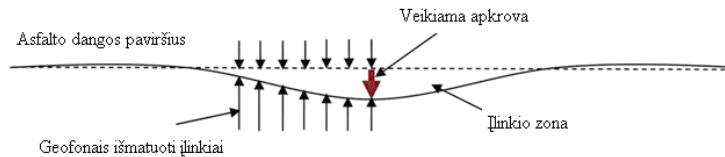
Norint nustatyti dangos sluoksnių paviršiaus įlinkį, rekomenduojama nubraižyti paviršiaus E modulio grafiką. Jis nurodo dangos sluoksnių įlinkius skirtinguose ekvivalentiniuose gyliuose.

Paviršiaus E modulis ekvivalentiniame gylyje r yra apytiksliai lygus moduliui dangos sluoksnio, ekvivalentiško dangos sluoksniams, esantiems žemiau ekvivalentinio gylio $h_e = r$.



3.8 pav. Krintančio svorio deflektometro FWD veikimo schema (Dynatest 8000 FWD Test System 1995)

Fig. 3.8. Falling Weight Deflectometer FWD operation scheme (Dynatest 8000 FWD Test System 1995)



3.9 pav. Krintančio FWD veikiamos apkrovos ir susidariusio įlinkio schema (Texas department of transportation 2008)

Fig. 3.9. Schematic of FWD load and deflection measurement (Texas department of transportation 2008)

Paviršiaus E modulis apkrovos centre (ekvivalentinis gylis = 0 mm) apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$E_0 = \left[\frac{f(1-\nu^2)\sigma_0 a}{d_r} \right] \quad (3.8)$$

Šis modulis nurodo visos dangos ekvivalentinį E modulį (laikoma, kad danga yra vienas sluoksnis).

Paviršiaus E modulis atstumu r nuo apkrovos centro ($r > 2a$) apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$E_{0(r)} = \left[\frac{(1 - \nu^2) \cdot \sigma_0 \cdot a^2}{r \cdot d_r} \right], \quad (3.9)$$

čia E_0 – paviršiaus modulis apkrovos plokštės centre; $E_{0(r)}$ – paviršiaus modulis atstumu r , MPa; f – įtempių pasiskirstymo koeficientas ($f = 2$ – tolygus (skelta apkrovos plokštė), $f = \pi/2$ – standi plokštė, $f = 8/3$ – birieji gruntai, standi plokštė, $f = 4/3$ – rišlieji gruntai, standi plokštė); ν – Puasono koeficientas; σ_0 – kontaktinis slėgis po apkrovos plokštės, kPa; a – apkrovos plokštės spindulys, mm; r – atstumas nuo jutiklio iki apkrovos centro, mm; d_r – įlinkis atstumu r , mm.

Šis modulis nurodo ekvivalentinę sluoksnių, esančių žemiau ekvivalentinio gylio $h_e = r$, deformaciją.

3.4. Tyrimų, atliktų ant žemės sankasos ir apatinių dangos konstrukcijos sluoksnių, analizė

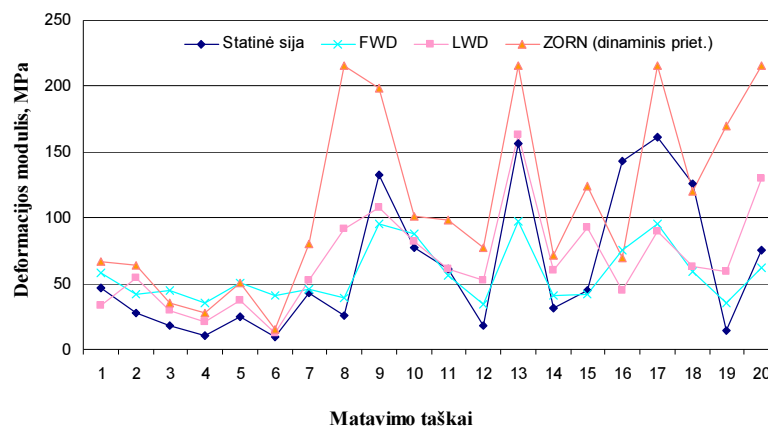
Kelio konstrukcijos sluoksnių stiprumas buvo tiriamas kelio Kaunas–Marijampolė–Suvalkai 16,10–16,40 km ruože ir naujai įrengtame bandomajame ruože Pagiriuose jau aprašytais tyrimų metodais. Matavimo metodų analizė parodė dėsningą naudotų prietaisų priklausomybę nuo statinių ir dinaminių metodų.

3.4.1. Tyrimų, atliktų ant žemės sankasos bandomuosiuose ruožuose, analizė

Kelio konstrukcijos sluoksnių stiprumo matavimo duomenų analizę geriausiai rodo matavimai, atlikti ant mažai rišlių medžiagų. Žemės sankasos išmatuotų deformacijos modulių vertės pateiktos 3.10–3.12 paveiksluose.

Pagal gautus matavimo rezultatus iš 3.10–3.12 paveiksluose matyti, kad skirtingais prietaisais gauti matavimo duomenys skirtingose matavimo vietose kinta dėsningai, nors jų reikšmės skiriasi. Atsižvelgiant į mažus atstumus tarp matavimo vietų galima teigti, kad sluoksnis nėra tolygiai sutankintas arba šiam sluoksniui įrengti naudotos nevienalytės medžiagos, arba išmatuota netiksliai.

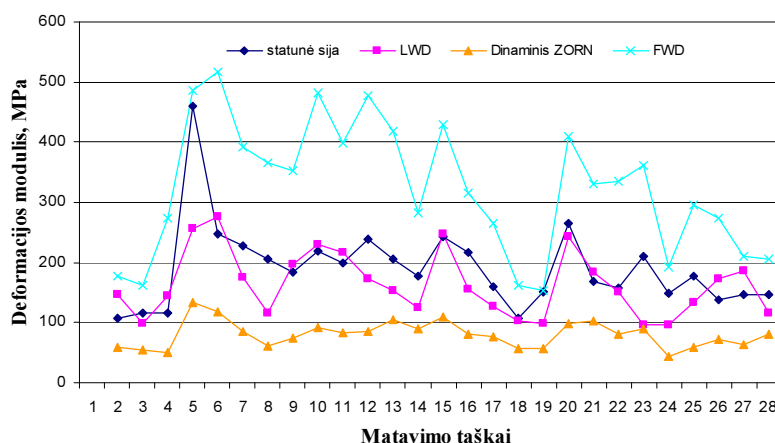
Matavimų, atliktų ant žemės sankasos kelio Kaunas–Marijampolė–Suvalkai 16,10–16,40 km ruože, rezultatų analizė rodo, kad tarp visų prietaisų yra dėsninga priklausomybė, bet deformacijos modulio (MPa) skaitinės reikšmės, lyginant su statine sija, kinta ir yra didesnės: LWD ir ZORN – 8–80 % nuo vidurkio, o FWD reikšmės 8 % nuo vidurkio mažesnės, lyginant su statine sija.



3.10 pav. Žemės sankasos stiprumo rezultatai, gauti išmatavus visais keturiais nagrinėtais prietaisais eksperimentiniame ruože Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (16,10–16,40 km)

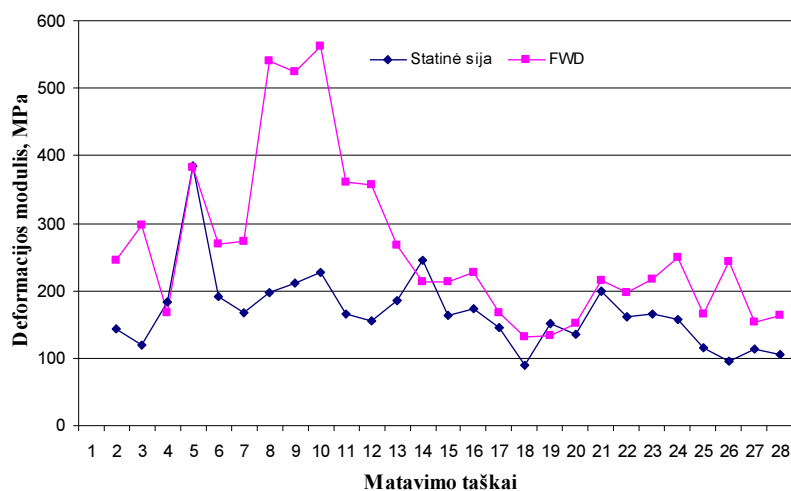
Fig. 3.10. Strength of the subgrade measured by all the above-mentioned devices of experimental road section Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (16,10–16,40 km)

Pagirių bandomajame ruože (3.11 pav.) kairė kelio ruožo pusė yra veikiamą kelis kartus didesnių apkrovų negu dešinė, nes tai kelias į Pagirių karjerą.



3.11 pav. Žemės sankasos stiprumo rezultatai, gauti išmatavus visais keturiais nagrinėtais prietaisais Pagirių bandomajame ruože (kairė pusė)

Fig. 3.11. Strength of the subgrade measured by all the above-mentioned devices of experimental road section in Pagiriai (left side)



3.12 pav. Žemės sankasos stiprumo rezultatai, gauti išmatavus statinę sija ir deflektometru FWD „Dynatest 8000“ Pagirių bandomajame ruože (dešinėje pusėje)

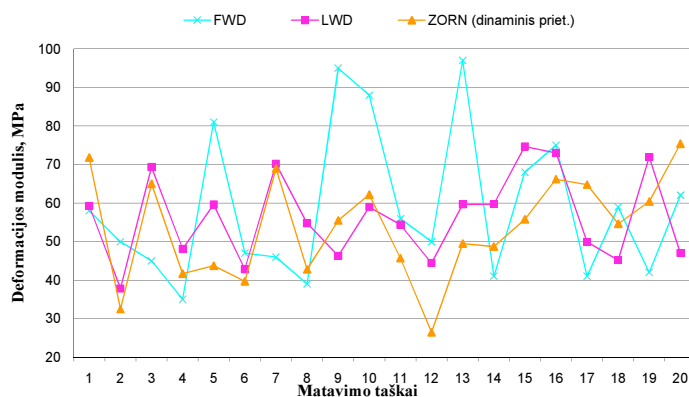
Fig. 3.12. Strength of the subgrade measured by static beam and FWD Dynatest 8000 of experimental road section in Pagiriai (right side)

Matavimų, atliktų ant žemės sankasos Pagirių bandomajame ruože, rezultatų analizė rodo, kad tarp visų prietaisų yra dėsninga priklausomybė, bet deformacijos modulio (MPa) skaitinės reikšmės, lyginant su statine sija, kinta ir yra mažesnės: LWD 14 % ir ZORN – 60 % nuo vidurkio, o FWD reikšmės 70 % didesnės.

3.4.2. Tyrimų, atliktų ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio bandomuosiuose ruožuose, analizė

Pagal gautus matavimo rezultatus iš 3.13–3.15 paveiksluose matyti, kad skirtingais prietaisais gauti matavimo duomenys skirtingose matavimo vietose kinta dėsningai, nors jų reikšmės skiriasi.

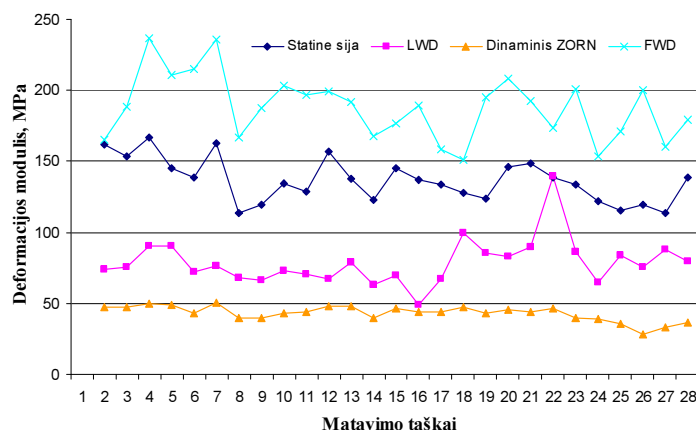
Matavimų, atliktų ant šalčiui atsparaus sluoksnio kelio Kaunas–Marijampolė–Suvalkai 16,10–16,40 km ruože, rezultatų analizė rodo, kad tarp visų prietaisų yra dėsninga priklausomybė, matavimai atlikti su trimis dinaminiais prietaisais (statinė sija matavimai nebuvo atlikti).



3.13 pav. Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio stiprumo rezultatai, gauti atlikus matavimus trimis nagrinėtais dinaminiais prietaisais bandomajame ruože Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (16,10–16,40 km)

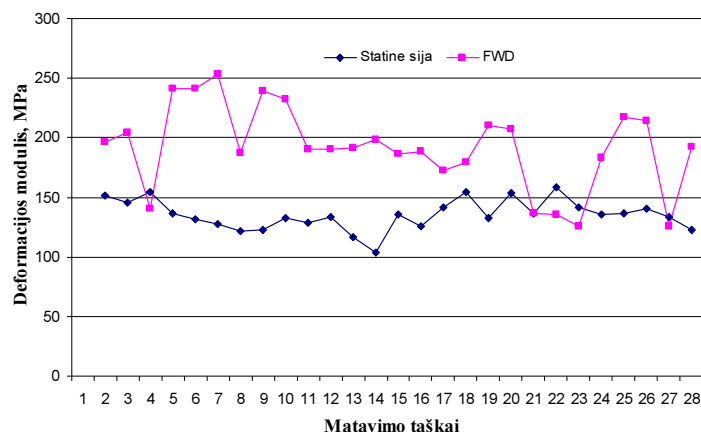
Fig. 3.13. Strength of the frost blanket course measured by all the above-mentioned devices of experimental road section Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (16,10–16,40 km)

Analogiški rezultatai buvo gauti ir atlikus deformacijos modulių matavimus ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio Pagirių bandomajame ruože (3.14 ir 3.15 pav.).



3.14 pav. Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio stiprumo rezultatai, gauti atlikus matavimus visais keturiais nagrinėtais prietaisais Pagirių bandomajame ruože (kairė pusė)

Fig. 3.14. Strength of the frost blanket course measured by all the above-mentioned devices of experimental road section in Pagiriai (left side)



3.15 pav. Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio stiprumo rezultatai, gauti atlikus matavimus statine sija ir deflektometru FWD „Dynatest 8000“ Pagirių bandomajame ruože (dešinėje pusėje)

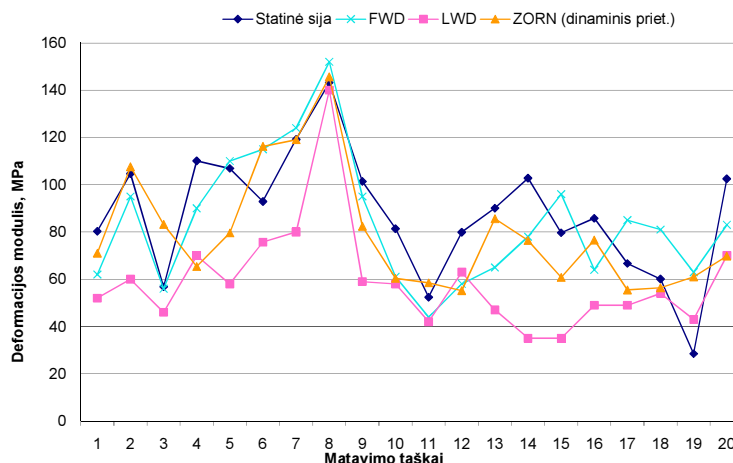
Fig. 3.15. Strength of the frost blanket course measured by static beam and FWD Dynatest 8000 of experimental road section in Pagiriai (right side)

Matavimo, atlikto dinaminiais prietaisais ant dangos konstrukcijų šalčiui atsparaus sluoksnio bandomajame Pagirių ruože, rezultatų analizė rodo, kad tarp visų prietaisų yra dėsninga priklausomybė, bet deformacijos modulio skaitinės reikšmės, lyginant su statine sija, kinta ir yra mažesnės. Krintančio svorio deflektometro LWD „Prima 100“ ir dinaminio prietaiso „ZORN ZSG 02“ reikšmės 33–68 % mažesnės už statinę sija išmatuotą deformacijos modulio vidutinę skaitinę reikšmę, o krintančio svorio deflektometro FWD „Dynatest 8000“ reikšmės 40 % didesnės.

3.4.3. Tyrimų, atliktų ant dangos pagrindo sluoksnių bandomuosiuose ruožuose, analizė

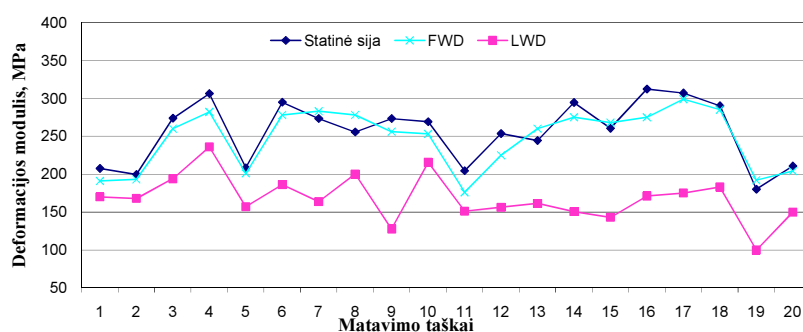
Buvo atlikti matavimai ant dangos pagrindo sluoksnių, įrengtų naudojant žvyrą ir dolomitinės skaldos sluoksnius, kelio Kaunas–Marijampolė–Suvalkai 16,10–16,40 km ruože. Ant žvyro sluoksnio matavimai buvo atlikti visais keturiais matavimo prietaisais, o ant dolomitinės skaldos pagrindo sluoksnio – trimis (statinė sija, FWD ir LWD). Deformacijos modulio skaitinės reikšmės, lyginant su statine sija, kinta ir yra mažesnės. Ant žvyro pagrindo atlikta analizė (3.16 pav.) parodė, kad dinaminio prietaiso ZORN ZSG 02 reikšmės yra 9 %, krintančio svorio deflektometro LWD „Prima 100“ vidutinės reikšmės – 32 %, o krintančio svorio deflektometro FWD

„Dynatest 8000“ reikšmės 4 % mažesnės už statinę sija išmatuotą deformacijos modulio vidutinę skaitinę reikšmę. Ant dolomitinės skaldos pagrindo atlikta analizė parodė (3.17 pav.), kad krintančio svorio deflektometro FWD „Dynatest 8000“ reikšmės yra 3 %, o LWD „Prima 100“ vidutinės reikšmės yra 34 % mažesnės už statinę sija išmatuotą deformacijos modulio vidutinę skaitinę reikšmę.



3.16 pav. Žvyro sluoksnio stiprumo rezultatai, gauti išmatavus visais keturiais nagrinėtais prietaisais bandomajame ruože Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (16,10–16,40 km)

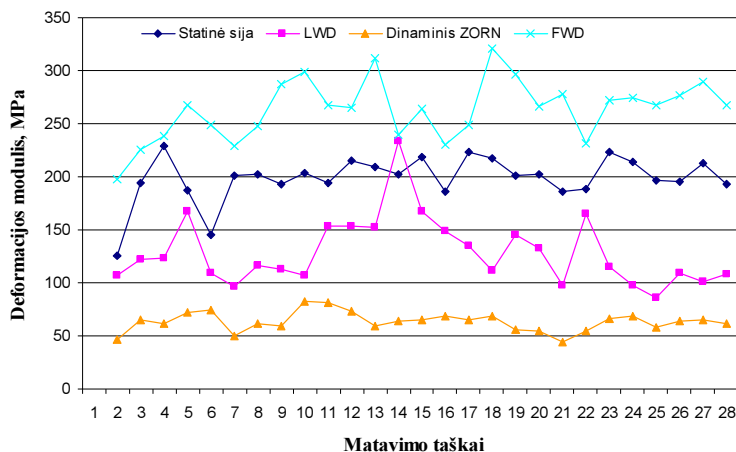
Fig. 3.16. Strength of the base gravel course measured by all the above-mentioned devices of experimental road section Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (16,10–16,40 km)



3.17 pav. Dolomitinės skaldos sluoksnio stiprumo rezultatai, gauti išmatavus trimis nagrinėtais dinaminiais prietaisais bandomajame ruože Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (16,10–16,40 km)

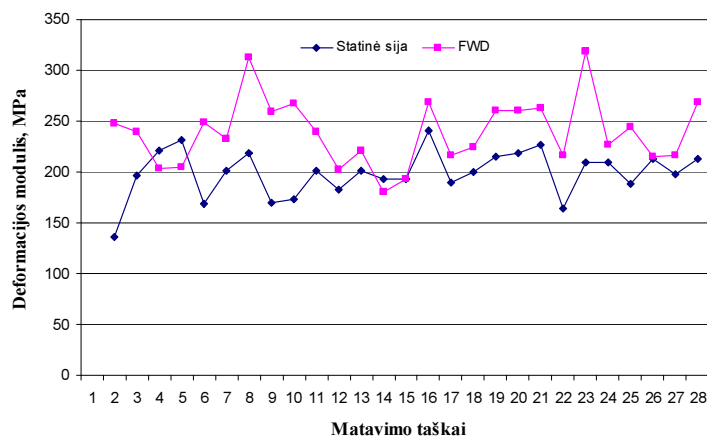
Fig. 3.17. Strength of the base dolomite course measured by all the above-mentioned devices of experimental road section Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (16,10–16,40 km)

Tokie pat matavimai buvo atlikti ir ant dangos pagrindo sluoksnio Pagirių bandomajame ruože. Rezultatai pateikti 3.18 ir 3.19 paveiksluose.



3.18 pav. Dangos pagrindo stiprumo rezultatai, gauti išmatavus visais keturiais nagrinėtais prietaisais Pagirių bandomajame ruože (kairė pusė)

Fig. 3.18. Strength of the base course measured by all the above-mentioned devices of experimental road section in Pagiriai (left side)



3.19 pav. Dangos pagrindo stiprumo rezultatai, gauti išmatavus statine sija ir deflektometru FWD „Dynatest 8000“ Pagirių bandomajame ruože (dešinėje pusėje)

Fig. 3.19. Strength of the base course measured by static beam and FWD Dynatest 8000 of experimental road section in Pagiriai (right side)

Matavimų rezultatų dinaminiais prietaisais ant dangos pagrindo analizė rodo, kad tarp visų prietaisų yra dėsninga priklausomybė, bet deformacijos modulio skaitinės reikšmės, lyginant su statine sija, kinta labiau ir yra mažesnės. Krintančio svorio deflektometro LWD „Prima 100“ ir dinaminio prietaiso „ZORN ZSG 02“ reikšmės 31–35 % mažesnės už statinę siją išmatuotą deformacijos modulio vidutinę skaitinę reikšmę, o krintančio svorio deflektometro FWD „Dynatest 8000“ reikšmės 30 % didesnės.

Tai paaiškinama matavimo metodų ir skaičiavimo metodikų skirtumais (Čygas *et al.* 2008). Pavyzdžiui, FWD skaičiavimo metodikoje taikomas apkrovos pasiskirstymo koeficientas f daro įtaką deformacijos modulio dydžiui. Čia matuojant naudotas $f = 8/3$, kai koeficientas $f = \pi/2$, apskaičiuotos reikšmės labai artimos kitais trimis prietaisais išmatuotoms reikšmėms.

3.5. Trečiojo skyriaus išvados

Kelio konstrukcijos stiprio matavimai buvo atlikti ant žemės sankasos, šalčiui atsparaus sluoksnio ir dangos pagrindo sluoksnio statiniais ir dinaminiais matavimo metodais naudojant statinę siją (štapą) „Strassentest“, lengvą dinaminį prietaisą ZORN ZSG 02 ir krintančio svorio deflektometrus: LWD „Prima 100“ ir FWD „Dynatest 8000“. Atlikus šių matavimų analizę galima pateikti šias išvadas:

1. Matavimų rezultatų dinaminiais prietaisais ant žemės sankasos analizė rodo, kad tarp visų prietaisų yra dėsninga priklausomybė. Kaunas–Marijampolė–Suvalkai bandomajame ruože (16,10–16,40 km) deformacijos modulio (MPa) skaitinės reikšmės, lyginant su statine sija, kinta ir yra didesnės: LWD ir ZORN – 8–80 % nuo vidurkio, o FWD reikšmės 8 % nuo vidurkio mažesnės, lyginant su statine sija. Pagirių bandomajame ruože atliktų tyrimų rezultatai parodė, kad deformacijos modulio skaitinės reikšmės, lyginant su statine sija, labiau kinta ir yra mažesnės: LWD „Prima 100“ ir „ZORN ZSG 02“ reikšmės – 14–17 %, o FWD „Dynatest 8000“ reikšmės 70 % didesnės už statinę siją išmatuotą deformacijos modulio vidutinę skaitinę reikšmę.

2. Matavimo rezultatų dinaminiais prietaisais ant šalčiui atsparaus sluoksnio analizė rodo, kad tarp visų prietaisų yra dėsninga priklausomybė, bet deformacijos modulio skaitinės reikšmės, lyginant su statine sija, kinta. Krintančio svorio deflektometro LWD „Prima 100“ ir dinaminio prietaiso „ZORN ZSG 02“ reikšmės 33–43 % mažesnės už statinę siją išmatuotą deformacijos modulio vidutinę skaitinę reikšmę, o krintančio svorio deflektometro FWD „Dynatest 8000“ reikšmės 40 % didesnės.

3. Matavimų rezultatų dinaminiais prietaisais ant dangos pagrindo analizė rodo, kad tarp visų prietaisų yra dėsninga priklausomybė, bet deformacijos modulio skaitinės reikšmės, lyginant su statine sija, labiau kinta. Kaunas–Marijampolė–

Suvalkai bandomajame ruože (16,10–16,40 km) ant žvyro pagrindo atlikta analizė parodė, kad dinaminio prietaiso „ZORN ZSG 02“ reikšmės yra 9 %, krintančio svorio deflektometro LWD „Prima 100“ vidutinės reikšmės – 32 %, o krintančio svorio deflektometro FWD „Dynatest 8000“ reikšmės 4 % mažesnės už statinę sija išmatuotą deformacijos modulio vidutinę skaitinę reikšmę. Ant dolomitinės skaldos pagrindo atlikta analizė parodė, kad krintančio svorio deflektometro FWD „Dynatest 8000“ reikšmės yra 3 %, o LWD „Prima 100“ vidutinės reikšmės – 34 % mažesnės už statinę sija išmatuotą deformacijos modulio vidutinę skaitinę reikšmę. Pagirių bandomajame ruože atliktų matavimų analizė parodė, kad krintančio svorio deflektometro LWD „Prima 100“ ir dinaminio prietaiso „ZORN ZSG 02“ reikšmės – 31–35 % mažesnės už statinę sija išmatuotą deformacijos modulio vidutinę skaitinę reikšmę, o krintančio svorio deflektometro FWD „Dynatest 8000“ reikšmės 30 % didesnės.

4. Matavimo rezultatų dinaminiais prietaisais ant žemės sankasos, apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio ir dangos pagrindo sluoksnių analizė rodo, kad tarp visų prietaisų matavimų rezultatų yra dėsninga priklausomybė, bet deformacijos modulio skaitinės reikšmės, lyginant su statine sija, kinta. Tai paaiškina matavimo metodų ir skaičiavimo metodikų skirtumus. Remiantis šių rezultatų analize negalima vienareikšmiškai nuspręsti, kuris metodas yra geriausias ir priimtinausias.

Kelio konstrukcijos stiprumo matavimo metodų tyrimų rezultatų analizė ir vertinimas

Skyriuje atliktas pasirinktų eksperimentinių ruožų tyrimų rezultatų ant žemės sankasos ir dangos konstrukcijos apatinių sluoksnių statistinė analizė ir vertinimas. Matematinė statistika yra vienas iš metodų, leidžianti teisingai apibendrinti tyrimų duomenis. Gauti skirtumai, padarytos išvados gali būti esminės tik tada, jei įrodyta, kad visa tai matematiškai patikima.

Vykdamas kelio ruožo Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (16,10–16,40 km) stiprumo nustatymo analizę ant visų kelio konstrukcijos sluoksnių (matavimo duomenys pateikti D ir E priede) taikyti statinis ir dinaminiai metodai. Tęsiant mokslinius tyrimus ir ieškant tinkamiausių bei ekonomiškai efektyvių kelių dangos konstrukcijų, kurių funkcionavimas būtų tiriamas jas eksploatuojant natūraliomis sąlygomis ir esant konkrečiam sunkiasvorio transporto eismo intensyvumui, atliktas mokslo tiriamasis darbas Pagirių bandomajame ruože ant žemės sankasos, apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio ir dangos pagrindo sluoksnių, taikant tuos pačius matavimo metodus kaip ir anksčiau atliktame Kauno ruože, parodant funkcines priklausomybes $E_{v2} = f(E_{v(FWD)})$, $E_{v2} = f(E_{v(LWD)})$, $E_{v2} = f(E_{v(ZORN)})$ tarp matavimo prietaisų.

Šių metodų rezultatų patikimumui nustatyti taikomi tikimybių teorijos ir matematinės statistikos metodai, kurie ir pateikti šiame skyriuje.

Tyrimų rezultatams naudojant statistinę analizę buvo pasirinktas statistinis paketas „StatSoft Statistica 7“. Koreliacija – tai dviejų kintamųjų priklausomybės stiprumas. Dviejų kintamųjų tiesinei priklausomybei įvertinti naudojamas koreliacijos koeficientas, kuris parodo, ar matuojamų kintamųjų tiesinė priklausomybė stipri.

Patikimumo intervalui nustatyta 95 % patikimumo viršutinė riba.

Šiame skyriuje, atlikus matavimo duomenų analizę ir vertinimą, pasiūlytas redukcijos koeficientas statiniais ir dinaminiais matavimo metodais gautiems matavimo rezultatams ant kelio konstrukcijos sluoksnių palyginti.

Skyriaus tematika paskelbti keturi autorės straipsniai (Bertulienė *et al.* 2008; Bertulienė, Laurinavičius, Lapinskienė 2010; Bertulienė, Laurinavičius, Vaitkus 2010).

4.1. Tyrimo rezultatų statistinės duomenų charakteristikos ir analizė

Vykdam tyrimus eksperimentiniuose kelių ruožuose, gautų stiprio rodiklių analizei ir vertinimui buvo taikomi matematinės statistikos metodai: aprašomoji statistika, analizės ir interpretavimo metodai.

Yra išskiriami du svarbūs intervalinio vertinimo kriterijai: tikslumas ir patikimumas. Tikslumą išreiškia vertinimo intervalo ilgis, o patikimumą – tikimybė, kuria šis intervalas priimamas.

Aprašomoji statistika – tai duomenų sisteminimo ir grafinio vaizdavimo metodai. Aprašomosios statistikos metodų taikymas yra labai svarbus statistinio uždavinio sprendimo etapas. Dažnai išsamus surinktos informacijos aprašymas leidžia daryti pagrįstas išvadas apie visos populiacijos nagrinėjamus požymius. Vienas iš aprašomosios statistikos privalumų yra tas, kad ji leidžia koncentruotai užrašyti informaciją, esančią duomenų masyvuose.

Svarbiausios duomenų padėties charakteristikos yra vidurkis ir mediana, apibūdinantys duomenų „centrą“. Vidurkis – tai taškas, kuris vidutiniškai artimiausias visiems statistinės eilutės elementams, apibrėžiamas formule:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j, \quad (4.1)$$

čia $\bar{x}$ – vidurkis; $x_1, x_2, \dots, x_n$ – tyrimų reikšmės.

Mediana – tai skaičius, perskiriantis variacinę eilutę į dvi maždaug lygias dalis, taigi

$$Md = \begin{cases} x_{((n+1)/2)}, & \text{kai } n - \text{nelyginis,} \\ \frac{x_{(n/2)} + x_{(n/2+1)}}{2}, & \text{kai } n - \text{lyginis.} \end{cases} \quad (4.2)$$

Pagrindinės sklaidos charakteristikos yra duomenų aibės plotis, dispersija, standartinis nuokrypis ir variacijos koeficientas.

Imties dispersija rodo duomenų sklaidą apie vidurkį ir apibrėžiama formule:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2, \quad (4.3)$$

čia n – duomenų skaičius; x_j – duomenų reikšmės; $\bar{x}$ – duomenų vidurkis.

Standartinis nuokrypis gaunamas ištraukus kvadratinę šaknį iš dispersijos:

$$s = \sqrt{s^2}. \quad (4.4)$$

Variacijos koeficientas naudojamas lyginant skirtingų duomenų aibių sklaidas ir apibrėžiamas formule:

$$cv = \frac{s}{\bar{x}}. \quad (4.5)$$

Duomenų aibės plotis apibrėžiamas kaip maksimalios ir minimalios statistinių duomenų reikšmių skirtumas.

Plotis informatyvus tik tada, kai nėra išsiskiriančių reikšmių. Dažniausiai naudojamas kvartiliais plotis. Jis apibūdina 50 % duomenų reikšmių sklaidą. Kvartilinis plotis statistikoje vaizduojamas stačiakampėmis diagramomis (4.4, 4.5 pav., 4.10, 4.11 pav., 4.21, 4.22 pav.). Stačiakampė diagrama rodo grafinį $\min, Q_1, Md, Q_3$ vaizdą.

Koreliacijos koeficientas žymimas raide r ir apibrėžiamas kaip kvadratinė šaknis iš determinacijos koeficiento:

$$r = \sqrt{r^2}, \quad (4.6)$$

čia r^2 – determinacijos koeficientas, apibrėžiamas regresinio nuokrypio kvadratų sumos ir bendro nuokrypio kvadratų sumos santykiu:

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}. \quad (4.7)$$

Koreliacijos koeficientas nematuoja netiesinės nepriklausomybės.

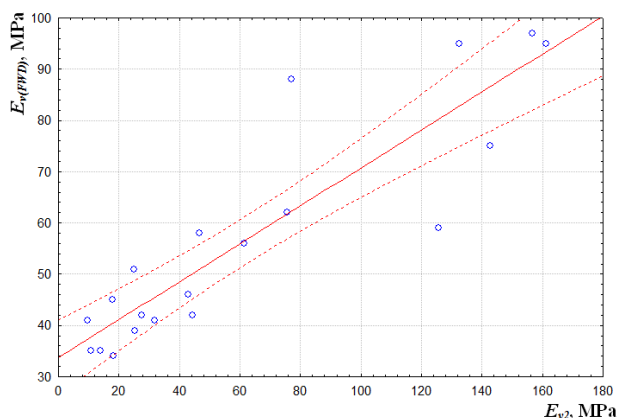
Koreliacinė analizė tarp visų matavimų parodo, ar yra tiesinė priklausomybė ($p < \alpha$, kai $\alpha = 0,05$).

Koreliacija gauta tarp minimalių ir maksimalių skirtingų deformacijos modulio reikšmių (4.1–4.3 pav., 4.6–4.9 pav., 4.12–4.20 pav., 4.23–4.26 pav.).

4.2. Žemės sankasos stiprumo matavimo rezultatų analizė

Matavimai kelio Kaunas–Marijampolė–Suvalkai eksperimentiniame ruože (16,10–16,40 km) ant žemės sankasos buvo atlikti keturiais prietaisais: statine sija „Strassentest“, dinaminiais prietaisais FWD, LWD ir ZORN ZSG 02. Mažiausia rezultatų sklaida gauta matuojant prietaisais FWD ir LWD. Didžiausia rezultatų sklaida gaunama matuojant prietaisais ZORN ZSG 02 (C priedas).

Koreliacija tarp atskirų prietaisų matavimo rezultatų: didžiausia koreliacija tarp matavimo rezultatų, gautų prietaisais „Strassentest“ ir FWD $r = 0,8952$ (4.1 pav.); mažiausia koreliacija tarp matavimo rezultatų, gautų prietaisais „Strassentest“ – ZORN ZSG 02 $r = 0,5619$ (4.3 pav.).



4.1 pav. FWD „Dynatest 8000“ ir statinės sijos „Strassentest“ matavimo, atlikto ant žemės sankasos kelio Kaunas–Marijampolė–Suvalkai eksperimentiniame ruože (16,10–16,40 km), rezultatų tarpusavio priklausomybės grafikas

Fig. 4.1. Relationship between the measuring results of the FWD Dynatest 8000 and the static beam Strassentest on the subgrade of experimental road section Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (16,10–16,40 km)

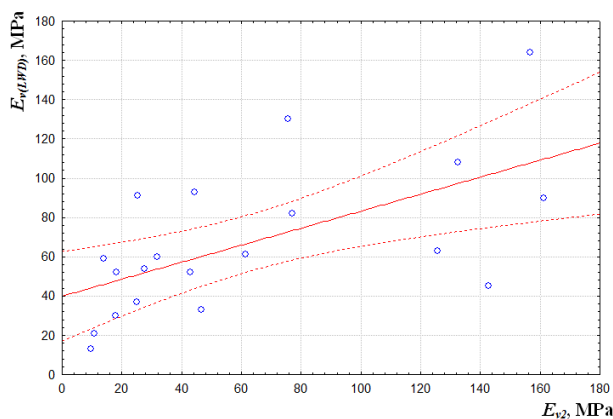
Parengus tyrimų, atliktų ant žemės sankasos Kauno eksperimentiniame ruože, duomenų deformacijos modulio, matuoto FWD „Dynatest 8000“ ir statinės sijos

„Strassentest“ prietaisais, statistinę analizę, nustatyta, kad koreliacija tarp matavimo metodų yra labai gera ($r^2 = 0,8013$, $r = 0,8925$). Tai rodo stiprų ryšį tarp FWD „Dynatest 8000“ ($E_{v(FWD)}$) ir statinės sijos „Strassentest“ (E_{v2}) deformacijos modulio matavimo rezultatų (4.1 pav.). Tokiu atveju galima būtų užrašyti tarp prietaisų nustatyto dinaminio žemės sankasos modulio ($E_{v(FWD)}$) ir statinio žemės sankasos modulio (E_{v2}) gautų matavimo rezultatų tarpusavio priklausomybės lygtį:

$$E_{v(FWD)} = 33,7181 + 0,3703E_{v2} .$$

Parengus tyrimų, atliktų ant žemės sankasos Kauno eksperimentiniame ruože, duomenų deformacijos modulio, matuoto LWD ir statinės sijos „Strassentest“ prietaisais, statistinę analizę, nustatyta, kad koreliacija tarp matavimo metodų yra gera ($r^2 = 0,3639$, $r = 0,6032$). Tai rodo ryšį tarp LWD ($E_{v(LWD)}$) ir statinės sijos „Strassentest“ (E_{v2}) deformacijos modulio matavimo rezultatų (4.2 pav.). Tokiu atveju galima būtų užrašyti tarp prietaisais nustatyto dinaminio žemės sankasos modulio ($E_{v(LWD)}$) ir statinio žemės sankasos modulio (E_{v2}) gautų matavimo rezultatų tarpusavio priklausomybės lygtį:

$$E_{v(LWD)} = 39,896 + 0,4332E_{v2} .$$



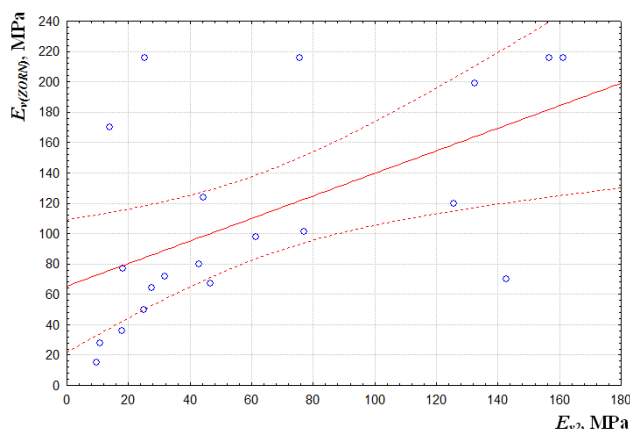
4.2 pav. LWD „Prima 100“ ir statinės sijos „Strassentest“ matavimo, atlikto ant žemės sankasos kelio Kaunas–Marijampolė–Suvalkai eksperimentiniame ruože (16,10–16,40 km), rezultatų tarpusavio priklausomybės grafikas

Fig. 4.2. Relationship between the measuring results of the LWD Prima 100 and the static beam Strassentest on the subgrade of experimental road section Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (16,10–16,40 km)

Parengus tyrimų, atliktų ant žemės sankasos Kauno eksperimentiniame ruože, duomenų deformacijos modulio, matuoto ZORN ZSG 02 ir statinės sijos „Strassentest“ prietaisais, statistinę analizę, nustatyta, kad koreliacija tarp matavimo metodų yra silpna ($r^2 = 0,3157$, $r = 0,5619$). Tai rodo silpną ryšį tarp ZORN ZSG 02 ($E_{v(ZORN)}$) ir statinės sijos „Strassentest“ (E_{v2}) deformacijos modulio matavimo rezultatų (4.3 pav.).

Tokiu atveju galima būtų užrašyti tarp prietaisų nustatyto dinaminio žemės sankasos modulio ($E_{v(ZORN)}$) ir statinio žemės sankasos modulio (E_{v2}) gautų matavimo rezultatų tarpusavio priklausomybės lygtį:

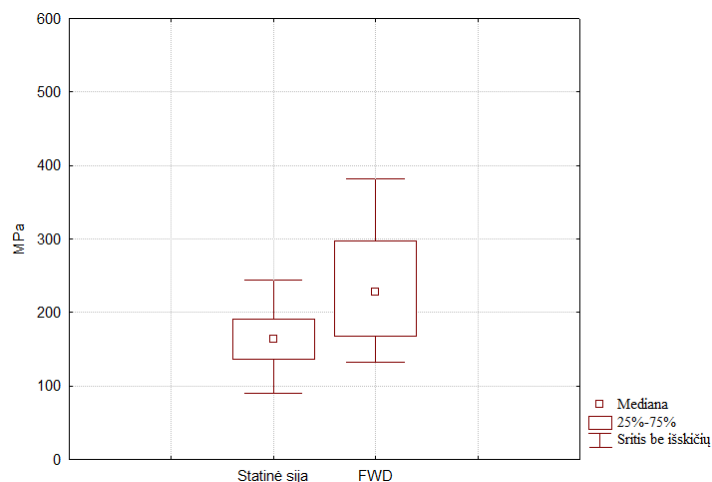
$$E_{v(ZORN)} = 65,4545 + 0,7426E_{v2}.$$



4.3 pav. ZORN ZSG 02 ir statinės sijos „Strassentest“ matavimo, atlikto ant žemės sankasos kelio Kaunas–Marijampolė–Suvalkai eksperimentiniame ruože (16,10–16,40 km), rezultatų tarpusavio priklausomybės grafikas

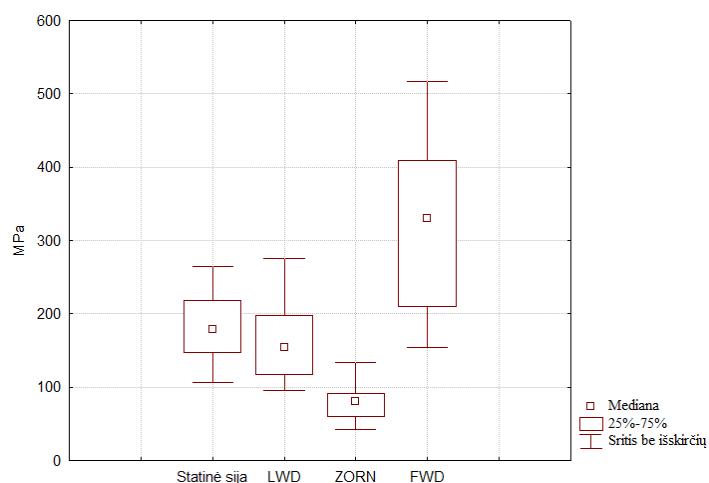
Fig. 4.3. Relationship between the measuring results of the ZORN ZSG 02 and the static beam Strassentest on the subgrade of experimental road section Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (16,10–16,40 km)

Siekiant nustatyti tyrimo duomenų sklaidą tarp matavimo prietaisų Pagirių bandomajame ruože, atlikta statistinė analizė. Duomenų sklaidos diagramos (4.4 ir 4.5 pav.) rodo kiekvienu prietaisu atskirai gautų duomenų sklaidą ant žemės sankasos – pastebimas labai didelis skirtumas tarp didžiausios ir mažiausios vertės. Matavimo duomenų su FWD rezultatų sklaida yra ypač didelė.



4.4 pav. Matavimo, atlikto ant žemės sankasos, rezultatų sklaidos diagrama (dešinė pusė)

Fig. 4.4. Dispersion plot of the measuring results on the subgrade (right side)



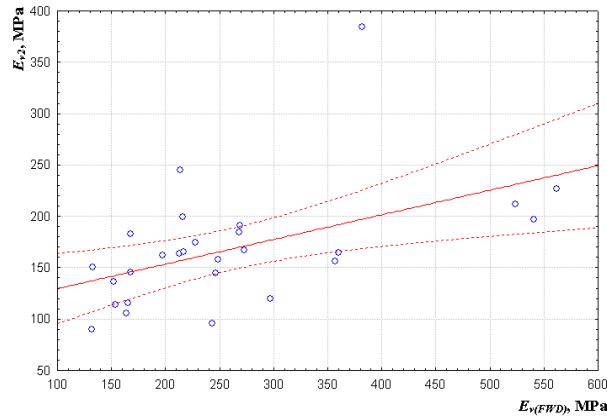
4.5 pav. Matavimo, atlikto ant žemės sankasos, rezultatų sklaidos diagrama (kairė pusė)

Fig. 4.5. Dispersion plot of the measuring results on the subgrade (left side)

Parengus tyrimų, atliktų ant žemės sankasos dešinės pusės Pagirių bandomajame ruože, duomenų deformacijos modulio, matuoto FWD „Dynatest 8000“ ir statinės sijos „Strassentest“ prietaisais (funkcinė priklausomybė $E_{v2} = f(E_{v(FWD)})$), statistinę analizę, nustatyta, kad koreliacija tarp matavimo metodų yra silpna ($r^2 = 0,2513$, $r = 0,5013$). Tai rodo silpną ryšį tarp FWD „Dynatest 8000“ ($E_{v(FWD)}$) ir statinės sijos „Strassentest“ (E_{v2}) deformacijos

modulio matavimo rezultatų (4.6 pav.). Tokiu atveju galima būtų užrašyti tarp prietaisų nustatyto dinaminio žemės sankasos modulio ($E_{v(FWD)}$) ir statinio žemės sankasos modulio (E_{v2}) gautų matavimo rezultatų tarpusavio priklausomybės lygtį:

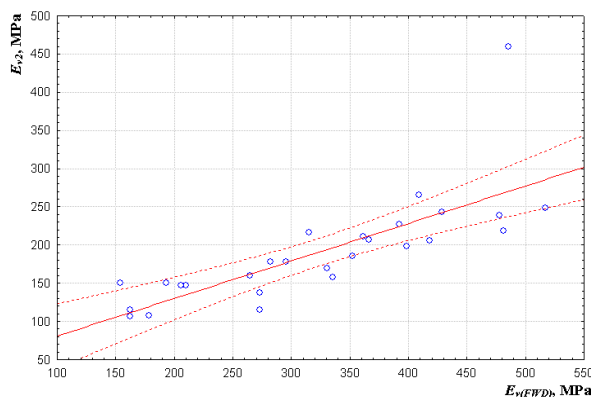
$$E_{v2} = 105,576 + 0,2397E_{v(FWD)}.$$



4.6 pav. FWD „Dynatest 8000“ ir statinės sijos „Strassentest“ matavimo ant žemės sankasos (dešinėje pusėje) Pagiriuose rezultatų tarpusavio priklausomybės grafikas
Fig. 4.6. Relationship between the measuring results of the FWD Dynatest 8000 and the static beam Strassentest on the subgrade of experimental road section in Pagiriai (right side)

Parengus tyrimų, atliktų ant žemės sankasos kairės pusės deformacijos modulio, matuoto FWD „Dynatest 8000“ ir statinės sijos „Strassentest“ prietaisais (funkcinė priklausomybė $E_{v2} = f(E_{v(FWD)})$), duomenų statistinę analizę, nustatyta, kad koreliacija tarp matavimo metodų yra gera ($r^2 = 0,5853$, $r = 0,7651$). Tai rodo stiprų ryšį tarp FWD „Dynatest 8000“ ($E_{v(FWD)}$) ir statinės sijos „Strassentest“ (E_{v2}) deformacijos modulio matavimo rezultatų. Šie rezultatai pateikti 4.7 paveiksle. Tokiu atveju galima būtų užrašyti tarp prietaisų nustatyto dinaminio žemės sankasos modulio ($E_{v(FWD)}$) ir statinio žemės sankasos modulio (E_{v2}) gautų matavimo rezultatų tarpusavio priklausomybės lygtį:

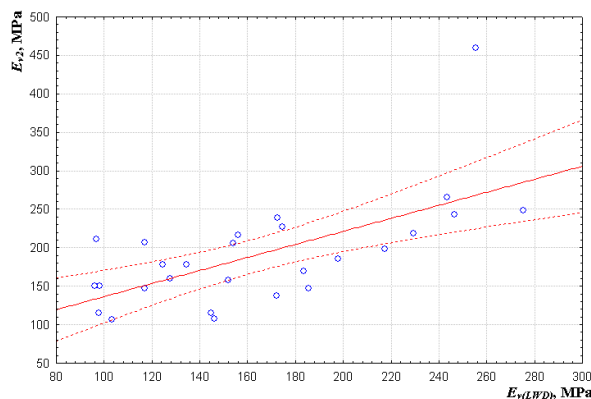
$$E_{v2} = 31,9079 + 0,4907E_{v(FWD)}.$$



4.7 pav. FWD „Dynatest 8000“ ir statinės sijos „Strassentest“ matavimo ant žemės sankasos (kairėje pusėje) Pagiriuose rezultatų tarpusavio priklausomybės grafikas
Fig. 4.7. Relationship between the measuring results of the FWD „Dynatest 8000“ and the static beam Strassentest on the subgrade of experimental road section in Pagiriai (left side)

Parengus tyrimų, atliktų ant žemės sankasos kairės pusės deformacijos modulio, matuoto LWD ir statinės sijos prietaisais (funkcinė priklausomybė $E_{v2} = f(E_{v(LWD)})$), duomenų statistinę analizę, nustatyta, kad koreliacija tarp matavimo metodų yra gera ($r^2 = 0,4150$, $r = 0,6442$). Tai rodo ryšį tarp LWD ($E_{v(LWD)}$) ir statinės sijos (E_{v2}) deformacijos modulio matavimo rezultatų (4.8 pav.). Tokiu atveju galima būtų užrašyti tarp prietaisų nustatyto dinaminio žemės sankasos modulio ($E_{v(LWD)}$) ir statinio žemės sankasos modulio (E_{v2}) gautų matavimo rezultatų tarpusavio priklausomybės lygtį:

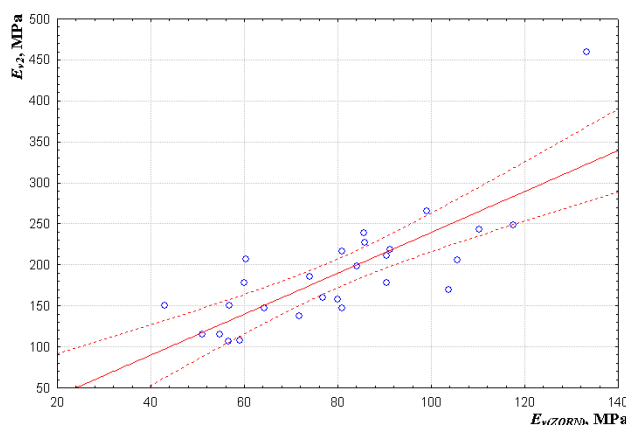
$$E_{v2} = 51,7955 + 0,8474 E_{v(LWD)}.$$



4.8 pav. LWD „Prima 100“ ir statinės sijos „Strassentest“ matavimo ant žemės sankasos (kairėje pusėje) Pagiriuose rezultatų tarpusavio priklausomybės grafikas
Fig. 4.8. Relationship between the measuring results of the LWD „Prima 100“ and the static beam „Strassentest“ on the subgrade of experimental road section in Pagiriai (left side)

Parengus tyrimų, atliktų ant žemės sankasos kairės pusės deformacijos modulio, matuoto ZORN ZSG 02 ir statinės sijos „Strassentest“ prietaisais (funkcinė priklausomybė $E_{v2} = f(E_{v(ZORN)})$), duomenų statistinę analizę, nustatyta, kad koreliacija tarp matavimo metodų yra gera ($r^2 = 0,6180$, $r = 0,7861$). Tai rodo stiprų ryšį tarp ZORN ZSG 02 ($E_{v(ZORN)}$) ir statinės sijos „Strassentest“ (E_{v2}) deformacijos modulio matavimo rezultatų (4.9 pav.). Tokiu atveju galima būtų užrašyti tarp prietaisų nustatyto dinaminio žemės sankasos modulio ($E_{v(ZORN)}$) ir statinio žemės sankasos modulio (E_{v2}) gautų matavimo rezultatų tarpusavio priklausomybės lygtį:

$$E_{v2} = -9,7836 + 2,4948E_{v(ZORN)}.$$



4.9 pav. ZORN ZSG 02 ir statinės sijos „Strassentest“ matavimo ant žemės sankasos (kairėje pusėje) Pagiriuose rezultatų tarpusavio priklausomybės grafikas

Fig. 4.9. Relationship between the measuring results of the ZORN ZSG 02 and the static beam Strassentest on the subgrade of experimental road section in Pagiriai (left side)

Remiantis atlikta statistine analize 4.1 lentelėje pateiktos matavimo ant žemės sankasos Pagirių bandomajame ruože prietaisų koreliacijos koeficientų reikšmės.

Didžiausia koreliacija gauta ant žemės sankasos kairėje pusėje deformacijos modulio, matuoto FWD „Dynatest 8000“ bei statinės sijos „Strassentest“ prietaisais ($r^2 = 0,5853$, $r = 0,7651$) ir tarp ZORN ZSG 02 bei statinės sijos „Strassentest“ ($r^2 = 0,6180$, $r = 0,7861$), tačiau dešinėje pusėje koreliacijos koeficientas nėra gero-kai mažesnis ($r^2 = 0,2513$, $r = 0,5013$). Nors ryšys tarp statinės sijos ir kitų dinami-nių prietaisų nėra labai stiprus, sklaidos diagramos parodė, kad labai pasklidę

duomenų rezultatai yra tų matavimų, kurie atlikti FWD, mažiausia sklaida gauta su statine sija ir ZORN prietaisais. Tai paaiškina skirtingos matavimo metodikos.

4.1 lentelė. Žemės sankasos matavimo prietaisų rezultatų koreliacijos koeficientų matricinė lentelė Pagirių bandomajame ruože (kairėje pusėje)

Table 4.1. Matrix of linear correlation coefficients for tested variables on subgrade in experimental section of Pagiriai (left side)

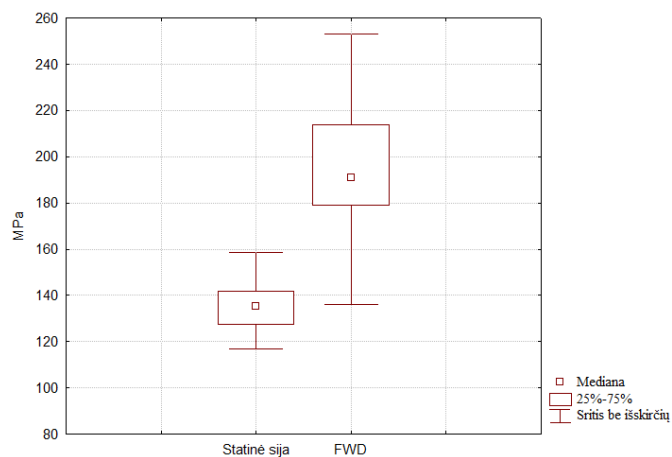
Matavimo prietaisai	FWD	Statinė sija	LWD	ZORN
FWD	1,000	0,501	0,759	0,788
Statinė sija	0,501	1,000	0,644	0,786
LWD	0,759	0,644	1,000	0,726
ZORN	0,788	0,786	0,726	1,000

4.3. Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio stiprumo matavimo rezultatų analizė

Matavimai kelio Kaunas–Marijampolė–Suvalkai eksperimentiniame ruože (16,10–16,40 km) ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio buvo atlikti trimis prietaisais: FWD „Dynatest 8000“, LWD „Prima 100“, ZORN ZSG 02. Mažiausia rezultatų sklaida gaunama matuojant prietaisais LWD, didesnė – ZORN ZSG 02. Didžiausia rezultatų sklaida gaunama matuojant prietaisais FWD „Dynatest 8000“.

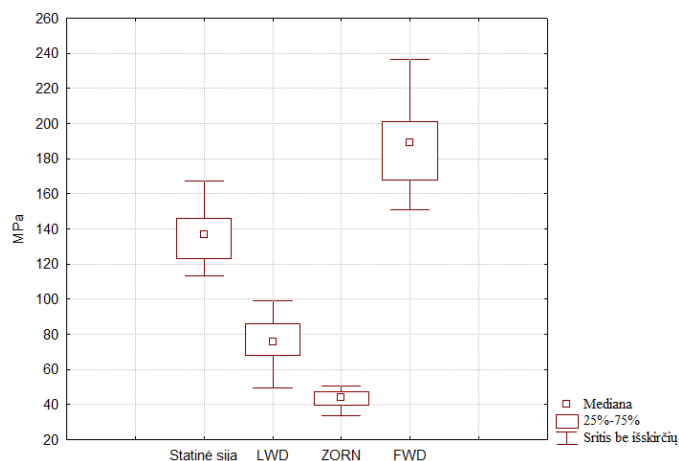
Koreliacija tarp atskirų prietaisų matavimo rezultatų: didžiausia koreliacija tarp matavimo rezultatų, gautų prietaisais LWD „Prima 100“ ir ZORN ZSG 02 $r = 0,513$; mažiausia koreliacija tarp matavimo rezultatų, gautų prietaisais FWD „Dynatest 8000“ ir LWD „Prima 100“ $r = 0,102$. Matavimai buvo atlikti tik su dinaminiais prietaisais, todėl išsamesnė statistinė tyrimų analizė pateikiama D priede.

Tyrimo duomenų sklaida tarp prietaisų bandomajame Pagirių ruože atlikta ir ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio. Duomenų sklaidos diagramos 4.10 ir 4.11 paveiksluose rodo kiekvienu prietaisu atskirai gautų duomenų sklaidą ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio – pastebimas labai didelis skirtumas tarp didžiausios ir mažiausios vertės. Matavimo duomenų su FWD „Dynatest 8000“ rezultatų sklaida yra ypač didelė. Mažiausią rezultatų sklaidą parodė ZORN ZSG 02 ir statinė sija „Strassentest“.



4.10 pav. Matavimo ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio rezultatų sklaidos diagrama (dešinė pusė)

Fig. 4.10. Dispersion plot of the measuring results on the frost blanket course (right side)



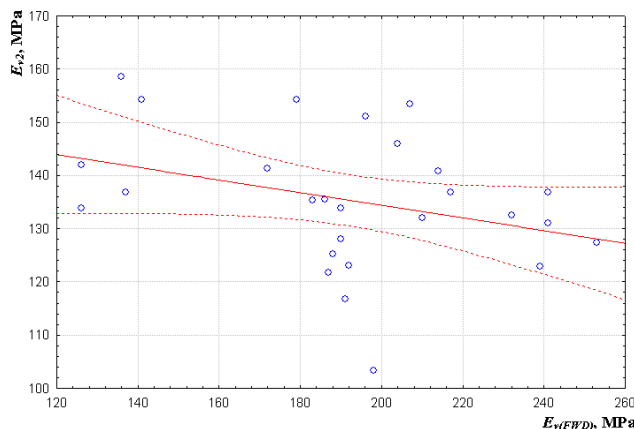
4.11 pav. Matavimo ant žemės sankasos sluoksnio rezultatų sklaidos diagrama (kairė pusė)

Fig. 4.11. Dispersion plot of the measuring results on the frost blanket course (left side)

Parengus tyrimų, atliktų ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio dešinės pusės, duomenų deformacijos modulio, matuoto FWD „Dynatest 8000“ ir statinės sijos „Strassentest“ prietaisais (funkcinė priklausomybė $E_{v2} = f(E_{v(FWD)})$), statistinę analizę, nustatyta, kad koreliacija tarp matavimo metodų yra labai silpna ($r^2 = 0,1097$, $r = -0,3312$). Tai rodo silpną ryšį tarp

FWD „Dynatest 8000“ ($E_{v(FWD)}$) ir statinės sijos „Strassentest“ (E_{v2}) deformacijos modulio matavimo rezultatų (4.12 pav.). Tokiu atveju galima užrašyti tarp prietaisais nustatyto dinaminio žemės sankasos modulio ($E_{v(FWD)}$) ir statinio žemės sankasos modulio (E_{v2}) gautų matavimo rezultatų tarpusavio priklausomybės lygtį:

$$E_{v2} = 158,1824 - 0,1189E_{v(FWD)} .$$

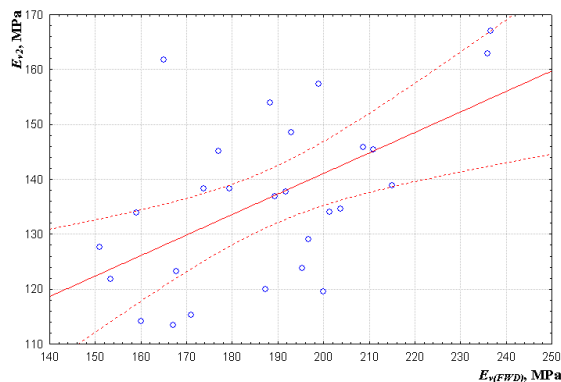


4.12 pav. FWD „Dynatest 8000“ ir statinės sijos „Strassentest“ matavimo ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio (dešinėje pusėje) Pagiriuose rezultatų tarpusavio priklausomybės grafikas

Fig. 4.12. Relationship between the measuring results of the FWD Dynatest 8000 and the static beam Strassentest on the frost blanket course of experimental road section in Pagiriai (right side)

Parengus tyrimų, atliktų ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio kairės pusės, duomenų deformacijos modulio, matuoto FWD „Dynatest 8000“ ir statinės sijos „Strassentest“ prietaisais (funkcinė priklausomybė $E_{v2} = f(E_{v(FWD)})$), statistinę analizę, nustatyta, kad koreliacija tarp matavimo metodų yra gera ($r^2 = 0,3060$, $r = 0,5532$). Tai rodo ryšį tarp FWD „Dynatest 8000“ ($E_{v(FWD)}$) ir statinės sijos „Strassentest“ (E_{v2}) deformacijos modulio matavimo rezultatų (4.13 pav.). Tokiu atveju galima užrašyti tarp prietaisais nustatyto dinaminio žemės sankasos modulio ($E_{v(FWD)}$) ir statinio žemės sankasos modulio (E_{v2}) gautų matavimo rezultatų tarpusavio priklausomybės lygtį:

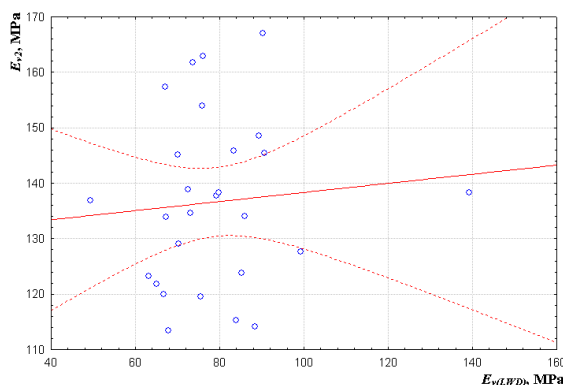
$$E_{v2} = 66,3428 + 0,3737E_{v(FWD)} .$$



4.13 pav. FWD „Dynatest 8000“ ir statinės sijos „Strassentest“ matavimo ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio (kairėje pusėje) rezultatų tarpusavio priklausomybės grafikas
Fig. 4.13. Relationship between the measuring results of the FWD Dynatest 8000 and the Strassentest on the frost blanket course of experimental road section in Pagiriai (left side)

Parengus tyrimų, atliktų ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio kairės pusės, duomenų deformacijos modulio, matuoto LWD ir statinės sijos „Strassentest“ prietaisais (funkcinė priklausomybė $E_{v2} = f(E_{v(LWD)})$), statistinę analizę, nustatyta, kad koreliacija tarp matavimo metodų yra labai silpna ($r^2 = 0,0075$, $r = 0,0864$). Tai rodo labai silpną ryšį tarp LWD ($E_{v(LWD)}$) ir statinės sijos „Strassentest“ (E_{v2}) deformacijos modulio matavimo rezultatų (4.14 pav.). Tokiu atveju galima užrašyti tarp prietaisais nustatyto dinaminio žemės sankasos modulio ($E_{v(LWD)}$) ir statinio žemės sankasos modulio (E_{v2}) gautų matavimo rezultatų tarpusavio priklausomybės lygtį:

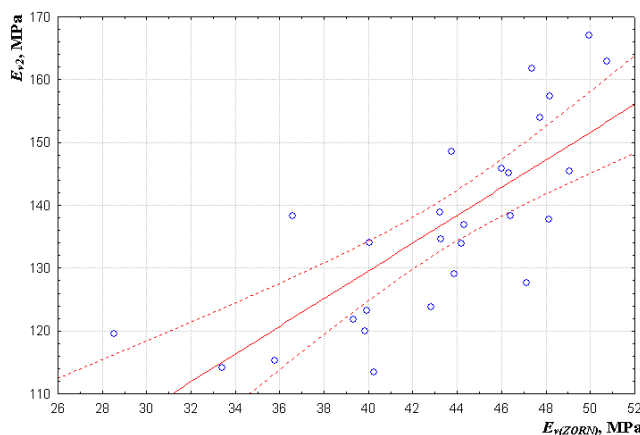
$$E_{v2} = 130,1339 + 0,0821E_{v(LWD)} .$$



4.14 pav. LWD „Prima 100“ ir statinės sijos „Strassentest“ matavimo ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio (kairėje pusėje) rezultatų tarpusavio priklausomybės grafikas
Fig. 4.14. Relationship between the measuring results of the LWD Prima 100 and the Strassentest on the frost blanket course of experimental road section in Pagiriai (left side)

Parengus tyrimų, atliktų ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio kairės pusės, duomenų deformacijos modulio, matuoto ZORN ZSG 02 ir statinės sijos „Strassentest“ prietaisais (funkcinė priklausomybė $E_{v2} = f(E_{v(ZORN)})$), statistinę analizę, nustatyta, kad koreliacija tarp matavimo metodų yra gera ($r^2 = 0,5830$, $r = 0,7636$). Tai rodo stiprų ryšį tarp ZORN ZSG 02 ($E_{v(ZORN)}$) ir statinės sijos „Strassentest“ (E_{v2}) deformacijos modulio matavimo rezultatų (4.15 pav.). Tokiu atveju galima būtų užrašyti tarp prietaisų nustatyto dinaminio žemės sankasos modulio ($E_{v(ZORN)}$) ir statinio žemės sankasos modulio (E_{v2}) gautų matavimo rezultatų tarpusavio priklausomybės lygtį:

$$E_{v2} = 41,302 + 2,2066E_{v(ZORN)}.$$



4.15 pav. ZORN ZSG 02 ir statinės sijos „Strassentest“ matavimo ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio (kairėje pusėje) Pagiriuose rezultatų tarpusavio priklausomybės grafikas

Fig. 4.15. Relationship between the measuring results of the ZORN ZSG 02 and the static beam Strassentest on the frost blanket course of experimental road section in Pagiriai (left side)

Remiantis atlikta statistine analize 4.2 lentelėje pateiktos koreliacijos koeficientų reikšmės tarp matavimo prietaisų ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio Pagirių bandomajame ruože.

Sklaidos diagramos parodė didelę matavimų, atliktų FWD, duomenų rezultatų sklaidą, mažiausia sklaida gauta su ZORN prietaisu. Didžiausia koreliacija gauta ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio kairėje pusėje deformacijos modulio, matuoto ZORN ZSG 02 ir statinės sijos „Strassentest“ prietaisais ($r^2 = 0,5830$, $r = 0,7636$). Nors ryšys tarp statinės sijos ir kitų dinaminių prietaisų nėra labai stiprus, tai paaiškina skirtingos matavimo metodikos.

4.2 lentelė. Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio matavimo prietaisų rezultatų koreliacijos koeficientų matricinė lentelė Pagirių bandomajame ruože (kairėje pusėje)

Table 4.2. Matrix of linear correlation coefficients for tested variables of frost blanket course in experimental section of Pagiriai (left side)

Matavimo prietaisai	FWD	Statinė sija	LWD	ZORN
FWD	1,00	0,553	0,004	0,356
Statinė sija	0,553	1,00	0,086	0,764
LWD	0,004	0,086	1,00	0,139
ZORN	0,356	0,764	0,139	1,00

4.4. Dangos pagrindo stiprumo matavimo rezultatų analizė

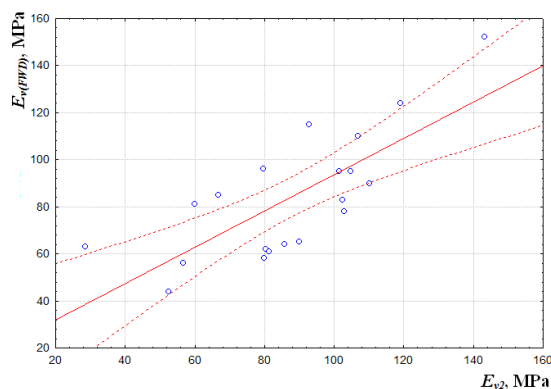
Matavimai kelio Kaunas–Marijampolė–Suvalkai eksperimentiniame ruože (16,10–16,40 km) ant žvyro sluoksnio buvo atlikti visais keturiais prietaisais. Mažiausia rezultatų sklaida gauta matuojant LWD, didesnė – ZORN ZSG 02. Didžiausia rezultatų sklaida gauta matuojant FWD „Dynatest 8000“ (C priedas).

Koreliacija tarp atskirų prietaisų matavimo rezultatų:

- didžiausia koreliacija tarp matavimo rezultatų, gautų prietaisais „Strassentest“ ir FWD, $r = 0,755$ (4.16 pav.);
- matavimo rezultatų koreliacija tarp matavimo rezultatų, gautų prietaisais „Strassentest“ ir LWD, $r = 0,689$ (4.17 pav.), truputį didesnė – „Strassentest“ ir „ZORN ZSG 02“, $r = 0,69$ (4.14 pav.).

Atlikus tyrimų duomenų ant žvyro 0/32 sluoksnio kelio Kaunas–Marijampolė–Suvalkai bandomajame ruože (16,10–16,40 km) deformacijos modulio, matuoto FWD „Dynatest“ 8000 ir statinės sijos „Strassentest“ prietaisais, statistinę analizę, nustatyta, kad koreliacija tarp matavimo metodų yra gera ($r^2 = 0,5698$, $r = 0,7548$). Tai rodo stiprų ryšį tarp FWD „Dynatest 8000“ ($E_{v(FWD)}$) ir statinės sijos „Strassentest“ (E_{v2}) deformacijos modulio matavimo rezultatų, kurie yra pateikti 4.17 paveiksle. Tokiu atveju galima užrašyti tarp prietaisais nustatyto dinaminio žemės sankasos modulio ($E_{v(FWD)}$) ir statinio žemės sankasos modulio (E_{v2}) gautų matavimo rezultatų tarpusavio priklausomybės lygtį:

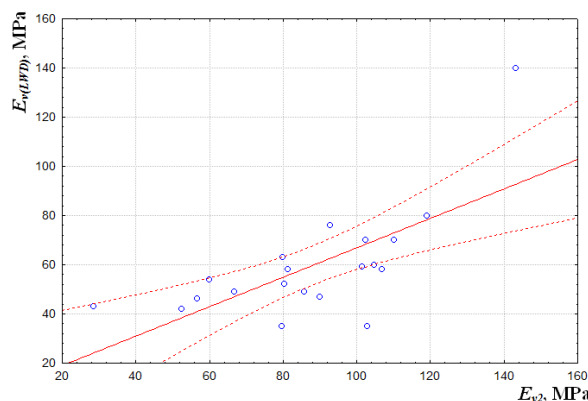
$$E_{v(FWD)} = 16,5304 + 0,7714E_{v2} .$$



4.16 pav. FWD ir „Strassentest“ matavimo ant žvyro sluoksnio kelio Kaunas–Marijampolė–Suvalkai bandomajame ruože (16,10–16,40 km) rezultatų tarpusavio priklausomybės grafikas
Fig. 4.16. Relationship between the measuring results of the FWD and the Strassentest on gravel base course of experimental road section Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (16,10–16,40 km)

Atlikus tyrimų, ant žvyro 0/32 sluoksnio, duomenų deformacijos modulio, matuoto LWD ir statinės sijos „Strassentest“ prietaisais, statistinę analizę, nustatyta, kad koreliacija tarp matavimo metodų yra gera ($r^2 = 0,4747$, $r = 0,6890$). Tai rodo gerą ryšį tarp LWD ($E_{v(LWD)}$) ir statinės sijos „Strassentest“ (E_{v2}) deformacijos modulio matavimo rezultatų (4.17 pav.). Tokiu atveju galima būtų užrašyti tarp prietaisais nustatyto dinaminio žemės sankasos modulio ($E_{v(LWD)}$) ir statinio žemės sankasos modulio (E_{v2}) gautų matavimo rezultatų tarpusavio priklausomybės lygtį:

$$E_{v(LWD)} = 7,0551 + 0,5987 E_{v2}.$$

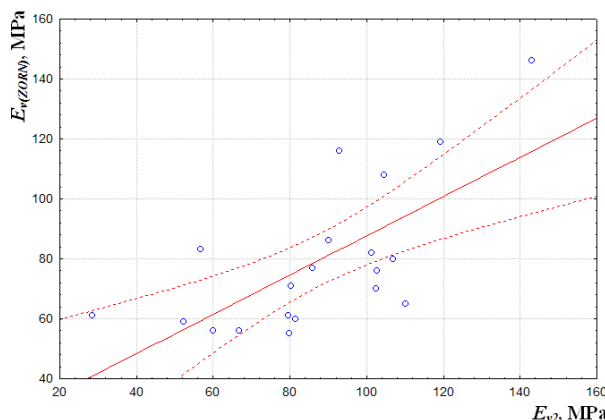


4.17 pav. LWD ir „Strassentest“ matavimo ant žvyro pagrindo sluoksnio kelio Kaunas–Marijampolė–Suvalkai bandomajame ruože (16,10–16,40 km) rezultatų tarpusavio priklausomybės grafikas

Fig. 4.17. Relationship between the measuring results of the LWD and the Strassentest on the gravel base course of experimental road section Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (16,10–16,40 km)

Atlikus tyrimų ant dangos pagrindo kairės pusės, duomenų deformacijos modulio, matuoto ZORN ZSG 02 ir statinės sijos „Strassentest“ prietaisais, statistinę analizę, nustatyta, kad koreliacija tarp matavimo metodų yra gera ($r^2 = 0,4748$, $r = 0,6890$). Tai rodo gerą ryšį tarp ZORN ZSG 02 ($E_{v(ZORN)}$) ir statinės sijos „Strassentest“ (E_{v2}) deformacijos modulio matavimo rezultatų (4.18 pav.). Tokiu atveju galima užrašyti tarp prietaisais nustatyto dinaminio žemės sankasos modulio ($E_{v(ZORN)}$) ir statinio žemės sankasos modulio (E_{v2}) gautų matavimo rezultatų tarpusavio priklausomybės lygtį:

$$E_{v(ZORN)} = 22,1951 + 0,6549E_{v2}.$$



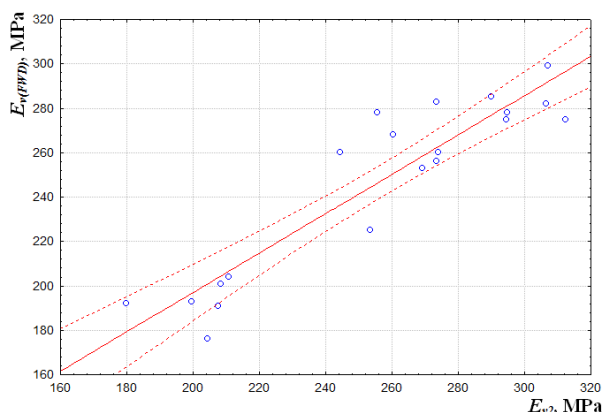
4.18 pav. ZORN ZSG 02 ir statinės sijos „Strassentest“ matavimo ant žvyro pagrindo sluoksnio kelio Kaunas–Marijampolė–Suvalkai bandomajame ruože (16,10–16,40 km) rezultatų tarpusavio priklausomybės grafikas

Fig. 4.18. Relationship between the measuring results of the ZORN ZSG 02 and the static beam Strassentest on the gravel base course of experimental road section Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (16,10–16,40 km)

Ant dolomitinės skaldos sluoksnio matavimai buvo atlikti trimis prietaisais: statine sija „Strassentest“, FWD, LWD. Prietaisas ZORN ZSG 02 šiuose ir tolimesniuose matavimuose nenaudotas, nes jo matavimo galimybės yra iki 180–200 MN/m². Mažiausia rezultatų sklaida gaunama naudojant prietaisais LWD, gerokai didesnė – matuojant prietaisais „Strassentest“ ir FWD (D priedas).

Koreliacija tarp matavimo atskirais prietaisais rezultatų:

- didžiausia koreliacija tarp rezultatų, gautų prietaisais statine sija „Strassentest“ ir FWD, $r = 0,922$ (4.19 pav.);
- mažiausia koreliacija tarp rezultatų, gautų prietaisais statine sija „Strassentest“ ir LWD, $r = 0,514$ (4.20 pav.).



4.19 pav. FWD „Dynatest 8000“ ir statinės sijos „Strassentest“ matavimo ant granitinės skaldos pagrindo sluoksnio kelio Kaunas–Marijampolė–Suvalkai bandomajame ruože (16,10–16,40 km) rezultatų tarpusavio priklausomybės grafikas

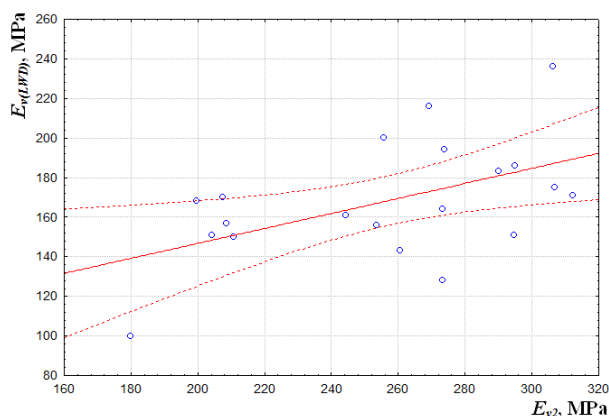
Fig. 4.19. Relationship between the measuring results of the FWD Dynatest 8000 and the static beam Strassentest on the granitic base course of experimental road section Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (16,10–16,40 km)

Parengus tyrimų, atliktų ant granitinės skaldos sluoksnio, deformacijos modulio, matuoto FWD „Dynatest 8000“ ir statinės sijos „Strassentest“ prietaisais, duomenų statistinę analizę, nustatyta, kad koreliacija tarp matavimo metodų yra labai gera ($r^2 = 0,8501$, $r = 0,9220$). Tai rodo stiprų ryšį tarp FWD „Dynatest 8000“ ($E_{v(FWD)}$) ir statinės sijos „Strassentest“ (E_{v2}) deformacijos modulio matavimo rezultatų (4.19 pav.). Tokiu atveju galima užrašyti tarp prietaisais nustatyto dinaminio žemės sankasos modulio ($E_{v(FWD)}$) ir statinio žemės sankasos modulio (E_{v2}) gautų matavimo rezultatų tarpusavio priklausomybės lygtį:

$$E_{v(FWD)} = 19,6904 + 0,8868E_{v2}.$$

Parengus tyrimų, atliktų ant dangos pagrindo kairės pusės, deformacijos modulio, matuoto LWD ir statinės sijos „Strassentest“ prietaisais, duomenų statistinę analizę, nustatyta, kad koreliacija tarp matavimo metodų yra vidutiniška ($r^2 = 0,2648$, $r = 0,5146$). Tai rodo gerą ryšį tarp LWD ($E_{v(LWD)}$) ir statinės sijos „Strassentest“ (E_{v2}) deformacijos modulio matavimo rezultatų (4.20 pav.). Tokiu atveju galima užrašyti tarp prietaisų nustatyto dinaminio žemės sankasos modulio ($E_{v(LWD)}$) ir statinio žemės sankasos modulio (E_{v2}) gautų matavimo rezultatų tarpusavio priklausomybės lygtį:

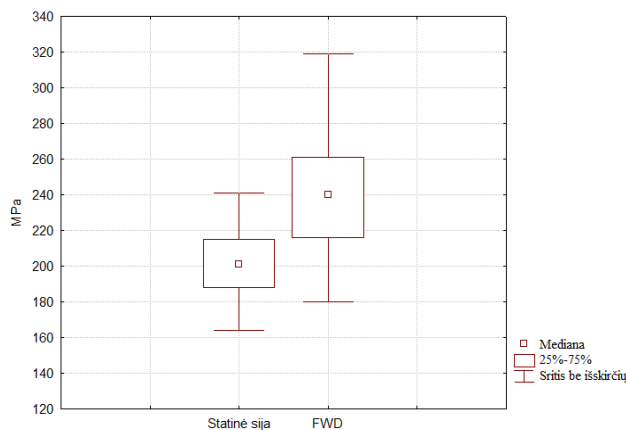
$$E_{v(LWD)} = 71,1131 + 0,3785E_{v2}.$$



4.20 pav. LWD „Prima 100“ ir statinės sijos „Strassentest“ matavimo ant dolomitinės skaldos kelio Kaunas–Marijampolė–Suvalkai bandomajame ruože (16,10–16,40 km) rezultatų tarpusavio priklausomybės grafikas

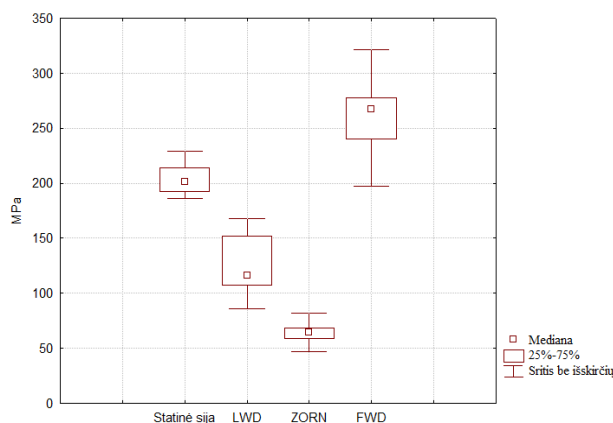
Fig. 4.20. Relationship between the measuring results of the LWD Prima 100 and the static beam Strassentest on the dolomite base course of experimental road section Kaunas–Marijampolė–Suvalkai (16,10–16,40 km)

Tyrimo duomenų sklaida tarp prietaisų bandomajame Pagirių ruože atlikta ir ant dangos pagrindo sluoksnio. Duomenų sklaidos diagramos 4.21 ir 4.22 pav. rodo kiekvienu prietaisu atskirai gautų duomenų sklaidą ant dangos pagrindo sluoksnio – pastebimas didelis skirtumas tarp didžiausios ir mažiausios vertės. Matavimo duomenų su FWD rezultatų sklaida yra ypač didelė, mažiausia sklaida gauta tarp sijos ir ZORN matavimo rezultatų.



4.21 pav. Matavimo ant dangos pagrindo sluoksnio rezultatų sklaidos diagrama (dešinė pusė)

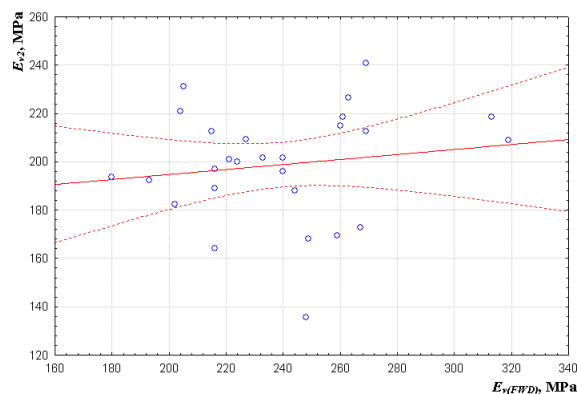
Fig. 4.21. Dispersion plot of the measuring results on the base course (right side)



4.22 pav. Matavimo ant dangos pagrindo sluoksnio rezultatų sklaidos diagrama (kairė pusė)

Fig. 4.22. Dispersion plot of the measuring results on the base course (left side)

Parengus tyrimų, atliktų ant dangos pagrindo dešinės pusės, deformacijos modulio, matuoto FWD „Dynatest 8000“ ir statinės sijos „Strassentest“ prietaisais (funkcinė priklausomybė $E_{v2} = f(E_{v(FWD)})$), duomenų statistinę analizę, nustatyta, kad koreliacija tarp matavimo metodų yra labai silpna ($r^2 = 0,0221$, $r = 0,1488$). Tai rodo silpną ryšį tarp FWD „Dynatest 8000“ ($E_{v(FWD)}$) ir statinės sijos „Strassentest“ (E_{v2}) deformacijos modulio matavimo rezultatų (4.23 pav.).



4.23 pav. FWD „Dynatest 8000“ ir statinės sijos „Strassentest“ matavimo ant dangos pagrindo (dešinėje pusėje) Pagiriuose rezultatų tarpusavio priklausomybės grafikas

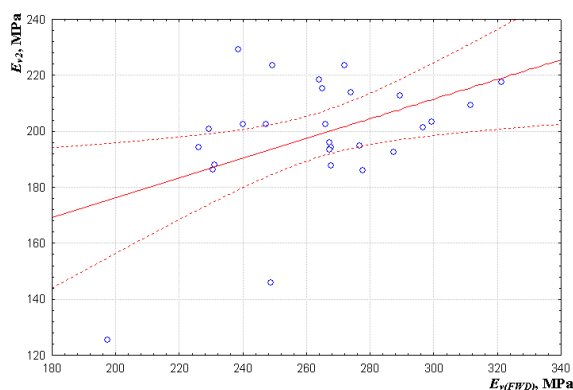
Fig. 4.23. Relationship between the measuring results of the FWD Dynatest 8000 and the static beam Strassentest on the base course of experimental road section in Pagiriai (right side)

Tokiu atveju galima užrašyti tarp prietaisais nustatyto dinaminio žemės sankasos modulio ($E_{v(FWD)}$) ir statinio žemės sankasos modulio (E_{v2}) gautų matavimo rezultatų tarpusavio priklausomybės lygtį:

$$E_{v2} = 174,0651 + 0,1034E_{v(FWD)} .$$

Parengus tyrimų, atliktų ant dangos pagrindo kairės pusės, deformacijos modulio, matuoto FWD „Dynatest 8000“ ir statinės sijos „Strassentest“ prietaisais (funkcinė priklausomybė $E_{v2} = f(E_{v(FWD)})$), duomenų statistinę analizę, nustatyta, kad koreliacija tarp matavimo metodų yra silpna ($r^2 = 0,2062$, $r = 0,4541$). Tai rodo silpną ryšį tarp FWD „Dynatest 8000“ ($E_{v(FWD)}$) ir statinės sijos „Strassentest“ (E_{v2}) deformacijos modulio matavimo rezultatų (4.24 pav.). Tokiu atveju galima užrašyti tarp prietaisais nustatyto dinaminio žemės sankasos modulio ($E_{v(FWD)}$) ir statinio žemės sankasos modulio (E_{v2}) gautų matavimo rezultatų tarpusavio priklausomybės lygtį:

$$E_{v2} = 105,4712 + 0,3535E_{v(FWD)} .$$

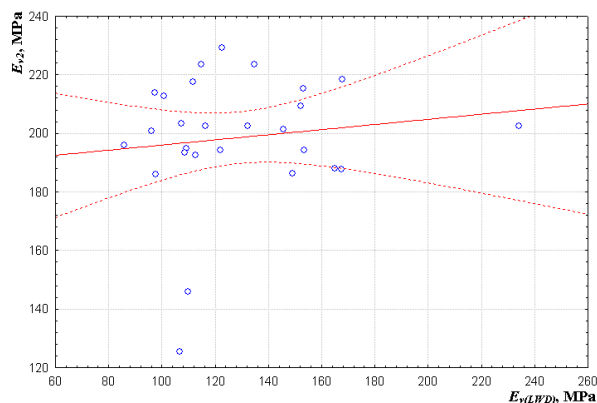


4.24 pav. FWD „Dynatest 8000“ ir statinės sijos „Strassentest“ matavimo ant dangos pagrindo (kairėje pusėje) Pagiriuose rezultatų tarpusavio priklausomybės grafikas

Fig. 4.24. Relationship between the measuring results of the FWD Dynatest 8000 and the static beam Strassentest on the base course of experimental road section in Pagiriai (left side)

Parengus tyrimų, atliktų ant dangos pagrindo kairės pusės, deformacijos modulio, matuoto LWD ir statinės sijos „Strassentest“ prietaisais (funkcinė priklausomybė $E_{v2} = f(E_{v(LWD)})$), duomenų statistinę analizę, nustatyta, kad koreliacija tarp matavimo metodų yra labai silpna ($r^2 = 0,0162$, $r = 0,1275$). Tai rodo labai silpną ryšį tarp LWD ($E_{v(LWD)}$) ir statinės sijos „Strassentest“ (E_{v2}) deformacijos modulio matavimo rezultatų (4.25 pav.). Tokiu atveju galima užrašyti tarp prietaisais nustatyto dinaminio žemės sankasos modulio ($E_{v(LWD)}$) ir statinio žemės sankasos modulio (E_{v2}) gautų matavimo rezultatų tarpusavio priklausomybės lygtį:

$$E_{v2} = 187,2464 + 0,0878E_{v(LWD)} .$$

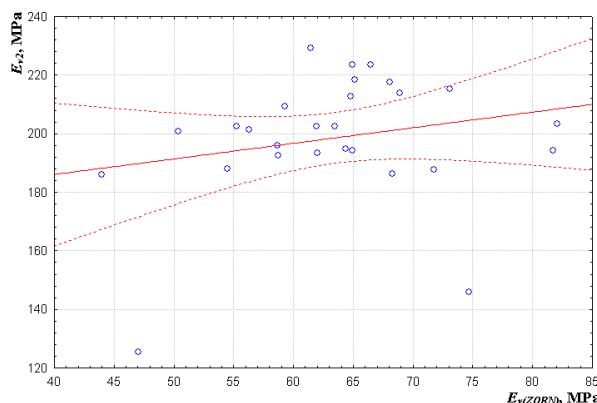


4.25 pav. LWD „Prima 100“ ir statinės sijos „Strassentest“ matavimo rezultatų tarpusavio priklausomybės grafikas ant dangos pagrindo (kairėje pusėje) Pagiriuose

Fig. 4.25. Relationship between the measuring results of the LWD Prima 100 and the static beam Strassentest on the base course of experimental road section in Pagiriai (left side)

Parengus tyrimų, atliktų ant dangos pagrindo kairės pusės, deformacijos modulio, matuoto ZORN ZSG 02 ir statinės sijos prietaisais (funkcinė priklausomybė $E_{v2} = f(E_{v(ZORN)})$), duomenų statistinę analizę, nustatyta, kad koreliacija tarp matavimo metodų yra labai silpna ($r^2 = 0,0484$, $r = 0,22$). Tai rodo silpną ryšį tarp ZORN ZSG 02 ($E_{v(ZORN)}$) ir statinės sijos „Strassentest“ (E_{v2}) deformacijos modulio matavimo rezultatų (4.26 pav.). Tokiu atveju galima užrašyti tarp prietaisais nustatyto dinaminio žemės sankasos modulio ($E_{v(ZORN)}$) ir statinio žemės sankasos modulio (E_{v2}) gautų matavimo rezultatų tarpusavio priklausomybės lygtį:

$$E_{v2} = 164,7536 + 0,5327 E_{v(ZORN)} .$$



4.26 pav. Lengvo dinaminio prietaiso ZORN ZSG 02 ir statinės sijos „Strassentest“ matavimo ant dangos pagrindo (kairėje pusėje) rezultatų tarpusavio priklausomybės grafikas

Fig. 4.26. Relationship between the measuring results of the ZORN ZSG 02 and the static beam Strassentest on the base course of experimental road section in Pagiriai (left side)

Remiantis atlikta statistine analize, 4.3 lentelėje pateiktos matavimo ant dangos pagrindo sluoksnio Pagirių bandomajame ruože prietaisų koreliacijos koeficientų reikšmės.

4.3 lentelė. Dangos pagrindo matavimo prietaisų rezultatų koreliacijos koeficientų matricinė lentelė Pagirių bandomajame ruože (kairėje pusėje)

Table 4.3. Matrix of linear correlation coefficients for tested variables of base course in experimental section of Pagiriai (left side)

Matavimo prietaisai	FWD	Statinė sija	LWD	ZORN
FWD	1,000	0,454	–0,135	0,271
Statinė sija	0,454	1,000	0,128	0,220
LWD	–0,135	0,128	1,000	0,182
ZORN	0,271	0,220	0,182	1,000

Skaidos diagramos parodė, kad matavimo duomenų rezultatų sklaida yra didelė, matavimų, atliktų FWD, mažiausia sklaida gauta su sija ir ZORN prietaisu. Atliktų tyrimų ant dangos pagrindo koreliacijos rezultatai tarp visų prietaisų gauti labai prasti. Didžiausias matavimo rezultatų koreliacijos koeficientas ant dangos pagrindo kairėje pusėje nustatytas tarp statinės sijos „Strassentest“ ir FWD „Dynatest 8000“, koreliacijos koeficientas $r = 0,4541$.

4.5. Siūlomas redukcijos koeficientas ir jo nustatymas

Siūlomo redukcijos koeficiento k^* , skirto palyginti statiniais ir dinaminiais matavimo metodais gautus rezultatus, matematinė išraiška:

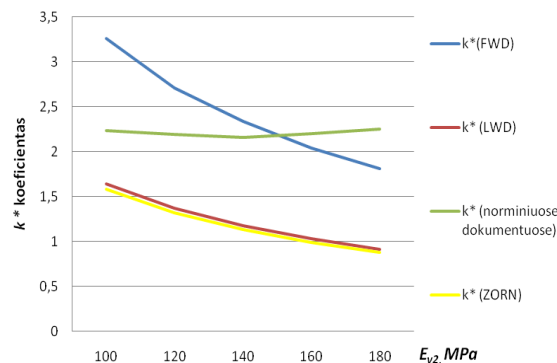
$$k^* = \frac{E_{v2}}{E_{vd}} \pm \Delta k. \quad (4.8)$$

Analizuojant matavimus ant skirtingų konstrukcijos sluoksnių buvo laikoma, kad Puasono koeficientas – nekintamas ($\nu = \text{const}$), temperatūrų įtaka nėra vertinama (į temperatūros įtaką būtina atsižvelgti vertinant stiprumo matavimus ant asfalto sluoksnių). Atliekant matavimus su FWD, inercija taip pat nėra vertinama. Kiekvieno konstrukcijos sluoksnio redukcijos koeficiento k^* prilyginimas norminiuose dokumentuose (Bandymo dinaminio prietaisu... 1995) siūlomam pateiktas 4.4–4.6 lentelėse. E_{v2}/E_{vd} santykis pateiktas pagal norminiuose dokumentuose rekomenduojamą, o k^* reikšmės mūsų siūlomos kiekvienam prietaisui atskirai. Šio koeficiento kitimas grafiškai pateiktas 4.27–4.29 paveiksluose.

4.4 lentelė. Atliktų matavimų ant žemės sankasos redukcijos koeficiento k^* prilyginimas norminiuose dokumentuose siūlomam

Table 4.4. Adjustment of reduction coefficient k^* for the measurements on the subgrade to the suggested in normative documents

E_{v2}/E_{vd}	$k^*(FWD)$	Δk	$k^*(LWD)$	Δk	$k^*(ZORN)$	Δk
2,25	1,81	44	0,91	134	0,88	137
2,20	2,04	16	1,03	117	0,99	121
2,16	2,33	17	1,17	99	1,13	103
2,19	2,71	52	1,36	83	1,32	87
2,23	3,26	103	1,64	59	1,58	65



4.27 pav. Atliktų matavimų ant žemės sankasos redukcijos koeficiento k^* prilyginimas siūlomam norminiuose dokumentuose

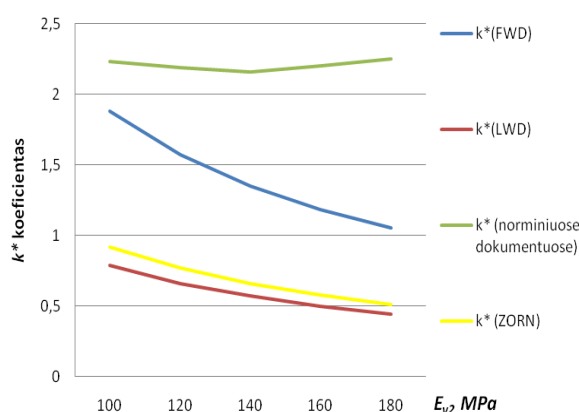
Fig. 4.27. Adjustment of reduction coefficient k^* for the measurements on the subgrade to the suggested in normative documents

Koeficiento k^* norminė kreivė (Bandymo dinaminio prietaisu... 1995) parodo E_{vd} (dinaminis deformacijos modulis) santykį su E_{v2} (statinis deformacijos modulis). Šis santykis kinta beveik tiesiškai intervale tarp 100 ir 180 MPa. Siūlomas koeficientas E_{v2}/E_{vd} kinta nuo 2,16 iki 2,25. Siūlomo koeficiento kitimas, matuojant FWD ant žemės sankasos, parodytas mėlyna kreive. Koeficientas kinta nuo 1,81 iki 3,26, t. y. santykis tarp norminio ir mūsų siūlomo koeficiento skiriasi 50 %, išskyrus vieną tašką E_{v2} , kuriame 150 MPa santykis yra lygus 1. Raudona kreivė rodo koeficiento kitimą, išmatuotą LWD prietaisu. Koeficientas nuo 0,91 iki 1,64, t. y. santykis su norminiuose dokumentuose siūlomu yra 40 %, o kitu atveju 70 % mažesnis už norminį. Labai panašus koeficientas gaunamas atlikus matavimus su ZORN prietaisu (geltona linija) – koeficientas kinta nuo 0,88 iki 1,58, t. y. santykis yra 40 %, o kitas 70 % mažesnis už norminį koeficientą.

4.5 lentelė. Atliktų matavimų ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio redukcijos koeficiento k^* prilyginimas norminiuose dokumentuose siūlomam

Table 4.5. Adjustment of reduction coefficient k^* for the measurements of frost blanket course to the suggested in normative documents

E_{v2}/E_{vd}	$k^*(FWD)$	Δk	$k^*(LWD)$	Δk	$k^*(ZORN)$	Δk
2,25	1,05	120	0,44	181	0,51	174
2,20	1,18	102	0,50	170	0,58	162
2,16	1,35	81	0,57	159	0,66	150
2,19	1,57	62	0,66	153	0,77	142
2,23	1,88	35	0,79	144	0,92	131



4.28 pav. Atliktų matavimų ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio redukcijos koeficiento k^* prilyginimas norminiuose dokumentuose siūlomam

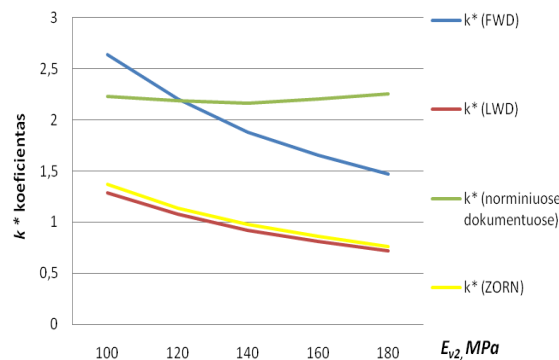
Fig. 4.28. Adjustment of reduction coefficient k^* for the measurements of frost blanket course to the suggested in normative documents

Siūlomas koeficientas, matuojant FWD ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio, kinta nuo 1,05 iki 1,88, t. y. santykis su norminiuose dokumentuose siūlomu sudaro 50 %, o kitu atveju 20 % mažesnis už norminį. Šiuo atveju sankirtos taškų nėra. Mažųjų prietaisų (LWD ir ZORN) skirtumai yra šiek tiek didesni nei prieš tai minėtų. $k^*(LWD)$ kinta nuo 0,44 iki 0,79, o santykis su norminiu 20 % ir atitinkamai 35 % mažesnis už norminį. Koeficientas $k^*(ZORN)$, lyginant su prieš tai aptartu, skiriasi daugiau ir kinta nuo 0,51 iki 0,92, santykis su norminiu koeficientu apie 20 % ir atitinkamai 40 % mažesnis už norminį.

4.6 lentelė. Atliktų matavimų ant dangos pagrindo sluoksnio redukcijos koeficiento k^* prilyginimas norminiuose dokumentuose siūlomam

Table 4.6. Adjustment of reduction coefficient k^* for the measurements on the base course to the suggested in normative documents

E_{v2}/E_{vd}	$k^*(FWD)$	Δk	$k^*(LWD)$	Δk	$k^*(ZORN)$	Δk
2,25	1,47	78	0,72	153	0,76	149
2,20	1,65	55	0,81	139	0,86	134
2,16	1,88	28	0,92	124	0,98	118
2,19	2,20	1	1,08	111	1,14	105
2,23	2,64	41	1,29	94	1,37	86



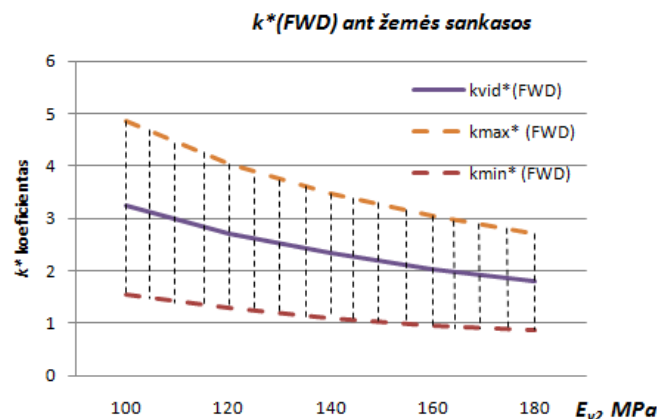
4.29 pav. Atliktų matavimų ant dangos pagrindo sluoksnio redukcijos koeficiento k^* prilyginimas norminiuose dokumentuose siūlomam

Fig. 4.29. Adjustment of reduction coefficient k^* for the measurements on the base course to the suggested in normative documents

Siūlomas koeficientas, matuojant FWD ant dangos pagrindo sluoksnio, kinta nuo 1,47 iki 2,64, santykis su norminiuose siūlomu yra 60 % mažesnis už norminį, o kitu atveju 20 % didesnis už norminį. Išskyrus vieną atvejį, kai E_{v2} , esant 120 MPa, santykis lygus 1, o kitos dvi kreivės yra labai artimos (geltona ir raudona). LWD atveju koeficientas kinta nuo 0,72 iki 1,29, o ZORN 0,76 iki 1,37, o skirtumai vienu atveju sudaro apie 35 %, lyginant su norminiu, o kitu atveju 60 % mažesnės už norminį.

Didžiausi skirtumai gauti matuojant su FWD prietaisu, todėl šių matavimų rezultatus aptarsime plačiau. Koeficientas, matuojant FWD prietaisu ant žemės sankasos, yra 50 % didesnis už norminį, ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio du kartus mažesnis už norminį, o mažųjų prietaisų paklaidos visais atvejais yra panašios ir svyruoja nuo 40 iki 60 % nuo norminių reikšmių. 4.30–4.32 paveiksluose pateikti grafikai rodo redukcijos koeficiento kitimą ne tik esant viduti-

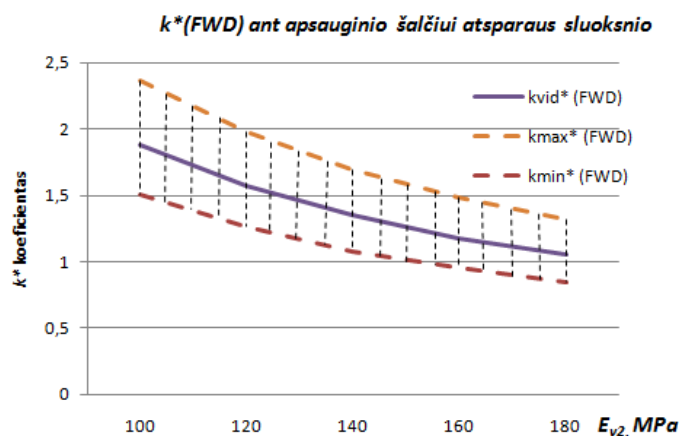
nėms, bet ir minimalioms ir maksimalioms matavimų rezultatų reikšmėms ant kelio konstrukcijos sluoksnių.



4.30 pav. Atliktų matavimų ant žemės sankasos redukcijos koeficiento $k^*(FWD)$ kitimo ribos
Fig. 4.30. Variation limits of reduction coefficient $k^*(FWD)$ measured on the subgrade

Redukcijos koeficiento $k^*(FWD)$ reikšmės nuo vidutinės reikšmės ant žemės sankasos apytikriai kinta nuo 0,4 iki 0,7. Tad galima užrašyti tokią matematinę išraišką:

$$k^* = k_{vid} \pm (0,4-0,7) k_{vid}; \quad (4.9)$$

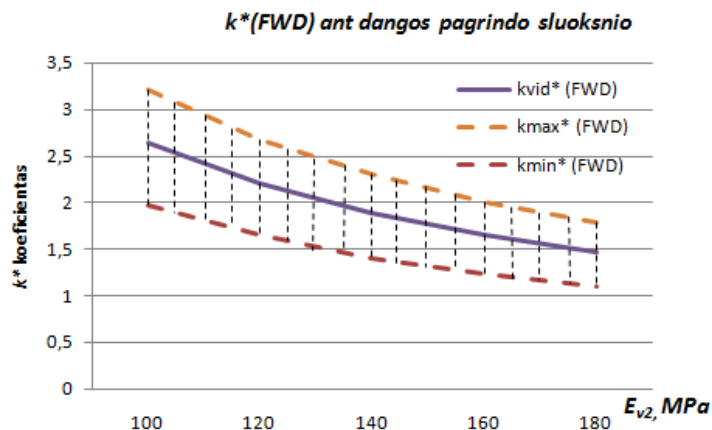


4.31 pav. Atliktų matavimų ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio redukcijos koeficiento $k^*(FWD)$ kitimo ribos

Fig. 4.31. Variation limits of reduction coefficient $k^*(FWD)$ measured on the frost-blanket course

Redukcijos koeficiento $k^*(FWD)$ reikšmės nuo vidutinių reikšmių ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio apytikriai skiriasi 0,8 karto, todėl galima užrašyti tokią matematinę išraišką:

$$k^* = k_{vid} \pm 0,8k_{vid} . \quad (4.10)$$



4.32 pav. Atliktų matavimų ant dangos pagrindo sluoksnio redukcijos koeficiento $k^*(FWD)$ kitimo ribos

Fig. 4.32. Variation limits of reduction coefficient k^* (FWD) measured on the base layer

Redukcijos koeficiento $k^*(FWD)$ reikšmės nuo vidutinių reikšmių ant dangos pagrindo sluoksnio apytikriai kinta nuo 0,7 iki 0,8, todėl galima užrašyti tokią matematinę išraišką:

$$k^* = k_{vid} \pm (0,7-0,8)k_{vid} . \quad (4.11)$$

Remiantis atliktų tyrimų rezultatų analize ir vertinimu, siūlomo redukcijos koeficiento k^* , skirto palyginti statiniais ir dinaminiais matavimo metodais gautus rezultatus, galima pasiūlyti (4.1) formulės matematinės išraiškos papildymą:

$$k^* = \frac{E_{v2}}{E_{vd}} \pm (0,4-0,8)k_{vid} . \quad (4.12)$$

4.6. Ketvirtojo skyriaus išvados

Atlikus kelio bandomojo ruožo žemės sankasos, apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio ir dangos pagrindo tyrimo rezultatų statistinę analizę, galima pateikti šias išvadas:

1. Rezultatų sklaidos diagramos, pagal duomenų rezultatus gautus matuojant ant žemės sankasos, apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio ir dangos pagrindo, parodė kiekvieno prietaiso tarpusavio rezultatų sklaidą. Pastebimas labai didelis skirtumas tarp minimalios ir maksimalios reikšmės. Mažiausią rezultatų sklaidą parodė dinaminis prietaisas ZORN ZSG 02 ir statinė sija „Strassentest“ – tai rodo patikimesnius matavimo rezultatus, o didžiausia rezultatų sklaidą parodė FWD „Dynatest 8000“.

2. Didžiausia koreliacija deformacijos modulio gauta, matuoto FWD „Dynatest 8000“ ir statinės sijos „Strassentest“ prietaisais ($r^2 = 0,5853$, $r = 0,7651$), ant žemės sankasos kairėje pusėje, tačiau dešinėje pusėje koreliacijos koeficientas nėra gerokai mažesnis ($r^2 = 0,2513$, $r = 0,5013$). Nors ir ryšys tarp statinės sijos ir kitų dinaminių prietaisų nėra labai stiprus, tai paaiškina skirtingos matavimo metodikos.

3. Didžiausia koreliacija deformacijos modulio gauta, matuoto ZORN ZSG 02 ir statinės sijos „Strassentest“ prietaisais ($r^2 = 0,5198$, $r = 0,7210$), ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio kairėje pusėje. Nors ryšys tarp statinės sijos ir kitų dinaminių prietaisų nėra labai stiprus, tai paaiškina skirtingos matavimo metodikos.

4. Atliktų tyrimų ant dangos pagrindo koreliacijos rezultatai tarp visų prietaisų gauti labai prasti. Didžiausias matavimo rezultatų koreliacijos koeficientas ant dangos pagrindo kairėje pusėje nustatytas tarp statinės sijos „Strassentest“ ir krintančio svorio deflektometro FWD „Dynatest 8000“, koreliacijos koeficientas $r = 0,4541$.

5. Atlikus tyrimų rezultatų analizę ir vertinimą galima teigti, kad ant žemės sankasos su visais matavimo prietaisais gaunami patikimi rezultatai, ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio stiprumui matuoti geriausiai tinka statinė sija ir dinaminis prietaisas ZORN ZSG 02, o ant dangos pagrindo patikimumo nustatyti nepavyko. Remiantis atliktų tyrimų rezultatų analize ir vertinimu, siūlomam redukcijos koeficientui k^* , skirtam palyginti statiniais ir dinaminiais matavimo metodais gautus rezultatus, taikyti pasiūlyta matematinė formulė.

Bendrosios išvados

1. Tyrimai atlikti ir rezultatai apdoroti remiantis atliktais matavimais kelio Kaunas–Marijampolė–Suvalkai eksperimentiniame ruože (16,10–16,40 km) ir bandomajame ruože Pagiriuose. Ruožuose matavimai atlikti statiniais ir dinaminiais matavimo metodais, naudojant šiuos prietaisus: statinę siją „Strassentest“, dinaminį krintančio svorio deflektometrą FWD „Dynatest 8000“, LWD „Prima 100“ ir dinaminį ZORN ZSG 02. Atlikus matavimus galima teigti, kad visi nagrinėjami prietaisai yra tinkami žemės sankasos, apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio deformacijos moduliams nustatyti.
2. Remiantis tyrimų rezultatais, gautais atlikus tyrimus Kauno ruože, galima pastebėti, kad kelio dangos stiprumui nustatyti prietaisai ir metodai turi būti taikomi pagal tai, kam bus naudojami matavimo rezultatai:
 - Statinė sija – tinkamiausia biriųjų medžiagų sluoksnių paviršiaus deformacijos moduliams nustatyti.
 - Deflektometras – detaliems visos dangos konstrukcijos būklės tyrimams.
3. Žemės sankasos ir apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio matavimo rezultatų analizė rodo, kad tarp visų dinaminių prietaisų matavimo rezul-

tatų yra dėsninga priklausomybė, bet deformacijos modulio skaitinės reikšmės, lyginant su statine sija, kinta: FWD „Dynatest 8000“ iki 70 % didesnės, LWD „Prima 100“ ir ZORN ZSG 02 yra mažesnės 8–80 %, todėl negalima vienareikšmiškai nuspręsti, kuris metodas yra geriausias ir priimtinausias.

4. Dangos pagrindo atliktų matavimų statiniais ir dinaminiais matavimo metodais tyrimų koreliacijos rezultatai tarp visų prietaisų parodė silpną ryšį. Didžiausias matavimo rezultatų koreliacijos koeficientas ($r = 0,4541$) nustatytas tarp statinės sijos „Strassentest“ ir krintančio svorio deflektometro FWD „Dynatest 8000“.
5. Atliktų eksperimentinių kelio konstrukcijos sluoksnių deformacijų tyrimų statiniais ir dinaminiais matavimo prietaisais rezultatai parodė, kad kelio konstrukcijos sluoksnių stiprumas, nustatytas krintančio svorio deflektometru, yra artimas statinei sija nustatytam stiprumui. Tarp E modulių, nustatytų statiniu ir dinaminio metodais, yra tiesinė priklausomybė. Deformacijos modulių, nustatytų skirtingais metodais, koreliacija rodo, kad krintančiojo svorio deflektometras gali būti taikomas tirtų konstrukcijų stipriui įvertinti, naudojant eksperimentiniais tyrimais nustatytus redukcijos koeficientus.
6. Atlikus žemės sankasos tyrimų rezultatų analizę ir vertinimą galima teigti, kad su visais matavimo prietaisais gaunami patikimi rezultatai. Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio stiprumui matuoti geriausiai tinkami statinė sija ir dinaminis prietaisas ZORN ZSG 02. Remiantis atliktų tyrimų rezultatų analize ir vertinimu, redukcijos koeficientą k^* , skirtą palyginti statiniais ir dinaminiais matavimo metodais gautus rezultatus, siūloma taikyti pagal šio darbo autorės pasiūlytą matematinę formulę.
7. Remiantis atliktų tyrimų rezultatais siūloma atlikti tolesnius dangos pagrindo ir kelio dangos sluoksnių mokslinius stiprumo matavimo tyrimus, įvertinat sluoksnio storį, medžiagų sudėtį, temperatūrą, ir matavimus atlikti panašiomis sąlygomis, įvertinti kiekvienos kelio konstrukcijos sluoksnio medžiagos Puasono koeficientą. Kalbant apie dangos pagrindo sluoksnį reikėtų patikslinti skaičiavimo metodikoje taikomą apkrovos pasiskirstymo koeficientą, kuris daro įtaką deformacijos modulio dydžiui.
8. Remiantis atlikta gautų rezultatų analize siūloma parengti rekomendacijas norminiams dokumentams, kuriuose būtų nurodoma, ant kokio sluoksnio ir kokiomis oro sąlygomis gali būti taikomas atitinkamas matavimo prietaisas.

Literatūros sąrašas

- AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. 1993. Washington AASHTO. 319 p.
- Aavik, A. 2003. *Methodical Basis for the Evaluation of Pavement Structural Strength in Estonian Pavement Management System (EPMS)*. Tieses of Tallinn Technical University. F. Civil Engineering. ISSN 1406-4766. Tallinn. 152 p.
- Aavik, A.; Paabo, P.; Kaal, T. 2006. Assessment of pavement structural strength by falling weight deflectometer, *The Baltic Journal of Roads and Bridges Engineering* 1(4): 192–199.
- ABAQUS, Finite Element Program, Version 5.2*. 1992. Hibbitt, Karlson and Sorensen, Inc.
- Acum, W. E. A.; Fox, L. 1951. Computation of load stresses in a three layer elastic system, *Geotechnique* 2(4): 293–300.
- Additional Technical Requirements and Instructions for Excavations in Road Constructions* (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Aufgrabungen in Verkehrsflächen) ZTVA-StB 97. 1997. Road and Transportation Research Association, Köln. 120 p. (in German).
- Almássy, K.; Subert, I. *Dynamic Compaction and Load Bearing Capacity Measurements on Highway Project M7*. Mélyépítés (May, 2006), 10–13 (in Hungaria).

Atitinkančio Lietuvos sąlygas automatizuoto automobilių kelių nestandžių dangų konstrukcijų projektavimo metodo tyrimai, pertvarkymas ir pritaikymas (I etapas). Mokslo darbo ataskaita. 2000. Vilnius: Vilniaus Gedimino technikos universitetas.

Atitinkančio Lietuvos sąlygas automatizuoto automobilių kelių nestandžių dangų konstrukcijų projektavimo metodo tyrimai, pertvarkymas ir pritaikymas (II etapas). Mokslo darbo ataskaita. 2001. Vilnius: Vilniaus Gedimino technikos universitetas.

Atitinkančio Lietuvos sąlygas automatizuoto automobilių kelių nestandžių dangų konstrukcijų projektavimo metodo tyrimai, pertvarkymas ir pritaikymas (III etapas). Mokslo darbo ataskaita. 2003. Vilnius: Vilniaus Gedimino technikos universitetas.

Bandyamo dinaminio prietaisu instrukcija. 1995. Vilnius. 11 p.

Baustoff- und Bodenprüfstelle Wetzlar, Verfüllen von Leitungsgaben, 2001.

Braga, A. 2005. *Dangų degradacijos modeliai ir jų taikymas Lietuvos automobilių keliams*: daktaro disertacija. Technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T. Vilnius. 156 p.

Brandl, H.; Adam, D.; Kopf, F.; Niederbrucker, R. 2003. *Der dynamische Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät, Schriftenreihe Straßenforschung der Österreichischen Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr (FSV).* 533 p.

Burmister, D. M. 1943. The Theory of stresses and displacements in layered systems and application to the design of airport runways, in *Proceedings, Highway Research Board*, Vol. 23. National Research Council, Washington, D.C., 125–148.

Cebon, D. 1993. *Interaction Between Heavy Vehicles and Roads.* Society of Automotive Engineers, USA. 82 p.

COST Action 351–WATMOVE. *Water Movement in Roadpavements and Embankments*, 2007.

Čygas, D.; Laurinavičius, A.; Vaitkus, A.; Motiejunas, A.; Bertulienė, L. 2008. *Automobilių kelių eksperimentinių dangų bandomojo ruožo įrengimas, ilgalaikiai jo tyrimai, rezultatų analizė ir vertinimas (1, 2, 3 etapai) (I etapas).* Mokslo darbo ataskaita. Vilnius. 91 p.

Damm, K.W. 1997. *Der dynamische plattendruckversuch.* VSVI Seminar, Asphalt Labor Arno J. Hinrichsen, Wahlstedt, Deutschland, 28. Jan. 1997.

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.

DIN 18134 Building Ground. Tests and Test Methods. Load with plate (Baugrund. Versuche und Versuchsgeräte. Plattendruckversuch). Berlin, German Standardization Institute. 1993. 9 p.

Dynatest 8000 FWD Test System. Dynatest Engineering A/S. 1995. 185 p.

ELMOD. *Evaluation of Layer Modules and Overlay Design. User's Manual*. Dynastest. Denmark. 1994. 152 p.

European Commission Directorate General Transport. *COST 336. Falling Weight Deflectometer. Final Report of the Action*. ECSC – EEC – EAEC, Brussels, Luxembourg, 1999. 166 p.

Ézsiás, L. 2005. *Application of the B&C Light Falling Weight Deflectometer for evaluation of earthworks*. University of Szécheny István, Gyo"r, Hungary, Final Project.

Floss, R. 1997. ZTVE – StB 94, Fassung 1997, Kommentar mit Kompendium Erd-und Felsbau, Kirschbaum Verlag, Bonn, Deutschland.

Fonad, M. B.; Mostafa, A. H. 2002. Effect of the Variability of seasonal moduli adjustment factors on the mechanistic–empirical overlay design, in *Proceedings of the 6 th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. Selected Papers: (24–26 June 2002, Lisbon, Portugal)*, 295–302.

French design manual for pavement structures. Guide technique. 1997. 248 p.

Gonçalves, J. 2003. *Possibilidade de Controlar o Processo Construtivo de Aterros com Recurso a DIP*. Uma Experiência na Polónia, Portugal Transport Research Bulletin (2003), 132:12–25.

Guidelines for Road Network Condition Monitoring: Part 3 – Pavement Strength. Austroads. 2005. 86 p.

Hildebrand, G.; Baltzer, S. 2003. Static plate bearing tests, falling weight deflectometer (FWD) and mini FWD. External Report 16, *Nordic Road and Transport Research* 2: 19.

Hildebrand, G.; 2003. Comparison of various types of bearing capacity equipment, *Nordic Road & Transport Research* 15(3): 12–14.

Hoffman, M. S.; Thompson, M. P. 1982. Back calculating nonlinear resilient module from deflection data, *Transportation Research Record* 852, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 42–51.

Huang, Y. H. 2004. *Pavement Analysis and Design*. 2nd ed. Pearson Printice Hall, Upper Saddle River, NJ.

Hudson, W. R.; Elkins, G. E.; Uddin, W.; Reilley, K. T. 1987. *Evaluation of Pavement Deflection Measuring Equipment*. FHWA - TS-87-208. Federal Highway Administration. 78 p.

Ilinkių matavimo naudojant Benkelmano siją instrukcija. 1995. 11 p.

Yi, J. H.; Kim, Y. S.; Mun, S. H.; Kim, J. M. 2010. Evaluation of structural integrity of asphalt pavement system from FWD test data considering modeling errors, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 5(1): 10–18. doi:10.3846/bjrbe.2010.02.

- Juknevičiūtė, L.; Laurinavičius, A. 2008. Analysis and evaluation of depth of frozen ground affected by road climatic conditio, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 3(4): 226–232.
- Kavussi, A.; Rfiei, K.; Yasrobi, S. 2010. Evaluation of PFWD as potential quality control tool of pavement layers, *Journal of Civil Engineering and Management* 16(1): 123–129.
- Kim, J. R.; Kang, H. B.; Kim, D.; Park, D. S.; Kim, W. J. 2007. Evaluation of in situ modulus of compacted subgrades using portable falling weight deflec-tometer and plate-bearing load test, *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(6): 492–499. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:6(492).
- Kiss, L.; Molnár, J. P.; Türk, I. 2003. Diagnostics of substructures – the dynamic sub-grade modulus, *Mélyépítő Tükörkép* (August 2003), 16–18 (in Hungaria).
- Kudla, W.; Floss, R.; Trautmann, C. 1991. Dynamischer Plattendruckversuch – Schnellprüfverfahren für die Qualitätssicherung von ungebundenen Schichten, *Strasse und Autobahn* 42: 66–71.
- Lauren, Y.; Swett, B. S. 2007. *Seasonal variations of pavement layer moduli determined using situ measurements of pavement stress and strain*. A thesis for the Degree of Master of Science. The University of Maine, May. 319 p.
- Lietuvos automobilių kelių asfaltbetonio dangų konstrukcijų stiprumas ir irimas. Tiriamojo darbo ataskaita*. 2007. Kaunas: TKTI. 243 p.
- Lietuvos automobilių kelių direkcija*. 2007. *Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės KPT SDK 07*. Vilnius.
- LST 1360.5:1995 Automobilių kelių gruntai. Bandymo metodai. Bandymas štampu*. Vilnius. 1995. 14 p.
- Ma, F.; Fu, Z. 2010. Development and application of nondestructive testing technology for pavent bearing capacity, in *Proceedings of International Workshop on Energy and Environment in Development of Sustainable Asphalt Pavements*. Changan Univ, Xian, Peoples R China, Jun 06-08, 2010, 327–331. ids:BRN74, isbn:978-7-5605-3574-6.
- Measurement of load bearing capacity with lightweight deflectometers (We-mex/ZFG)*. Institute for Transport Sciences. 1995. Research report, Client: ÁKMI Kht.
- 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
- Olsson, U. 1983. *Projektering med hänsyn till drift och underhåll*. Construction Research Council: Stockholm). 25 p. (in Swedish).
- Palšaitis, E.; Vidugiris, L. 1999. *Automobilių kelių projektavimas. Teorija ir praktika*. Vilnius. 440 p.

- Paterson, W. D. O. 1987. *Road Deterioration and Maintenance Effects*. Published for The World Bank The Johns Hopkins University Press Baltimore and London. 454 p.
- Petkovsek, A. (Ed.). 2007. *Brief Information On Slovenian Experience And Practice With Light Weight Fall Plate Bearing Tests*. Summary report prepared after personal communication. Technical University of Ljubljana.
- Raad, L.; Figueroa, J. L. 1980. Load Response of Transportation Support Systems, *Journal of the Transportation Engineering Division* 106(TE1): 111–128.
- Road Transport Research. OECD full – scale pavement test. Report prepared by an OECD scientific expert group*. 1991. Organization for economic co-operation and development. Paris. 266 p.
- Robert, D.; Srombom, R. 1987. *Maintenance of Agregate and Earth Roads*. Manual U.S. Departament of Transportation. Federal Highway Administration. Fujiki and Associates Inc. Washington, D.C. 71 p.
- Shoop, S.; Affleck, R.; Haehnel, R.; Janoo, V. 2008. Mechanical behavior modeling of thaw-weakened soil, *Cold Regions Science and Technology* 52(2): 191–206. doi: 10.1016/j.coldregions.2007.04.023.
- Siddharthan, R. V.; Yao, J.; Sebaaly, P. E. 1998. Pavement strain from moving dynamic 3D load distribution, *Journal of Transportation Engineering* 124(6): 557–566.
- Siekmeier, J. A.; Young, D.; Beberg, D. 2000. Comparison of the dynamic cone penetrometer with other tests during subgrade and granular base characterization in Minnesota, in S. D. Tayabji, E. O. Lukanen (Eds.). *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli: Third Volume, ASTM STP 1375*. ASTM, West Conshohocken, PA., 175–188.
- System oceny stanu nawierzchni „SOSN“*. Wytyczne stosowania. 1989. Warszawa. 48 s.
- Staged Pavement Design, a Danish Construction Practice*. 1995. Vejteknisk Institut. 14 p.
- Statybinė klimatologija RSN 156-94*. 1995. Vilnius: Aplinkos ministerija. 136 p.
- Sulewska, M. 1998. Rapid quality control method of compaction of non-cohesive soil embankment, in *Proceedings of the 11th Danube-European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Porec, Croatia, Unknown Month 25, 283–286.
- Sulewska, M. 2004. The application of the modern method of embankment compaction control, *Journal of Civil Engineering and Management* X: 45–50. ISSN 1392-3730.
- Šiaudinis, G. 2006. Relationship of road pavement determination moduli, determined by different methods, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 1(2): 77–81. ISSN 1822-427X
- Šiaudinis, G. 2007. *Lietuvos automobilių kelių nestandžių dangų konstrukcijų stiprumo nustatymo metodai*: daktaro disertacija. Technologijos mokslai, statybos inžinerija (02T). Vilnius. 150 p.

Technical advisory. 2008. Texas Department of Transportation [žiūrėta 2009 m. lapkričio 14 d.]. Prieiga per internetą: <ftp://ftp.dot.state.tx.us/pub/txdot-info/cst/tips/falling_weight_deflectometer.pdf>.

Technical Specification for Soil and Rock in Road Construction TP BF-StB Part B 8.3 (Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau TP BF-StB Teil B 8.3: Dynamischer Platten-druckversuch mit Hilfe des Leichten Fallgewichts-gerätes). 1997. Road and Transportation Research Association, Köln. 18 p. (in German).

Tompai, Z. 2008. Conversion between static and dynamic load bearing capacity moduli and introduction of dynamic target values, *Civil Engineering* 52(2): 97–102. doi: 10.3311/pp.ci.2008-2.06

Ullidta, P. 1987. *Pavement Analysis*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.

Ullidtz, P. 1998. *Modeling Flexible Pavement Response and Performance*. Denmark. 205 p.

Vaitkus, A.; Laurinavičius, A.; Čygas, D. 2005. Analysis and evaluation of determination methods of non-rigid pavement structures' deformation modulus, in *The 6th International Conference Environmental Engineering 2*: 792–795. ISBN 9986-05-851-1.

Janoo, V. C.; Berg, R. L. 1992. Layer moduli determination during freeze – thaw periods, *Transportation Research Record* 1377: 26–35.

Weingart, W. 1993. Control of road layers without binder using light drop-weight tester, *Transactions in Mineral Materials in Road Construction (Tagungsband Mineralstoffe in Strassenbau)*, Vol. 6, Köln, 50–53 (in German).

Weingart, W. 1994. Einbaukontrolle mit dem Leichten Fallgewichtsgerät auf Tragschichten ohne Bindemittel – Arbeitsweise des Prüfgerätes, Erfahrungen bei seinem Einsatz, Beitrag zur Mineralstofftagung.

Wistuba, M.; Litzka, J. 2002. Consideration of climatic conditions in pavement design, in *Proceedings of The 6th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. Selected Papers (24–26 June 2002, Lisbon, Portugal)*, 373–380.

Zaghloul, S.; White, T. D.; Drnevich, V. P.; Coree, B. 1994. Dynamic analysis of FWD loading and pavement response using a three-dimensional finite element program, *ASTM Non Destructive Testing of Pavements and Back Calculation of Moduli (Second Volume)*, ASTM STP 1198.

Zollars, J.; Dai, S. 2002. Resilient Modulus of Minnesota Road Research Project, *Transportation Research Record* 1786: 20–28.

Zorn, G. 2007. *Light Drop-Weight Tester ZFG-02*. Operating Manual Corresponding to the German Code TP BF-STb Part B 8.3, Stendal, Germany.

ZTVA-StB. (1997). *Additional technical requirements and instructions for excavations in road constructions (Zusätzliche technische vertragsbedingungen und richtlinien für er-*

arbeiten im straßenbau), Road and Transportation Research Association, Köln (in German).

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau. 1994. ZTVE - StB 94.

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Straßen-bauarbeiten für den Geschäftsbereich des Landesbetriebes Bau Sachsen-Anhalt, Ausgabe 2005/Fassung 2007: Landesbetrieb Bau Sachsen-Anhalt, 2007. ZTV - StB LBB LSA 05/07.

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Straßen-bauarbeiten für den Dienstaufsichtsbereich des Landesamtes für Straßenbau Sachsen-Anhalt: Landesamt für Straßenbau Sachsen-Anhalt, 1996. ZTV - StB LAS ST 96.

Белоногов, Л. Б.; Кычкин, В. И.; Пугин, К. Г. 1999. *Вибродиагностика прочности дорожных одежд нежёсткого типа*. Пермь: Пермский государственный технический университет.

Васильев, А. П.; Сиденко, В. М. 1990. Эксплуатация автомобильных дорог и организация дорожного движения. М.: «Транспорт». 304 с.

Дороги России 21 века. 2003. №2. Издание Государственной службы дорожного хозяйства Министерства транспорта Российской Федерации.

Илиополов, С. К.; Ляпин, А. А. 1997. Особенности расчета напряженно-деформированного состояния конструкции дорожной одежды при динамическом нагружении. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион, *Технические науки* 4: 63–66.

Илиополов, С. К.; Селезнев, М. Г.; Медведева, Т. А. 1996. Об одном подходе к исследованию пространственной динамической задачи теории упругости о контакте полосы со слоистым полупространством, *Сборник трудов 2-ой Международной конференции “Современные проблемы механики сплошной среды*. т. 3. Ростов-на-Дону, 69–74.

Илиополов, С. К.; Селезнёв, М. Г.; Углова, Е. В. 2002. *Динамика дорожных конструкций*: монография. Ростов-на-Дону: Ростовский государственный строительный университет. 258 с.

Илиополов, С. К.; Селезнёв, М. Г.; Углова, Е. В.; Дроздов, А. Ю., *et al.* 2001. *Разработка методологии прогнозирования транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог с учётом динамического пространственного воздействия транспортных средств*. Отчёт о научно-исследовательской работе. Государственный контракт № ЮУ-11/528-1, РГСУ.

Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа/ВСН 46-83. Москва: «Транспорт». 1985. 156 с.

Межгосударственные отраслевые дорожные нормы. Проектирование нежестких дорожных одежд / МОДН 2 – 2001. [žiūrėta 2010-06-21]. Preiga per internetą

<http://libgost.ru/modn/61120-Tekst_MODN_2_2001_Proektirovanie_nezhestkih_dorozhnyh_odezhd.html>.

ОДН 218.0.006-2002. Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог. 2002. М.: «Росавтодор». 79 с. [žiūrēta 2010-05-21]. Preiga per internetu: <http://stroyoffis.ru/odn_otraslevie/odn_218_0_006_2002/odn_218_0_006_2002.php>.

ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд. 2003. М.: «Росавтодор». [žiūrēta 2010-05-21]. Prieiga per internetu: <http://stroyoffis.ru/odn_otraslevie/odn_218_046_01/odn_218_046_01.php>.

ОДН 218.1.052-2002. Оценка прочности нежестких дорожных одежд. 2003. М.: «Росавтодор». 79 с.

Проектирование нежестких дорожных одежд. 2002. Москва: «Союздорнии».

Смирнов, А. В. 1993. *Прикладная механика дорожных и аэродромных конструкций*: учеб. пособие. Омск: Издательство ОмГТУ.

Современные автоматизированные технические средства диагностики автомобильных дорог. Автомобильные дороги: обзорная информация. Информавтодор. Выпуск 5. 2002. М.: 80 с.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Bertulienė, L.; Laurinavičius, A. 2008. Research and evaluation of methods for determining deformation modulus of road subgrade and frost blanket course, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 3(2): 71–76. doi:10.3846/1822-427X.2008.3.71–76. ISSN 1822-427X (Thomson ISI Web of Science)

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. ISSN 1822-427X (Thomson ISI Web of Science)

Straipsniai kituose leidiniuose

Bertulienė, L.; Oginskas, R. 2008. Analysis of results on testing asphalt pavements reinforced by geosynthetic materials, in *The 7th International Conference “Environmental Engineering”*, Selected Papers. May 22–23, Vilnius. Vol. 3, 1108–1113. ISBN 978-9955-28-265-5 (Thomson ISI Proceedings)

Leonovich, I. I.; Bertulienė, L. 2011. New approaches to performing the diagnostics of motor roads // *Proc of the 8th International Conference “Environmental Engineering”*:

selected papers, Vol. 3, May 19–20, Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 1113–1120. ISBN 9789955288299.

Bertulienė, L.; Laurinavičius, A.; Lapinskienė, O. 2010. Research of strength measurement methods on subgrade of experimental road pavement, in P. Vainiūnas, E. K. Zavadskas (Eds.). *Proc of the 10th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”: selected papers*, Vol. 1, May 19–21, Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 28–33. ISBN 9789955285939.

Laurinavičius, A.; Vaitkus, A.; Bertulienė, L.; Tuminienė, F.; Žiliūtė, L. 2009. Research of experimental road pavement structures in Lithuania, in *1 International Conference Environmentally Friendly Roads 15–16 X 2009*. ENVIROADS 2009, Lenkija, Varšuva, 2009 m. spalio 14–16 d. [elektroninis išteklis], 15–16 X 2009 [CD] / Road and Bridge Research Institute Warsaw, 2009, 1–6. ISBN 8389252023.

Laurinavičius, A. [Лауринавичюс, А.]; Juknevičiūtė, L. [Юкневичюте, Л.]; Bertulienė, L. [Бертулене, Л.]. 2009. Климатический фактор в эксплуатации автомобильных дорог, в кн. *Материалы седьмой международной научно-технической конференции «Наука-образованию, производству, экономике»*. В 3 томах. Т. 2 / Белорусский национальный технический университет. Минск: БНТУ, с. 202. ISBN 9789855252789.

Laurinavičius, A. [Лауринавичюс, А.]; Bertulienė, L. [Бертулене, Л.]; Juknevičiūtė, L. [Юкневичюте, Л.]. 2010. Статические и динамические методы оценки состояния дорожных конструкций в Литве, в кн. *Материалы седьмой международной научно-технической конференции «Наука-образованию, производству, экономике»*. Белорусский национальный технический университет. Минск: БНТУ, с. 51.

Kniukštaitė, L. 2006. Kelio dangos konstrukcijų sluoksnių stiprumo matavimo metodų analizė ir vertinimas, iš *9-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2007 metų teminės konferencijos TRANSPORTAS, įvykusios Vilniuje 2006 m. gegužės 25 d., pranešimų rinkinys*. Vilnius: Technika, 182–187. ISBN 9986-05-991-7.

Kniukštaitė, L. 2007. Nestandžių kelio dangų konstrukcijų deformacijos modulio nustatymo metodai, iš *10-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2007 metų teminės konferencijos TRANSPORTAS, vykusios Vilniuje 2007 m. gegužės 3 d., straipsnių rinkinys*. Vilnius: Technika, 181–185. ISBN 978-9955-28-374-4.

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

The road network of Lithuania has been developed well enough and in recent years no considerable changes have taken place (21324.8 km of roads of national significance), however, the earlier constructed roads are not able to carry the increased loads and the growing traffic volume of heavy vehicles. Due to those factors much more funds are required for the road maintenance and for the assurance of traffic volume. On the main roads of Lithuania the number of equivalent axle loads has increased more than twice since the year 2000, and the total traffic volume – by about 55 %. Though, at present due to the worldwide crisis the traffic volume has lowered, the increased heavy loads cause a rapid deterioration of road pavements.

Pavement structural strength is one of the main indices to determine pavement ability to carry traffic loads. The strength of separate layers of flexible pavement structures and of the whole pavement structure can be calculated during their design. When building and reconstructing roads it is necessary to control whether the strength of the newly built structural layers corresponds to their design strength. For this purpose, various methods for determining pavement structural strength are used. The static and dynamic non-destructive methods are worldwide used to determine the deformation modulus of pavement structures, however, in many countries when designing and building road pavement structures their strength is defined by a static deformation modulus.

Topicality of the thesis

A continuously growing need for the strengthening of pavement structures on the roads of Lithuania necessitates to introduce new road reconstruction technologies, to look for new alternatives in building structural pavement layers, to make research of pavement structures in real conditions of their operation. In order to determine and compare the accuracy of testing results by the static and dynamic methods in the year 2007 the Laboratory of Road Research of Vilnius Gediminas Technical University carried out comparable measurements on the test road section. Based on the data of those measurements the review of measuring methods was carried out and experimental research on the pavement structural strength of the roads of Lithuania was implemented by different measuring methods using the static and dynamic measuring devices. Analysis and assessment of experimental research results obtained on the test section will allow to select the most suitable measuring method for the separate layers of pavement structure.

The main objective of research – to identify correlation between the static and dynamic moduli of elasticity of road pavement. Since the formulas for calculating direct correlation between those moduli are seldom used in practice the objective was to determine the values of reduction coefficient which would allow to find out the required bearing capacity of the layers using the dynamic measuring methods.

In other words, in the near future the quality assessment based on dynamic modulus could replace the widely used slow and complicated testing by a static plate load. The results would help to create and to put into practice new design methods based on dynamic testing.

The object of research

The object of research is as follows: methods for determining structural strength of road pavements, their assessment and use, employment and assessment of measuring methods. Experimental object – road pavement structure built in the test section, analysis and assessment of comparable measurements taken by the static and dynamic measuring methods.

The aim of the thesis

The aim of research – to theoretically justify suitability and compatibility of the static and dynamic measuring methods for measuring the strength of different structural pavement layers (except the upper layers of pavement structure) and to select the most reliable method under the conditions of Lithuania.

The tasks of thesis

The following tasks were solved to achieve the aim of research:

1. Analysis of methods for measuring structural strength of road pavements.
2. Experimental research on the structural strength of Lithuania's road pavements using different measuring devices by the static and dynamic measuring methods.
3. Determination of a reliable relationship between the results of measuring methods obtained with the help of experimental measurements by the static and dynamic methods.

4. Justification of the most suitable measuring method for the separate pavement structural layers.

Methodology of research

Methodologies of research are based on the analysis of works in this field by the scientists of Lithuania and foreign countries. The following research methods were employed in this work: analytical, statistical, mathematical; experimental – laboratory; experimental field-test (on roads).

The dissertation is based on the scientific publications by the authors of Lithuania and foreign countries, scientific and information publications by academic institutions.

Scientific novelty

Scientific novelty and importance of the work are represented by the following results:

1. For the first time with the help of different static and dynamic measuring devices the research was carried out of different pavement structures laid on the subgrade of equal strength.
2. For the first time a comparable analysis of the static and dynamic measuring methods and measuring results was performed using different measuring devices.
3. Having assessed the currently used strength methods, based on deflection measurements, where suggested suitable measuring method for separate structural layers. According to the reduction equations obtained, the reduction coefficients were suggested to be used between the results of static and dynamic measuring methods.

Practical value

1. The research showed that methods and devices to determine strength shall be used based on the application of measuring results:
 - static measuring methods – most suitable for the determination of deformation modulus at the surface of pavement layers laid from aggregate materials.
 - dynamic measuring methods – most suitable for the detail investigation of the whole condition of pavement structure.
2. Having made the analysis of measuring results a reliable correlation between the measuring methods was determined; the difference between the results obtained by the static and dynamic devices was identified; regression equations were suggested to reduce the E moduli values by dynamic measuring devices to the E_{v2} values measured by static measuring methods. Reduction coefficients were suggested for the comparison of the static and dynamic measuring methods.

Defended propositions

1. The quality assessment of road pavement structure can be justified by dynamic measuring modulus which could replace the widely used slow and complicated testing by a static plate load. The results obtained create a basis for developing and employing new dynamic measuring methods.

2. Static measuring methods are most suitable for the determination of deformation modulus at the surface of pavement layers laid from aggregate materials.
3. Dynamic measuring methods can be used for the quality assessment and control of the subgrade and lower layers of road pavement structure.

The scope of the scientific work

The dissertation consists of introduction, four chapters, conclusions and 9 annexes.

The total scope of the dissertation – 126 pages, excluding addenda, 58 numbered formulas, 67 figures and 13 tables. 99 references were used for the preparation of dissertation.

1. Analytical review of methods for the determination of pavement structural strength

Pavement structural strength is one of the main indices to determine pavement ability to carry traffic loads. The strength of the separate layers of flexible pavement structures and of the whole pavement structure can be calculated during their design. When building and reconstructing roads it is necessary to periodically control whether the strength of the newly built structural layers corresponds to their design strength.

Most European countries use analytical methods for pavement design and determination of the need for pavement strengthening which conceptually are very similar. All the European and worldwide design methods are adjusted to the local climatic factors and materials used in that country. When using pavement strength determination models of other countries it is essential to adjust them to the particular country.

At present Lithuania uses different methodologies for the design of road pavements: the American AASHTO methodology as well as the pavement design methodology developed by DORNII on a basis of the *Russian Road Instruction VSN 46-83*.

The most important pavement indices are strength and roughness. If the road pavement is not strong enough the ruts and damages occur, the skid-resistance considerably increases, sometimes the road pavement becomes absolutely impassable. Driving on rough pavement causes not only vehicle and pavement damages, but also inconveniences for the passengers and transported goods. Therefore, the road pavement must be strong enough, free of any ruts or damages.

The scientists of foreign countries use to determine the performance of pavement structure under real conditions by building and testing pavement structures in special test polygons. One of the largest test polygons was established in 1989, in the French Central Laboratory of Roads and Bridges (Road Transport Research... 1991). Here the scientists of various European countries tested and evaluated the performance of three different pavement structures. The pavement structures were tested under the effect of different loads, the readings of the transducers of stresses, pressure, temperature and moisture were recorded and the tendencies for the development of defects in the upper pavement layers were determined.

In 2006–2007 the testing of road pavement structures by six different transducers was carried out in the University of Maine (Lauren and Swett. 2007). Transducers were

installed in different pavement structural layers to determine seasonal effect on the structural strength of road pavement.

The USA carried out investigations of experimental pavement structures in order to find out the change in the strength of separate layers during freeze – thaw periods (Vincent *et. al.* 1992). The Falling Weight Deflectometer (FWD) was used here to measure pavement structure in different periods of the year and to define the resistance of each pavement layer to frost effect.

Models of the performance of pavement structure under real conditions have been comprehensively analyzed by the Professor of the Technical University of Denmark P. Ullidtz (Ullidtz. 1998). The scientist studies elasticity of pavement structure, distribution of stresses, models influencing the service life of road pavement, its condition and tendencies for the initiation and development of defects.

For the control purposes various methods are used to determine the structural strength of pavement layers. Deformation modulus is most frequently determined by the non-destructive static and dynamic methods. The strength of road pavement and its separate structural layers in Lithuania is regulated by the static deformation modulus.

In order to use a dynamic measuring method for all pavement structural layers the research was started the aim of which was to determine the correlation between the measured dynamic and static modulus. The new dynamic values would give an opportunity to carry out quality control and to identify the bearing capacity of the study layer not only by a static plate load test, which is time-consuming and requires much effort, but also by dynamic devices.

Summary of correlation results between the static and dynamic measuring methods in foreign countries is given in figure S1.

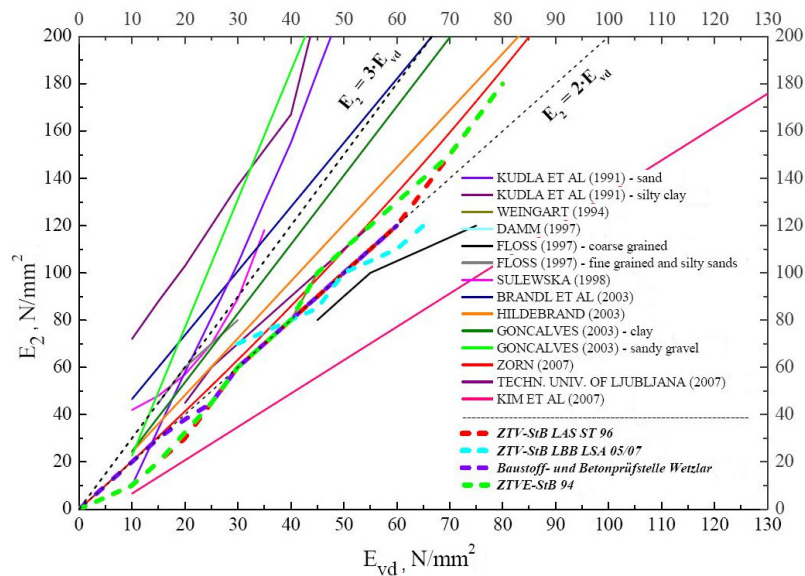


Fig. S1. Correlation results found in international literature (Tompai 2008)

This figure gives correlation results, obtained by the scientists from various countries of the world, between the static E_2 (static modulus by a static plate load) and dynamic E_{vd} (dynamic modulus) measuring methods.

The formulas for calculating direct correlation are seldom used in practice, most frequently the limit values are given for both E_2 and E_{vd} . Four different German standards give similar limit values presented in figure 1 (bright broken line). It could be also noticed that the value of static modulus measured by plate load at least twice exceeds the E_{vd} modulus. Some of the results represent even higher correlation. Only two literature sources give correlation lower than two, though they both refer to the modulus values measured in only several points and at small distances.

Obviously, the dynamic values presented in all German standards are close to a correlation line indicating the ratio of two. This means that in all known standards when giving the limit values of the dynamic modulus E_{vd} the lowest correlation ratio (or even slightly lower) is applied.

Determination of direct correlation between the dynamic and static moduli are seldom used in practice, the values of E_2 and E_{vd} moduli are approved in Germany, Slovenia and some other countries.

To find out and compare the accuracy of testing results obtained by the static and dynamic methods the first measurements in Lithuania were carried out in 2004 at the selected 20 points of the road A5 Kaunas – Marijampolė – Suwalki, from 16.10 to 16.40 km (grade-separated Garliava intersection). Measurements were carried out during road construction and this allowed to measure deflections of each structural layer and to estimate their deformation modulus. In 2007 the experimental test section of road pavement structures was built in Pagiriai where experimental research was carried out by the author of the dissertation. Further research results, their analysis and assessment will allow to select the most suitable measuring method for the separate pavement structural layers.

2. Methods for the determination of structural strength parameters of road pavement

Road pavement strength is the resistance of pavement to stresses and strains caused by traffic loads and climatic conditions. Road pavement strength is an invisible quantity, however, it is of special importance for the determination of pavement condition. It is very expensive to construct asphalt overlays, therefore, information about road pavement strength helps to plan pavement repair works taking into consideration the traffic volume and its composition.

From the recently worldwide used methods for determining road pavement strength the most effective method is based on deflection measurements (Fig. S2). The scientific research works of different countries have explained the relationships between load, elastic deflection of road pavement and modulus of elasticity of the thicknesses of pavement layers. Those relationships, determined by the same-size load, can be used to identify the strength of road pavement structure. The testing method enables to determine the force amplitude and its duration which is approximately equal to the duration of the wheel load impact on the road pavement, to evaluate indirect and plasto-elastic deformation value, to measure deflections in points situated at a distance from the loading centre.

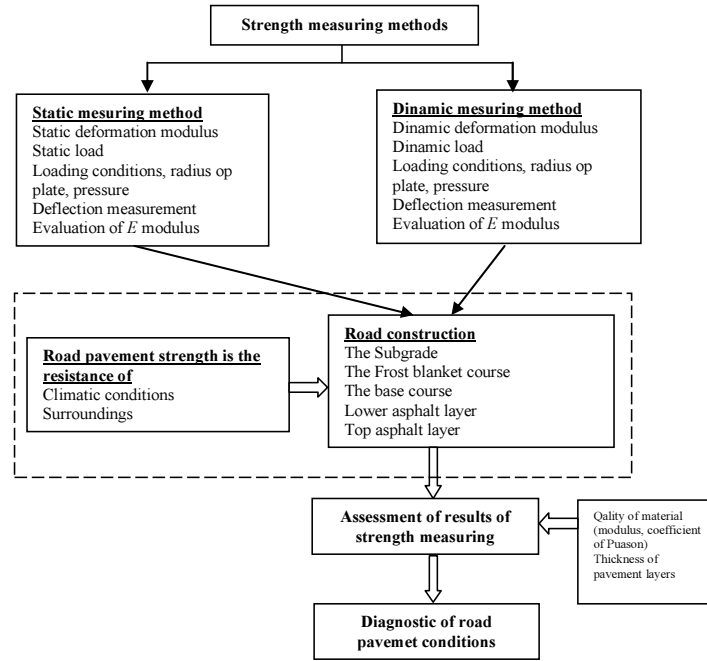


Fig. S2. Strength measuring methods based on deflection measurements

In order to determine the strength of separate pavement structural layers it was necessary to find out the relationship between deformation moduli calculated from pavement structure deflections obtained by the static and dynamic devices.

For practical purposes the most simple is a static strength measuring method. When taking measurements by static measuring devices a certain area of the pavement structure is being gradually loaded and unloaded. The certain indices could be distinguished characterizing the static strength of road pavement, i.e. ability of the structure to resist vertical stresses and horizontal stresses.

The essence of the static methods for determining pavement structural strength – to initiate a relative pressure to the pavement surface which, according to its value, corresponds to the load impact produced under the plate by vehicle wheel or dual wheels. In the first case the impact to the pavement surface is transferred through a rigid plate in an area which is equal to the calculated wheel track. Depending on the elastic deflection the total modulus of elasticity is calculated by the formula:

$$E = \frac{P \cdot D}{l} (1 - \nu^2), \quad (1)$$

where P – vehicle wheel pressure to the pavement, Pa; D – diameter of the plate, m; l – forced pavement deflection, m; ν – Poisson's ratio.

The above mentioned tests basically describe the average statistical modulus of elasticity of road pavement structure during a period of pavement service life. Based on the test data it is only possible to determine the ability of road pavement structure to resist main vertical stresses. However, the tests do not allow to fully describe the condition of road pavement structure and to predict its further worsening.

A common disadvantage of all static methods is that when using such methods it is impossible to assess the ability of pavement structure to essentially realize a dynamic impact caused by real traffic movement (Илиополов *et al.* 2001; Илиополов *et al.* 2002; Илиополов *et al.* 1996; Илиополов and Ляпин 1997).

Generally, all the static calculation schemes and assessment methods should be used for determining pavement structural strength, the ability of road pavement structure to carry the considerably increasing traffic loads and, thus, to avoid a rapid failure of road structure. Based on the static strength measuring results obtained with the help of dynamic coefficients and taking into consideration the rapidly growing traffic flows and increasing loads – this is an empirical transition from static decisions of the theory of elasticity to the failure of insufficiently investigated road structures due to the impact of dynamic stresses. With the worsening pavement surface a dynamic impact of traffic is increasing. This is first of all evidenced by the increase in energy accepted by the road structure. Then, the tendency of changing relations between different micro structural elements of road structure becomes obvious as well as of their failure.

In ideal case, condition assessment methodology shall explain reasons for the decrease of strength and to clearly distinguish the condition of separate elements: pavement, base courses and subgrade layers, and this in each case will allow to decide on the most efficient complex of repair measures. The standard solution to increase strength by laying a strengthening layer can appear ineffective in case when the subgrade soil is weak or the base courses are damaged. In that case the static condition assessment methods are uninformative.

Thus, static methods used for the design of road pavement structures and their strength assessment have the following disadvantages:

- static methods allow to determine the ability of road pavement structures to carry loads considerably exceeding the loads caused by road traffic and are uninformative for assessing the level of fatigue development processes in the structural layers of road pavement;
- static testing methods do not allow to find out the reason for the decrease in the strength of road pavement structure and restrict the effective decision-making when predicting road repair and maintenance.

In order to objectively assess road pavement condition it is advisable to apply impact analogous to a real traffic movement. Unlike the static measuring methods, dynamic methods make it possible to assess loads from moving vehicles.

When using dynamic measuring methods the load is produced by the drop of a falling massive cylinder in a very short period of time which causes deformations of structural pavement layers.

Dynamic deformation modulus E_{vd} describes deformation of soil under the load of predetermined size. Having measured the soil deformation s under the loading plate the value of modulus is found by the formula:

$$E_{vd} = 1.5 \cdot r \cdot \frac{\delta}{s}, \quad (2)$$

where: r – radius of the loading plate, cm; δ – dynamic load equal to 0.1 MN/m^2 ; s – soil deformation under the loading plate, mm.

Dynamic deformation modulus $E_{vd} \text{ MN/m}^2$ is found from the formula (2). Knowing the determined value of dynamic load under the plate δ , the plate diameter and the average value of measured deformations s mm, dynamic deformation modulus is calculated from the formula (3):

$$E_{vd} = \frac{22.5}{s}, \quad (3)$$

In Lithuania the recommended values for reducing dynamic deformation modulus E_{vd} to static deformation modulus E_{v2} are given in *LST 1360.5:1995 Road soils. Testing methods*.

Having taken measurements with the use of dynamic measuring method the obtained elastic deflection is reduced to a comparable shape (static deflection) using coefficients of regression relationship:

$$l_f = X_1 l_d + X_2 \cdot \quad (4)$$

where l_f – real deflection, mm; l_d – deflection measured by a dynamic device, mm; $X_{1,2}$ – empirical coefficients of regression relationship.

Calculation of data obtained by dynamic methods requires much time even when using modern electronic calculation techniques. Therefore, all the mathematical models of modern high-efficiency falling weight equipment are oriented to the calculation of the general modulus of elasticity of the road structure.

Dynamic measuring methods exceed the static ones both in the accuracy of results obtained and in the mobility of the execution of experiments. But the most important advantage of dynamic methods is, without doubt, their adequacy to real loads and traffic impacts. A wide experience of the use of dynamic analysis when testing road pavement proves a perspective development of those methods in the field of strength assessment. The most informative is the analysis of the structural strength of dynamically loaded road pavement.

When determining the strength of different pavement structural layers by the static and dynamic measuring methods it was necessary to find out correlation between deformation modulus calculated from pavement structure deflections obtained by the static and dynamic devices.

For the meantime, the dynamic method is not widely used in Lithuania and in some foreign countries since dynamic modulus has not been acknowledged for the assessment and control of the quality of pavement structural layers. Therefore, dynamic measuring devices are used rather seldom, mostly in small-scale projects where testing by a static plate load would be too complicated.

In order to use those dynamic devices for the measurements on the lower layers of road pavement structures the research was started aimed to determine correlation between the measured dynamic modulus and static modulus.

The main objective of research – to determine correlation between the dynamic and static moduli. Since the formulas for calculating direct correlation are seldom used in practice the aim was to estimate reduction coefficients for dynamic values.

In other words, in the near future the quality assessment, based on dynamic moduli, could replace the widely used slow and complicated static plate load test. The results would help to create and employ new design methods.

Most of Lithuania's normative documents have been prepared according to the German normative documents and standards. At present based on *LST 1360.5:1955 Road soils. Testing methods. Load test. 1995* Lithuania uses the recommended approximate values for reducing dynamic deformation modulus E_{vd} to static deformation modulus E_2 . Therefore, it is very important to justify the most suitable measuring method for the separate pavement structural layers and based on measuring results to suggest reduction coefficient values for each structural layer.

The values obtained by dynamic method would give an opportunity to carry out quality control and to assess the bearing capacity of the study layer not only by a static plate load test, which requires much time and efforts, but also by dynamic devices. A more wide use of the above mentioned dynamic devices would make it easier for the contractors, laboratories and engineers of road and railway construction enterprises to carry out a rapid and continuous quality control of embankments, roadbeds, soil layers and back-fillings.

3. Experimental research on measuring methods of pavement structural strength

The chapter describes experimental research on the determination of pavement structural strength, selection of the test section for experimental research and its construction, methodology for investigating pavement structure parameters and the equipment used. The analysis was carried out of the measurements taken on the subgrade and the lower layers of pavement structure.

In order to determine and compare the accuracy of the results obtained by the static and dynamic measuring methods, first of all, it is necessary to analyse methods for determining pavement structural strength and to make a review of similar scientific works. Also, to carry out the impact analysis of factors influencing road pavement structure, such as traffic loads, climatic and environmental factors. The need for strengthening road pavement structures necessitates to introduce new road reconstruction technologies, to look for new alternatives in building pavement structural layers, to investigate pavement structures in their real conditions of operation. Namely for this reason the comparable measurements were carried out on the road and on the test section. The first measurements were taken in 2004 on the selected road A5 Kaunas – Marijampolė – Suwalki, in the section from 16.10 to 16.40 km (grade-separated Garliava intersection), and in 2007 the experimental test section was constructed in Pagiriai for further research.

The following experimental research had to be carried out in order to theoretically justify the suitability of static and dynamic measuring methods and the compatibility of measuring devices for measuring the strength of the separate pavement layers and to select the most reliable:

- to carry out measurements of the structural strength of road pavement on the road and on the test section;
- to experimentally investigate the structural strength of road pavement by different measuring devices using the static and dynamic measuring methods;
- to make the assessment of measuring results obtained by different measuring devices;
- to justify the most suitable measuring method for the separate layers of road structure.

When constructing the experimental test section in Pagiriai the deformation modulus of the separate pavement structural layers and the whole pavement structure was determined, like on the road section Kaunas – Marijampolė – Suwalki (16.10 – 16.40 km), by the static and dynamic methods using the following devices:

static method – static beam (press) “Strassentest”;

dynamic method – light dynamic device “ZORN ZSG 02”; Falling Weight Deflectometer LWD “Prima 100”; Falling Weight Deflectometer FWD “Dynatest 8000”.

Based on the executed comparable strength measurements on the road and on the test section the author of this dissertation made the analysis and assessment of comparable measurement data.

Analysis of the measuring results by dynamic devices on the subgrade shows that there is a regular correlation between all measuring devices. On the road section Kaunas – Marijampolė – Suwalki (16.10 – 16.40 km) the numerical values of deformation modulus (MPa), compared to a static beam, vary and are higher: LWD and ZORN – 8 – 80 % from the mean, and the values of FWD are 8 % lower from the mean compared to a static beam. The results of measurements on the test section in Pagiriai showed that the numerical values of deformation modulus, compared to a static beam, vary more and are lower: the values of LWD “Prima 100” and “ZORN ZSG 02” are 14-17 %, and the values of FWD “Dynatest 8000” are 70 % higher than the numerical values of deformation modulus measured by a static beam.

Analysis of the measuring results by dynamic devices on the frost-blanket course shows that there is a regular correlation between all measuring devices, though, the numerical values of deformation modulus, compared to a static beam, vary. The values of Falling Weight Deflectometer LWD “Prima 100” and dynamic device “ZORN ZSG 02” are 33–43 % lower than the mean numerical value of deformation modulus measured by a static beam, and the values of Falling Weight Deflectometer FWD “Dynatest 8000” are 40 % higher.

Analysis of the measuring results by dynamic devices on pavement base shows that there is a regular correlation between all measuring devices, though, the numerical values of deformation modulus, compared to a static beam, vary more. On the road section Kaunas – Marijampolė – Suwalki (16.10 – 16.40 km) analysis on a gravel base showed that the values of dynamic device “ZORN ZSG 02” are 9 %, the mean values of Falling Weight Deflectometer LWD “Prima 100” are 32 %, and the values of Falling Weight Deflectometer FWD „Dynatest 8000” are 4 % lower than the mean numerical value of

deformation modulus measured by a static beam. Analysis on a crushed dolomite base showed that the values of Falling Weight Deflectometer FWD „Dynatest 8000“ are 3 %, the mean values of LWD “Prima 100“ are 34 % lower than the mean numerical value of deformation modulus measured by a static beam. Analysis of measuring results on the test section in Pagiriai showed that the values of LWD “Prima 100“ and dynamic device “ZORN ZSG 02“ are 31–35 % lower than the numerical values of deformation modulus measured by a static beam, and the values of Falling Weight Deflectometer FWD “Dynatest 8000“ are 30 % higher.

Analysis of the measuring results by dynamic devices on the subgrade, frost-blanket course and base courses shows that there is a regular correlation between all measuring devices, though, the numerical values of deformation modulus, compared to a static beam, vary and are lower. This explains the differences in measuring methods and calculation methodologies. Analysis of the results indicated that there is no possibility to unambiguously decide which method is the best and most acceptable.

4. Analysis and assessment of research results on measuring methods of pavement

The chapter describes statistical analysis and assessment of research results obtained on the subgrade and the lower pavement layers. Mathematical statistics is one of the methods allowing to properly generalize research data. The differences obtained and the conclusions made can be essential only when they are proved as mathematically reliable.

For the strength determination analysis of the road section Kaunas – Marijampolė – Suwalki (16.10 – 16.40 km) the static and dynamic methods were applied for all structural road pavement layers. To continue scientific research and to find the most suitable and cost-effective road pavement structures the functioning of which would be studied under natural conditions and under a concrete heavy traffic volume the scientific research work was implemented in Pagiriai test section on the subgrade, frost-blanket course and base courses using the same measuring methods like in the previously investigated Kaunas section by showing functional correlation $E_{v2}=f(E_{v(FWD)})$, $E_{v2}=f(E_{v(LWD)})$, $E_{v2}=f(E_{v(ZORN)})$ between measuring devices.

To determine the reliability of results using the above methods the methods of mathematical statistics were applied. Having implemented the analysis and assessment of measurement data the reduction coefficient was suggested for the comparison of measuring results obtained on the pavement structural layers by the static and dynamic measuring methods.

When implementing research of experimental road sections for the analysis and assessment of the strength indices that were obtained the methods of mathematical statistics were used: descriptive statistics, analysis and interpretation methods.

A width of data set is defined as the difference between maximum and minimum values of statistical data.

Width is informative only in case where there are no exceptional values. A quartile width is most frequently used. It describes 50% dispersion of data values. A quartile width in statistics is represented by rectangular plots (Fig S3.). A rectangular plot shows a graphical min., Q_1 , Q_3 , Q_4 image.

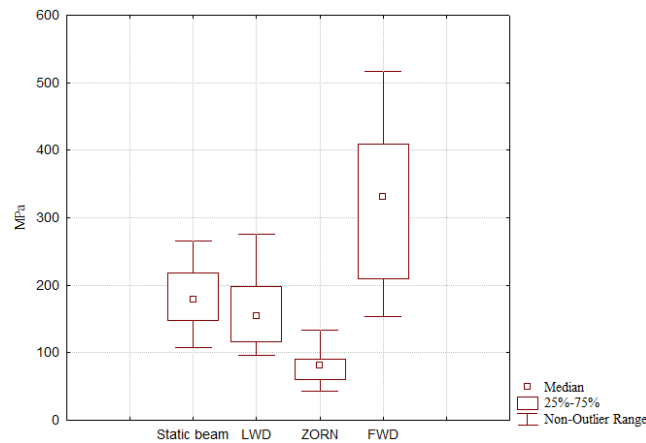


Fig. S3. Dispersion plot of measuring results on the subgrade (left side)

Dispersion plots of results on the subgrade, frost-blanket course and pavement base showed a dispersion of results between each device. A large difference could be observed between minimum and maximum value. The lowest dispersion of results was indicated by the dynamic device “ZORN ZSG 02” and a static beam “Strassentest” and this shows more reliable measuring results. The highest dispersion of results was indicated by FWD “Dynatest 8000”.

Correlation analysis. Correlation was obtained between the minimum and maximum different values of deformation modulus (Fig S4.).

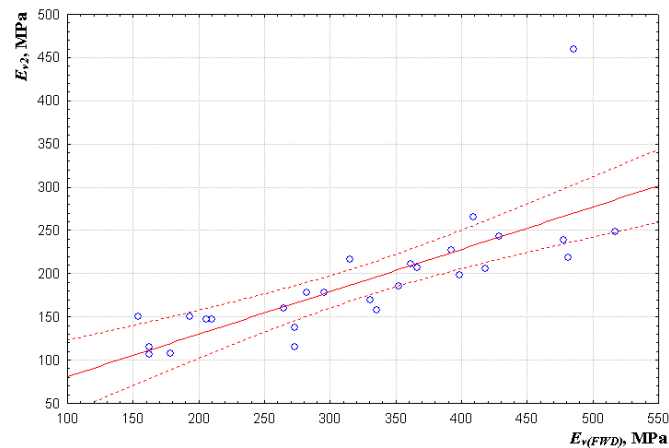


Fig. S4. Correlation between measuring results of the FWD “Dynatest 8000” and a static beam “Strassentest” on the subgrade of experimental road section in Pagiriai (left side)

The highest correlation was obtained when measuring deformation modulus on the subgrade on the left side by FWD “Dynatest 8000” and a static beam “Strassentest”

($r^2=0.5853$, $r=0.7651$), however, on the right side the correlation coefficient is not considerably lower ($r^2=0.2513$, $r=0.5013$). Though the relationship between the static beam and other dynamic devices is not very strong this is explained by different methodologies.

The highest correlation was obtained when measuring deformation modulus on the frost-blanket course on the left side by “ZORN ZSG 02” and a static beam “Strassentest” ($r^2=0.5198$, $r=0.7210$). Though the relationship between the static beam and other dynamic devices is not very strong this is explained by different methodologies.

Correlation results of measurements on pavement base by all devices were poor. The highest correlation coefficient on pavement base on the left side was determined between a static beam “Strassentest” and Falling Weight Deflectometer FWD “Dynatest 8000”, correlation coefficient $r=0.4541$.

Mathematical expression of the suggested reduction coefficient k^* developed for the comparison of results obtained by the static and dynamic methods is as follows:

$$k^* = \frac{E_{v2}}{E_{vd}} \pm \Delta k. \quad (5)$$

When analysing measurements on the separate structural layers it was assumed that Poisson's ratio is constant ($\nu = const.$), the effect of temperature was not considered (the effect of temperature must be considered when assessing strength measurements on asphalt layers). During measurements with FWD inertia was not considered also. Adjustment of the reduction coefficient k^* for each structural layer to the suggested coefficient in the normative documents, E_{v2}/E_{vd} ratio is given according to the suggested ratio in the normative documents, and the k^* values are suggested for each separate device. An example of variation of the reduction coefficient is graphically represented in figure S5.

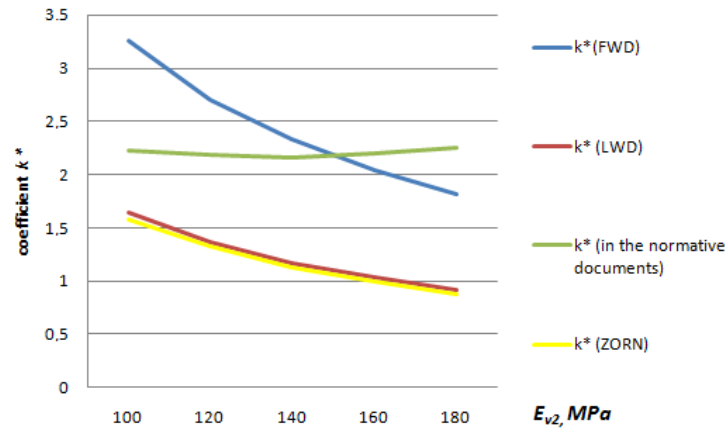


Fig. S5. Adjustment of the reduction coefficient k^* for the measurements on the subgrade to the suggested coefficient in the normative documents

The normative curve of coefficient k^* shows the ratio between E_{vd} (dynamic deformation modulus) and E_{v2} (static deformation modulus), this ratio varies almost linear in the interval between 100 and 180 MPa, the suggested coefficient E_{v2}/E_{vd} varies from 2.16 to 2.25. Variation of the suggested coefficient when taking measurements on the subgrade by the FWD is indicated by a blue curve and the variation is from 1.81 to 3.26, i.e. the ratio between the normative and the suggested coefficient differs by 50 %, except one point E_{v2} where 150 MPa ratio is equal to 1. The red curve points out variation of the coefficient measured by the LWD, the variation is from 0.91 to 1.64, i.e. the ratio with the suggested by the normative documents is 40 %, and in other case is 70 % lower than the normative one. A very similar coefficient is obtained having taken measurements by the ZORN device (yellow line), the variation is from 0.88 to 1.58, i.e. the ratio is 40 %, and other is 70 % lower than the normative coefficient.

The largest differences were obtained taking measurements by the FWD device, therefore, those measuring results will be discussed more widely. Reduction coefficient measured by FWD on the subgrade is 50 % higher than the normative, on the frost-blanket course is 2 times lower than the normative, and the errors of small devices are similar in all cases and vary from 40 to 60 % from the normative values. The charts in Fig. S6–S8 show the variation of reduction coefficient not only at the mean values but also at the minimum and maximum values measured on the structural layers of the road.

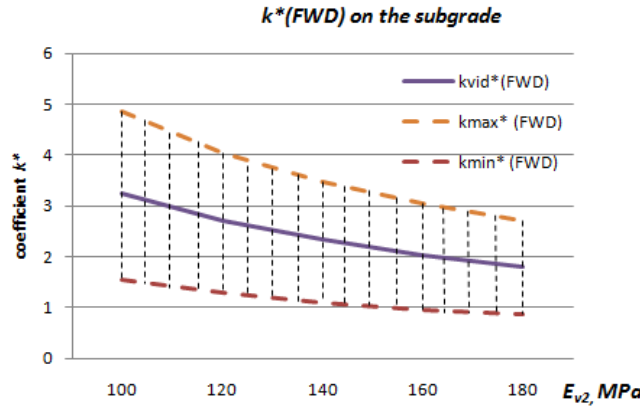


Fig. S6. Variation limits of reduction coefficient k^* (FWD) measured on the subgrade

The values of reduction coefficient $k^*(FWD)$ on the subgrade vary from the mean value approximately from 0.4 to 0.7, and could be represented by the following mathematical expression:

$$k^* = k_{vid} \pm (0.4 \dots 0.7) k_{vid} ; \quad (6)$$

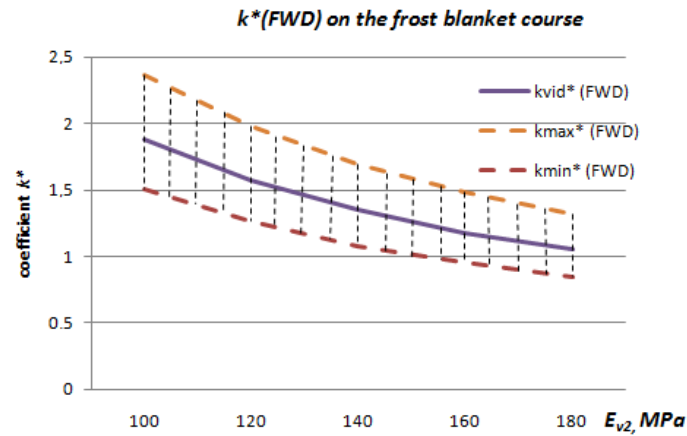


Fig. S7. Variation limits of reduction coefficient k^* (FWD) measured on the frost-blanket course

The values of reduction coefficient k^* (FWD) on the frost-blanket course vary from the mean value approximately by 0.8 time, and could be represented by the following mathematical expression:

$$k^* = k_{vid} \pm 0.8k_{vid} ; \quad (7)$$

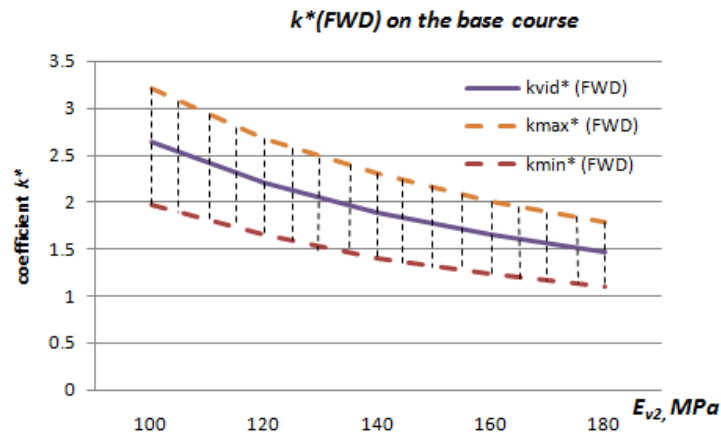


Fig. S8. Variation limits of reduction coefficient k^* (FWD) measured on the base course

The values of reduction coefficient k^* (FWD) on the base course vary from the mean value approximately from 0.7 to 0.8, and could be represented by the following mathematical expression:

$$k^* = k_{vid} \pm (0.7...0.8)k_{vid} ; \quad (8)$$

Based on the analysis and assessment of research results the following supplement to the mathematic expression (5) could be suggested for the reduction coefficient k^* developed for the comparison of results obtained by the static and dynamic measuring methods:

$$k^* = \frac{E_{v2}}{E_{vd}} \pm (0.4...0.8)k_{vid} . \quad (9)$$

General conclusions

1. The research was carried out and the results were processed based on the investigations carried out by the Laboratory of Road Research of Road Department of Vilnius Gediminas Technical University on Kaunas road section and Pagiriai experimental test section. Measurements were taken by the static and dynamic methods using the following devices: the static beam "Strassentest", the dynamic Falling Weight Deflectometer FWD "Dynatest 8000", the LWD "Prima 100" and the dynamic device "ZORN ZSG 02". Having taken measurements it could be stated that all the study devices are suitable for the determination of deformation modulus on the subgrade and frost-blanket course.

2. Based on research results obtained from the measurements on Kaunas road section it was noticed that the methods and devices used to determine road pavement strength shall be used based on the application of measuring results:

- Static beam – most suitable to determine deformation modulus at the surface of aggregate layers;
- Deflectometer – for detail research of the whole condition of pavement structure.

3. Analysis of measuring results of the subgrade and frost-blanket course obtained by dynamic devices shows that there is a regular correlation between all the devices, though, the numerical values of deformation modulus, compared to a static beam, vary: FWD "Dynatest 8000" are by 70 % higher, LWD "Prima 100" and the dynamic device "ZORN ZSG 02" are by 8–80 % lower. Therefore, there is no possibility to unambiguously decide which method is the best and most acceptable.

4. Correlation results of the pavement base measurements between all devices are poor. The highest correlation coefficient ($r=0.4541$) on pavement base on the left side was determined between the static beam "Strassentest" and the Falling Weight Deflectometer FWD "Dynatest 8000".

5. The results of research of deformations of the structural layers of experimental pavement structures by the static and dynamic measuring devices showed that the structural strength of pavement layers determined by the Falling Weight Deflectometer is close to the strength determined by a static testing device. There is a linear relationship between the E modulus determined by the static and dynamic methods. Correlation of deformation moduli determined by different methods shows that the Falling Weight Deflectometer can be used

for determining the strength of investigated pavement structures using reduction coefficients developed by experimental research.

6. Having made the analysis and assessment of subgrade research results it could be stated that all measuring devices represent reliable results. The most suitable devices for measuring strength of the frost-blanket course are a static beam and the dynamic device "ZORN ZSG 02". Based on the analysis and assessment of research results for the reduction coefficient k^* developed for the comparison of results obtained by the static and dynamic methods to use mathematical formula suggested by the author of the dissertation.

7. Based on research results it is suggested to carry out further scientific investigations on the subgrade and on road pavement layers taking into consideration thickness of the layer, material composition, temperature, to carry out measurements under similar conditions and to take into consideration the Poisson's ratio of each material used for the road structure. What concerns the base course it would be necessary to correct the load distribution coefficient, used in calculation methodology, as this coefficient influences the size of deformation modulus.

8. Based on the analysis of the results obtained it is suggested to prepare recommendation for normative documents which would exactly indicate on what layer and under what conditions one or another measuring device shall be used.

Priedai¹

- A priedas.** Automobilių kelių konstrukcijos sandara, sluoksnių paskirtis
- B priedas.** Kelio konstrukcijos sluoksnių stiprumo nustatymo metodai
- C priedas.** Rekomenduojamos apytikrės dinaminio deformacijos modulio pervedimo į statinį deformacijos modulį reikšmės
- D priedas.** Kauno bandomojo ruožo duomenys
- E priedas.** Pagirių bandomojo ruožo duomenys
- F priedas.** Matavimų schemos
- G priedas.** Konstrukcijos schemos
- H priedas.** Publikacijų bendraautorių sutikimai teikti publikacijas disertacijos gynime
- I priedas.** Autoriaus publikacijų disertacijos tema kopijos

¹ Priedai pateikti pridėtoje elektroninėje laikmenoje

Lina BERTULIENĖ

AUTOMOBILIŲ KELIŲ KONSTRUKCIJOS PAGRINDO
SLUOKSNIŲ STIPRUMO NUSTATYMO METODŲ
VERTINIMAS, TYRIMAI IR TAIKYMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai
Statybos inžinerija (02T)

ASSESSMENT, RESEARCH AND USE OF METHODS FOR
DETERMINING THE STRENGTH OF BASE COURSES OF
ROAD PAVEMENT STRUCTURE

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Civil Engineering (02T)

2011 12 21. 13,75 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