VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Igoris KRAVCOVAS

GATVIŲ DANGOS BŪKLĖS VERTINIMO RODIKLIŲ ĮVERČIŲ REIKŠMINGUMO TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (T 002)

Vilnius, 2021

Disertacija rengta 2016–2021 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

prof. dr. Audrius VAITKUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002).

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

Pirmininkas

prof. dr. Darius BAČINSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002).

Nariai:

doc. dr. Vytautas GRIGONIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002),

doc. dr. Artūras KERŠYS (Kauno technologijos universitetas, transporto inžinerija – T 003),

doc. dr. Marek PSZCZOLA (Gdansko technikos universitetas, Lenkija, statybos inžinerija – T 002),

prof. habil. dr. Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2021 m. rugpjūčio 27 d. 9 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

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

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2021 m. liepos 26 d.

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

Vilniaus Gedimino technikos universiteto 2021-038-M mokslo literatūros knyga

doi: 10.20334/2021-038-M

© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2021
© Igoris Kravcovas, 2021
igoris.kravcovas@vilniustech.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Igoris KRAVCOVAS

ANALYSIS OF URBAN ROAD PAVEMENT PERFORMANCE INDICATORS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (T 002)

Vilnius, 2021

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2016–2021.

Supervisor

Prof. Dr Audrius VAITKUS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

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

Chairman

Prof. Dr Darius BAČINSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

Members:

Assoc. Prof. Dr Vytautas GRIGONIS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002),

Assoc. Prof. Dr Artūras KERŠYS (Kaunas University of Technology, Transport Engineering – T 003),

Assoc. Prof. Dr Marek PSZCZOLA (Gdansk University of Technology, Poland, Civil Engineering – T 002),

Prof. Dr Habil. Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

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 **9 a. m. on 27 August 2021**.

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

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 26 July 2021.

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

Reziumė

Miestų savivaldybių administracijos nuolatos sprendžia sudėtingą racionalizavimo uždavinį, siekiant ekonomiškai efektyviai parinkti gatvių tinklo atnaujinimo prioritetus. Faktinė situacija rodo, kad atnaujintų gatvių ruožų dangos konstrukcija dažnai neatlaiko numatyto naudojimo laikotarpio apkrovų. Tokiems atvejams išvengti turėtų būti žinoma viso gatvių tinklo būklė bei nustatyti atrankos kriterijai. Šioje disertacijoje nagrinėjami gatvių dangos būklės vertinimo bei dangos būklės rodiklių įverčių reikšmingumo racionalizavimo klausimai. Tyrimo objektas yra gatvių dangos būklės vertinimas pagal išmatuojamus ir apskaičiuojamus būklės rodiklius išskiriant homogeninius ruožus, siekiant racionalizuoti gatvių tinklo remonto prioritetų nustatymą.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, rekomendacijos, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai bei 6 priedai.

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

Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Jame pateikta dangų valdymo sistemų samprata, dangos būklės vertinimo metodikos bei segmentavimo principai ir metodai. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir pateikiami disertacijos uždaviniai. Antrajame skyriuje pateiktas eksperimentinio tyrimo planas ir metodika bei tyrimo rezultatai. Aprašomas atliktas eksperimentinis tyrimas, kurio metu panaudojant natūrinius Vilniaus miesto gatvių būklės duomenis, įvairiais metodais nustatoma gatvių dangos konstrukcijos būklė. Panaudotos metodikos palyginamos, išryškinant privalumus ir trūkumus, pasirenkama viena metodika tolimesnei analizei. Trečiajame skyriuje palyginami keli ruožų segmentavimo metodai, tarp jų ir pasiūlytas autoriaus, išrenkamas tinkamiausias. Aprašomas taikomas segmentavimo algoritmas bei sukurtos automatizuotos segmentavimo skaičiuoklės veikimo principas. Segmentavimo efektyvumas patikrinamas, pritaikant pasirinktą metodą ištirtiems gatvių ruožams. Apskaičiuojamas kiekvieno dangos būklės indekso reikšmingumas, įvertinama laikomosios gebos įtaka suminiam dangos būklės indeksui. Pateikiamos rekomendacijos gatvių dangos būklės vertinimui miestų gatvėse bei dangų valdymo sistemų įdiegimui.

Disertacijos tema paskelbti 4 mokslo straipsniai: trys – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į Clarivate Analytics Web of Science duomenų bazę, vienas – recenzuojamoje tarptautinės konferencijos medžiagoje. Disertacijos tema perskaityti 3 pranešimai Lietuvos bei kitų šalių mokslinėse konferencijose.

Abstract

This dissertation touches the subject of urban road pavement network evaluation and significance of pavement performance indicators. The aim of this thesis is to determine the significance of bearing capacity as well as other pavement performance indicators used in the pavement evaluation process, while proposing the approach for urban road sectioning in order to help with the problem of determining road network repair priorities.

The dissertation consists of an introduction, three chapters, general conclusions, recommendations, lists of cited literature and author's publications on the topic of the dissertation, as well as 6 appendices.

The introduction contains the research problem, the relevance of the work, the object of research. The aim of study as well as its objectives are established. The developed research methodology, the scientific novelty of the work and its significance, the defended statements are also described. At the end of the introduction, the author's publications and conference papers are listed, the structure of the dissertation and the acknowledgments are presented. The first chapter is dedicated to literatures research regarding areas relevant to this study. In this chapter the pavement management system (PMS) principles, aims and demand are described. Also pavement performance evaluation process is analyzed while comparing several existing methodologies and presenting the concept of technical parameters (TP), performance indices (PI) and combined performance indices (CPI). In addition several existing road sectioning methodologies are presented and analyzed while highlighting the concept of a homogenous section. The second chapter presents the experimental research. 15 of Vilnius city urban roads were investigated by collecting pavement distress, roughness, FWD deflection data, as well as other relevant parameters. Performance of urban pavements is evaluated while 2 pavement evaluation methodologies are compared. One methodology is chosen for further analysis. The third chapter starts with comparison of four road sectioning methodologies. The proposed combined method is chosen as the most reliable one. Based on this method the automatic sectioning algorithm is described, and the original automatic sectioning spreadsheet is presented. Also in this chapter the significance of each pavement performance indicator is calculated while accentuating on bearing capacity impact on overall performance indices. At the end of this thesis, conclusions and recommendations for practical use of findings are presented.

4 scientific articles were published on the topic of the dissertation: three – in scientific journals included in the Clarivate Analytics Web of Science database, one – in a peer-reviewed scientific journal. 3 reports on the topic of the dissertation were read at scientific conferences in Lithuania and other countries.

Žymėjimai

Simboliai

a – apkrovos plokštės skersmuo, mm;
A – regresijos parametras, mm;
$A_{i,j}$ – i tipo j išsivystymo laipsnio plyšių plotas, m^2;
A_{ref} – nagrinėjamo ruožo plotas, m^2;
B – regresijos parametras, mm^{-1};
BI_n – būklės indeksas;
CR – plyšiais pažeisto ploto dalis, %;
$d_{0,n}$ – normalizuotas įlinkis n-ame deformacijos jutiklyje, mm;
d_n – įlinkis, pamatuotas n-ame deformacijos jutiklyje, mm;
E_0 – dangos konstrukcijos nesurištųjų pagrindo sluoksnių standumo modulis, N/mm^2
E_{v2} – statinis deformacijos modulis, MPa;
f – įtempimų pasiskirstymo faktorius;
F – perduodama smūgio jėga, kN;
h – asfalto dangos sluoksnių storis, mm;
I_n – svoriniais koeficientais išreikšti būklės indeksai;
I_{plotis} – standartinis remontuojamo plyšio plotis (priimta – 0,5 m), m;

IRI – ruožo vidutinis dangos nelygumas, m/km;

KBI – kombinuotas būklės indeksas;

l – eismo juostų skaičius;

l – tamprios deformacijos ilgis, mm;

L_{apkr} – apkrova suteikta matavimo metu, kN;

LFC – išilginis trinties koeficientas (50 km/val.);

$L_{i,j}$ – *i* tipo *j* išsivystymo laipsnio plyšių ilgis, m;

L_{st} – standartinė apkrova (50 kN);

M_0 – dangos konstrukcijos nesurištųjų pagrindo sluoksnių modulis, N/mm^2;

M_0 – nesurištų medžiagų puserdvės sluoksnio modulis, N/mm^2;

MPD – vidutinis profilio gylis, mm;

n – ruoželių skaičius;

p – poveikio faktorius, %;

R/D – liekamasis amžius / projektinis laikotarpis;

R_0 – įlinkio kreivės spindulys nuo apkrovos centro, m;

R_0 – įlinkio kreivės spindulys nuo apkrovos centro;

R^2 – apibrėžtumo koeficientas;

r_i – atstumas nuo apkrovos centro, mm;

RUT – provėžos gylis, mm;

SD – paviršiaus defektais pažeisto ploto dalis, %;

SFC – šoninės jėgos koeficientas (60 km/val.);

T – asfalto dangos sluoksnio temperatūra, º C;

TP_{pd} – bendras paviršiaus defektų kiekis nagrinėjamo kelio ruožo dangoje, %;

$TP_{pd,i,A,j}$ – *i* paviršiaus defektų *j* išsivystymo laipsnio, matuojamiems ploto vienetais, pažeistas dangos plotas, %;

TP_{pl} – bendras plyšių kiekis nagrinėjamo kelio ruožo dangoje, %;

$TP_{pl,i,A,j}$ – *i* plyšių *j* išsivystymo laipsnio, matuojamų ploto vienetais, pažeistas dangos plotas, %;

$TP_{pl,i,L,j}$ – *i* plyšių *j* išsivystymo laipsnio, matuojamų tiesiniais vienetais, pažeistas dangos plotas, %;

T_z – laikomosios gebos skaičius;

w_0 – išmatuotas įlinkis apkrovos centre, mm;

w_{200} – išmatuotas įlinkis 200 mm atstumu nuo apkrovos centro, mm;

$w_{i,ri}$ – deformacija už apkrovos taikymo ribų, išmatuota deformacijos jutikliu atstumu *r* nuo apkrovos centro, mm;

W_n – būklės indeksų svorinis koeficientas;

μ_0 – dangos konstrukcijos nesurištųjų pagrindo sluoksnių Puasono koeficientas;

ν – Puasono koeficientas;

σ_0 – standartinė apkrova po apkrovos plokšte, MPa.

Santrumpos

AASHTO – Jungtinių Amerikos Valstijų greitkelių ir transporto asociacija (angl. American Association of State Highway and Transportation Officials);

BCI – žemės sankasos dangos laikomosios gebos rodiklis (angl. Base Curvature Index);

BDI – pagrindo sluoksnių dangos laikomosios gebos rodiklis (angl. Base Damage Index);

BI – dangos būklės indeksas;

BI_L – dangos konstrukcijos laikomosios gebos būklės indeksas;

BI_N – nelygumo dangos būklės indeksas;

BI_P – provėžų dangos būklės indeksas;

BI_Pd – paviršiaus defektų dangos būklės indeksas;

BI_Pl – plyšių dangos būklės indeksas;

BI_S – automobilio rato su danga sukibimo būklės indeksas;

DBI – suminis dangos būklės indeksas;

DBI – suminis dangos būklės indeksas;

DK – dangos konstrukcija;

DVS – dangų valdymo sistema;

FWD – krintančio svorio deflektometras;

IRI – tarptautinis dangos nelygumo indeksas;

KBI – kombinuotas būklės indeksas;

KBI_komf – komforto kombinuotas būklės indeksas;

KBI_saug – saugumo kombinuotas būklės indeksas;

KBI_str – struktūrinis kombinuotas būklės indeksas;

KS – kumuliacinio skirtumo metodas;

LAKD – VĮ Lietuvos automobilių kelių direkcija;

PCI – dangos būklės indeksas (angl. Pavement Condition Index);

RDP – skaidymo-sujungimo algoritmas (Ramer–Douglas–Peucker algoritmas);

RST28 – mobilioji kelių tyrimų laboratorija;

SCI – surištųjų sluoksnių dangos laikomosios gebos rodiklis (angl. Surface Curvature Index);

SDSL – suminis dangos suirimo laipsnis;

SV – slenkančių vidurkių metodas;

SV+KS – jungtinis slenkančių vidurkių ir kumuliacinio skirtumo metodas;

TP – dangos techninis parametras;
VMPEI – vidutinis metinis bendras paros eismo intensyvumas;
VMPEI(SV) – vidutinis metinis sunkiojo transporto paros eismo intensyvumas;
VMS – Vilniaus miesto savivaldybė;
VT – visuomeninis (maršrutinis) transportas;
ŽS – žemės sankasa.

Turinys

ĮVADAS 1
Problemos formulavimas 1
Darbo aktualumas 2
Tyrimų objektas 2
Darbo tikslas 2
Darbo uždaviniai 3
Tyrimų metodika 3
Darbo mokslinis naujumas 3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė 4
Ginamieji teiginiai 4
Darbo rezultatų aprobavimas 4
Disertacijos struktūra 5
Padėka 5
Disertacijos rengimo algoritmas 6

1. DANGOS BŪKLĖS ĮVERTINIMO METODŲ ANALIZĖ 7
1.1. Kelių ir gatvių tinklo dangų būklės monitoringas ir valdymas 7
1.1.1. Dangų valdymo sistemų poreikis ir tikslai 9
1.1.2. Įvesties duomenys, reikalingi dangų valdymo sistemoms 12
1.2. Dangos būklės rodikliai 15
1.2.1. Asfalto dangos būklė ir savybės 16
1.2.2. Techniniai parametrai 18
1.2.3. Būklės indeksai 27

1.3. Dangos būklės kitimo (degradacijos) prognozavimo modeliai 30
1.4. Ruožų segmentavimo pagal dangos būklę principai 34
1.4.1. Kumuliacinio skirtumo metodas 36
1.4.2. Absoliučių slenkančių vidutinių verčių skirtumų metodas 38
1.4.3. Kumuliacinio skirtumo metodo atmainos ir kiti metodai 40
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir darbo uždavinių formulavimas 43

2. MIESTO GATVIŲ DANGOS BŪKLĖS TYRIMAS 45
2.1. Eksperimentinio tyrimo planas 45
2.1.1. Tyrimo planas 46
2.1.2. Tiriamųjų gatvių ruožų pasirinkimas 47
2.2. Eksperimentinio tyrimo metodika 51
2.2.1. Gatvių dangos ruožų matavimai 51
2.2.2. Gatvių dangos būklės vertinimas 56
2.3. Gatvių dangos būklės tyrimų rezultatai 59
2.3.1. Absoliutūs dangos būklės tyrimų rezultatai 59
2.3.2. Dangos būklės rodiklių ryšys su teorine dangos konstrukcijos klase 62
2.3.3. Laikomosios gebos vertinimas pagal tampriąją deformaciją 66
2.4. Dangos būklės vertinimo metodikų palyginimas 72
2.5. Antrojo skyriaus išvados 75

3. SUMINIO DANGOS BŪKLĖS RODIKLIO ĮVERČIŲ REIKŠMINGUMO NUSTATYMAS 77
3.1. Gatvių homogeninių ruožų sudarymas ir tikslinimas 78
3.1.1. Segmentavimo metodo parinkimas 78
3.1.2. Segmentavimo efektyvumo patikrinimas 81
3.1.3. Automatizuotas segmentavimo algoritmas 86
3.2. Dangos būklės indeksų reikšmingumas 92
3.2.1. Bendro įverčių reikšmingumo nustatymas 92
3.2.2. Laikomosios gebos įtaka suminiam dangos būklės indeksui 96
3.2.3. Krovininio eismo rodiklio įtaka laikomosios gebos indeksui 100
3.3. Viršutinio sluoksnio atnaujinimo darbų įtaka dangos konstrukcijos būklės kitimui 100
3.4. Trečiojo skyriaus išvados 107

BENDROSIOS IŠVADOS 109

REKOMENDACIJOS 113

LITERATŪRA IR ŠALTINIAI 115

AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS 123

SUMMARY IN ENGLISH 125

PRIEDAI[1] 141
A priedas. Dangos konstrukcijos klasės apskaičiavimas bei jos palyginimas su teorine 143
B priedas. Keturiais metodais sudarytų segmentavimo kreivių palyginimas 145
C priedas. Automatizuota segmentavimo skaičiuoklė 157
D priedas. Autoriaus sąžiningumo deklaracija 158
E priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje 159
F priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos 169

[1] Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Contents

INTRODUCTION 1
Problem formulation 1
Relevance of the thesis 2
Object of the thesis 2
Aim of the thesis 3
Objectives of the thesis 3
Research methodology 3
Scientific novelty of the thesis 4
Practical value of the research findings 4
Defended statements 4
Approval of the research findings 4
Structure of the thesis 5
Acknowledgements 5
The arrangement algorithm of dissertation 6

1. ANALYSIS OF PAVEMENT EVALUATION METHODS 7
1.1. Pavement monitoring and management of road and urban road networks 7
1.1.1. Pavement management system demand and objectives 9
1.1.2. Pavement management system input data 12
1.2. Pavement performance indicators and their significance 15
1.2.1. Asphalt pavement condition and properties 16
1.2.2. Technical parameters 18

1.2.3. Performance indicators 27
1.3. Pavement performance models 30
1.4. Pavement segmentation based on performance 34
1.4.1. Cumulative difference approach 36
1.4.2. Sliding mean value approach 38
1.4.3. Cumulative difference approach variations and other methods 40
1.5. Conclusions of the first chapter and formulation of the aim and tasks of the dissertation 43

2. URBAN ROAD PAVEMENT PERFORMANCE RESEARCH 45
2.1. Experimental research 45
2.1.1. Research plan 46
2.1.2. Selection of test site 47
2.2. Experimental research methodology 51
2.2.1. Urban road pavement measurements 51
2.2.2. Urban road pavement evaluation 56
2.3. Urban road pavement condition 59
2.3.1. Absolute urban road pavement research results 59
2.3.2. Pavement performance indicator correlation with reference pavement class 62
2.3.3. Evaluation of bearing capacity based on elastic deformation 66
2.4. Comparison of pavement performance methods 72
2.5. Conclusions of the second chapter 75

3. ANALYSIS OF PAVEMENT PERFORMANCE INDICATOR SIGNIFICANCE .. 77
3.1. Urban road segmentation and adjustment 78
3.1.1. Selection of segmentation methods 78
3.1.2. Segmentation efficiency verification 81
3.1.3. Automatic segmentation algorithm 86
3.2. Pavement performance index significance 92
3.2.1. Overall pavement performance indicator evaluation 92
3.2.2. Bearing capacity influence on general performance index 96
3.2.3. Heavy traffic influence on bearing capacity index 100
3.3. Top asphalt layer replacement influence on general performance index 100
3.4. Summary of research results and conclusions of the third chapter 107

GENERAL CONCLUSIONS 109

RECOMMENDATIONS 113

REFERENCES 115

LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION 123

SUMMARY IN ENGLISH 125

ANNEXES[2] 141

Annex A. Comparison of pavement class to a reference pavement class 143
Annex B. Comparison of segmentation curves composed by different methods 145
Annex C. Automatic segmentation tool 157
Annex D. Declaration of academic integrity 158
Annex E. The co-authors' agreements to present publications material in the doctoral dissertation 159
Annex F. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation 169

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

Įvadas

Problemos formulavimas

Šiuolaikinių miestų gatvių tinklas yra didelis turtas, kuriam tausoti, prižiūrėti bei išsaugoti būtini racionalūs sprendimai. Trys pagrindiniai veiksniai turėtų užtikrinti ekonomiškai efektyvų gatvių turto valdymą:

- esamos gatvių dangų tinklo būklės tikslus įvertinimas;
- gatvių dangų tinklo skirstymas į panašios būklės homogeninius ruožus;
- esamą būklę bei projektines apkrovas atitinkančio sprendinio parinkimas bei tolimesnės degradacijos prognozė.

Nemaža miestų savivaldų dalis gatvių priežiūros ir finansavimo klausimą sprendžia pagal visuomenės poreikį arba įvertinus tik vizualiai matomas pažaidas. Šiam tikslui skiriamos lėšos turėtų būti pagrįstos kompleksiniais kriterijais, vadinamais dangos būklės rodikliais arba indeksais. Šie rodikliai padeda įvertinti dangos būklę, atsižvelgiant į komforto, saugumo bei dangos konstrukcijos struktūrines sąlygas. Praleidus vieną iš jų, gauti dangos būklės rezultatai gali neatitikti realios situacijos, dėl ko bus parenkamas netinkamas priežiūros sprendinys. Pavyzdžiui, nevertinant dangos konstrukcijos laikomosios gebos dažniausiai parenkamas nesudėtingas atnaujinimo sprendinys – viršutinio dangos sluoksnio pakeitimas. Tokiu atveju, ypač aukštesnės kategorijos gatvėse, panašaus pobūdžio pažaidos pasireiškia sekančiais atnaujinto ruožo

eksploatacijos sezonais. Be to, neretai nesigilinama į atskirų tos pačios gatvės atkarpų specifiką. Tų pačių priemonių panaudojimas analogiškos būklės gatvių atkarpose gali turėti skirtingą poveikį.

Iki šiol nėra vieningos miestų gatvių dangų būklės vertinimo metodikos, leidžiančios visapusiškai įvertinti viso tinklo lygį. Egzistuojančios kelių būklės vertinimo metodikos galėtų būti taikomos ir miestuose, tačiau tokiu atveju kiekvieno dangos būklės rodiklio reikšmingumas turėtų būti parenkamas eksperimentiniu būdu. Taip pat nėra ir universalios homogeninių ruožų sudarymo metodikos, parenkančios matematinį segmentavimo metodą bei objektą.

Darbo aktualumas

Šalyse, kuriose nėra taikomos automatizuotos dangų valdymo sistemos miestų gatvių tinko priežiūrai ir vertinimui, išlieka aktuali problema – efektyvus lėšų panaudojimas, siekiant didžiausio poveikio gatvių tinklo tobulinimui. Gatvių dangos konstrukcijų degradacijos specifika, kai pasiekus tam tikrą suirties lygį, būtinas visiškas dangos konstrukcijos atnaujinimas, lemia poreikį taikyti būtinąsias priemones nedelsiant. Todėl būtina ne tik nuolatos vertinti gatvių tinklo būklę, tačiau ir ieškoti būdų faktinės būklės nustatymui bei tinkamo atnaujinimo sprendinio parinkimui individualiai kiekvienam analogiškų parametrų ir dangos būklės ruožui.

Disertacijoje nagrinėjama motorizuoto eismo gatvių dangos būklės vertinimo specifika bei nustatomas dangos būklės rodiklių įverčių reikšmingumas. Pasiūlyta dangos būklės vertinimo metodika galėtų būti naudojama savivaldybėse, sudarant gatvių prioritetinius remonto ir priežiūros sąrašus. Gatvių segmentavimas iki šiol buvo atliekamas vertinant gatvių parametrus ir / arba pagal dangos paviršiaus pažaidų lygį. Pasiūlytas segmentavimo algoritmas gali būti taikomas miestų gatvių suskirstymui į homogeninius ruožus.

Tyrimų objektas

Gatvių dangos būklės vertinimas pagal išmatuojamus ir apskaičiuojamus būklės rodiklius, išskiriant homogeninius ruožus.

Darbo tikslas

Nustačius dangos būklės rodiklių įverčių reikšmingumą sukurti gatvių dangos būklės vertinimo metodiką ir homogeninių ruožų sudarymo algoritmą.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Apžvelgti kelių ir gatvių dangos būklės vertinimo metodus bei išanalizuoti naudojamus homogeninių ruožų sudarymo principus, parenkant sprendinius, tinkamus taikyti miestų gatvėms.
2. Nustatyti įvairių dangos techninių parametrų kitimo tendencijas, priklausomai nuo tiriamųjų gatvių dangos konstrukcijos klasių.
3. Išanalizavus miestų gatvių techninius parametrus, palyginti pasirinktais dangos būklės vertinimo metodais (COST 354 ir LAKD) apskaičiuotą suminį dangos būklės indeksą bei nustatyti skirtumus tarp metodikų, išskiriant privalumus ir trūkumus.
4. Palyginti įvairius homogeninių ruožų sudarymo metodus, nurodyti efektyviausią bei pateikti šio metodo taikymo gaires.
5. Nustatyti gatvių dangos konstrukcijos laikomosios gebos rodiklio įtaką suminiam būklės rodikliui bei įvertinti kitų įverčių reikšmingumą.
6. Įvertinti viršutinio sluoksnio atnaujinimo darbų įtaką gatvių dangos konstrukcijos būklės kitimui.

Tyrimų metodika

Gatvių dangos eksperimentiniai tyrimai atlikti pasitelkiant dangos nelygumo (IRI) ir dangos pažaidų matavimus fiksuojančią mobiliąja kelių tyrimų laboratoriją RST28. Dangos įlinkių matavimai atlikti krintančio svorio deflektometru. Dangos konstrukcijos laikomosios gebos apskaičiavimui taikomi regresinės analizės metodai. Dangos būklės vertinimo metodikų rezultatų palyginimui taikyti statistinės regresinės ir palyginamosios analizės metodai. Homogeninių ruožų sudarymui taikyti kumuliacinio skirtumo ir slenkančių vidurkių metodai. Skaičiavimai, analizė bei rezultatų apibendrinimas atliekamas pasitelkiant Microsoft Excel, Origin, Visio ir kt. programinę įrangą. Homogeninių ruožų automatizuotos skaičiuoklės sukūrimui naudojama Visual Basic kalba suprogramuota skaičiuoklė.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie statybos inžinerijos mokslui nauji ir reikšmingi rezultatai:

1. Iki šiol nebuvo ,gos miestų gatvių dangos būklės vertinimo metodikos. Šiam tikslui pasiekti rekomenduojama COST 354 veiklos pagrindu sudaryta metodika su analizės metu pasiūlytais būklės indeksų svoriniais koeficientais (įverčiais). Aprašomas svorinių koeficientų nustatymo algoritmas iš didesnės imties gatvių dangų duomenų nustatymo. Pasiūlyta metodika padeda visapusiškai vertinti bendrą dangos būklę, atsižvelgiant į saugumo, komforto ir struktūrines dangos konstrukcijos sąlygas.
2. Pasiūlytas jungtinis slenkančių vidurkių ir kumuliacinio skirtumo homogeninių ruožų sudarymo metodas. Segmentavimui supaprastinti siūloma taikyti Ramer–Douglas–Peucker (RDP) algoritmą. Sukurta skaičiuoklė, padedanti automatizuotai išskirti homogeninių ruožų ribas pagal įvestus dangos būklės rodiklių duomenis. Skaičiuoklė pagreitina segmentavimo procesą ir mažina žmogiškojo faktoriaus įtaką.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Tyrimų rezultatai gali būti naudojami pilnai ar dalinai automatizuotų dangų valdymo sistemų įdiegimui. Remiantis pateiktais algoritmais galima vertinti gatvių dangos būklę, sudarant homogeninių ruožų remonto prioritetinį sąrašą.

Ginamieji teiginiai

1. Gatvių dangos konstrukcijos laikomosios gebos būklės indeksas yra esminis suminio dangos būklės indekso įvertis.
2. Gatvių homogeniniai ruožai turėtų būti sudaromi įvertinant dangos konstrukcijos laikomosios gebos rodiklius.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra paskelbti 4 moksliniai straipsniai: trys – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į Clarivate Analytics Web of Science sąrašą (Vaitkus et al. 2021; Kravcovas et al. 2020; Vaitkus et al. 2016), vienas – recenzuojamoje tarptautinės konferencijos medžiagoje (Žiliūte et al. 2016).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo pristatyti trijose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“ 2018 m. Vilniuje;

- Tarptautinėje konferencijoje „*Transport research arena*“ 2018 m. Vienoje;
- Tarptautinėje konferencijoje „4th international conference on road and rail infrastructures“ 2016 m. Zagrebe.

Disertacijos struktūra

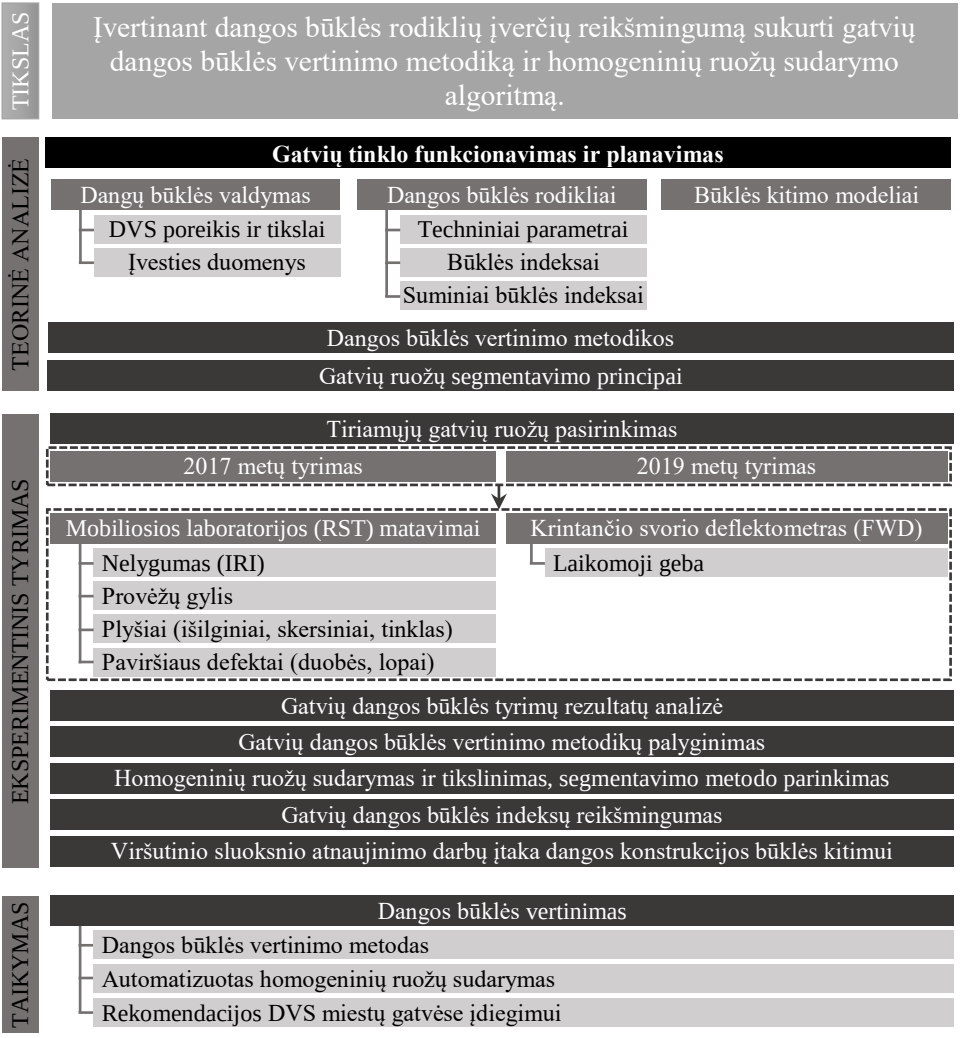
Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, rekomendacijos, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema, sąrašai. Taip pat yra 6 priedai.

Darbo apimtis yra 140 puslapių, neskaitant priedų, tekste panaudotos 24 numeruotos formulės, 59 paveikslai ir 15 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudoti 106 literatūros šaltiniai.

Padėka

Disertacijos autorius dėkoja baigiamojo darbo vadovui prof. dr. Audriui Vaitkui už konsultacijas, patarimus ir vertingas mokslines įžvalgas bei už pasitikėjimą ir paskatinimą tobulėti disertacijos rengimo metu. Autorius reiškia padėką dr. Ritai Kleizienei už naudingas idėjas ir užvedimą ant kelio ypač pradiniais disertacijos rengimo etapais. Taip pat dėkojama visiems disertacijos ekspertams už vertingas pastabas ir komentarus. Autorius dėkingas Vilnius Tech universiteto Kelių tyrimo institutui už suteiktą galimybę tobulėti atliekant eksperimentinius tyrimus bei visiems instituto darbuotojams už pagalbą tyrimų metu ir palaikymą. Be abejo, autorius išreiškia padėką visiems savo artimiesiems už pasitikėjimą, supratimą ir palaikymą.

Disertacijos rengimo algoritmas



1 pav. Disertacijos rengimo algoritmas
Fig. 1. The arrangement algorithm of dissertation

1

Dangos būklės įvertinimo metodų analizė

Šiame skyriuje pateikiama dangų degradacijos ir dangų valdymo sistemos samprata. Apžvelgiami dangos funkcionavimą bei degradavimą lemiantys veiksniai. Analizuojamos pagrindinės asfalto dangos pažaidos bei su jomis susiję būklės indeksai ir suminiai dangos būklės indeksai. Pateikiami pasaulyje bei Lietuvoje naudojami kelio dangos būklės vertinimo metodai. Šiame skyriuje taip pat aprašomi pasaulyje bei Lietuvoje naudojami dangos būklės kitimo prognozavimo modeliai. Aptariami kelių ir gatvių ruožų segmentavimo principai.

Skyriaus tematika paskelbti trys autoriaus straipsniai (Kravcovas et al. 2020; Kravcovas 2018; Vaitkus et al. 2016).

1.1. Kelių ir gatvių tinklo dangų būklės monitoringas ir valdymas

Daugelis Lietuvos ir kitų šalių miestų ir miestelių gatvės yra tiestos prieš 30 ar net daugiau metų. Tuo tarpu naujos statybos gatvių projektinis eksploatavimo laikotarpis yra 20 metų. Šiuolaikiniuose miestuose asfalto danga padengtos 75 % ir daugiau visų gatvių. Asfalto dangos gatvėse paviršiaus pažaidos pasireiškia jau po 1 ar 2 pirmųjų eksploatacijos metų, atlikus rekonstravimo arba remonto darbus.

Tipiniai dangos paviršiaus pažaidų šalinimo metodai yra atsiradusių duobių taisymas kas 1–2 metus bei kartą per 8–10 metų laikotarpį keičiant visą viršutinį dangos konstrukcijos sluoksnį, tuo atveju kai projektinė apkrova nepakito. Dėl riboto lėšų kiekio, šios priemonės būna taikomos nesavalaikiai ir jų efektyvumas būna abejotinas, kadangi tikėtina, jog jau atėjo laikas kapitališkai remontuoti visą dangos konstrukciją. Periodinių priemonių taikymas turėtų būti pagrįstas, įvertinant visą gatvių tinklą. Šiam tikslui pasiekti naudojami dangų būklės vertinimo metodai.

Įvairių pasaulio šalių kelių tinklas yra valdomas kelių šeimininkų: kelių administracijos (Lietuvoje – VĮ Lietuvos automobilių kelių direkcija) valdo valstybinės reikšmės (tarpmiestinius) kelius, o savivaldybės prižiūri gatves ir vietinės reikšmės kelius. Valstybinės reikšmės ir vietiniai keliai yra skirtingi – atlieka skirtingas funkcijas, yra veikiami skirtingų sąlygų, tiek klimatinių, tiek transporto sudėties ir intensyvumo. Paprastai valstybinės reikšmės keliai sudaro mažesnę visų šalies kelių dalį, pvz., Oficialiosios statistikos portalo duomenimis (Oficialios statistikos portalas 2020) Lietuvoje valstybinės reikšmės keliai sudaro tik apie ketvirtadalį visų kelių (21238 km iš 85086 km). Likusi dalis atitenka vietinės reikšmės keliams ir miestų gatvėms (63848 km). Valstybinės reikšmės keliuose jau yra nusistovėjęs jų vertinimo, priežiūros ir remonto procesas, taikant naujausias tiems tikslams skirtas priemones ir metodikas, tokias kaip sistemingas dangos būklės vertinimas arba dangų valdymo sistemų taikymas. Tuo tarpu miestų gatvėse dažnai trūksta efektyvios jų valdymo sistemos. 2013 metais Lietuvoje atlikto valstybinio audito ataskaitoje „Ar sudarytos sąlygos efektyviai naudoti valstybės lėšas, skiriamas vietinės reikšmės keliams ir gatvėms prižiūrėti ir modernizuoti?“ (Lietuvos Respublikos valstybės kontrolė 2013) išskiriamos pagrindinės vietinės reikšmės kelių ir gatvių priežiūros ir plėtros procesui keliamos sąlygos:

- turi būti renkama ir pateikiama išsami bei patikima informacija, galinti atskleisti esamą kelių ir gatvių padėtį bei jos pokyčius;
- turi būti užtikrinama koordinuota visų suinteresuotų institucijų veikla;
- turi būti atliekama objektyvi valstybės lėšomis finansuojamų projektų atranka;
- turi būti užtikrintas racionalus ir efektyvus esamų išteklių, skiriamų vietinės reikšmės kelių ir gatvių priežiūrai ir plėtrai, naudojimas bei efektyvi kontrolė;
- turi galioti teisinė sistema, užtikrinanti išvardytų sąlygų įgyvendinimą.

Nemažoje dalyje Lietuvos ir daugelio aplinkinių valstybių miestų savivaldų gatvių atnaujinimas planuojamas remiantis subjektyviais kriterijais. Daugeliu atvejų stokojama daugiakriterinio vertinimo sistemos bei ruožų pagal būklės lygį segmentavimo. Darbo aktualumą grindžia Valstybės kontrolės išvados apie savivaldose neskaidriai ir neaiškiai parenkamus prioritetus gatvių atnaujinimui.

2020 metais atlikus kelių infrastruktūros valdymo valstybinį auditą (Lietuvos Respublikos valstybės kontrolė 2020) paaiškėjo keletas pagrindinių problemų: 52 savivaldybėse apie 83 % kelių nėra tinkamai įregistruoti, 14 iš 14-os audituotų savivaldybių sistemiškai nefiksuoja ir nekaupia duomenų apie valdomų kelių / gatvių būklės indeksus ir eismo intensyvumą jose, o vietinių kelių funkcinė paskirtis neretai būna blogai nustatyta. Pusėje audituotų savivaldybių prioritetines darbų eiles sudaro nenustačius kriterijų, o kitoje pusėje savivaldybių su nustatytais atrankos kriterijais ne visada parenka juos tinkamai, dėl ko neretai į prioritetinę eilę patenka mažo patrauklumo visuomenei objektai.

Optimalus tinklo valdymas turi būti užtikrinamas tikslių duomenų apie kelio ar gatvės būklę surinkimu ir saugojimu visą objekto gyvavimo laikotarpį. Svarbu užtikrinti, kad periodiškai arba atlikus tam tikrus remonto darbus, kelio būklės duomenys būtų atnaujinami. Ne ką mažiau svarbūs yra infrastruktūros-statinio konstrukcijos sudėtis ir jos pokytis eksploatacijos metu. Kadangi atskirai visus šiuos aspektus yra labai sudėtinga suvaldyti, šiems tikslams pasaulyje jau daugiau nei 50 metų plačiai naudojamos dangų valdymo sistemos (Haas et al. 1978).

1.1.1. Dangų valdymo sistemų poreikis ir tikslai

Dangų valdymas (angl. *pavement management*) – tai procesas, apimantis kelių tinklo planavimą, priežiūrą ir remontą. Jis padeda sistematiškai ir pagrįstai paskirstyti turimus išteklius tarp būtiniausių objektų, atsižvelgiant į viso tinklo poreikius bei įvertinant ilgalaikę perspektyvą (Haas et al. 1978; Dore et al. 2009; Haas et al. 2015). Dangų valdymas taikomas ir aerodromuose, krovininiuose uostuose, geležinkelio terminaluose bei kitur.

Dangų valdymo sistema (toliau – DVS) (angl. *pavement management system*) – tai planavimo įrankių rinkinys, kuris yra skirtas racionaliems ir pagrįstiems dangos priežiūros veiklos sprendimams priimti, išanalizavus viso tinklo būklės lygį ir kaip jis kinta parinktam finansavimo biudžetui. Naudojant DVS galima suprognozuoti dangos būklės kitimą tinkle, įvertinant pradinį dangos būklės lygį (nelygumus, provėžas, įvairius plyšius ir duobes), transporto priemonių eismo intensyvumą, rekomenduojamas priežiūros veiklas (paprastąjį remontą, kapitalinį remontą ir pan.) bei eksploatacijos amžių. Galima būtų išskirti tokius pagrindinius DVS tikslus (Haas et al. 1994):

- racionalizuoti sprendimus, susijusius su dangos valdymu;
- išplėsti dangos valdymo procesą, įtraukiant visą su sprendiniu susijusią informaciją;
- sekti grįžtamąjį ryšį, gaunamą po būsimų sprendinių padarinių;
- racionalizuoti duomenų mainus, bendradarbiavimą ir kelio dangos valdymo proceso koordinavimą valdančiosios organizacijos viduje ir tarp skirtingų organizacijų;

- užtikrinti priimamų toje pačioje įstaigoje sprendimų nuoseklumą.

Šiems tikslams pasiekti DVS sprendžia tokius uždavinius:

- įvertina kelio dangos būklę;
- prioretizuoja kelių ruožus, remiantis eismo intensyvumo, kelio ar gatvės kategorijos ir kitais duomenimis bei atsižvelgiant į visuomenės poreikį;
- suplanuoja priežiūrą kaip palaikyti geros dangos būklės ruožus;
- suplanuoja blogos ir labai blogos būklės ruožų remonto strategiją, atsižvelgiant į skiriamą finansavimą;
- leidžia sudaryti objektyviaisiais kriterijais pagrįstus kelių ruožų prioritetinius sąrašus.

Pirmosios DVS buvo pradėtos naudoti praeito amžiaus 60-ųjų metų pabaigoje, 70-ųjų metų pradžioje (Kulkarni et al. 2003; Hudson et al. 1976). Ankstyvosios DVS veikė projekto lygmeniu ir buvo paprasčiausiais duomenų apdorojimo metodų rinkiniais, kurie galėjo padėti įvertinti ir suprioretizuoti rekonstravimo projektus, remiantis tokiais faktoriais kaip eismo intensyvumas, bei esama dangos būklė ir kt. Nei dangos būklės prognozavimas, nei ekonominė analizė nebuvo svarstomi. Pradžioje DVS buvo naudojamos tik užmiesčio kelių tinklo valdymui, nuo praeito amžiaus 90-ųjų metų vidurio buvo pradėta galvoti dėl DVS įgyvendinimo miestuose gatvių dangų valdymui. Farrukh Sohail, Terrence Dossey (1996) įvykdė projektą, kurio tikslas buvo pademonstruoti miesto dangų valdymo sistemos URMS (Urban Road Management System) veikimą mažuose ir vidutiniuose JAV Teksaso valstijos miestuose. Autoriams pavyko sėkmingai įgyvendinti DVS dviejuose miestuose, įskaitant programinės įrangos įdiegimą, darbuotojų apmokymą, dangos būklės duomenų surinkimo algoritmų sudarymą. URMS yra lanksti ir draugiška vartotojui dangų valdymo sistema, tinkanti mažiems ir vidutiniams miestams. Šios sistemos įdiegimas leidžia sutaupyti lėšų ne tik valdančiosioms organizacijoms, bet ir vartotojams, taip pat racionalizuojama sprendimų, susijusių su gatvių dangos valdymu, paieška.

Dvidešimtojo amžiaus pabaigoje DVS imta kurti ir diegti Rytų ir Centrinės Europos šalyse, taip pat ir Baltijos valstybėse. 1994 m. Lietuvoje buvo pradėta naudoti čia sukurta dangų valdymo sistemos versija – DAVASEMA. Ši DVS sudaryta plačiai žinomos kitos sistemos HDM-III pagrindu (Braga 2005). Šiuo metu VšĮ Transporto kompetencijų agentūra Lietuvos valstybinės reikšmės kelių tinklo dangų valdymui naudoja kanadiečių sukurtą programų paketą dTIMS (Deighton Total Infrastructure Management System).

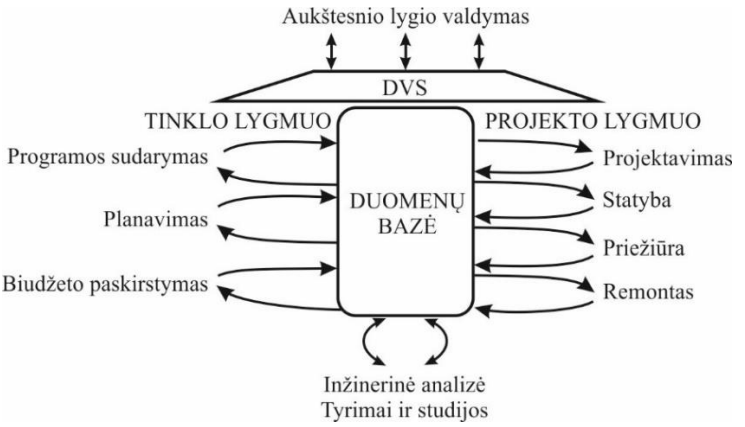
Dangų valdymas padeda priimti sprendimą įvairiais lygmenimis (Dore et al. 2009; Haas et al. 2015; Wolters et al. 2011):

- Strateginiu lygmeniu politikai ir ekspertai priima sprendimus dėl ilgalaikės strategijos šalies arba organizacijos mastu. Tarp svarstomų dalykų gali būti įvairių leistinų kelio būklės rodiklių nustatymas, finansavimo

paskirstymas arba tvarumo strategijos parinkimas. Dažnai strateginis lygmuo sutapatinamas su tinklo lygmeniu.

- Tinklo lygmens analizės metu nustatomas priežiūros ir remonto poreikis, prognozuojamas dangos būklės kitimas, esant skirtingiems finansavimo scenarijams, prioretizuojamas tinklo elementų (gatvių arba kelių ruožų) sąrašas, kuriems reikalingas remontas ir tolimesnė analizė projekto lygyje, ir laikas, kurio metu turi būti vykdomas remontas. Tipinis laikotarpis, kuriam yra priimami sprendimai, yra 5 metai.
- Projekto lygmenyje sprendimai yra sukoncentruoti artimiausiems 1–2 metams. Pagrindiniai sprendžiami dalykai yra priežiūros ir remonto darbų planavimas, siekiant kuo daugiau prailginti eksploatacinį amžių bei racionalizuoti skirtas lėšas.

Principinė DVS funkcionavimo schema tinklo ir projekto lygmenimis pavaizduota 1.1 paveiksle. Tinklo lygmeniu pirmasis dangų valdymo žingsnis yra programos sudarymas, t. y., dangų remonto prioritetinės eilės sudarymas. Prioritetinė eilė turi būti grindžiama iš anksto nustatytais vertinimo kriterijais, įskaitant dangos būklės rodiklius. Ši dalis yra svarbi, kadangi sekantys žingsniai priklauso nuo surinktų duomenų tikslumo, išbaigtumo ir aktualumo. Surinkus nepakankamai duomenų, jų neatnaujinus ar parinkus netinkamą vertinimo metodiką, rizikuojama nevisapusiškai įvertinti visą pavaldų kelių arba gatvių tinklą, dėl ko sumažėja dangos būklės prognozės tikslumas bei, atitinkamai, priežiūrai ir plėtrai skirtų lėšų paskirstymo racionalumas.



1.1 pav. Pagrindiniai DVS komponentai (Haas et al. 1994, perdaryta autoriaus)
Fig. 1.1. Basic components of PMS (Haas et al. 1994, perdaryta autoriaus)

1.1.2. Įvesties duomenys, reikalingi dangų valdymo sistemoms

Taikant DVS svarbu turėti pakankamo periodiškumo bei pakankamo tikslumo įvesties duomenis apie eksploatuojamą kelią ar gatvę. Kuo daugiau įvairių kelio parametrų bus surenkama, tuo tikslesnius dangos degradacijos modelius galima naudoti DVS. Braga (2005) išskiria tokius pagrindinius kelių dangos būklės valdymo ir kelių plėtros planavimo sistemų darbui reikalingus duomenis:

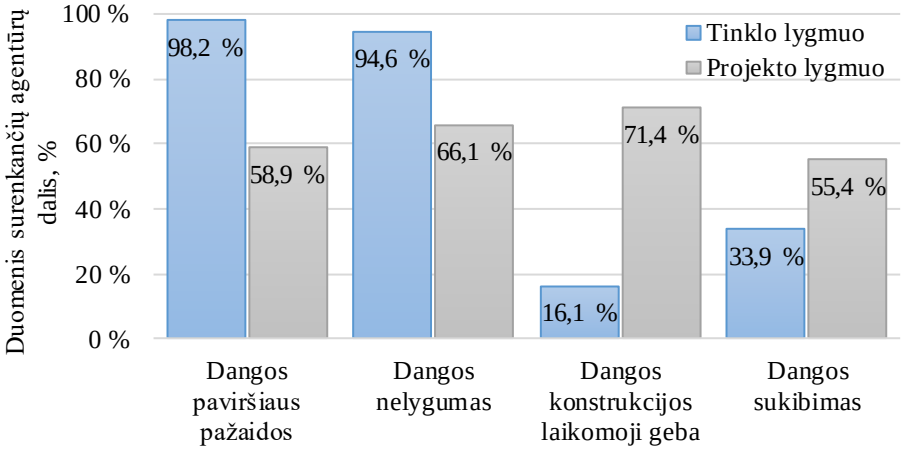
- duomenys apie kelio ruožą, kelius ar kelių tinklą – kelio ir kelio dangos konstrukcijos geometrinės, techninės ir eksploatacinės charakteristikos; kiti duomenys apie kelią ir jo būklę;
- duomenys apie transporto priemones ir jų eismą – eismo intensyvumas, eismo srauto sudėtis, intensyvumo augimo prognozė; eismo sąlygos; autotransporto priemonių techninės ir eksploatacinės charakteristikos;
- duomenys apie kelių darbus – reikalavimai kelių priežiūros, remontų, rekonstrukcijos ir naujų kelių tiesimo darbams, standartai, kainos; planuojamų darbų vykdymo grafikas.

Analizuojant esamų kelių dangos būklę, laikomąją gebą, eksploatacines charakteristikas ir saugumą, reikalingas inžinerinis požiūris. Vieni dangos būklės rodiklių tipai yra labiau tinkami priežiūros strategijai parinkti, kiti – remonto sprendinių priėmimui. Kasmet priežiūros komponentai tampa svarbesni dėl viso kelių tinklo senėjimo, todėl svarbu turėti kuo didesnius istorinius duomenis. Vaitkus et al. (2016) teigia kad Danijoje, Belgijoje, Olandijoje, Vokietijoje ir kitose Europos šalyse du svarbiausiais dangos konstrukcijos parametrais laikomi laikomoji geba bei atsparumas šalčiui. Dėl to šiose šalyse nuo seno yra kaupiami ir saugomi užšalimo temperatūros ir įšalo gylio duomenys iš stacionarių stebėjimo postų. Pagal šiuos duomenis, bent 30 paskutiniųjų metų, yra sudaromi įšalo gylio žemėlapiai. DVS tokia informacija būtų įvertinama, parenkant gatvių priežiūros ir remonto darbus, priklausomai nuo šalies regiono.

Visi DVS turimi įvesties duomenys saugomi duomenų bazėje, kuri yra pagrindinis modernios DVS komponentas. Toliau tobulėjant kompiuterių ir programinės įrangos technologijoms, kasdien duomenų bazėje gali būti saugoma vis daugiau duomenų. Taip pat didėja ir kreipimosi į duomenų bazę sparta.

Haas et al. (2015) išskiria DVS reikalingus duomenis į inventorizacinius ir dangos būklės duomenis. Į pirmąją grupę patenka santykinai pastovūs duomenys apie kelio ar gatvės ruožą, tokie kaip ruožo įrengimo, priežiūros ir remonto istorija, kelio geometriniai parametrai ir kt. Taip pat prie inventorizacinių duomenų priskiriami ir eismo intensyvumo bei apkrovos duomenys. Į dangos būklės grupę priskiriami pažaidų duomenys, įvairių ruožo eksploatacinių charakteristikų duomenys, eismo saugumo duomenys. Flintsch et al. (2009) atliko visų JAV ir Kanados valstijų kelių priežiūros agentūrų apklausą apie tai, kokius įvesties duomenis jie surenka savo DVS (žr. 1.2 pav.). Iš tyrimo rezultatų matyti,

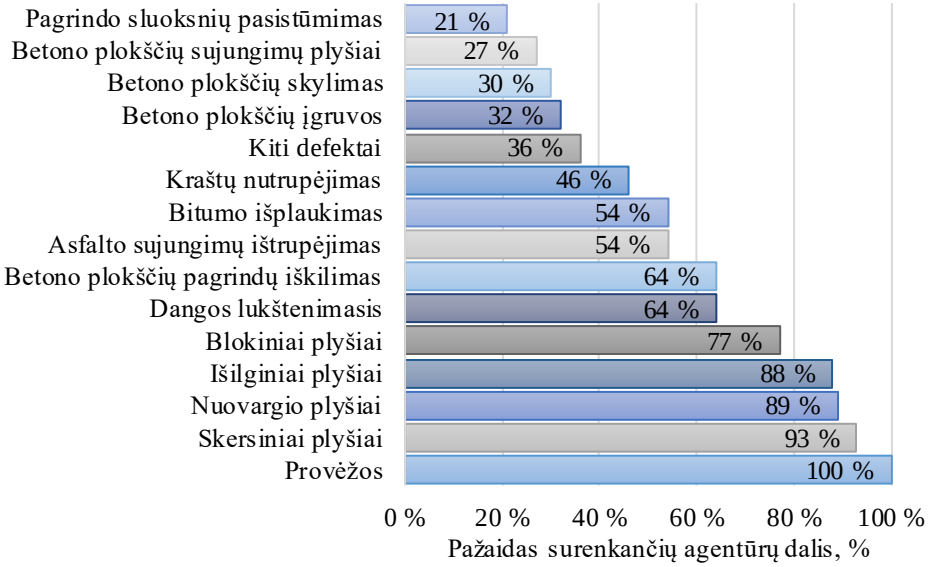
jog DVS taikant tinklo lygmeniu beveik visos agentūros surenka dangos pažaidų duomenis bei nelygumo duomenis – 98,2 % ir 94,6 % atitinkamai. Tinklo lygmeniu laikomąją gebą surenka tik 16,1 % agentūrų, tačiau projekto lygmeniu tai labiausiai pageidaujamas rodiklis – 71,4 % agentūrų.



1.2 pav. Dangos būklės rodiklių surinkimas įvairiose JAV ir Kanados valstijose (Flintsch et al. 2009, perdaryta autoriaus)
Fig. 1.2. Monitored pavement performance indicator type by USA and Canada road agencies (Flintsch et al. 2009, perdaryta autoriaus)

Flintsch et al. (2009) taip pat atliko apklausą apie dažniausiai surenkamus dangos pažaidų tipus (žr. 1.3 pav.). Iš gautų rezultatų matyti, jog absoliučiai visos agentūros surenka provėžų duomenis, taip pat surenkama daugiau nei 77 % duomenų apie įvairių plyšių tipus.

Lang (2012) atliko analogišką tyrimą Šiaurės Europos valstybėse (Suomijoje, Norvegijoje, Danijoje bei Švedijoje), kuriame nustatė, kokie kelio techniniai parametrai surenkami tolimesniam naudojimui dangų valdymo procese (žr. 1.1 lentelę). Skirtingai nuo JAV ir Kanados valstijų, nei viena iš valstybių nesurenka plyšių duomenų, tačiau įlinkių (laikomosios gebos) duomenis atvirkščiai – surenka kiekviena valstybė, nors didžioji dalis – projekto lygmeniu. Provėžų duomenis taip pat renka 100 %visų agentūrų, dėl ko provėžas galima laikyti viena svarbiausių pažaidų tipų. Taip pat visose šiose Europos valstybėse renkami rato sukibimo su danga duomenys, nors Suomijoje ir Norvegijoje tai daroma tik projekto lygmeniu.



1.3 pav. Dangos pažaidų surinkimas įvairiose JAV ir Kanados valstijose (Flintsch et al. 2009, perdaryta autoriaus)
Fig. 1.3. Monitored distresses by USA and Canada road agencies (Flintsch et al. 2009, perdaryta autoriaus)

1.1 lentelė. Kelio techninių parametrų surinkimas įvairiose Europos valstybėse (Lang 2012)
Table 1.1. Monitored road technical parameters in different European countries (Lang 2012)

Surenkami duomenys	Suomija	Norvegija	Danija	Švedija
1	2	3	4	5
Nelygumas (IRI)	Taip	Taip	Taip	Taip[2]
Provėžų gylis	Taip	Taip[1]	Taip	Taip[3]
Dangos „mega“ tekstūra	Taip	Taip	Taip	Taip
Dangos „makro“ tekstūra	Taip	Taip	Taip	Taip
Dangos „mikro“ tekstūra	–	–	–	–
Rato sukibimas su danga	Taip**	Taip	Taip[4]	Taip**
Dangos kraštų deformacijos		Taip		Taip
Kelio skersinis nuolydis	Taip	Taip	Taip	Taip
Kelio trasos geometrija	Taip	Taip	Taip	Taip

1.1 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5
Kelio išilginis nuolydis	Taip	Taip	Taip	Taip
Dangos įlinkiai	Taip*	Taip*	Taip	Taip*
Dangos plyšiai	Taip	–	–	–
Vizuali apžiūra	Taip	Taip*	Taip	Taip*
Nuotraukos	Taip	Taip	Taip	Taip

Pastabos:

* – tik projekto lygmeniu;

** – surenka, bet apribotai;

[1] – Norvegijoje provėžų gylis matuojamas skirtingai nei kitose šalyse;

[2] – kartu su nelygumu Švedijoje, taip pat kas 100 mm matuojamas išilginis profilis;

[3] – kartu su provėžomis Švedijoje matuojamas ir skersinis profilis;

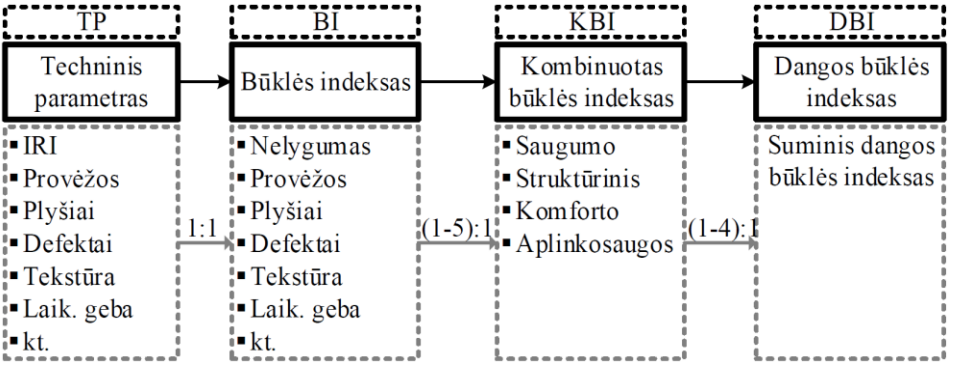
[4] – Danijoje sukibimas matuojamas naujai paklojus viršutinį dangos sluoksnį

Geroji kitų valstybių patirtis parodo, kad yra svarbu ne tik reguliariai rinkti įvairius kelių ir gatvių dangos būklės rodiklius ir techninius parametrus, bet ir tinkamai juos apdoroti bei saugoti (Kravcovas 2018). DVS praktinis taikymas prasideda nuo informacijos apie aptarnaujamus ruožus surinkimo. Renkamų duomenų įvairumas ir periodiškumas priklauso nuo kiekvieno valdytojo finansinių, žmogiškųjų galimybių bei techninių išteklių. Tačiau tam tikri parametrai turėtų būti renkami bet kokiu atveju, tai – dangos pažaidos (ypatingai – plyšiai, provėžos), dangos paviršiaus parametrai (ypatingai – nelygumas, o esant galimybei – sukibimas), laikomoji geba, ypač projekto lygmeniu. Šių parametrų ir bendros informacijos apie ruožus surinkimas atitiktų minimalų DVS įvesties duomenų poreikį, kas leistų atlikti būklės vertinimą bei prognozavimą.

1.2. Dangos būklės rodikliai

Dangos būklės rodiklis – bet koks pamatuojamas arba apskaičiuojamas parametras, nusakantis dangos būklę pagal vieną iš jos vertinimo kriterijų, kriterijų sumą arba bendrą dangos būklę. Pavyzdžiui, rodikliu gali būti laikoma atskira pažaida (provėžos), pažaidų grupė (skersiniai plyšiai, išilginiai plyšiai, blokiniai plyšiai ir t. t.) arba suminis dangos būklės indeksas, apskaičiuotas įvertinant įvairias pažaidas, laikomąją gebą ir kt. parametrus. Kadangi atskirų rodiklių reikšmingumas gali skirtis, patogu juos sudalinti pakopomis. Siekiant visapusiškai įvertinti kelių ir gatvių dangos būklę tinklo lygmeniu vertinimo metodas turėtų apimti visas šias pakopas.

1.4 paveiksle pateikiamos keturios dangos būklės rodiklių pakopos, pradedant nuo žemiausios iki aukščiausios.



1.4 pav. Kelio dangos būklės vertinimo kelių tinklo lygiu struktūrinė schema
Fig. 1.4. Pavement performance evaluation during network-level analyses

COST Action 354 veiklos ataskaitoje (COST Action 354 2008) yra plačiau išdėstyti skirtingų dangos būklės rodiklių pakopų tarpusavio sąryšiai:

- Būklės indeksas (BI) – bedimensis dydis, apskaičiuojamas iš vieno techninio parametro (TP). Pastaruoju gali būti išmatuotos vienos rūšies pažaidos, dangos nelygumas, laikomoji geba ir kt.
- Kombinuotas dangos būklės indeksas (KBI) – bedimensis dydis, apimantis keletą BI, susijusių tarpusavyje. KBI apskaičiuoti gali būti naudojamos kelios alternatyvos, priklausomai nuo būklės indeksų skaičiaus.
- Suminis dangos būklės indeksas (DBI) – bedimensis dydis, apimantis visus apskaičiuotus KBI. DBI yra parametras, kuris turėtų atspindėti bendrą dangos būklę, atsižvelgiant į įvairius dangos parametrus.

1.2.1. Asfalto dangos būklė ir savybės

Pažvelgus iš kelio naudotojo pusės ,vienas svarbiausių dangos būklės įvertis yra jos lygumas (Harris 2013; Noureldin et al. 2003). Jis užtikrina saugų eismą, važiavimo patogumą bei optimalias degalų sąnaudas. Asfalto dangos lygumas priklauso ne tik nuo pačio asfalto sudėties ir fizinių bei mechaninių savybių, bet ir nuo dangos konstrukcijos pagrindų, jų storio, būklės bei medžiagų kokybės, taip pat kaip ir žemės sankasos parametrų (Vaitkus et al. 2012).

Per visą kelio eksploatacinį laikotarpį dangoje atsiranda pažaidos bei įvairios liekamosios deformacijos, o lygumas prastėja (Sandra et al. 2013). Todėl svarbu žinoti dangos būklę kiekviename tinklo kelyje ar gatvėje, t. y., periodiškai matuoti kelio nelygumą, pažaidas ir kitus techninius parametrus, tokius kaip laikomoji

geba, dangos sukibimas ir kt. Dangos pažaidas galima suskirstyti į šias pagrindines grupes: paviršiaus suirimas, šlyties liekamosios deformacijos, temperatūros plyšiai, nuovargio plyšiai, provėžos ir dangos skersiniai profilio iškrypimai (Khattak et al. 2014).

Funkcionavimo ir paskirties atžvilgiu, užmiesčio ir miesto keliai nesiskiria. Tačiau, lyginant kelio dangos konstrukcijos eksploataciją ir funkcionavimą, miesto teritorijoje gatvės ženkliai skiriasi nuo užmiesčio kelių. Miesto teritorijoje šie skirtumai labiausiai susiję su transporto priemonių eismo intensyvumu, ypač darbo dienomis, piko valandomis. Užmiesčio keliuose vyrauja dinaminės apkrovos, kurios juda 80–100 km/h greičiu, o miesto teritorijoje vidutinis transporto priemonių greitis yra ženkliai mažesnis, t. y., 50–60 km/h, sankryžų zonose – iki 20 km/h Tai parodo, kad miestų teritorijose kelių dangos yra veikiamos tiek ypatingųjų, tiek statinių apkrovų. Miesto gatvėmis naudojasi keletas vartotojų grupių. Įprastai gatvių erdvėje yra eilė požeminių ir antžeminių komunikacijų, einančių lygiagrečiai ir skersai. Požemines komunikacijas apima elektros ir komunikacijos tinklai, vandentiekiai ir dujotiekiai, lietaus vandens ir kanalizacijos nuotekų sistemos bei kt. Visas jas prižiūri atskiri subjektai, todėl remontas ar atnaujinimas paprastai atliekamas skirtingu metu, o tai reiškia, jog kelio danga būna išardoma ir užtaisoma eilę kartų per visą jos eksploatacijos laikotarpį, kas neigiamai veikia šio laikotarpio ilgumą (Mubaraki 2010).

Bendruoju atveju, krovininių transporto priemonių apkrovos kelių dangos konstrukcijos būklės kitimui turi didžiausią įtaką. Aukštesnių kategorijų gatvėse krovininio / sunkiojo transporto eismo intensyvumas gali būti didesnis už magistralinių kelių eismo intensyvumą. Be to krovininis transportas važiuoja mažesniais greičiais ir periodiškai sustoja ties sankryžomis ir / arba pėsčiųjų perėjomis. Šiose vietose asfalto dangoje dėl stabdymo proceso neretai susidaro bangos. Taip pat, be aptarnaujančio ir tranzitinio krovininio transporto eismo miestų gatvėmis periodiškai kursuoja visuomeninis transportas. Svarbu paminėti, kad eismo juostose, skirtose visuomeninio transporto eismui, miesto autobusai ir troleibusai juda tomis pačiomis eismo juostomis, ir tose juostose susidariusiomis vėžėmis. Gatvėse, kuriose susikerta visuomeninio transporto maršrutai, laikotarpis tarp autobuso ir / ar troleibuso ratų apkrovų kinta nuo 20 s iki 5 min. Tai lemia ypatingai sudėtingą dangos funkcionavimą, kadangi asfalto danga per tokį trumpą laikotarpį nespėja atsistatyti po apkovos – susidaro plastinės deformacijos, kurios kaupiasi ir laikui bėgant susiformuoja provėžos (LaCroix 2013; Ali et al. 2008). Taip pat reikšmingą įtaką plastinių deformacijų susidarymui turi tai, kad gatvės dangos temperatūra miesto teritorijoje yra apie 8–10°C aukštesnė, lyginant su užmiesčio kelio danga (Vaitkus et al. 2014).

Didžioje dalyje miesto teritorijoje esančių gatvių yra įrengtos uždaro tipo vandens surinkimo ir drenažo sistemos bei kiti tinklai, kurių priežiūrai skirti šuliniai dažnai įrengiami gatvės važiuojamojoje dalyje. Šių inžinerinių elementų

įrengimas bei eksploatacija daro neigiamą įtaką važiavimo kokybei – padidėja kelio nelygumas, laikui bėgant apžiūros šuliniai nusėda, o jų sujungimo su asfalto danga vietose viršutinis sluoksnis ištrupa.

1.2.2. Techniniai parametrai

Techniniais parametrais (angl. *technical parameter*) vadinamos fizinės kelio ar gatvės dangos charakteristikos, nustatytos specialia matavimų įranga, vizualiai ar surinktos kitais būdais. Didžiąją dalį techninių parametrų sudaro kelio dangos pažaidos (provėžų gylis, plyšių plotas ir kt.), tačiau jiems priskiriamos ir kitos dangos charakteristikos (nelygumas, sukibimas, laikomoji geba ir kt.) bei kelio charakteristikos (nuolydžiai, kelio trasos geometrija, eismo juostų pločiai ir kt.).

Siekiant patikimai ir pilnaverčiai nustatyti dangos būklę, reikėtų vertinti eilę atskirų faktorių – dangos būklės rodiklių (angl. *pavement performance indicators*). Rodikliai gali būti skirstomi į struktūrinius ir funkcinius. Funkciniai rodikliai apima eismo saugumo ir važiavimo komforto parametrus, o struktūriniai – dangos konstrukcijos pažaidas, laikomąją gebą ir dangos atsparumą eismo apkrovoms (AASHTO 1993). Tarp šių dangos būklės rodiklių gali būti nelygumas, provėžų gylis, plyšiai, paviršiaus šiurkštumas, standumo modulis, paviršiaus būklė, komforto indeksas ir kt. (Haas et al. 2015). Yang Hsien Huang (2004) sugrupavo didžiąją dalį dangos pažaidų priklausomai nuo jų tipo bei sąryšio su eismo apkrova:

- struktūriniai, susiję su eismo apkrova: plyšių tinklai bei nuovargio plyšiai, lopų degradavimas, duobės, vandens išplaukimas;
- struktūriniai, nesusiję su eismo apkrova: blokiniai plyšiai, dangos suvedimo plyšiai, išilginiai ir skersiniai plyšiai, dangos išsipūtimas, vandens išplaukimas;
- funkciniai, susiję su eismo apkrova: provėžos, lopų degradavimas, duobės, vandens išplaukimas;
- funkciniai, nesusiję su eismo apkrova: bitumo išplaukimas, dangos bangavimas, lukštenimasis ir nusidėvėjimas, vandens išplaukimas.

Paprasčiausias ir prieinamiausias dangos būklės vertinimo būdas yra vizualinė inspekcija, atliekama kvalifikuotų nepriklausomų ekspertų. Iš kitos pusės šis metodas reikalauja daug žmogiškųjų išteklių bei finansinių investicijų. Jo efektyvumas laiko atžvilgiu yra prastas, o jo rezultatai dažnai būna nepatikimi. (Ragnoli et al. 2018). Siekiant išvengti šių trūkumų, dangos būklės parametrams nustatyti naudojami įvairūs specializuoti automatizuoti prietaisai. Kai kurie iš jų yra skirti nustatyti konkretų parametrą ar savybę, pvz., krintančio svorio deflektometras (angl. *falling weight deflectometer*), kuris nustato dangos konstrukcijos įlinkius arba dangos laikomąją gebą, požeminiai radarai (angl. *ground penetrating radar*), nustatantys dangos konstrukcijos sluoksnių storius.

Kiti įrenginiai yra daugiafunkciniai ir nustato eilę parametrų tuo pačiu metu, pvz., Lietuvoje naudota mobili laboratorija RST28, ir jos naujesnė versija RST63, nustatanti nelygumą, pažaidas bei kitus kelio parametrus (Ziliute et al. 2011) arba Vokietijoje naudojama daugiafunkcinė matavimo priemonė MESAS (Pinkofsky et al. 2018). Aukščiau išvardinti prietaisai yra profesionalūs ir yra specifiškai sukurti kelio dangos tyrimams. Atitinkamai šių priemonių prieinamumas ir kaina yra pakankamai didelė. Pasaulio mokslininkai ieško būdų kaip būtų galima tyrimus atlikti automatizuotai, pasinaudojant kuo paprastesnėmis priemonėmis ir pasitelkiant kuo mažiau resursų. Atlikta nemažai tyrimų, vertinančių galimybę naudojantis kelių ir gatvių dangos nuotraukomis automatizuotai aptikti plyšius (Xu et al. 2005; Lovas et al. 2008; Wang et al. 2018; Gavilán et al. 2011). O Koch et al. (2011), Huidrom et al. (2013) ir kiti mokslininkai atliko tyrimus, vertinant galimybę automatizuotai aptikti duobes pagal dangos filmuotą medžiagą. Visi tyrėjai daro išvadą, kad pritaikius kai kuriuos iš šių būdų, kelius administruojančios įmonės galėtų išvengti brangių daugiafunkcinių transporto priemonių pirkimo ir vis tiek gebėtų aptikti tam tikras pažaidų rūšis, naudojant tik transporto priemonę su vaizdo kamera arba fotoaparatu.

Taip pat šiuo metu jau egzistuoja komerciniai produktai, kurių pagalba naudojantis tik mobiliuoju telefonu ir nespecializuota transporto priemone aptinkamos beveik visos dangos pažaidų rūšys. Nufilmavus dangos ruožą specialia mobilia programėle telefone, vaizdinė medžiaga siunčiama į serverį ir dirbtinio intelekto pagalba nustatomos pažaidos bei jų lygis. Išanalizuotą informaciją įvairiais pjūviais galima matyti miesto ar kelių tinklo žemėlapyje, apskaičiuoti bendrą dangos būklės indeksą, skirstyti pagal pažaidų kritiškumo lygį ir t. t. Taip pat egzistuoja programėlės telefonui, kurių pagalba, naudojant išmaniuosiuose telefonuose esančius akcelerometrus ir giroskopus gali būti matuojamas išilginis nelygumas (IRI). Nors tokių matavimų tikslumas ir negali būti lyginamas su specializuotų prietaisų tikslumu, tokio pobūdžio analizė gali būti atlikta bendram tinklo vaizdui sudaryti ir palyginti su ankstesnių metų duomenimis, kai nėra pakankamai lėšų išsamiems tyrimams atlikti.

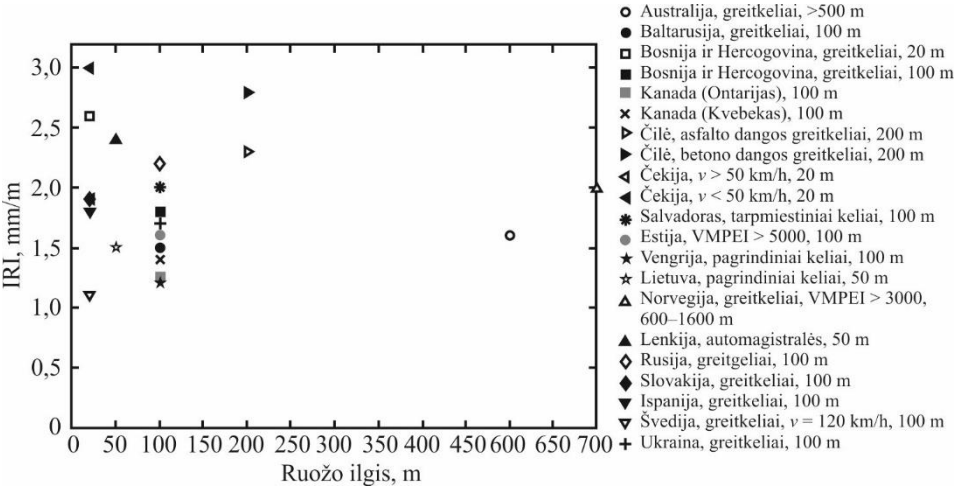
Šiuo metu Lietuvos valstybinės reikšmės keliuose matuojamos pažaidos skirstomos į du tipus – plyšius ir paviršiaus defektus (Lietuvos automobilių kelių direkcija 2017b). Matavimai atliekami vienu iš dviejų būdų: vizualiai kelyje arba automatizuotai. Pirmasis metodas taikomas tik trumpiems kelių ruožams. Taikant automatizuotą metodą kelyje fiksuojamas dangos vaizdas, kuris specialios programinė įrangos pagalba transformuojamas į atskiras pažaidas ir jų skaitines reikšmes. Šis būdas tinkamas analizuoti tiek trumpą kelio ruožą, tiek visą kelių tinklą. Pažaidų matavimo metu taip pat nustatomi šie dangos parametrai:

- dangos išilginis nelygumas (IRI);
- provėžos (provėžų gylis, prošvaisa, fiktyvus vandens gylis provėžose);

– kiti dangos skersiniai parametrai (skersinis dangos nuolydis, eismo juostos plotis).

Gatvės dangos paviršiaus išilginis nelygumas arba tarptautinis nelygumo indeksas (IRI) yra vienas svarbiausių faktorių, kuris daro įtaką važiavimo komfortui, eismo saugumui bei nulemia eksploatacines išlaidas (Dore et al. 2009). Dangos nelygumo kriterijus apskaičiuojamas pagal kompleksinę funkciją, apimančią visas dangos pažaidas ir kuri įvertina automobilio pakabos vibraciją. Dažniausiai nelygumas matuojamas integruotu profilometru, taikant ketvirčio automobilio (angl. *quarter-car*) metodą (Du et al. 2014). Taikant mechanistinius modelius, išmatuotos skaitinės nelygumo vertės yra konvertuojamos į transporto priemonės, važiuojančios 80 km/h greičiu reakciją į išilginį profilį. Dangos nelygumo vystymąsi nulemia du pagrindiniai faktoriai – tai sunkiojo (krovininio) transporto eismo intensyvumas ir jo sukeliamos apkrovos (per kitų dangos pažaidų formavimąsi) bei aplinkos poveikis (iškylos dėl šalčio).

Keliai laikomi pakankamai geros būklės, jeigu jų dangos nelygumas IRI ≤ 2,5 m/km, o ypač nelygios dangos keliais pripažįstami tie keliai, kurių dangos lygumo rodiklis IRI ≥ 12 m/km (Harris 2013). Múčka (2017) atliko išsamų tyrimą, kuriame palygino IRI rodiklio ribines reikšmes (iki kurių kelias yra laikomas geros būklės). Reikšmės svyruoja nuo 1,1 iki 3,0 m/km (žr. 1.5 pav.). Kiekviena šalis nusistato ruožo ilgį, kuriam atliekamas matavimas bei, esant poreikiui – kitus parametrus, tokius kaip važiavimo greitis ar vidutinis metinis paros eismo intensyvumas. Dažniausiai taikomas ruožo ilgis – 100 m, Lietuvoje – 50 m (Lietuvos automobilių kelių direkcija 2017a).



1.5 pav. Nelygumo (IRI) ribinių reikšmių palyginimas įvairiose Europos ir pasaulio šalyse (Múčka 2017)

Fig. 1.5. Comparison of IRI threshold values used in different countries (Múčka 2017)

IRI gali būti matuojamas įvairiomis priemonėmis. Pagal matavimo įrangą ir matavimo būdą galima išskirti penkias pagrindines grupes (Perera et al. 2002; Múčka 2017; Uechi et al. 2018):

- matavimas rankinėmis priemonėmis (lygi matuoklė ir gilmatis, kartelė su gylio matavimo pleištu, mobilioji lygumo matavimo kartelė);
- matavimas pusiau automatinėmis matavimo priemonėmis (pusiau automatinis profilografas);
- matavimas automatiniais lygumo matavimo ir fiksavimo prietaisais;
- automatiniais greitaeigiais lygumo matavimo prietaisais (pvz. mobilioji laboratorija RST28);
- matavimas lengvaisiais profilometrais.

Pagal „Valstybinės reikšmės kelių dangos būklės vertinimo tvarkos aprašą“ (Lietuvos automobilių kelių direkcija 2018) vertinamas kelio dangos nelygumas turi būti išmatuotas kiekvienoje eismo juostoje, dešiniojo ir kairiojo automobilių ratų riedėjimo trajektorijose. Vertinant kelio ruožo dangos nelygumo būklę, yra vertinamas vidutinis dangos nelygumas, kuris nustatomas taip:

$$IRI = \frac{1}{n}\frac{1}{l}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{l} IRI_{ij}\,, \tag{1.1}$$

čia *IRI* – viso ruožo vidutinis dangos nelygumas, m/km; *n* – ruoželių skaičius; *l* – eismo juostų skaičius; IRI_{ij} – *i*-tojo ruoželio *j*-osios eismo juostos vidutinis nelygumas *IRI*, m/km.

Išskiriami trys skersinį dangos nelygumą apibūdinantys parametrai (Lietuvos automobilių kelių direkcija 2017b) – tai provėžų gylis transporto priemonių ratų riedėjimo zonose, didžiausia prošvaisa ir fiktyvus vandens gylis provėžose. Visi parametrai nustatomi rankiniu būdu arba automatizuotai ir matuojami milimetrais.

Plastinės deformacijos – tai asfalto dangoje susiformavę nelygumai, kurie atsiranda dėl transporto priemonių apkrovų ir aplinkos poveikio. Esant aukštai aplinkos, o tuo pačiu ir dangos, temperatūrai bei veikiant sunkiasvorių / krovininių transporto priemonių sukeltoms apkrovoms asfalto dangoje gali susiformuoti plastinės deformacijos. Fwa et al. (2010) teigia, kad plastinės deformacijos asfalto dangose atsiranda dėl:

- stovinčiųjų ar stacionariųjų (ilgalaikių ar statinių) apkrovų;
- pasikartojančiųjų eismo apkrovų (didelis pasikartojimų skaičius);
- stabdymo ar greitėjimo apkrovų.

Literatūros šaltiniuose (Vaitkus et al. 2014; Nguyen et al. 2016) išskiriami trys pagrindiniai provėžų tipai (žr. 1.6 pav.):

- struktūrinės provėžos – tai visų dangos konstrukcijos sluoksnių deformacija, o provėžų gylis, susiformuojantis viršutiniame asfalto sluoksnyje yra deformacijų, susidariusių žemesniuosiuose dangos sluoksniuose, rezultatas. Šių provėžų susidarymą lemia: dangos

konstrukcijos parinkimas projektavimo metu, atskirų sluoksnių medžiagų savybės ir dangos konstrukcijos įrengimo kokybė statybos metu. Projektuojant dangos konstrukciją, turi būti įvertinti visi struktūrines provėžas galintys sukelti veiksniai – tai žemės sankasos gruntai, eismo intensyvumo apkrovos, šalčio poveikis, gruntinio vandens lygis, drenažas ir kt.;

- šlyties provėžos – tai viršutinio arba viršutinio ir apatinio asfalto sluoksnių deformacijos, kurios susiformuoja dėl asfalto sluoksnio nuovargio, kuriam atsiradus asfaltas pasidaro neatsparus šlyties įtempimams;
- paviršinės provėžos – tai deformacijos, kurios formuojasi palaipsniui, sutankėjus asfalto sluoksniams ir pardėjus irti paviršiui (užpildų nuostolių). Paviršiaus provėžos yra neišvengiamos, tačiau jų gylis gali būti nežymus, jei tinkamai parinktas asfalto viršutinio sluoksnio mišinys (turintis mažą tuštymių kiekį) ir statybos metu konstrukcijos sluoksniai bus tinkamai sutankinti.



1.6 pav. Asfalto dangos provėžų tipai: a) struktūrinės provėžos; b) šlyties provėžos; c) paviršinės provėžos (Nguyen et al. 2016)

Fig. 1.6. Rutting type on asphalt pavements: a) structural; b) instability; c) surface wear (Nguyen et al. 2016)

Hicks et al. (2000) atliko kelių tampriosios dangos profilaktinės priežiūros tyrimą, kurio metu nustatė, kad provėžos sudėtingumas priklauso nuo hidroplanavimo pavojaus bei kitų su eismo įvykiais, kurie susiję su šlapia danga, rizikos. Šiame tyrime jis išskyrė 3 provėžų masto lygius:

- mažas sudėtingumo lygis – provėžos gylis mažesnis už 6 mm. Hidroplanavimo ir su juo susijusių eismo įvykių rizika maža;
- vidutinis sudėtingumo lygis – provėžos gylis nuo 7 iki 12 mm. Kartu esant netinkamam skersiniam nuolydžiui gali būti sukeltos nepageidaujamos pasekmės;
- aukštas sudėtingumo lygis – provėžos gylis 13 mm ir daugiau. Didelė eismo įvykių, susijusių su hidroplanavimu rizika.

Fwa et al. (2010) atliko tyrimą, kuriame palygino įvairių JAV kelių valdymo agentūrų provėžų kritiškumo lygius. Analizuoti Kanados, JAV valstijų – Vašingtono, Ohajo, Masačiusetso, Kalifornijos bei kitų šalių agentūrų nustatomi kritiškumo laipsniai. Nustatyta, kad paprastai provėžos, gilesnės už 20 mm priskiriamos aukštam kritiškumo laipsniui, apie 10–20 mm gylio – vidutiniam laipsniui, o mažesnio už 10 mm gylio – žemam kritiškumo laipsniui.

Visi plyšiai, nepriklausomai nuo jų rūšies, asfalto dangoje pradeda formuotis kaip paviršaus irimas ir / arba plauko pavidalo ar siauri įtrūkimai, kurie esant aplinkos ir transporto priemonių poveikiui tik didėja. Dangoje atsiradę plyšiai skirstomi į: skersinius, išilginius, blokinius, tinklinius ir atsikartojančius. Dažniausiai sezoniniai temperatūros pokyčiai ir asfalto senėjimo (bitumo kietėjimo) procesai nulemia asfalto dangoje atsirandančius statmenus važiuojamajai kelio ašiai skersinius plyšius. Taip pat šie plyšiai gali atsikartoti žemesniuose temperatūriniuose plyšiuose. Išilginiai plyšiai formuojasi transporto priemonių judėjimo kryptimi, o jų vieta skersai kelio priklauso nuo plyšius sukėlusios priežasties: dangos centre arba eismo juostų sujungimuose – dėl nekokybiškų technologinių siūlių, ratų vėžėse (dangos nuovargio plyšiai) – dėl krovininio transporto apkrovų, 20–40 cm atstumu nuo dangos krašto – dėl netinkamo kelkraščio arba drenažo įrengimo ir šalčio poveikio. Blokiniai plyšiai – tai persikryžiuojantys išilginiai ir skersiniai plyšiai, kurie dangos paviršių sudalina į kvadratus. Susiformavusių kvadratų dydis gali būti nuo 0,3×0,3 m iki 3,0×3,0 m (Miller et al. 2014). Tarpų tarp bloko plyšių atsiradimą nulemia asfalto kietėjimas ir susitraukimas, kuris priklauso nuo asfalto dangos senėjimo procesų. Nuovargio (tinkliniai) plyšiai – tai aligatoriaus odą arba kiaušinio lukštą primenantis plyšių tinklas, kuris dangą sudalina į mažus, nuo 2 iki 15 cm dydžio, gabalėlius (Miller et al. 2014). Asfalto pagrindo sluoksnyje nuovargio plyšiai susiformuoja nuo transporto priemonių apkrovų ciklų dėl prastos žemės sankasos laikomosios gebos. Ateityje nuovargio plyšiai gali virsti duobėmis. Atsikartojantys plyšiai susiformuoja dėl netinkamų sprendinių kelio rekonstrukcijos / remonto metu, kadangi susiformuoja taisytoje kelio dangoje dėl apatiniuose sluoksniuose esančių plyšių, kurių susidarymo priežasties neįmanoma nustatyti neatlikus ekspertinio tyrimo. Pagal Valstybinės reikšmės kelių pažaidų matavimo ir nustatymo tvarkos aprašą (Lietuvos automobilių kelių direkcija 2017b) visi aukščiau išvardyti plyšiai, kurių plotis yra daugiau nei 19 mm priskiriami aukšto išsivystymo laipsnio skersiniams plyšiams.

Išdaužos (duobės) susidaro dangos paviršiaus pažaidų, deformacijų ir plyšių vietose nuo aplinkos sąlygų ir veikiamų transporto priemonių apkrovų. Norint sustabdyti plyšio skverbimąsi gilyn ir užtikrinti dangos sandarumą, kad vanduo nepatektų į žemesnius asfalto sluoksnius, itin svarbu ankstyvoje plyšių susidarymo stadijoje užtaisyti atsiradusius plyšius. Įprastai duobės ir išdaužos susiformuoja tuose ruožuose, kuriuose neužtikrinamas tinkamas paviršinio

vandens nuvedimas. Pagal Valstybinės reikšmės kelių pažaidų matavimo ir nustatymo tvarkos aprašą (Lietuvos automobilių kelių direkcija 2017b) išdauža laikomas defektas, kai jo mažiausias gylis yra lygus asfalto sluoksnio storiui. Priešingu atveju defektas laikomas dangos lukštenimusi – tai dangos nusidėvėjimas, kai atskirose kelio dangos atkarpose atitrūksta arba nusilupa plonas dangos viršutinis sluoksnis. Dažniausiai dangos lukštenimasis pasireiškia esant viensluoksniam paviršiaus apdarui. Aukšto išsivystymo laipsnio dangos lukštenimuisi priskiriamas plotas, kuriame užpildas arba rišančioji medžiaga yra nusidėvėjusi, o dangos paviršius labai šiurkštus ir nelygus, kadangi dangos paviršius netenka stambiojo užpildo.

Lopai (taisytos išdaužos) – tai nauja danga pakeisti dangos plotai, kurie yra didesni kaip 0,1 m^2. Lopų suirimas – tai defektai, atsirandantys suremontuotame dangos plote. Lopai yra ankstesnių kito tipo paviršiaus defektų vystymosi pasekmė, kai remonto (taisymo) metu pašalinamas pažeistos dangos mažiausias plotas ir užtaisoma nauju asfalto sluoksniu. Nepašalintos pirminių defektų atsiradimo priežastys ankstesnio remonto metu nulemia lopų suirimą, kadangi jau pašalinti paviršiaus defektai atsikartoja naujai paklotame asfalto sluoksnyje. Aukšto išsivystymo laipsnio lopui priskiriamas lopas, kuris yra labai suiręs (defektai sudaro daugiau nei 30 % lopo ploto).

Bitumo išplaukimas – tai bitumo perteklius, atsiradęs asfalto dangos paviršiuje, kuris būna blizgantis, panašus į stiklą veidrodinis paviršius, tačiau prisilietus gali būti lipnus. Dažniausiai bitumo išplaukimas susidaro asfalto dangos paviršiuje, ratų riedėjimo vėžėse, kai vasarą, įkaitus kelio dangai, dėl šilumos besiplečiančiam rišikliui, asfalto medžiagoje nepakanka laisvų oro tuštymių ir bitumas, užpildęs jas, išsiveržia į dangos paviršių, sudarydamas minkštas bitumo dėmes. Aukšto išsivystymo laipsnio bitumo išplaukimui priskiriamas dėl bitumo pertekliaus pradėjusio blizgėti dangos paviršiaus ir patamsėjusio užpildo sudaromas plotas. Šiose vietose, esant šiltam orui, gali būti matomos padangų žymės.

Kelio dangos konstrukcijos laikomoji geba nulemia kelio dangos gebėjimą atlaikyti sunkiojo / krovinio transporto, įskaitant visuomeninio transporto, apkrovas. Dangos konstrukcija turi būti suprojektuota ir įrengta taip, kad visu eksploatacijos laikotarpiu dangos konstrukcijoje neatsirastų ribiniai įtempimai ir deformacijos, dėl kurių pradėtų formuotis plyšiai ir provėžos. Stipri, standi dangos konstrukcija yra atsparesnė nuovargiui ir dilimui.

Dangos konstrukcijos laikomoji geba gali būti įvertinta dviem būdais:

- ardančiaisiais metodais – gręžiant dangos konstrukciją ir matuojant jos sluoksnių storius, nustatant sluoksnių medžiagas bei taikant dangų konstravimo teorijos principus ir apskaičiuojant orientacinę dangos konstrukcijos laikomąją gebą;

- neardančiaisiais metodais – atliekant dangos konstrukcijos įlinkio nuo ekvivalentinės 10 t svorio ašinės apkrovos rato matavimus, taip apskaičiuojant visos dangos konstrukcijos faktinę laikomąją gebą.

Abu metodai turi tiek privalumų, tiek trūkumų. Ardančiaisiais metodais dangos konstrukcijos laikomoji geba vertinama projekto lygiu, o esant poreikiui nustatyti laikomąją gebą tinklo lygiu, šie tyrimai atliekami neardančiaisiais metodais (Dore et al. 2009; Yang Hsien Huang 2004).

Dangos konstrukcijos tyrimai ardančiaisiais metodais yra itin aktualūs, kai reikia nustatyti šalčiui atsparios dangos konstrukcijos sluoksnio storį bei esamų pagrindo sluoksnių medžiagų kokybę. Tačiau šie tyrimai yra labai imlūs laikui, o gręžtoje vietoje pažeista danga degraduoja sparčiau, tad šurfavimas naujai įrengtose gatvių ruožuose turėtų būti vengtinas.

Įvairios pažaidos ir kiti dangos būklės techniniai parametrai ne visada akivaizdžiai parodo dangos būklės lygį. Įvairūs techniniai parametrai išreiškiami skirtingais mato vienetais, o jų kritiškumo ribos skiriasi. Kiekvienai aptiktai pažaidai turėtų būti priskiriamas jos masto lygis, kuriuo remiantis pritaikoma priežiūros ir remonto strategija. Pavyzdžiui, mažo sudėtingumo blokinių plyšių pažaidos gali būti eliminuojamos plonu viršutiniu dėvėjimosi sluoksniu, o esant sunkesniems pažeidimo plyšiais lygiams, jau gali tekti imtis dangos asfalto sluoksnių atnaujinimo (Adlinge et al. 2013). Pagal Lietuvos automobilių kelių direkcija (2018); TKTI (1994) visos aptinkamos Lietuvos valstybinės reikšmės keliuose pažaidos skirstomos į 3–5 masto lygius (pvz., skersiniai plyšiai, kurių plotis yra mažesnis už 6 mm priskiriami prie mažo sudėtingumo lygio, nuo 6 iki 19 mm – vidutinio sudėtingumo , nuo 19 mm – aukšto sudėtingumo lygio). Dangos konstrukcijos, turinčios aukšto sudėtingumo lygio pažaidų, turėtų būti remontuojamos anksčiau, kadangi pažaidos lygis gali pasiekti kritinę ribinę reikšmę, dėl ko kelio ar gatvės ruožas gali nebetenkinti saugių eksploatavimo sąlygų. JAV Ohajo transporto departamente (The Ohio Department of Transportation 2006) naudojamos dvigubos skalės, siekiant nustatyti pažaidos poveikį kelio dangai. Pirmoji skalė – įprastas sudėtingumo lygis, antroji – pažaidos apimties lygis. Pažaidos masto lygiai ir ribinės reikšmės skiriasi nuo šalies, valstijos, kelio / gatvės kategorijos, priežiūros lygio ir kitų faktorių.

Vertinant dangos būklę anksčiau minėti techniniai parametrai (dangos būklės rodikliai) turėtų būti palyginami su iš anksto nustatytomis ribomis. Reikšmė, kurią pasiekus, reikėtų remontuoti arba rekonstruoti dangos konstrukciją vadinama ribine reikšme. Ši reikšmė parodo matuojamojo parametro mažiausią reikšmę, užtikrinančią dangos konstrukcijos patvarumą bei funkcionalumą ir kurią privalo užtikrinti kelio valdytojas, kuomet ji yra priimtina kelio naudotojams (Gilbert Y. Baladi et al. 2017).

Ribinės reikšmės gali būti nustatomos ir atskiriems dangos būklės indeksams, ir suminiams dangos būklės indeksams. 1.2 lentelėje pateiktas įvairių parametrų

ribinių reikšmių, nustatytų pagal JAV ir Lietuvos reglamentus palyginimas (Kravcovas et al. 2020). Analizuojami tokie reglamentai:

- FHWA-HIF-10-020 Performance Evaluation of Various Rehabilitation and Preservation Treatments (Zheng Wu et al. 2010) (1.2 lentelėje – FHWA-HIF-10-020) – JAV Federalinės greitkelių administracijos atliktas tyrimas, nagrinėjantis įvairiose valstijose naudojamus rekonstruotos dangos būklės tyrimus. Šio tyrimo rezultatai pateikiami atskirose lentelėse ir gali būti naudojami kaip gairės greitkelių administracijoms.
- Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures (NCHRP 1-37A 2004) – Jungtiniu Amerikos Valstijų greitkelių ir transporto asociacijos (angl. *American Association of State Highway and Transportation Officials*) (1.2 lentelėje – AASHTO) sukurtos gairės naujų ir rekonstruotų kelių dangos konstrukcijų projektavimui, būklės vertinumui ir priežiūrai.
- Pavement Condition Rating system (The Ohio Department of Transportation 2006) (1.2 lentelėje – Ohio) – JAV Ohajo valstijos naudojamos dangos būklės vertinimo gairės.
- Valstybinės reikšmės kelių pažaidų matavimo ir nustatymo tvarkos aprašas (Lietuvos automobilių kelių direkcija 2017b)(1.2 lentelėje – LAKD) – VĮ Lietuvos automobilių kelių direkcija patvirtintas aprašas, nustatantis valstybinės reikšmės kelių pažaidų, kurių duomenys naudojami atliekant kelio dangos būklės vertinimą, matavimo, klasifikavimo ir nustatymo tvarką.

1.2 lentelė. Techninių parametrų ribinių reikšmių palyginimas įvairių dangos būklės vertinimo metodikų pagrindu (Kravcovas et al. 2020)
Table 1.2. Comparison of threshold values of various technical parameters by different methodologies (Kravcovas et al. 2020)

PPI	FHWA-HIF-10-020	AASHTO	Ohio	LAKD
1	2	3	4	5
IRI	2,7 m/km	3,16 m/km		4,5 m/km
Provėžos gylis	12,7 mm	16,5 mm	19,0 mm (>50 %)	20 mm
Plyšių tinklai	20 % ploto	35 % ploto		>19 mm pločio
Išilginiai plyšiai	200 m / 100 m eismo juostos		>25 mm pločio, 150 m/0,1 km	>19 mm pločio
Skersiniai plyšiai	67 m / 100 m eismo juostos	132,6 m / km eismo juostos	<0,9 tarp plyšių >50 %	>19 mm pločio

1.2 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5
Blokiniai plyšiai			<0,9x0,9 m >50 % (>6/km)	
Duobės			>25 mm gylio >0,84 m^2	> sluoksnio storio
Lukštenimasis			>50 %	
Bitumo išplaukimas			juodas paviršius >30 %	blizgus paviršius, padangų žymės
Lopai			>0,84 m^2 >12/km	>30 % ploto defek.

Stebėdamas kelio dangos būklę, kelio valdytojas neturėtų laukti, kol ribinės reikšmės bus pasiektos ir tik tuomet įtraukti ruožą į remonto darbų sąrašą. Iš kitos pusės, kai ruože jau pasiekiamos ribinės reikšmės, tai nereiškia, jog valytojas nedelsiant turi uždaryti šį kelią vartotojams ir imtis remonto darbų. Ribinė reikšmė yra dangų valdymo įrankis, padedantis kelio valdytojams įvertinti, apskaičiuoti ir priimti pagrįstus sprendinius dėl kelio tinkamumo naudoti bei kelių tinklo sąlygų (Gilbert Y. Baladi et al. 2017).

Miestų gatvėse būtų netikslinga taikyti tas pačias ribines reikšmes kaip ir užmiesčio keliuose dėl skirtingų aplinkos ir eismo sąlygų, specifiško važiavimo greičio ir eismo intensyvumo. Miestuose važiavimo greitis yra mažesnis, todėl nelygumo parametras pasidaro nebe toks svarbus. Tačiau miestuose gausu sankryžų ir pėsčiųjų perėjų, dėl ko dangos sukibimo parametras yra svarbesnis nei užmiesčio keliuose. Antra vertus, vertinimas pagal ribines reikšmes gali būti pirmas žingsnis, įgyvendinant DVS. Jau nustatytos egzistuojančios ribos gali būti priimtos kaip atskaitos taškas, o laikui bėgant jos gali būti koreguojamos konkrečiam gatvių tinkui. Be to, parenkant ribines reikšmes, svarbu įvertinti konkrečių duomenų surinkimo galimybę, pvz., jei turima dangos tyrimo įranga sugeba plyšius registruoti tik pagal pažeisto ploto dalį, netinka naudoti plyšio pločio ribinę reikšmę.

1.2.3. Būklės indeksai

Paprastai dangos būklė apibrėžiama eile skirtingų pažaidų ir kitų faktorių. Plačiausiai naudojamas yra dangos būklės indeksas PCI (angl. Pavement Condition Index). Šio indekso apskaičiavimas aprašytas JAV galiojančiame ASTM D6433 standarte (ASTM 2011). Jis išreiškiamas skaičiumi nuo 0 iki 100, kai 100 – tobula danga, be jokių pastebimų defektų, o 0 – danga, turinti aukščiausio sudėtingumo lygio pažaidas, pasklidusias pagal aukščiausią apimties lygį. Jo privalumas yra lankstumas, kadangi indeksas gali būti apskaičiuojamas nepriklausomai ar visų aprašytų pažaidų duomenys turimi, ar tik dalies. Iš viso

indeksui gali turėti įtakos apie 20 įvairių asfalto dangų pažaidų. Zofka et al. (2014) atliko tyrimą, kuriame apskaičiavo PCI pagal išilginių ir skersinių plyšių bei nelygumo (IRI) duomenis. Mokslininkai suprognozavo šio indekso kitimą 20 metų, pritaikydami 6 tipinius priežiūros ir remonto darbų scenarijus. Tyrimo rezultatai parodė, jog efektyviausia yra nelaukti kol dangos būklės indeksas PCI pasieks kritinį lygį ir remontuoti dangą kol ji yra geros būklės.

Shah et al. (2013) atliko tyrimą, kuriame kombinuotas bendrasis dangos būklės indeksas OPCI (angl. Overall Pavement Condition Index) buvo įvertintas, atsižvelgiant į keturis pagrindinius dangos būklės rodiklius, tokius kaip pažaidos, nelygumas, laikomoji geba ir atsparumas slydimui. Tyrimas atliktas atrinktose Noidos miesto gatvėse. Mokslininkai padarė išvadą, jog dangos konstrukcijos laikomoji geba yra vienas iš lemiamų faktorių, turinčių įtaką dangos būklei, todėl laikomosios gebos rodiklis turėtų būti įvertintas planuojant priežiūros ir remonto strategiją miesto gatvių tinklui. JAV Ohajo transporto departamente (The Ohio Department of Transportation 2006) naudojamas dangos būklės reitingas PCR (angl. Pavement Condition Rating), kaip ir PCI išreiškiamas skaičiumi nuo 0 iki 100. FHWA-HRT-17-095 (2017) aprašoma subalansuota dangos būklės reitingavimo sistema, paremta likutinio struktūrinio tarnavimo laikotarpio RSP (angl. Remaining Structural Period) bei likutinio funkcinio tarnavimo laikotarpio RFP (angl. Remaining Functional Period) principais. RFP galima laikyti dangos būklės reitingu, skirtu kelių ar gatvių tinklo naudotojui, o RSP – kelio valdytojui. RFP apskaičiuojamas kelio ruožui, remiantis trimis dangos būklės rodikliais: išilginis nelygumas (IRI), provėžos gylis bei atsparumas slydimui. RSP apskaičiuojamas remiantis šešiais dangos būklės rodikliais, įskaitant įvairius plyšių tipus bei provėžos gylį. Apskaičiavus abu reitingus duotam kelio ruožui priskiriama žemiausia iš dviejų apskaičiuotų verčių.

Siekiant standartizuoti Europos sąjungos šalių valstybinės reikšmės kelių būklės nustatymo metodus 2008 m. buvo įvykdytas jungtinis 23 Europos šalių bendradarbiavimo mokslinių ir techninių tyrimų srityje projektas COST 354 (angl. *European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research*). Atsižvelgiant į veiklos ataskaitoje COST 354 „Kelių dangų eksploatacinių savybių rodikliai“ (COST Action 354 2008) (toliau – COST 354 metodika) pateiktą metodologiją, taikomą Europos sąjungos šalyse, kelio dangos būklė tinklo lygiu yra vertinama ir reitinguojama, taikant globalų dangos būklės indeksą PCI (Pavement Condition Index). Pagrindinis COST 354 tikslas yra apjungti Europoje naudojamus DVS metodus, parengiant universalią, lanksčią metodiką, kuri leistų taikyti įvairaus detalumo duomenų rinkinius dangos būklei nustatyti. COST 354 apibrėžė suminio dangos būklės indekso (DBI), kombinuotų dangos būklės indeksų (KBI) ir dangos būklės indeksų (BI) sistemą bei nurodymus jų praktiniam taikymui.

2018 metais ši metodika buvo pritaikyta Lietuvos automobilių kelių direkcijos išleistame „Valstybinės reikšmės kelių dangos būklės vertinimo tvarkos apraše“ (Lietuvos automobilių kelių direkcija 2018) (toliau – LAKD metodika). Minėtame apraše apibūdinti valstybinės reikšmės kelių būklės vertinimo kriterijai, kurie taikomi planuojant valstybinės reikšmės kelių rekonstravimo, kapitalinio ir paprastojo remonto darbus. Vertinimas atliekamas trimis etapais:

- išmatuoti atskiri kelio dangos techniniai parametrai perskaičiuojami į bedimensius būklės indeksus 5 balų sistemoje;
- sujungiant atskirus būklės indeksus apskaičiuojami kombinuoti būklės indeksai;
- sujungiant visus tris kombinuotus būklės indeksus apskaičiuojamas suminis dangos būklės indeksas.

Pagrindiniai skirtumai tarp LAKD ir COST 354 metodikų yra tame, kad Lietuvoje paprastai naudojamas tik vienas techninis parametras (toliau – TP) kiekvienam BI apskaičiuoti, o COST 354 pasiūlo keletą alternatyvių formulių BI apskaičiuoti. Lietuvoje nuo kelio reikšmės priklauso tik nelygumo būklės indeksas, o COST 354 metodika leidžia kiekvieną BI apskaičiuoti, pritaikant keletą formulių, priklausančių nuo kelio reikšmės. Taip pat, Lietuvoje taikomoje metodikoje nenaudojami dangos sukibimo ir laikomosios gebos BI. Valstybinės reikšmės kelių dangos būklės rodikliai vertinami penkiabalėje sistemoje nuo 0 iki 5, kur 0 – labai gerai ir 5 – labai blogai. Apskaičiuojant BI pagal pateiktas formules reikėtų turėti omenyje, kad jei gauta reikšmė yra neigiama, BI priimamas lygus 0, o jei apskaičiuota reikšmė didesnė už 5, BI priimamas, kad lygus 5.

Apjungiant atskirus rodiklius į KBI arba DBI yra atsižvelgiama į didžiausią rodiklio svertinę vertę, kurią lemia kitų rodiklių svertiniai koeficientai. Tas pats dangos BI gali būti naudojamas keliems kompleksiniams eksploatacijos kriterijams nustatyti. Apskaičiuojant kompleksinius eksploatacijos kriterijus, taikomi svoriniai koeficientai atskiriems dangos būklės rodikliams (indeksams). Tuomet, pagal įvairių kompleksinių eksploatacijos rodiklių svorinius koeficientus yra apskaičiuojamas DBI. COST 354 skaičiavimo algoritmas pagrįstas samprata, kad didžiausias dangos būklės eksploatacinis rodiklis (indeksas) turės didžiausią poveikį suminiam dangos būklės indeksui. Praktiniam procedūros taikymui sukurti metodai, kurie suteikia vartotojui galimybę lanksčiai taikyti svertinius koeficientus ir esant poreikiui tikslinti jų poveikį DBI.

Dėl COST 354 metodikos lankstumo, Lietuvos ir kitų šalių gerosios praktikos ši dangos būklės vertinimo metodologija buvo pasirinkta analizei šiame darbe. Nors ji ir yra skirta valstybinės reikšmės kelių būklei nustatyti, ją galima būtų adaptuoti gatvių dangų tinklui – eksperimentiniu būdu apskaičiuojant atskirų ir kombinuotų būklės indeksų reikšmingumą (svorinius koeficientus). Palyginimui pasirinkta LAKD metodika, kadangi ji yra sukalibruota Lietuvos aplinkos ir eismo sąlygomis.

1.3. Dangos būklės kitimo (degradacijos) prognozavimo modeliai

Esamų kelių ir gatvių išsaugojimas tapo viena pagrindinių valdančiųjų institucijų užduotimi. Blogėjanti gatvių dangos būklė bei sumažėjęs finansavimas jų remontui ir rekonstravimui yra pagrindinės vietinių savivaldų problemos. Todėl lėšos, skirtos gatvių dangų tinklui, turi būti panaudotos kuo efektyviau. Vienas pagrindinių komponentų sprendimų priėmimo procese yra dangos būklės vertinimas. Šios strategijos taikymas leidžia įvertinti visą gatvių tinklą individualiai bei priskirti kiekvienam jos elementui (pvz., gatvės ruožui) skaitinę reikšmę, kuri atspindėtų šio elemento būklę.

Siekiant įvertinti dangos likutinę vertę, atsižvelgiant į kiekvieną dangos būklės rodiklį, sudaromos eksploatacinių savybių kreivės. Šios kreivės turėtų padėti nustatyti dangos pažaidų lygį bet kuriuo gatvės eksploatavimo laikotarpio metu, neatliekant papildomų tyrimų. Eksploatacinių savybių kreivės lemia kiekvienos pažaidos svarbą. Stampley et al. (1995) padarė išvadą, jog bazinė kreivės forma yra sigmoidinė kreivė (S formos).

Dangos būklės vertinimas gali būti atliekamas remiantis įvairiomis metodikomis, pvz., neapibrėžtinės logikos (angl. *fuzzy logic*) ir analitinės hierarchijos procesais (Sun et al. 2011), mašininio mokymosi algoritmais (Marcelino et al. 2018), ekspertinėmis sistemomis (Ismail et al. 2009), rizika pagrįstu metodu (angl. *risk-informed approach*) (Ellingwood 2005) ar programinių skaičiavimų metodu (A. P. Singh et al. 2018).

Sivilevičius et al. (2013) atliko tyrimą, kuriame bandė sukurti provėžų gylio prognozavimo Lietuvos valstybinės reikšmės greitkeliuose metodą, kadangi provėžos laikomos viena pagrindinių problemų Lietuvos keliuose. Ziliute et al. (2011) ištyrė asfalto dangų nelygumo duomenis kartu su eismo intensyvumo duomenimis Vilniaus miesto gatvėse. Mokslininkai nustatė, kad mieste eismo intensyvumas atskirose gatvėse gali padidėti net iki 23 % per metus, kas stipriai skiriasi nuo valstybinės reikšmės keliuose matomų tendencijų.

Kirbaş et al. (2016) pasitelkė trimis skirtingais modeliavimo metodais: deterministinės regresijos, daugiamatės adaptyviosios regresijos glodžiosiomis kreivėmis (MARS) bei dirbtinio neuroninio tinklo (ANN), siekiant prognozuoti miesto gatvių dangos degradavimą. ANN modelis buvo išrinktas labiausiai tinkamas šiam tikslui. Nepaisant to, kitų modelių prognozės tikslumas buvo artimas ANN metodui. Osorio (2015) priėjo išvadą, kad miestų dangos būklės indeksas UPCI (angl. Urban Pavement Condition Index) gali būti naudojamas miestų dangų valdymo sistemoje įvairiose šalyse. Mokslininkas sukūrė tris UPCI modelius, skirtus naudoti su rankiniu arba automatiniu būdu surinktais dangos būklės duomenimis.

Dangų valdymo ir priežiūros sistemos vystymas reikalauja dangų degradavimo modeliavimo pagal istorinius tyrimo duomenis. Tai daroma tokiomis priemonėmis kaip HDM-4. Šio įrankio dėka mėginama sukurti regresijos modelį, kuris atkartotų kompleksinę sąveiką tarp dangos konstrukcijos, eismo apkrovų bei aplinkos sąlygų. Šis modelis (arba tiksliau – modelių rinkinys) turėtų prognozuoti įvairių pažaidų raidą dangose skirtingu laikotarpiu ateityje (A. Singh et al. 2018). Kadangi pažaidų lygiai gana stipriai koreliuoja su aplinkos sąlygomis kelių / gatvių tinkle, dangos degradacijos modeliai turėtų būti sukalibruoti kiekvienai šaliai ar jos daliai, prieš pradedant dirbti su modeliu.

Braga (2005) nustatė, jog dangos degradacijos modeliuose gali būti naudojama apie 60 asfalto degradavimą veikiančių faktorių. Tai dangos būklės rodikliai, eksploatacinės charakteristikos, eismo, klimato ir aplinkos duomenys bei daugelis kitų. Visų tokio pobūdžio veiksnių įvertinti praktiškai neįmanoma ir netikslinga. Yra svarbu atrinkti pagrindinius rodiklius ir jiems taikyti degradacijos modelius. Mokslininkas įvardijo nelygumo, plyšių ir provėžų rodiklius kaip pagrindinius.

Braga (2005) dangos degradacijos modelį įvardina kaip matematinę funkciją, kurios kintamieji – kelio dangos konstrukcija, jos techninės ir eksploatacinės charakteristikos, amžius, taikomi priežiūros ir remontų standartai, transporto priemonių eismo intensyvumas ir jų apkrovos į dangą, kelio geometriniai parametrai, klimato sąlygos ir kita – išreikštos fizikiniais dydžiais arba faktoriais. Tai yra dinaminiai modeliai, kadangi visada vienas iš kintamųjų yra laikas.

Dangos degradacijos modeliai gali būti priskiriami vienam iš dviejų plačių tipų (Osorio 2015):

- deterministiniai (angl. *deterministic*) – modeliuoja dažniausiai pasitaikantį degradacijos atvejį laike. Jais galima prognozuoti kelio dangos būklę (ar kelio dangos būklės parametrą, pvz., nelygumą) tam tikru laiko momentu ateityje;
- stochastiniai arba tikimybiniai (angl. *probabilistic*) – įvertina degradacijos tempo kaitą kiekvienais metais. Jais galima prognozuoti kelio dangos būklės pokytį (ar kelio dangos būklės parametro pasikeitimą, pvz., kelio nelygumas) per tam tikrą laiko tarpą.

Abiejų tipų modeliai naudojami prognozuoti dangos būklės kitimą laike. Pagal prognozavimo galimybę laike, modeliai skirstomi į diskretinius, kuriuose laiko atskaita fiksuojama tam tikrais nustatytais intervalais, pavyzdžiui vieneriais metais, bei į tolydžius, kuriuose kelio dangos būklė gali būti modeliuojama bet kuriuo momentu, neribotam laiko tarpui.

Dangos būklė gali būti apskaičiuota taikant įvairius metodus, pradedant nuo ekspertinės apklausos, baigiant išsamiu dangos būklės prognozavimu, naudojantis istoriniais duomenimis skirtinguose deterministiniuose ir stochastiniuose modeliuose (Haas et al. 1994):

- mechanistiniai – prognozuojama reikšmė paremta pagrindinėmis vertėmis, pvz., deformacija ar įtempiai;
- mechanistiniai-empiriniai – išmatuota funkcinė ar struktūrinė degradacija, susijusi su atsako parametrais (angl. *response parameter*);
- empiriniai – išmatuota priklausoma funkcinė ar struktūrinė degradacijos vertė, susijusi su vienu ar daugiau nepriklausomų parametrų, pavyzdžiui, dangos amžius, lygumas, ašių apkrovų skaičius ir t. t.;
- stochastiniai (tikimybiniai) – prognozuojama formaliu arba struktūrizuotai, naudojantis stochastiniais procesais.

Stochastiniai modeliavimo procesai tinka dangų degradacijos modeliavimui tinklo lygiu. 1.3 lentelėje pateikta stochastinių metodų santrauka su kiekvieno iš jų privalumais ir trūkumais (Chamorro Giné 2012). Bajeso teorijos modeliai arba Markovo grandinės modeliai labiausiai tinkami kai nėra prieinami istoriniai duomenys, tačiau pastarasis gali būti lengviau pritaikytas esant netiesiniams ryšiams.

1.3 lentelė. Stochastiniai modeliai (Chamorro Giné 2012)
Table 1.3. Stochastic models (Chamorro Giné 2012)

Modeliavimo metodas	Trumpas aprašymas	Privalumai	Trūkumai
Regresinė analizė	Statistinis modeliavimo metodas	– paprastesnis modeliavimas – gali būti išvystyti nelinijiniai ryšiai	– efektyvus tik esant dideliems duomenų kiekiams – negali būti išeinama už turimų duomenų ribų
Neuroniniai tinklai	Simuliuojami matematiniai modeliai, turint įvesties duomenis, bet neturint išvesties duomenų bei modelio	–procesas nereikalauja tiksliai nurodytų ryšių	– sudėtingas modeliavimas – reikalauja didelių eksperimentinių duomenų kiekio
Bajeso modeliai	Tikimybinis modeliavimas pagal Bajeso regresiją (žinomi skirstiniai + surinkti duomenys)	– tikslus, turint ekspertų vertinimą – tinkamas rezultatas, turint mažą duomenų bazę	– sudėtingas nelinijinių ryšių modeliavimas
Markovo grandinės	Tikimybinis modeliavimas pagal stochastinę matricą. Gali numatyti dangos konstrukcijos būklę pagal esamą būklę	– modeliai gali būti kuriami ir be istorinės duomenų bazės – lengva modeliuoti nelinijinius ryšius	– stochastinė tikimybių matrica turi būti kuriama kiekvienai rodiklių kombinacijai

HDM-4 yra viena žinomiausių dangų valdymo sistemų (DVS) pasaulyje. Pasaulio bankas išleido šiuo metu paskutinę šios programos versiją (v2) 2004 metais. HDM-4 DVS inkorporuoja dangų degradacijos modelį. Šis modelis buvo sukurtas remiantis Brazilijos ir Pietų Afrikos šalyse atliktais tyrimais (Ognjenovic et al. 2015). Tyrimų metu buvo sumodeliuotos praktiškai visos pažaidos, kurios tik gali atsirasti kelio ar gatvės dangos konstrukcijoje.

Bendrus, kelių dangos būklės valdymo ir kelių plėtros planavimo skaičiavimo sistemos modelius, sudaro keletas mažesnių modelių, kurie tiria įvairius aspektus: transporto priemonių eksploatacinių išlaidų modelis, poveikio kelio naudotojams modelis, kelio dangos degradacijos modelis, kelio dangos priežiūros ir remontų modelis (VĮ Transporto ir kelių tyrimo institutas 2009).

HDM-4 modelis plačiai taikomas visame pasaulyje, tame tarpe ir miesto gatvių dangų degradacijos prognozavimui ir valdymui (A. Singh et al. 2018; Ognjenovic et al. 2015; Yogesh et al. 2016; Pradena et al. 2016; Mandhani 2016). Kiekviena valstybė, norinti naudoti HDM-4 metodą, turi jį pritaikyti savo vietinėms (eismo, ekonomikos, socialinėms, klimato, technologinėms) sąlygoms.

HDM-4 yra harmonizuota kelių infrastruktūros planavimo sistema ir jos kompiuterinė įranga, kuri leidžia įvertinti ne tik ekonominį investicijų į kelius poveikį, bet ir techninį ar socialinį (VĮ Transporto ir kelių tyrimo institutas 2009). Ši sistema dažniausiai taikoma, norint įvertinti projektus, sudaryti daugiametes kelių tinklo plėtros programas, taip pat strateginiam planavimui.

Morosiuk et al. (2004) išvardija pažaidas bei dangos būklės rodiklius, kuriuos galima sumodeliuoti HDM-4 pagalba. Asfalto dangoms tai plyšiai, provėžos, duobės, kraštų nutrupėjimas, bitumo išplaukimas, nelygumas, sukibimas ir kt. Taip pat modeliuojami ir betono dangos bei nesurištos dangos pažaidos ir rodikliai, išskyrus betono plokščių dangas. HDM sistemose kelio dangos nelygumas yra pagrindinis parametras, nusakantis bendrą kelio dangos kokybinę būklę ir jos poveikį automobiliui sąveikoje „kelias-automobilis“. Į jį susiveda visi kelio dangos defektai, todėl metinis kelio dangos nelygumo pokytis per tam tikrą laiko tarpą išreiškiamas sudėtiniu dangos nelygumo modeliu.

Lietuvoje HDM-4 modelio pritaikymas valstybinės reikšmės keliams aprašomas Braga (2005) bei Braga et al. (2003). Mokslininkas nustatė, kad efektyvus modelių taikymas įmanomas tik reguliariai vykdant dangos būklės tyrimus, siekiant gauti pakankamą prognozės tikslumą. Jo atlikta analizė įrodo, kad tenkinant šią sąlygą bei naudojantis kitais Lietuvos automobilių kelių informacinėje sistemoje saugomais duomenimis, pritaikius darbe pasiūlytus kalibruotus arba modifikuotus HDM dangų degradacijos modelius, degradacijos prognozavimas įmanomas ir gali būti taikomas planavimo etape.

Kitose šalyse taip pat bandyta adaptuoti HDM-4 modelį. Jorge et al. (2012) pasiūlė deterministinį optimizavimo modelį susietą su homogeniniais ruožais – GENEPAV-HDM4. Šį modelį sudaro tokie komponentai: analizės tikslas, kelio

dangos duomenys ir modeliai, sistemos apribojimai bei rezultatai. GENEPAV-HDM4 pradėtas kurti kaip Lisabonos dangų valdymo sistemos komponento sprendimų paramos įrankio DAT (angl. *Decision Aid Tool*) dalis. Modelis plėtotas toliau kaip visos Portugalijos DVS dalis. Saba (2011) adaptavo egzistuojančius dangos funkcionavimo ir būklės prognozavimo modelius (HDM-4) ir juos sukalibravo Šiaurės Europos šalių sąlygoms, o vėliau juos įdiegė šiose šalyse.

Chopra et al. (2018) sukūrė 5 genetinio programavimo (GP) modelius, skirtus plyšių (1 modelis), dangos lukštenimosi (2 modelis), duobių (3 modelis), provėžų (4 modelis) ir nelygumo (5 modelis) vystymosi prognozei. Mokslininkai įrodė, kad GP pagalba suprognozuoti pažaidų duomenys pakankamai gerai koreliuoja su natūrinių tyrimų metu išmatuotais duomenimis.

Kaip rodo įvairių mokslininkų ir specialistų praktika, nėra sudėtinga sukurti arba adaptuoti egzistuojančius modelius konkrečioms sąlygoms, ir konkrečiam kelių ar gatvių tinklui. Tam tikri modeliai yra detaliai aprašyti ir yra viešai prieinami kiekvienam norinčiam. HDM-4 yra tarp populiariausių tokių modelių, jo pagrindu sukurta nemažai DVS, tame tarpe ir Lietuvoje naudota DAVASEMA. Kiti modeliai yra uždari ir egzistuoja tik kaip komercinės dangų valdymo sistemos produkto dalis. Paprastai tokie modeliai turi jų kalibravimo galimybes, tačiau šios galimybės limituotos. Įgyvendinant DVS miesto gatvių tinkle, neturint patirties, sudėtinga nuo nulio parinkti taikytinus degradacijos modelius, todėl gali būti tikslinga pasinaudoti pilnaverčiu komerciniu DVS paketu. Laikui bėgant, kelių tinklo duomenis būtų kaupiami, o degradacijos modeliai kalibruojami ir tikslinami.

1.4. Ruožų segmentavimo pagal dangos būklę principai

Dangos būklės parametrai, tokie kaip įlinkiai, laikomoji geba, dangos sukibimas, įvairių pažaidų lygiai skiriasi atskiruose to pačio kelio ruožuose. Šie duomenys naudojami projektuojant naujus kelius ar gatves bei parenkant esamų priežiūros ir remonto strategiją. Jei sprendiniai parenkami atsižvelgiant į suvidurkintas reikšmes, apskaičiuotas visam analizuojamam kelio ruožui, šie sprendiniai gali būti neekonomiškai pertekliniai arba atvirkščiai – nepakankami. Todėl, nuoseklūs dangos būklės parametrai išilgai kelio atkarpai, turėtų būti apibrėžti į atskirus, santykinai tolygius ruožus, kuriems turi būti taikomi atskiri priežiūros ir remonto sprendiniai.

Stambiausias vienetas kelio ar gatvių tinkle, kai kalbama apie dangos valdymą, vadinamas atšaka (Nik et al. 2019). Shahin (2005) aprašo atšaką kaip lengvai atpažįstamą dangų tinklo dalį, turinčią aiškią naudojimo paskirtį. Pavyzdžiui, atskira gatvė arba automobilių stovėjimo aikštelė gali būti skaitoma atskira dangų tinklo atšaka. Analogiškai atskiros aerodromo dalys, tokios kaip

kilimo-tūpimo takas arba riedėjimo takas, gali būti laikomi atskiromis oro uosto dangų tinklo atšakomis. Atšaka ne visada turi tas pačias charakteristikas per visą jos ilgį arba plotą. Dėl tos priežasties, aiškesniam valdymui, atšakos skirstomos į smulkesnius vienetus, vadinamus homogeniniais ruožais. Homogeninis ruožas gali būti laikomas smulkiausiu vienetu, kuriam turi būti parenkamas nuoseklus priežiūros ir remonto sprendinys. Tas pats ruožas turi būti tos pačios dangos (asfalto, betono, asfalto su betono pagrindu ir t. t.). Kiekviena atšaka susideda bent iš vieno homogeninio ruožo, kai skiriasi atšakos charakteristikos, ruožų yra daugiau. Kiti faktoriai, kuriuos reikėtų turėti omenyje, skirstant atšakas į homogeninius ruožus, yra dangos konstrukcija, statybos, remonto ir priežiūros darbų istorija, eismo intensyvumas ir sudėtis, dangos būklės reitingas, vandens nuvedimo įrenginiai ir kt. Pagal Valstybinės reikšmės kelių dangos būklės vertinimo tvarkos aprašą (Lietuvos automobilių kelių direkcija 2018) homogeninis kelio ruožas – vienodų techninių parametrų ruožas, kuriame dangos konstrukcijos sluoksnių storiai, dangos techniniai parametrai (nelygumas, vėžės ir kiti), automobilių eismo intensyvumas kinta nežymiai.

Tikslus homogeninio ruožo apibrėžimas skiriasi kiekvienoje kelių / gatvių tinklo valdančiojoje organizacijoje, priklausomai nuo dangų valdymo sistemos raidos ir galimybių bei nuo šiuo metų turimos kelių tyrimų įrangos (F Thomas et al. 2004). Nebūtinai visos nustatytos charakteristikos susijusios su ta pačia etalonine atskaitos sistema, tačiau sistema vis vien priklauso nuo sekančių savybių ir bendrų struktūrinių sąlygų:

- informacijos charakteristika (atsparumas slydimui, provėžos, plyšiai ir kt.);
- duomenų surinkimo metodas (vizualinis, rankinis matavimo prietaisas, automatizuotas prietaisas ir kt.);
- matavimo prietaisas (krintančio svorio deflektometras, mobilioji laboratorija ir kt.);
- tyrimų lygmuo (kelių / gatvių tinklo mastu, projekto mastu).

Bennett (2004) aprašo keletą segmentavimo (angl. *segmentation*) būdų, kuriais galima suskirstyti kelią į atskirus ruožus:

- Skirstymas pagal fiksuotą ruožo ilgį. Pavyzdžiui, kelias skirstomas į 500 m ilgio ruožus iki pat pabaigos.
- Skirstymas pagal vertės pokyčius. Pavyzdžiui, ties vietomis, kur keičiasi kelio ar gatvės plotis, ar dangos konstrukcija. Taip pat ruožo riba dažnai uždedama administracinio vieneto pasikeitimo vietose, pavyzdžiui ties miesto riba ar tarp valstybės rajonų.
- Skirstymas pagal vertės diapazoną. Pavyzdžiui, išmatavus nelygumą (IRI) gatvėje, galima būtų suskirstyti pagal IRI reikšmes: <5 m/km; 5–10 m/km; 10–15 m/km; >15 m/km.

- Skirstymas pagal vertės nuokrypį. Pavyzdžiui, išmatavus nelygumą (IRI) gatvėje, ruožo riba būtų ties vietomis, kur IRI pasikeičia daugiau nei 1,5 m/km, lyginant su to ruožo pradžios verte.

Tačiau visus šiuos segmentavimo būdus sudėtinga pavadinti objektyviais ar pagrįstais, kadangi gauti atskiri ruožai nebus homogeniniai, t. y., tikėtina, kad daugelis jų parametrų skirsis. Dangos valdymas, įtraukiantis tikslų homogeninių ruožų parinkimą, yra svarbus, norint minimizuoti kaštus per nurodytą laikotarpį, sumažinant dangos degradavimą ir priimant tinkamus sprendinius dangų valdymo sistemoje (Nik et al. 2016). Homogeninių ruožų naudos ir jų skirstymo tema buvo atlikta nemažai tyrimų, įskaitant (Misra et al. 2003; Haide et al. 2015; F Thomas et al. 2004; Fridtjof Thomas et al. 2004; Van Hiep et al. 2010; Bennett 2004; Krawczyk et al. 2013; Nik et al. 2019).

Ruožų segmentavimo duomenų pagrindu gali būti įvairūs parametrai arba atsako vertės (angl. *response value*). Tai gali būti, kaip ir atskiri dangos būklės rodikliai, iš kurių plačiausiai naudojami yra dangos įlinkiai, gauti krintančio svorio deflektometro matavimų metu (Pantuso et al. 2019; Krawczyk et al. 2013; Jordaan et al. 2015). Galimi ir kiti atskiri rodikliai, tokie kaip nelygumas (IRI) (Fridtjof Thomas et al. 2004), kelio dangos sukibimas, įvairių defektų lygiai ir kt., nors, kita vertus, ruožų segmentavimą galima atlikti pagal apskaičiuotus suminius dangos būklės indeksus (Pantuso et al. 2019) arba skirtingas atsako verčių kombinacijas.

1.4.1. Kumuliacinio skirtumo metodas

Kumuliacinio skirtumo metodas (angl. *cumulative difference approach*) – metodas, kurio taikymas civilinės inžinerijos srityje anksčiausiai buvo aprašytas AASHTO Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO 1993). Šis metodas sudaro skirtumų tarp reikšmių iki tam tikro matavimo sumos bei sumos, gautos sudedant viso ruožo vidurkį iki to matavimo, seką. Šis metodas plačiai taikomas civilinės inžinerijos specialistų iš viso pasaulio, įskaitant JAV (Bennett 2004; AASHTO 1993), Europos Sąjungą (Fridtjof Thomas et al. 2004; COST Action 336 2005), Aziją (Pantuso et al. 2019) bei kitas šalis.

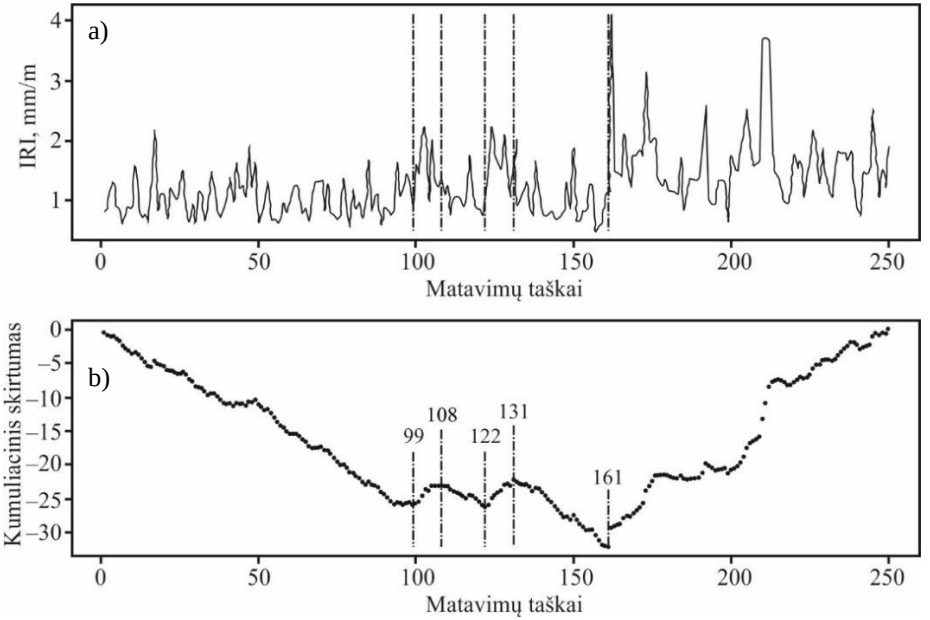
Kiekvieno *k*-tojo matavimo kumuliacinį skirtumą galima būtų išreikšti taip:

$$z_k = \sum_{i=1}^{k} x_i - k\bar{x}, \tag{1.2}$$

visiems $k = 1, 2, ..., n$,

$$\text{kur } \bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i . \tag{1.3}$$

(Fridtjof Thomas et al. 2004) pademonstravo kumuliacino skirtumo segmentavimo principą pagal kelio dangos nelygumą (IRI) (žr. 1.7 pav.).



1.7 pav. Kumuliacinio skirtumo metodas: a) „žali“ duomenys (IRI); b) segmentavimo kreivė (Fridtjof Thomas et al. 2004, perdaryta autoriaus)
Fig. 1.7. Cumulative differences approach: a) raw data (IRI); b) segmentation curve (Fridtjof Thomas et al. 2004, perdaryta autoriaus)

Homogeninio ruožo riba nustatoma, kai kumuliacinio skirtumo kreivė keičia kryptį AASHTO (1993), t. y., didėjimas keičiasi į mažėjimą arba atvirkščiai. Tačiau, kai grafikas yra sudaromas pagal sąlyginai nepastovius duomenis (pvz., krintančio svorio deflektometro įlinkiai arba automatizuoto matuoklio pamatuotas nelygumas IRI), tikslinga apriboti išskirtų homogeninių ruožų skaičių arba apriboti ruožo ilgį. Tai daroma, kadangi esant dideliam svyravimų skaičiui, nemaža dalis iš jų yra neesminiai, atsirandantys dėl „iššokusių“ pavienių matavimo taškų. Tokie neesminiai kreivės krypties pasikeitimai turėtų būti ignoruojami.

1.7 paveiksle pateikto homogeninio ruožo riba nustatyta kumuliacinio skirtumo kreivėje išrenkant tik esminius pikus. Esminiu pikas buvo laikomas, kai jo reikšmė buvo didžiausia arba mažiausia tarp gretutinių taškų, įskaitant po 7 taškus prieš ir už nagrinėjamo taško. Įvedant palyginimo su gretutiniais taškais

sąlygą, atmetamos nereikšmingos reikšmės ir tuo tarpu mažinamas nustatytų homogeninių ruožų skaičius.

1.4.2. Absoliučių slenkančių vidutinių verčių skirtumų metodas

Absoliučių slenkančių vidutinių verčių skirtumų metodas arba slenkančių vidurkių metodas (angl. *absolute differences in sliding mean values*) – metodas pradėtas taikyti Vokietijoje. Rübensam et al. (1996) pasiūlė būdą, kaip galimai sumažinti paklaidas, susijusias su dideliu atsako reikšmių svyravimu. Autoriai siūlo visų pirma išlyginti atsako reikšmių matavimo seriją ir toliau ją analizuoti. Kiekvienam matavimų taškui apskaičiuojamas pačios reikšmės vidurkis kartu su jo kaimyninėmis reikšmėmis. (Fridtjof Thomas et al. 2004) aprašo, kaip iš x_1, x_2, ..., x_n išmatuotų reikšmių apskaičiuojamas aritmetinis vidurkis su pačia reikšme, q reikšmių, einančia prieš nagrinėjamą matavimą bei q reikšmių, einančių už nagrinėjamo matavimo:

$$y_i = \frac{1}{(2q+1)} \sum_{j=1-q}^{i+q} x_j \,, \tag{1.4}$$

visiems $i = q+1, ..., n-q$.

Tokiu būdu kiekviena išlygintos sekos reikšmė bus apskaičiuota iš $2q+1$ išmatuotų reikšmių. Šiuo atveju, q lemia kiekvienos slenkančios vidutinės reikšmės „išlyginimo laipsnį“. Toliau absoliutus skirtumas tarp dviejų kaimyninių reikšmių, nutolusių per $2d+1$ išmatuotas reikšmes viena nuo kitos.

$$z_i = \left| y_{i-d} - y_{i+d} \right|, \tag{1.5}$$

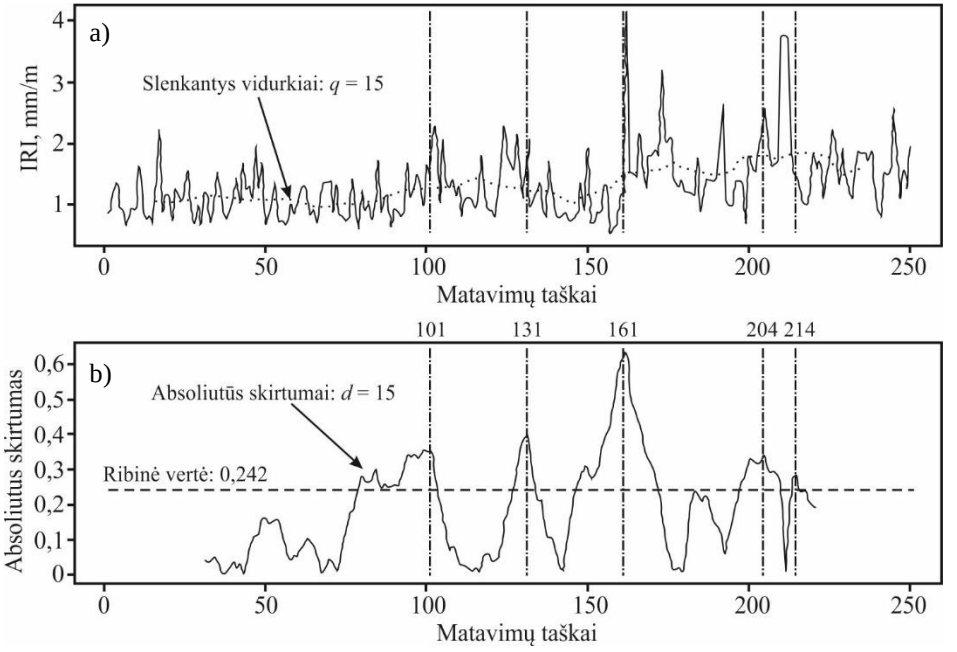
visiems $i = d+q+1, ..., n-q-d$.

Pabrėžtina, jog duomenų seka $z_{d+q+1}, ..., z_{n-q-d}$ susideda iš $n-2(q+d)$ elementų bei tai, kad homogeninių ruožų ribos duomenų sekos pradžioje bei pabaigoje gali būti sunkiai identifikuojamos, tačiau esant dideliam matavimų skaičiui tai neturės esminės įtakos.

Homogeninių ruožų ribos nustatomos, visų pirma, pasirenkant ribinę reikšmę z_{crit} , su kuria bus lyginamos absoliučių skirtumų duomenų sekos reikšmės. Visos $z_{d+q+1}, ..., z_{n-q-d}$ sekos reikšmės, esančios žemiau z_{crit} yra ignoruojamos, o piko vertės, virš šios ribinės reikšmės, sutampa su homogeninių ruožų ribomis. 1.8 paveiksle pateiktas šio metodo grafinio atvaizdavimo pavyzdys.

Rübensam et al. (1996) laiko šias homogeninio ruožo ribas preliminariomis, todėl papildomai patikrina ar ribos tenkina įvairius iš anksto apibrėžtus reikalavimus. Taip pat, naudojantis slenkančių vidurkių metodu, ne visada

įmanoma aptikti tolygiai kintančias reikšmes, kai pokytis vyksta ilgesniame kelio / gatvės dangos ruože. Mokslininkai rekomenduoja papildomai patikrinti gautų homogeninių ruožų ribas specifiškai dėl šios metodo savybės, ir esant poreikiui, apibrėžti papildomas ribas.



1.8 pav. Absoliučių skirtumų metodas: a) „žali“ duomenys (IRI); b) segmentavimo kreivė (Fridtjof Thomas et al. 2004, perdaryta autoriaus)
Fig. 1.8. Absolute differences of smoothed series approach: a) raw data (IRI); b) segmentation curve (Fridtjof Thomas et al. 2004, perdaryta autoriaus)

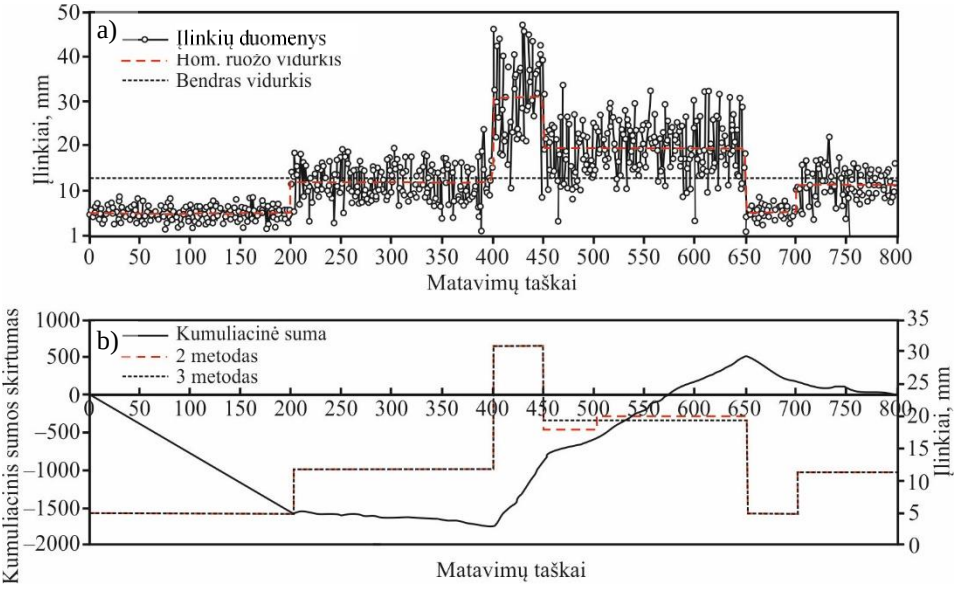
1.8 paveiksle pavaizduotas metodo pritaikymas nelygumo matavimų rezultatų kreivei, nustatant tokias reikšmes: $q = d = 15$ and $z_{crit} = 0{,}242$. Pabrėžtina, jog q ir d nebūtinai turi sutapti. Nustatytos penkios homogeninių ruožų ribos, kurios sutampa su viršutiniais pikais, kurių reikšmė yra didesnė už ribinę reikšmę. Pastaroji pažymėta punktyrine horizontaliąja tiese apatiniame grafike. Nesudėtinga išvesti naują ribinę reikšmę, skirtingą nuo pavaizduotos paveiksle – paslinkus ją, tam tikrus pikus galima įtraukti arba atsisakyti iš homogeninio ruožo ribos nustatymo. Pvz., jei z_{crit} reikšmė būtų išrinkta mažesnė, šeštasis pikas tarp 161 ir 204 būtų įtrauktas kaip tinkama homogeninio ruožo riba. Taip pat, pakėlus z_{crit} reikšmę šiek tiek, pirmasis homogeninis ruožas būtų sudalintas į 2 dalis, kadangi tarp dviejų pikų prie ~60 ir 100 atsirastų pertrūkimas ir abu pikai būtų priskaityti prie ruožo ribos taško.

Tai yra svarbus pastebėjimas, kadangi ribinės reikšmės pakėlimas nebūtinai reiškia, jog homogeninių ruožų ribų skaičius sumažės, išskyrus kai visos „kalvos“, kurias apibrėžia slenkančių vidurkių skirtumų kreivė yra vienalytės, ko galima pasiekti tik pakankamai daug „išlyginant“ kreivę, pasirenkant didesnį kaimyninių reikšmių skaičių, apskaičiuojant nagrinėjamos reikšmės vidurkį. Iš kitos pusės, kreivės išlyginimas gali paslėpti informaciją apie staigius matavimo charakteristikų šuolius. Pernelyg didelė vidutinės reikšmės apskaičiavimo apimtis gali neleisti tiksliai nustatyti staigaus šuolio tikslią padėtį, todėl slenkančių vidurkių metodas ne visada tinkamas naudoti, jeigu yra poreikis nustatyti homogeninį ruožą vieno matavimo taško tikslumu.

1.4.3. Kumuliacinio skirtumo metodo atmainos ir kiti metodai

Kumuliacinio skirtumo metodas (KSM) yra paprasčiausias naudoti ir gali būti įgyvendintas kaip algoritmas kompiuterinėje programoje. Tačiau subjektyvumo faktoriaus, susijusio su tuo, jog specialistas vizualiai turi nustatyti homogeninių ruožų ribas, jo panaudojimas, gali būti apribotas. Be to, KSM neretai negeba identifikuoti naudojamo atsako parametro svyravimą tame pačiame homogeniniame ruože. Praktiniais tikslais į KSM algoritmus įvedami apribojimai mažiausiam ruožo ilgiui bei mažiausiam atsako parametro vidurkių skirtumui tarp gretimų matavimų (Misra et al. 2003; Ping et al. 1999).

Įvairūs tyrėjai bandė pagerinti KSM metodą, įvesdami šiuos kriterijus ar modifikuodami algoritmą. Bennett (2004) aprašė sąlygas, apskaičiuojant homogeninius ruožus dangų valdymo sistemoms, taip pat jis pabrėžė skirtumus tarp ruožų segmentavimo ir analizės, naudojantis įvairiais duomenų šaltiniais. Misra et al. (2003) pasiūlė patobulintą ir supaprastintą metodologiją homogeninių ruožų nustatymui, remiantis kombinuotu klasifikavimo ir regresijos medžio metodu (angl. *classification and regression tree* (CART)). (Cafiso et al. 2012) pasiūlė metodą kaip galima aptikti kreivės pasikeitimo tašką, ieškant reikšmės tarp visų reikšmių vidutinių kvadratinių nuokrypių aibės. El Gendy et al. (2005) pasiūlė segmentavimo metodą, kai ruožai parenkami pagal mažiausios ir didžiausios reikšmės rėžius kiekviename ruože pagal nelygumo matavimo duomenis. Mokslininkai naudojo absoliučių skirtumų metodą, skirstant IRI duomenų ribas į ruožus. (Haide et al. 2015) pasiūlė du naujus algoritmo patobulinimus, naudojant krintančio svorio deflektometro įlinkių duomenis, kurie turėtų padėti įveikti skirtumo vidurkio bei vietinio svyravimo klausimus (žr. 1.9 pav.).



1.9 pav. Segmentavimo metodų palyginimas: a) „žali“ duomenys (įlinkiai) ir vidurkis; b) segmentavimo kreivės (Haide et al. 2015, perdaryta autoriaus)
Fig. 1.9. Example for comparing all delineation methods: a) raw data (deflections) and averages; b) segmentation curves (Haide et al. 2015, perdaryta autoriaus)

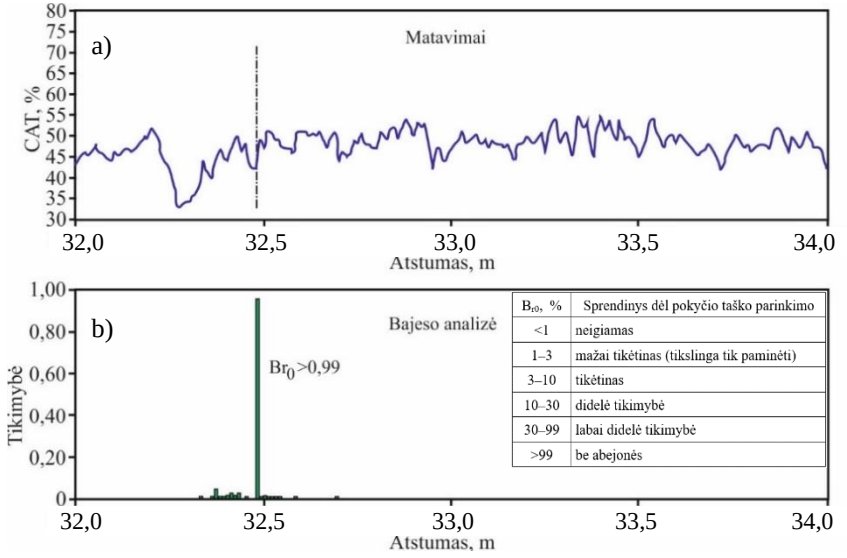
Dar vieną segmentavimo būdą ištyrė Bernardo et al. (1994) bei Cafiso et al. (2012) – metodą, paremtą Bajeso teorema. Tai tikimybių teorijos teorema, kuria apskaičiuojama tam tikro įvykio tikimybė, kai yra žinoma ne pilna informacija apie įvykius. Pagal Bajeso teorijos modelį išmatuota skaitinė reikšmė x_t laikoma atsitiktine reikšme, visos x_1, ..., x_n reikšmės nepriklausomos tarpusavyje. Cafiso et al. (2012) sudarė funkciją, pagal kurią galima aprašyti pasiskirsčiusias atsitiktines vertes:

$$x_t = \begin{cases} \theta_1(t) + \varepsilon_t, & \text{kai } t = 1, \ldots, r \\ \theta_2(t) + \varepsilon_t, & \text{kai } t = r+1, \ldots, n \end{cases}, \quad (1.6)$$

čia: x_t – išmatuota reikšmė; θ (t) – reikšmė, priimta pagal atsitiktinį kintamąjį T matavimo taške t; ε_t – pamatuota paklaida t taške; r – pokyčio taško padėtis.

Craiu et al. (2013) paaiškino modelį taip: atsitiktinių reikšmių seka x_1, x_2, ..., x_n sudalinta į dvi atskiras sekas x_1, ..., x_r ir x_r +1, ..., x_n pokyčio taške r ($1 \leq r < n$). Šios dvi sekos abipusiai pakeičiamos, tačiau kombinuotojo seka nėra. Sudaromi 2 modeliai: pirmas su dviem padalintomis sekomis (M_r) ir antras su viena kombinuota seka (M_0). Atliekamas abiejų modelių palyginimas, skirtumas

apibrėžiamas Bajeso faktoriumi B_{r0}. Šis faktorius apskaičiuojamas kiekvienam taškui, jo reikšmingumas išreiškiamas procentais nuo 0 % iki 100 % (arba vieneto dalimis). Priklausomai nuo reikšmės didžiausią Bajeso faktorių turintį tašką galima laikyti pokyčio tašku *r* arba ne. Suradus pokyčio tašką *r* procedūra pakartojama su dviem naujoms sekoms – iki *r* taško ir už jo. Kiekvienoje iš naujai gautų sekų vėl ieškomas pokyčio taškas *r*. Tokia sudalinimo procedūra kartojama iki kol Bajeso faktoriaus reikšmės bus pakankamai mažos ir nelaikomos reikšmingomis. Grafiškai Bajeso teorija paremtame modelyje pokyčio taško paieška pavaizduota 1.10 paveiksle. Tinkamai parinkus pokyčio taškus, jie galėtų būti laikomi homogeninio ruožo riba.



1.10 pav. Pasikeitimo taško identifikavimas, taikant Bajeso analizę: a) taško paieška; b) tikimybės nustatymas (Cafiso et al. 2012, perdaryta autoriaus)
Fig. 1.10. Identification of a change-point using Bayesian analysis: a) point search; b) probability calculation (Cafiso et al. 2012, perdaryta autoriaus)

Cafiso et al. (2012) padarė išvadą, jog nors Bajeso teorema paremtas segmentavimo metodas yra moksliškai pagrįstas ir leidžia pagrįstai nustatyti ruožo ribas, jo taikymo sudėtingumas neleidžia kontroliuoti mažiausio ruožo ilgio ($L_{\min}$) bei vidutinių reikšmių tarp gretimų ruožų ($\Delta_{\min}$) palyginimo kontrolės.

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir darbo uždavinių formulavimas

1. DVS padeda racionaliai panaudoti kelių ir gatvių priežiūros lėšas bei automatizuoti dangų valdymo procesus tinklo ir projekto lygmenimis. DVS darbas grindžiamas reguliariai surenkamais struktūriniais (pažaidos ir dangos būklė) bei funkciniais (eismo saugumo bei komforto) rodikliais. Taip pat svarbu sukurti objektyvius vertinimo kriterijus, tinkančius konkrečiam aptarnaujamam kelių ar gatvių tinklui.
2. Vertinant dangos eksploatacinį patrauklumą DVS naudojamos techninių rodiklių ribinės reikšmės. Miesto gatvių dangoms kiekvieno parametro ribinė reikšmė turėtų būti nustatyta individualiai, įvertinant vietines eismo sąlygas bei surenkamų dangų matavimo duomenų formatą ir tikslumą.
3. Dangos būklės vertinimas gali būti atliekamas pagal atskirus dangos būklės rodiklius, skirstomus į struktūrinius ir funkcinius bei pagal suminius būklės rodiklius. Vertinant pagal pastaruosius, sudaroma galimybė palyginti įvairius gatvių ruožus visame tinkle. Vertinant pagal būklės rodiklius galima tiksliau apibrėžti silpnąją vietą kiekviename ruože. Tam, kad abu šie vertinimai būtų tikslūs ir naudingi, turi būti parenkama racionali dangos būklės vertinimo metodika.
4. COST 354 dangos būklės vertinimo metodika skiriasi nuo LAKD metodikos, taikomos valstybinės reikšmės keliams. COST 354 būklės indeksų perskaičiavimo principai yra lankstesni, o kombinuoti būklės indeksai įvertina papildomus techninius parametrus, tokius kaip laikomoji geba ar sukibimas, turinčius įtakos dangų funkcionavimui.
5. Dėl to, kad dangos degradavimą lemiančių veiksnių yra be galo daug, visų jų duomenis matuoti ir kaupti nėra tikslinga. Įgyvendinant DVS miesto gatvių tinklui svarbu nustatyti tiriamus dangos būklės rodiklius, svarbiausi iš kurių yra pažaidos (98 %), nelygumas (95 %) ir laikomoji geba (bent projekto lygmeniu – 71 %). Parenkant matuojamus rodiklius reikia įsivaizduoti kokie degradavimo modeliai bus taikomi būklės prognozavimui. Laikui bėgant, didėjant gatvių ruožų duomenų bazei, degradacijos modeliai turėtų būti kalibruojami ir tobulinami.
6. Yra nemažai naudojamų gatvių ruožų segmentavimo metodų. Populiariausias yra kumuliacinio skirtumo metodas, kurį lengva

pritaikyti ir automatizuoti, tačiau jis gali būti nepatikimas, esant dideliems gretimų matavimo verčių svyravimams, nuo kurių ruožų ribas yra sudėtingiau atskirti. Todėl gali būti tikslinga šį metodą patobulinti arba naudoti kitą, pavyzdžiui, slenkančių vidurkių metodą. Siekiant pasirinkti racionaliausią metodą gatvių tinklo segmentavimui, turėtų būti atliktas eksperimentinis tyrimas.

Atsižvelgiant į mokslinės literatūros analizės išvadas, gatvių dangos būklės vertinimo miestų gatvėse patobulinimui būtina išspręsti šiuos uždavinius:

1. Nustatyti įvairių dangos techninių parametrų kitimo tendencijas, priklausomai nuo tiriamųjų gatvių dangos konstrukcijos klasių.
2. Išanalizavus miestų gatvių techninius parametrus, palyginti pasirinktais dangos būklės vertinimo metodais (COST 354 ir LAKD) apskaičiuotą suminį dangos būklės indeksą bei nustatyti skirtumus tarp metodikų, išskiriant privalumus ir trūkumus.
3. Palyginti įvairius homogeninių ruožų sudarymo metodus, nurodyti efektyviausią bei pateikti jo taikymo gaires.
4. Nustatyti gatvių dangos konstrukcijos laikomosios gebos rodiklio įtaką suminiam būklės rodikliui bei įvertinti kitų įverčių reikšmingumą.
5. Įvertinti viršutinio sluoksnio atnaujinimo darbų įtaką gatvių dangos konstrukcijos būklės kitimui.

2

Miesto gatvių dangos būklės tyrimas

Šiame skyriuje palyginamos dvi dangos būklės vertinimo metodikos, aprašomos konvertavimo formulės, naudojami svoriniai koeficientai. Metodikų palyginimui atliekamas eksperimentinis tyrimas, kurio metu matuojami Vilniaus gatvių dangos būklės parametrai. Pateiktas eksperimentinio tyrimo planas ir metodika bei tyrimo rezultatai. Ištirtų gatvių dangos būklės vertinimui pritaikomos abi metodikos, palyginami atskiri, kombinuoti ir suminiai būklės rodikliai, pasirenkama viena metodika tolimesnei analizei. Aprašomas teorinis algoritmas gatvių ruožų segmentavimui pagal dvi metodikas.

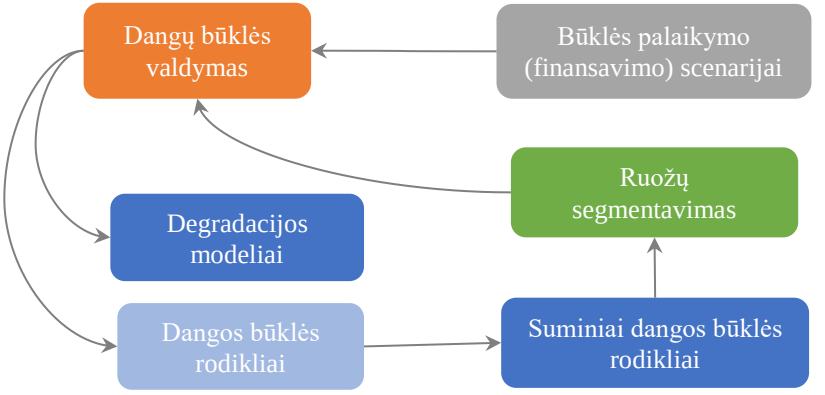
Skyriaus tematika paskelbti du autoriaus straipsniai (Kravcovas et al. 2020; Kravcovas 2018).

2.1. Eksperimentinio tyrimo planas

Dangų valdymo sistemų funkcionavimas susideda iš kelių pagrindinių dalių. Taikant DVS jau turi būti naudojami segmentuoti gatvių ruožai pagal techninius parametrus bei esamą dangos būklę. Siekiant suskirstyti esamas gatves į šiuos homogeninius ruožus visų pirma turėtų būti ištirtas visas gatvių tinklas. Įprastai gatvių techninius parametrus gauti nėra sudėtinga iš dokumentacijos, projektų

arba vizualios analizės būdu. Tačiau tokių apžiūrų ir dangos paviršiaus rodiklių tyrimų dažnai nepakanka, norint pilnavertiškai nustatyti visos dangos konstrukcijos būklę.

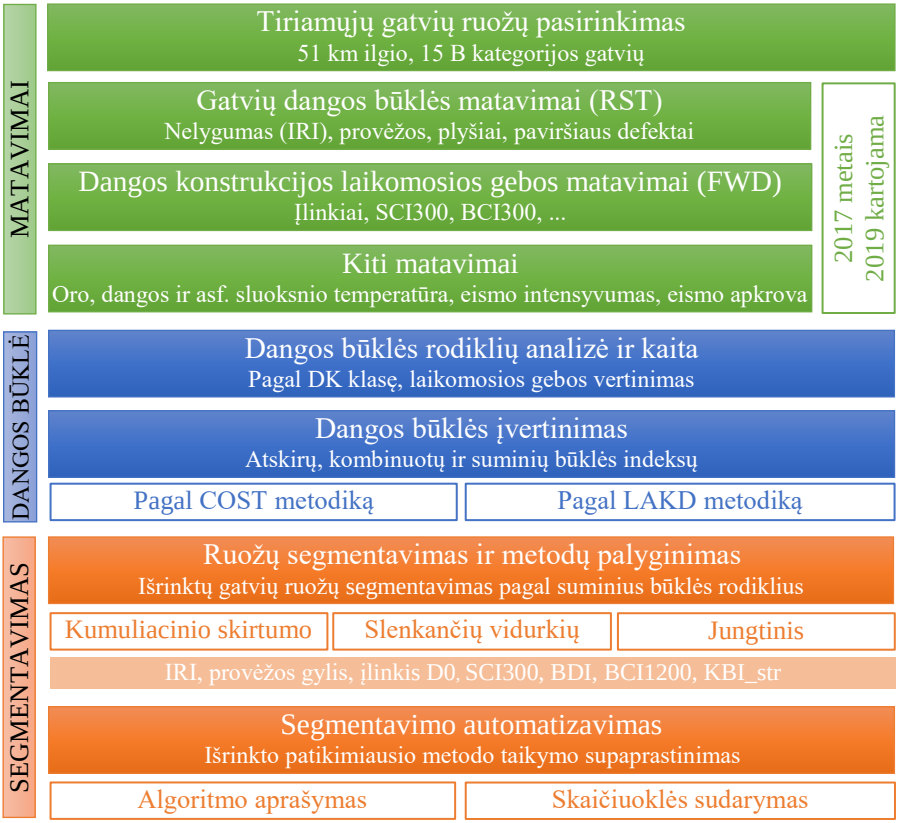
Gatvių ruožų segmentavimas gali būti atliekamas įvairiais būdais bei pagal įvairius parametrus. Tai gali būti ir dangos tyrimų metu gauti techniniai parametrai, ir kombinuoti bei suminiai dangos būklės rodikliai. Taip pat įtaką daro ir dangos būklės palaikymo ir finansavimo scenarijai, kadangi visada reikia spręsti alternatyvą, kokį remontą taikyti šiuo metu, ar tai bus visos gatvės rekonstravimas ar paviršinių sluoksnių remontas. Kitas svarbus aspektas – taikomi degradacijos modeliai, skirti prognozuoti dangos būklę ateityje. Principinė DVS funkcionavimo schema pateikta 2.1 paveiksle.



2.1 pav. Principinė DVS funkcionavimo schema
Fig. 2.1. PMS basic functioning

2.1.1. Tyrimo planas

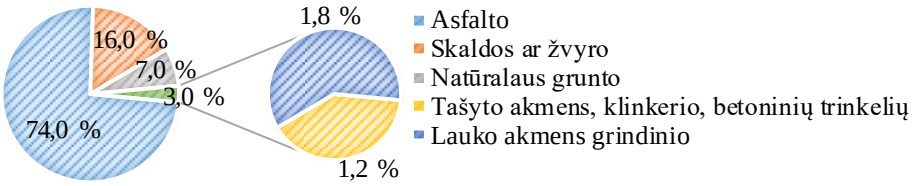
Šiame darbe planuojama įvertinti 2 esminius gatvių dangų valdymo komponentus – ruožų segmentavimą bei dangos būklės vertinimą. Tam tikslui numatomas pasirinktų Vilniaus gatvių dangos būklės eksperimentinis tyrimas, kurio metu bus surenkami duomenys tolimesnei analizei, metodikų parinkimui bei algoritmų sudarymui. Tyrimo planas pateiktas 2.2 paveiksle.



2.2 pav. Tyrimo planas
Fig. 2.2. Research plan

2.1.2. Tiriamųjų gatvių ruožų pasirinkimas

Vilnius – Lietuvos sostinė ir didžiausias šalies miestas, įsikūręs šalies pietryčiuose. Vilniaus miesto savivaldybės duomenimis 2019 metų pabaigoje Vilniaus mieste gyveno 569635 gyventojų (Vilniaus miesto savivaldybė 2019). Vilniaus miesto plotas – 400,6 km^2. Vilniuje 2015 metų duomenimis yra 40 km^2 kilometrai motorizuoto eismo A, B, C, D kategorijų gatvių (Savivaldybės įmonė „Vilniaus planas" 2009). 2015 m. sausio 1 d. duomenimis Vilnius užima pirmą vietą Lietuvoje pagal bendrą gatvių ilgį. Vilniaus miesto bendras gatvių tinklo ilgis – 1418,7 km, iš kurių 74 % (1049,8 km) sudaro gatvės su asfalto danga, 16 % (227 km) – gatvės su skaldos ir žvyro danga, 7 % (99,3 km) – gatvės su natūralaus grunto danga (Savivaldybės įmonė „Vilniaus planas" 2009). Vilniaus miesto gatvių dangų tipų pasiskirstymas pavaizduotas 2.3 paveiksle.



2.3 pav. Vilniaus miesto gatvių dangų tipų pasiskirstymas
Fig. 2.3. Distribution of pavement types on urban roads of Vilnius city

Siekiant pritaikyti anksčiau aprašytus dangos būklės vertinimo metodus, nuspręsta atlikti Vilniaus miesto gatvių dangos būklės tyrimą. Vilniaus mieste gyventojų skaičius didėja kasmet ir sostinės gatvės patiria kone didžiausius eismo srautus visoje Lietuvoje. Prieš 20 ir daugiau metų įrengtos gatvių dangos konstrukcijos nebuvo pritaikytos šių dienų eismo srautų intensyvumui. Šis faktorius, kaip ir perkrautų transporto priemonių ašinių apkrovų sraute skaičius, naftos produktų patekimas ant asfalto, padidėjęs statinių apkrovų skaičius, prastas vandens nuvedimas bei kiti faktoriai lemia asfalto dangoje atsiradusias pažaidas.

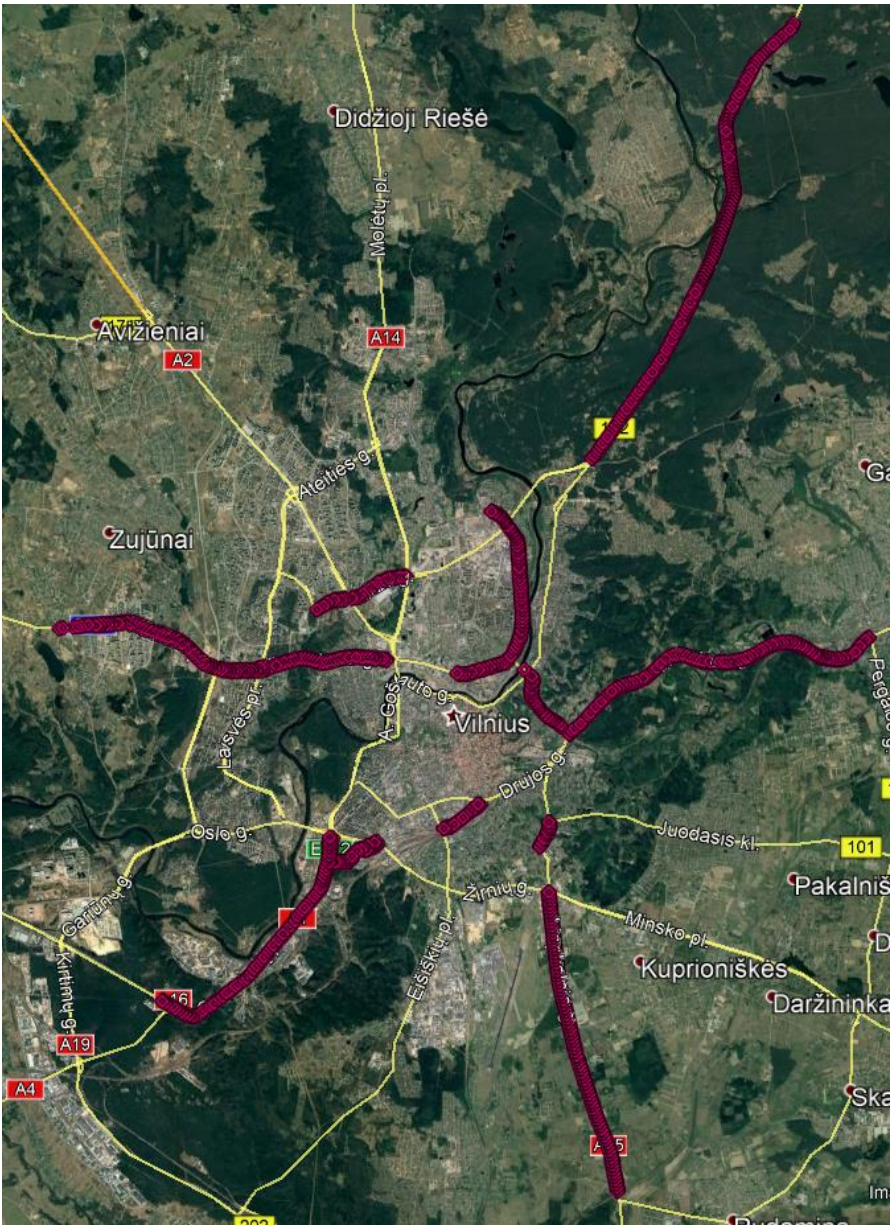
Tyrimą nuspręsta atlikti B kategorijos (B1 ir B2 iki 2019 m.) gatvėse (STR 2.06.04:2014 2020) su skirtingu eismo intensyvumu ir eismo srauto sudėtimi. Pasirinkta 15 gatvių ruožų bendru ilgiu apie 48 km. Kiekviena gatvė turėjo nuo 2 iki 6 eismo juostų abiem kryptimis. B kategorijos gatvės turėtų atspindėti daugumą aukšto intensyvumo gatvių Vilniaus mieste. A kategorijos gatvės buvo netirtos, kadangi įprastai jose važiavimo greičiai būna didesni nei 80 km/h, kas neatspindėtų tipinių eismo sąlygų mieste. Taip pat A kategorijos gatvėmis važiuoja mažiau visuomeninio transporto, kuris turi daug įtakos pažaidų formavimuisi. Iš praktinės pusės, greito eismo gatvėse sudėtinga atlikti tyrimus, kadangi tiriamoje eismo juostoje turėtų būti uždaromas eismas. Tiriamų gatvių ruožų suvestinė pateikta 2.1 lentelėje, o jų padėtis Vilniaus mieste 2.4 paveiksle.

Visose gatvėse buvo tiriamos pirmos mišriojo transporto eismo juostos kiekviena kryptimi (neskaitant viešojo transporto juostų, jei tokios buvo). Gatvėse, kuriose buvo matuojamos 4 eismo juostos – papildomai išmatuota antra eismo juosta (kairėje pusėje nuo pirmosios) kiekviena kryptimi. Eismo juostų žymėjimas pateiktas 2.2 lentelėje.

2.1 lentelė. Tiriamų gatvių ruožų suvestinė
Table 2.1. List of investigated road sections

Ruožo Nr.	Gatvė	Ruožo ilgis, km	Koordinatės (LKS)				EJ pamatuota	VMPEI, aut./p.	VMPEI (SV), %	VMPEI (VT), %
			Pradžios X	Pradžios Y	Pabaigos X	Pabaigos Y				
1	Dariaus ir Girėno g.	3,13	582080,51	6058595,90	582141,47	6055526,55	4	6610	3,48	0,67
2	Dunojaus g.	0,59	584200,16	6059704,67	583969,42	6059186,60	4	16978	1,93	1,45
3	Geležinkelio g.	1,28	582103,54	6059735,61	583206,34	6060278,85	2	18250	15,11	4,39
4	Liepkalnio g.	6,24	584070,52	6058319,03	584896,00	6052212,94	2	24494	1,28	0,28
5	Nemenčinės pl.	10,06	585674,31	6066710,88	590554,40	6075081,74	4	19570	0,96	0,37
6	Olandų g.	1,73	584789,62	6061413,15	584002,01	6062755,80	4	14710	2,91	2,54
7	Ozo g.	2,15	581873,70	6064799,06	579828,49	6064295,39	4	13608	4,48	3,22
8	Pilaitės pr.	4,35	578805,29	6063273,83	574830,19	6064415,77	2	1037	2,51	0,00
9	Savanorių pr.	5,73	576188,44	6056820,85	579975,16	6059948,69	4	32504	9,68	0,11
10	Šeimyniškių g.	1,13	582627,20	6062781,83	583679,48	6063016,98	4	1814	1,43	0,00
11	Stepono Batoro g.	7,02	584719,50	6061320,93	590933,78	6062754,58	4	7063	5,61	0,13
12	T. Narbuto g.	2,71	581385,89	6063218,77	578759,32	6063194,28	4	2657	1,43	0,56
13	Vilkpėdės g.	1,19	579738,00	6059290,14	580728,35	6059573,12	2	20866	0,50	0,47
14	Žemaitės g.	0,78	580693,13	6060611,07	581226,41	6060039,88	2	11794	1,49	1,59
15	Žirmūnų g.	3,27	583621,41	6065946,13	583668,52	6063003,72	4	19718	2,13	1,84

Paaiškinimai: EJ pamatuota – eismo juostų pamatuota, VMPEI – vidutinis metinis paros eismo intensyvumas , SV – sunkiasvoris (krovininis) transportas, VT – viešasis transportas



2.4 pav. Tiriamųjų gatvių ruožų padėtis Vilniaus mieste
Fig. 2.4. Location of test sites in Vilnius city

2.2 lentelė. Eismo juostų ir važiavimo krypties žymėjimas tiriamuose ruožuose
Table 2.2. Designation of lanes and road direction used in measurements

Kryptis atgal		Kryptis pirmyn	
Kairė		Dešinė	
K1	K2	D2	D1
1 eismo juosta	2 eismo juosta	2 eismo juosta	1 eismo juosta

2.2. Eksperimentinio tyrimo metodika

Eksperimentinis tyrimas buvo atliktas dviem etapais:

1. 2017 metais dangos būklės matavimai RST bei FWD prietaisais 15-oje B kategorijos Vilniaus miesto gatvių, nustatant dangos pažaidas, būklę ir laikomąją gebą, pamatuojant eismo intensyvumą bei nustatant dangos konstrukcijos sluoksnius.
2. 2019 metais analogiški gatvės būklės ir pažaidų matavimai. Taip pat buvo atlikti papildomi dangos konstrukcijos tyrimai, nustatant asfalto sluoksnio ir pagrindo sluoksnių storius Šeimyniškių ir Olandų gatvėse.

2.2.1. Gatvių dangos ruožų matavimai

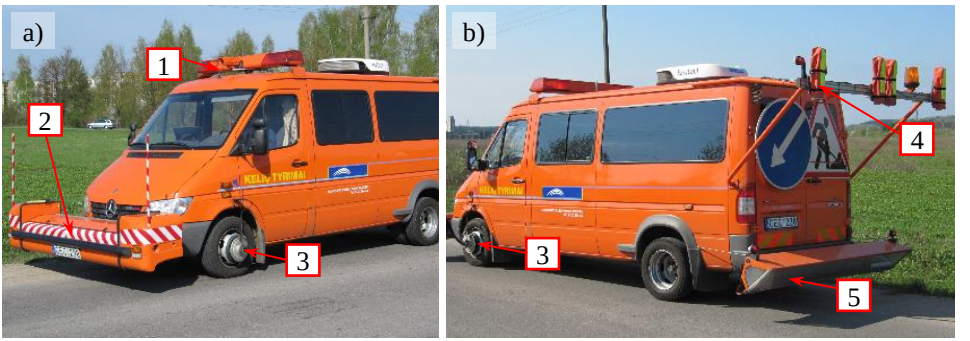
Natūriniai eismo intensyvumo matavimai buvo atlikti Savanorių pr., Žirmūnų g., Ozo g. 2017 m. rugsėjo 26–27 dienomis. Eismo apskaita buvo vykdoma naudojant mobilius autonominius vamzdelinius eismo intensyvumo skaitiklius bei klasifikatorius. Transporto priemonės buvo klasifikuojamos pagal EUR13 metodiką, o vėliau grupuojamos į lengvąjį transportą, krovininį transportą bei visuomeninį transportą.

„Golden River Traffic“ gamintojo skaitiklis Marksman M400 geba atskirti kelias transporto priemones, kurios tuo pačiu metu važiuoja per pneumatinius vamzdelius, jei jų važiavimo greitis skiriasi bent 5 km/h Šis skaitiklis transporto priemones rūšiuoja pagal EUR13 klasifikavimo lentelę, fiksuojant transporto priemonės ašių skaičių ir atstumus tarp ašių. Skaitiklis gali nustatyti transporto priemonės klasę, važiavimo greitį, kryptį, transporto priemonės bazę bei atstumą tarp viena paskui kitą važiuojančių transporto priemonių. Visose kitose gatvėse, kur nebuvo atliekami eismo intensyvumo tyrimai, aktualūs duomenys paimti iš Vilniaus miesto sav. pateikto Vilniaus miesto gatvių sąrašo.

Vilniaus miesto gatvių dangos būklės tyrimai atlikti mobiliąja kelių tyrimo laboratorija RST28 (žr. 2.5 pav.). Šios įrangos pagalba važiuojant eisme matuojami ir įrašomi tokie parametrai:

- dangos nelygumas pagal tarptautinį nelygumo indeksą IRI (angl. International Roughness Index) kairėje bei dešinėje vėžėje ir jų vidurkis, m/km;
- vidutinis provėžų gylis kairėje bei dešinėje vėžėje ir jų vidurkis, mm;
- skersiniai ir išilginiai plyšiai, m, bei plyšių tinklai, %. Taikant 2.1–2.2 formules perskaičiuojami į suminį plyšiais pažeistos dangos plotą, %;
- duobės ir lopai, %. Taikant 2.3–2.4 formules perskaičiuojami į suminį paviršiaus defektais pažeistos dangos plotą, %;
- kiti parametrai apie matuojamą gatvę (matavimo data, greitis, eismo juosta ir t. t.).

Lazerinio profilografo (žr. 2.6 pav. Nr. 2) pagalba matuojamas atstumas iki dangos paviršiaus. Matavimų paklaida ±0,5 mm, įrenginio tikslumo klasė – pirma. Pagal pamatuotus atstumus sudaromas kelio dangos vertikalus profilis. Pagal tokių profilių seką išskiriamos pažaidos ir kiti parametrai. Pamatuotos pažaidos ir parametrai pateikiami 10 m intervalais priimant parametrų vidurkius arba sumą. Tyrimų metu retkarčiais buvo susiduriama su sunkumais, pavyzdžiui, važiuojamojoje dalyje paliktomis stovėti transporto priemonėmis, atliekamais gatvių priežiūros ar remonto darbais, vandens sankaupomis dangoje bei kitomis matavimus sunkinančiomis eismo ir oro sąlygomis.



2.5 pav. Mobilioji kelių tyrimų laboratorija RST28: a) vaizdas iš priekio (1 – pagrindinė kamera, 2 – lazerinis profilografas, 3 – inklinometras); b) vaizdas iš galo (3 – inklinometras, 4 – dPAVUE kamera, 5 – blykstė)

Fig. 2.5. Road Research Laboratory RST28: a) front view (1 – main camera; 2 – laser profilograph; 3 – inclinometer); b) rear view (3 – inclinometer; 4 – dPAVUE9 camera; 5 – flash)

Pirmą kartą RST28 matavimai buvo atlikti 2017 m. birželio ir liepos mėn. Iš viso buvo pamatuota 17810 dangos ruoželių, kiekvieno iš kurių ilgis yra 10 m, o plotis – vienos eismo juostos plotis. Bendras pamatuotas ilgis – 178,1 km. Mobilios laboratorijos važiavimo greitis svyravo nuo 17,7 iki 62,2 km/h,

neskaitant atvejų kai automobilis sustodavo dėl susidariusių spūsčių arba kitų kliūčių. Pakartotinai matavimai buvo atlikti 2019 m. spalio 23–25 dienomis, juos atkartojant tuose pačiuose gatvių ruožuose.

Laikomosios gebos matavimai atliekami krintančio svorio deflektometru FWD (Falling Weight Deflectometer). FWD simuliuoja važiuojančio 65–80 km/h greičiu krovininio transporto rato perduodamą dangos konstrukcijai apkrovą. 50 kN apkrova suteikiama per 30 cm diametro plokštę į dangą, kas atitinka 707 kPa slėgį. Apkrova paduodama impulsu, kurio trukmė apie 30 ms. Nuo apkrovos atsirandančius dinaminius įlinkius skirtingu atstumu nuo plokštės centro fiksuoja seisminiai įlinkio davikliai, kurie paprastai išdėstyti 0, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150 ir 180 cm atstumu nuo plokštės centro. Kiekviename matavimų taške atliekami 3 plokštės metimai, skaičiavimuose naudojamas paskutinis – trečias metimas. Dangos įlinkio duomenys nuo žinomo slėgio į dangą leidžia apskaičiuoti kaip visos dangos konstrukcijos, taip ir atskirų sluoksnių standumą / laikomąją gebą.

Vertinant kelio dangos būklę, būtina tiriamame ruože naudoti duomenis apie pažaidas procentine išraiška (Lietuvos automobilių kelių direkcija 2017b). Mobiliosios laboratorijos įranga dangos būklės rodiklius matuoja su jiems būdinga fizikine dimensija (pvz., provėžas – jų gyliu, mm; IRI – m/km ir t. t.). Tačiau tokius parametrus kaip plyšiai sudėtinga lyginti tarpusavyje, kai vieni plyšiai išreiškiami tiesiniais vienetais, o kiti ploto vienetais. Todėl skersiniams ir išilginiams plyšiams (kurie matuojami tiesiniais vienetais) perskaičiuoti į procentinę išraišką taikoma formulė:

$$TP_{pl,i,L,j} = \left(\frac{1}{A_{ref}} \cdot \sum\nolimits_n \left[l_{plotis} \cdot L_{i,j} \right] \cdot 100 \right), \qquad (2.1)$$

čia $TP_{pl,i,L,j}$ – i plyšių j išsivystymo laipsnio, matuojamų tiesiniais vienetais, pažeistas dangos plotas, %; A_{ref} – nagrinėjamo ruožo plotas, m^2; I_{plotis} – standartinis remontuojamo plyšio plotis (priimta – 0,5 m). $L_{i,j}$ – i tipo j išsivystymo laipsnio plyšių ilgis, m.

Tinkliniams, nuovargio ir kt. plyšiams, kurie matuojami ploto vienetais perskaičiuoti į procentinę išraišką taikoma formulė:

$$TP_{pl,i,A,j} = \left(\frac{1}{A_{ref}} \cdot \sum\nolimits_n \left[A_{i,j} \right] \cdot 100 \right), \qquad (2.2)$$

čia $TP_{pl,i,A,j}$ – i plyšių j išsivystymo laipsnio, matuojamų ploto vienetais, pažeistas dangos plotas, %; A_{ref} – nagrinėjamo ruožo plotas, m^2; $A_{i,j}$ – i tipo j išsivystymo laipsnio plyšių plotas, m^2.

Visi nagrinėjamo kelio ruože esantys plyšiai sujungiami į vieną bendrą suminį plyšių indeksą $TP_{pl.}$ Plyšių suminis kiekis apskaičiuojamas taip:

$$TP_{pl} = \min\left(100; TP_{pl,i,L,j} + TP_{pl,i,A,j}\right), \quad (2.3)$$

čia TP_{pl} – bendras plyšių kiekis nagrinėjamo kelio ruožo dangoje, %; $TP_{pl,i,L,j}$ – i plyšių j išsivystymo laipsnio, matuojamų tiesiniais vienetais, pažeistas dangos plotas, %; $TP_{pl,i,A,j}$ – i plyšių j išsivystymo laipsnio, matuojamų ploto vienetais, pažeistas dangos plotas, %.

Paviršiaus defektams (kurie matuojami kvadratiniais metrais) perskaičiuoti į procentinę išraišką taikoma formulė:

$$TP_{pd,i,A,j} = \left(\frac{1}{A_{ref}} \cdot \sum\nolimits_n \left[A_{i,j}\right] \cdot 100\right), \quad (2.4)$$

čia $TP_{pd,i,A,j}$ – i paviršiaus defektų j išsivystymo laipsnio, matuojamiems ploto vienetais, pažeistas dangos plotas, %; A_{ref} – nagrinėjamo ruožo plotas, m^2; $A_{i,j}$ – i tipo j išsivystymo laipsnio paviršiaus defektų plotas, m^2.

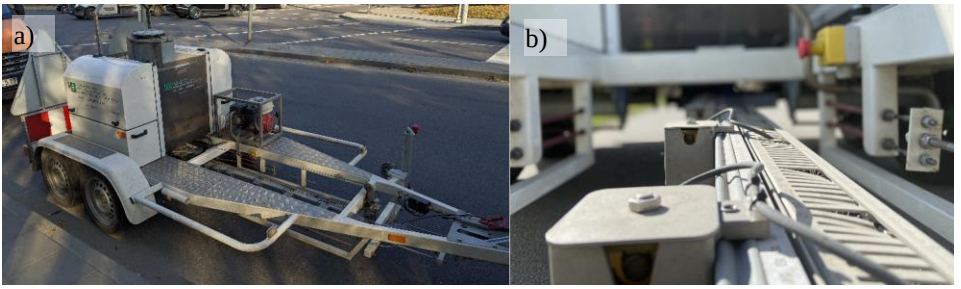
Visi kelio dangos paviršiaus defektai sujungiami į paviršiaus defektų indeksą TP_{pd}. Paviršiaus defektų suminis kiekis apskaičiuojamas taip:

$$TP_{pd} = \min\left(100; TP_{pd,i,A,j}\right), \quad (2.5)$$

čia TP_{pd} – bendras paviršiaus defektų kiekis nagrinėjamo kelio ruožo dangoje, %; $TP_{pd,i,A,j}$ – i defektų j išsivystymo laipsnio, matuojamiems ploto vienetais, pažeistas dangos plotas, %.

Gatvių dangos laikomosios gebos matavimai FWD pirmą kartą buvo atlikti 2017 m. gegužės–birželio mėn. „FWD DYNATEST 8000“ prietaisu. Iš viso buvo pamatuoti 664 taškai 15-oje Vilniaus miesto gatvių, ~150 m atstumu tarp taškų. Tokiu būdu iš viso buvo pamatuota apie 99,6 km gatvių dangos. Ten, kur buvo įmanoma, matuota pirmosios eismo juostos (neskaitant visuomeninio transporto juostos) dešinėje vėžėje. Pakartotinai matavimai buvo atlikti 2019 m. spalio 11–24 dienomis, tuose pačiuose gatvių ruožuose Vilniaus Gedimino technikos universiteto Kelių tyrimo instituto „PRIMAX 2500“ prietaisu (žr. 2.6 pav.). Nuspręsta matuoti tankiau, atstumą tarp taškų paliekant apie 75 m. Iš viso buvo pamatuoti 1324 taškai arba 99,3 km.

Abu krintančio svorio deflektometro modeliai atitinka ASTM D4694-09 standartą (ASTM International 2003). Abiejų įrenginių įlinkius matuojančių jutiklių (geofonų) tikslumas yra ne blogesnis nei 2 % ± 1 μm. Apkrova per į centrinę plokštę perduodama į dangą 2 % ± 0,2 kN tikslumu.



2.6 pav. Krintančio svorio deflektometras FWD PRIMAX 2500: a) bendras vaizdas; b) sijos su davikliais vaizdas
Fig. 2.6. Falling weight deflectometer FWD PRIMAX 2500: a) overall view; b) sensor beam view

Parinkta metodologija atitinka ekspertizės lygį pagal laikomosios gebos skaičiavimo standartą D 4695-03 (ASTM 2003). Matavimų metu registruotas paviršiaus įlinkis, dangos, paviršiaus ir oro temperatūra, fiksuotos matavimo taškų koordinatės. Dangos konstrukcijos įlinkiai turėtų būti normalizuojami standartinei 50 kN apkrovai bei 20 C temperatūrai. Normalizavimas pagal apkrovą atliekamas kiekvienam atskiram metimui pagal lygtį (2.6):

$$d_{0,n} = \frac{L_{st}}{L_{apkr}} d_n, \tag{2.6}$$

čia: $d_{0,n}$ – normalizuotas įlinkis n-ame deformacijos jutiklyje, mm; d_n – įlinkis, pamatuotas n-ame deformacijos jutiklyje, mm; L_{apkr} – apkrova suteikta matavimo metu, kN; L_{st} – standartinė apkrova (50 kN).

Matavimo metu asfalto dangos savybės, esant skirtingai aplinkos temperatūrai, skiriasi. Šiai analizei išmatuotos asfalto dangos konstrukcijos įlinkio dubuo normalizuotas į +20 °C standartinę temperatūrą. Asfalto sluoksnio temperatūra buvo matuojama gylyje, kuris lygus visų asfalto sluoksnių storių sumos pusei. Temperatūros normalizavimo (pataisos) koeficientas apskaičiuotas pagal lygtį (2.7) (Motiejunas et al. 2010):

$$k_t = 10^{-0,000221 \cdot h^{1,0229} \cdot (T-20)}, \tag{2.7}$$

čia: h – asfalto dangos sluoksnių storis, mm; T – asfalto dangos sluoksnio temperatūra, ºC.

Normalizuotas standumo modulis apskaičiuojamas pagal lygtį (2.8):

$$E_{0,n} = \frac{f \cdot \left(1 - v^2\right) \cdot \sigma_0 a}{d_{0,n}}, \tag{2.8}$$

čia: f – įtempimų pasiskirstymo faktorius (f = 2 kai pasiskirstymas tolygus); ν – Puasono koeficientas; σ_0 – standartinė apkrova po apkrovos plokšte, MPa; a – apkrovos plokštės skersmuo, mm; $d_{0,n}$ – normalizuotas įlinkis, mm.

FWD matavimų pagrindu jau ilgą laiką vertinama visos dangos konstrukcijos laikomoji geba. Laikui bėgant mokslininkai aprašė ir pridėjo eilę parametrų, skirtų įvertinti atskirų sluoksnių ir / arba konstrukcijos tam tikrame gylyje laikomąją gebą. Talvik et al. (2009) sudarė lentelę, kurioje išdėstę parametrus, naudojamus įvairiose šalyse. Šiame darbe kartu su dangos paviršiaus įlinkiais ir standumo moduliu bus apskaičiuojami ir nagrinėjami tokie parametrai Vaitkus et al. 2021:

- SCI (angl. Surface Curvature Index) – nusako viršutinių (surištų) sluoksnių būklę;
- BDI (angl. Base Damage Index) – nusako pagrindo sluoksnių būklę;
- BCI (angl. Base Curvature Index) – nusako žemės sankasos būklę.

2.2.2. Gatvių dangos būklės vertinimas

Tiriamų gatvių dangos būklės vertinimas buvo atliktas pagal dvi pirmame skyriuje aprašytas metodologijas – LAKD naudojamas valstybinės reikšmės kelių būklės vertinimo metodą bei COST Action 354 veiklos ataskaitoje pateiktą metodą. Abejomis metodikomis pagal techninių parametrų, gautų gatvių dangos matavimo metu, duomenis, apskaičiuojami būklės indeksai, kombinuoti būklės indeksai bei suminis dangos būklės indeksas. Būklės indeksams (BI) apskaičiuoti naudojami techniniai parametrai bei taikomos konvertavimo formulės pateikiamos 2.3 lentelėje.

Priimtos būklės indekso apskaičiavimo formulės artimiausios greitkeliams ir krašto keliams / pagrindinėms gatvėms, išskyrus išilginį nelygumą, kuris apskaičiuojamas pagal IRI indeksą. Nelygumui pagal LAKD metodiką apskaičiuoti priimta formulė rajoninių kelių vertinimui, kadangi miesto gatvėse greičiai yra mažesni nei užmiesčio keliuose, o važiuojant mažesniu greičiu, išilginiai nelygumai yra mažiau pastebimi. Natūrinių tyrimų metu nebuvo galimybės pamatuoti dangos sukibimo. Vienas tokių parametrų – LFC (Longitudinal Friction Coefficient) – santykis tarp horizontaliosios tempimo jėgos ir vertikaliosios apkrovos jėgos, veikiančios kontroliuojamai stabdant automobilio ratą. Sukibimo būklės indeksas (BI_S) apskaičiuojamas pagal šį techninį parametrą, todėl tolimesniems skaičiavimams priimama kad LFC = 0,5.

Apskaičiuotas būklės indeksas turi atspindėti dangos būklę penkiabalėje sistemoje nuo 0 (geriausia būklė) iki 5 (blogiausia būklė). Jei pagal pateiktas formules gaunama mažesnė už 0 reikšmė – priimama 0, jei gaunama didesnį už 5 – priimama 5.

2.3 lentelė. Būklės indeksų apskaičiavimas pagal COST 354 bei LAKD metodus
Table 2.3. Calculation of performance indices based on COST 354 and LRA methodologies

Būklės indeksas	Techninis parametras	Formulė*	
		COST 354	LAKD (2018)
Išilginis nelygumas, BI_N	Nelygumas IRI, m/km	0,816 · IRI	$2 \cdot IRI - 5{,}02$
Skersinis nelygumas, BI_P	Provėžų gylis, mm	−0,0015 ·RD2 + 0,2291·RD	0,2·RD
Laikomoji geba, BI_L	SCI300, μm	SCI300 /129	–
Plyšiai, BI_Pl	Plyšiais pažeistas plotas, %	0,1333·CR	kai CR ≥ 8,73 % tada 5 kai CR < 8,73 % tada $-0{,}0669 \cdot CR^2 + 1{,}1379 \cdot CR$
Pav. defektai, BI_Pd	Pav. defektų plotas, %	0,1333·SD	kai SD ≥ 6,9 %, tada 5 kai SD < 6,9 %, tada $-0{,}0942 \cdot SD^2 + 1{,}3412 \cdot SD$
Sukibimas, BI_S	Išilginis trinties koeficientas LFC, km/h (50 km/h)	−13,875·LFC + 9,338	–

Toliau iš gautų būklės indeksų apskaičiuojami kombinuoti būklės indeksai (KBI): struktūrinis, komforto ir saugumo. Abiem metodais KBI apskaičiuojami vienodai. Struktūrinis, komforto ar saugumo KBI yra apskaičiuojamas kaip svariausio BI bei vidutinės visų kitų BI reikšmės, padaugintos iš poveikio faktoriaus, sumos (2.9 formulė). Vienintelis skirtumas LAKD metodikoje tas, kad apskaičiuojant saugumo rodiklį, dėl pavojingų vietų kelio ruože, gali būti pridedami papildomi balai.

$$KBI = I_1 + \frac{p}{100} \cdot \overline{I_2, I_3, ..., I_n}, \tag{2.9}$$

čia *KBI* – kombinuotas būklės indeksas (max 5); *p* – poveikio faktorius, %; BI_n - būklės indeksai; W_n - būklės indeksų svoriniai koeficientai (žr. 1.10 lentelę); I_n - svoriniais koeficientais išreikšti būklės indeksai, apskaičiuojami pagal formulę:

$$I_n = W_n \cdot BI_n; \tag{2.10}$$

$$I_1 \geq I_2 \geq ... \geq I_n .$$

Poveikio faktorius *p* leidžia kontroliuoti bendrą atskirų eksploatacijos rodiklių įtaką, atsižvelgiant į jų reikšmingumą. Remiantis Vokietijoje atliktais tyrimais ir analize, poveikio faktorius, apskaičiuojant kombinuotus veiklos rodiklius, turėtų būti nuo 10 % iki 20 % (Oertelt et al. 2007). Didesnis *p* koeficientas padidina mažesnį svertinį koeficientą turinčių rodiklių įtaką.

BI svoriniai koeficientai skiriasi priklausomai nuo apskaičiuojamo KBI (struktūrinio, komforto ar saugumo). VĮ Lietuvos automobilių kelių direkcija (toliau – LAKD) pateikiamas vienas fiksuotas svorinis koeficientas. COST 354 metodikoje pateikiamos svorinių koeficientų didžiausia, mažiausia reikšmės, mediana bei vidurkis. Nors paprastai taikoma vidutinė reikšmė, esant poreikiui galima priimti ir kitą koeficientą, jei jo reikšmė patenka į nurodytas ribas. Kiekvieno KBI apskaičiavime priimti svoriniai koeficientai pateikti 2.4 lentelėje. Svoriniai koeficientai priimti tokie, kad atspindėtų kiekvieno metodo rekomenduojamas reikšmes, kadangi šios analizės tikslas yra palyginti dvi metodikas. Poveikio faktorius *p* priimtas 20 %. COST metodikoje apskaičiuojant saugumo KBI didžiausią svorinį koeficientą turi sukibimo BI, tačiau dėl to, kad sukibimo parametras nebuvo nustatytas tyrimais, o priimtas standartinis visoms gatvėms, BI_S svorinis koeficientas mažinamas iki 0,5. Aplinkos KBI, aprašomas COST metodikoje nebuvo apskaičiuojamas, kadangi oro taršos ir triukšmo techninių parametrų surinkimas reikalauja plačių daugiakriterinių tyrimų.

2.4 lentelė. Trijų pagrindinių KBI komponentai bei atskirų BI svoriniai koeficientai
Table 2.4. Main CPI composition and individual PI weights

KBI	Metodas	BI_L	BI_Pl	BI_P	BI_N	BI_Pd	BI_S
Struktūrinis	COST	1	0,9	0,5	0,6	–	–
	LAKD	–	–	0,556	1	0,667	–
Komforto	COST	–	0,5	0,7	1	0,6	–
	LAKD	–	0,5	0,7	1	0,6	–
Saugumo	COST	–	–	0,9	–	0,6	0,5
	LAKD	–	–	1	–	0,667	–

Reikėtų pabrėžti, kad Lietuvoje neapskaičiuojamas laikomosios gebos BI, nors pagal COST 354 metodiką šis indeksas turi didžiausią svorinį koeficientą, nustatant struktūrinį KBI. Taip pat, COST 354 aprašomas vienas papildomas KBI – aplinkos. Jis susideda iš triukšmo ir oro taršos būklės indeksų. Tačiau autoriai neparinko visuotinai priimtinų ir patogių nustatymui techninių parametrų,

pagal kuriuos galėtų būti apskaičiuojami šie BI. Taigi, šiuo metu dangos būklės įvertinimui aplinkos KBI nenaudojamas.

Suminis kelio dangos būklės indeksas (toliau – DBI) įvertina kelio dangos būklę per atskirus kombinuotus kelio dangos būklės indeksus. DBI yra apskaičiuojamas kaip svariausio KBI bei vidutinės visų kitų KBI reikšmės, padaugintos iš poveikio faktoriaus, sumos (2.11 formulė). LAKD ir COST 354 metodikose svoriniai koeficientai identiški, skiriasi tik tai, kad COST 354 papildomai pateikiami aplinkos KBI svoriniai koeficientai. Parinkti svoriniai koeficientai: W_{str} = 1,0; W_{saug} = 1,0; W_{komf} = 0,65.

$$DBI = I_1 + \frac{p}{100} \cdot \overline{I_2, I_3, ..., I_n}, \tag{2.11}$$

čia *KBI* – kombinuotas būklės indeksas (max 5); *p* – poveikio faktorius, %; B_n - būklės indeksai; W_n - kombinuotų būklės indeksų svoriniai koeficientai; I_n - svoriniais koeficientais išreikšti kombinuoti būklės indeksai, apskaičiuojami pagal formulę:

$$I_n = W_n \cdot KBI_n; \tag{2.12}$$

$$I_1 \geq I_2 \geq ... \geq I_n.$$

2.3. Gatvių dangos būklės tyrimų rezultatai

2.3.1. Absoliutūs dangos būklės tyrimų rezultatai

Siekiant nustatyti gatvių dangos pažaidų lygį, buvo pamatuotas nelygumas (IRI), provėžų gylis, išilginiai plyšiai, skersiniai plyšiai, plyšių tinklų plotas, duobių plotai, lopų plotai bei dangos konstrukcijos įlinkiai. Šiame skyrelyje aptariami gatvės būklės rezultatai po 2017 metais atliktų matavimų. Taip pat reikšmės palyginamos su 1.2 lentelėje pateikiamomis ribinėmis techninių parametrų reikšmėmis.

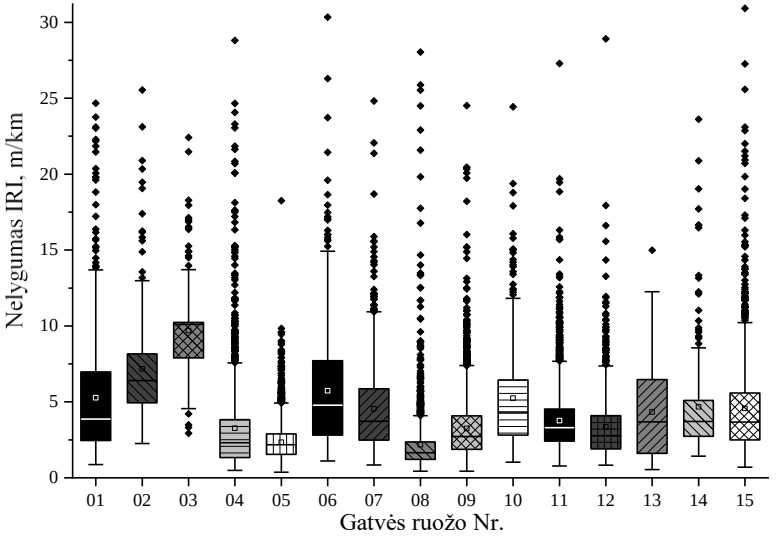
Visi pamatuoti parametrai grupuojami į kategorijas ir konvertuojami į mato vienetus, tinkamus naudoti tolimesniam dangos konstrukcijos būklės vertinimui. Sudarytos tokios kategorijos:

- nelygumas (IRI), m/km. Naudojamas nelygumo kairėje ir dešinėje vėžėje vidurkis;
- provėžų gylis, mm. Naudojamas kairės ir dešinės provėžos vidutinis gylis;
- plyšių ir defektų plotas, %. Vertinami išilginiai plyšiai, skersiniai plyšiai bei plyšių tinklas, duobės ir lopai. Skaičiuojama vienos eismo juostos 10 m ilgio ruožo procentinė dangos paviršiaus dalis, pažeista plyšiais ir kitais defektais.

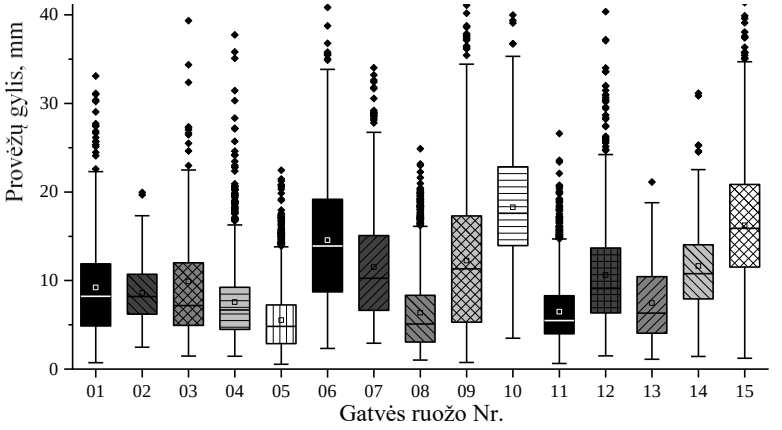
- įlinkiai (D0), μm. Vertinami FWD centrinio daviklio užfiksuoti ir normalizuoti įlinkiai.

Visose 15 gatvių dangos nelygumas (IRI) svyravo nuo 0,38 iki 30,93 m/km, o vidutinis IRI buvo lygus 3,6 m/km. 50 % visų ištirtų ruoželių IRI kito nuo 1,89 iki 4,42 m/km. Lyginant su Gilbert Y. Baladi ir kt. (2017) nustatyta 2,7 m/km ribine IRI reikšme 52,7 % visų pamatuotų gatvių ruoželių viršijo šią ribą. Lyginant su AASHTO (NCHRP 1-37A 2004) nustatyta 3,16 m/km ribine IRI reikšme 42,9 % visų pamatuotų gatvių ruoželių viršijo numatytą ribą. Lyginant su Lietuvos valstybinės reikšmės rajoniniuose keliuose (Lietuvos automobilių kelių direkcija 2017) nustatyta 4,5 m/km ribine IRI reikšme, 24,1 % visų pamatuotų gatvių ruoželių viršijo šią ribą. Visų pamatuotų gatvių nelygumo (IRI) matavimų rezultatai pateikti 2.7 paveiksle.

Provėžų gylis svyravo nuo 0,5 iki 51,1 mm, o vidutinis provėžų gylis – 9,4 mm. 50 % visų ruoželių duomenų provėžų gylis kito nuo 4,5 iki 12,8 mm. Lyginant su Gilbert Y. Baladi ir kt. (2017) nustatytu 12,7 mm ribiniu provėžos gyliu, 25,3 % visų ruoželių viršijo šią ribą. Lyginant su AASHTO (2004) nustatytu 16,5 mm ribiniu provėžos gyliu 14,8 % visų pamatuotų gatvių ruoželių viršijo šią ribą. Lyginant su Lietuvos valstybinės reikšmės rajoniniuose keliuose (Lietuvos automobilių kelių direkcija 2018) nustatytu 20 mm ribiniu provėžos gyliu, 8,3 % visų pamatuotų gatvių ruoželių viršijo šią ribą. Visų pamatuotų gatvių provėžų gylio matavimų rezultatai pateikti 2.8 paveiksle.

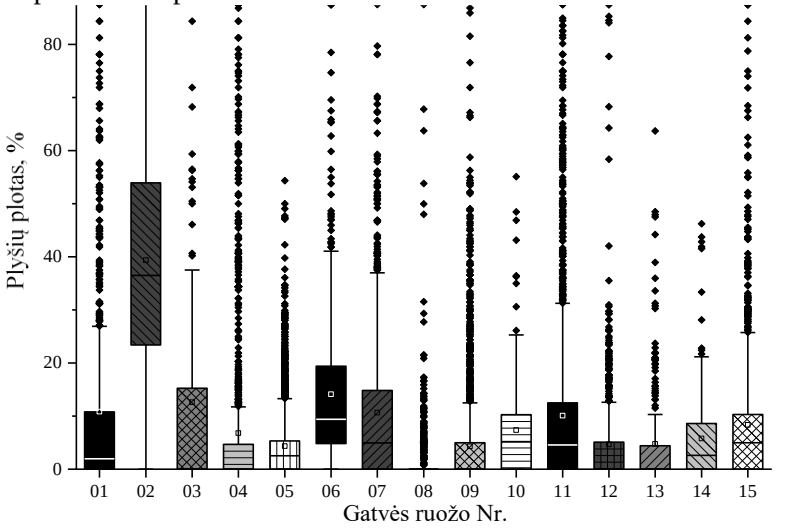


2.7 pav. Nelygumo IRI matavimų rezultatai
Fig. 2.7. IRI test results



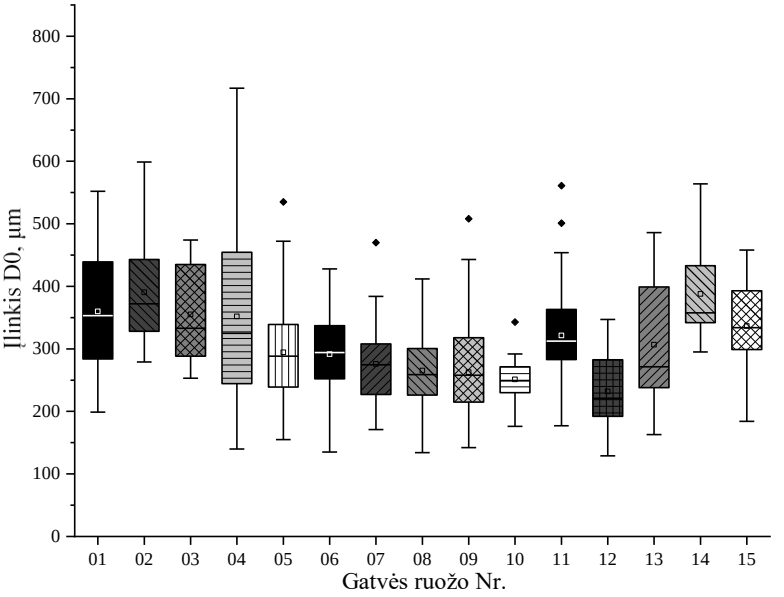
2.8 pav. Provėžų gylio matavimų rezultatai
Fig. 2.8. Rut depth test results

Plyšių ir defektų plotas svyravo nuo 0 iki 96,9 %, o vidutinis plotas – 7,1 %. Daugiau nei pusėje (51,4 %) 10 m ilgio ruoželių neturėjo plyšių ir defektų. Kadangi reglamentuose ir kitoje literatūroje šios pažaidų rūšys paprastai vertinamos pagal jų fizinius parametrus, o ne pagal pažeisto ploto dalį, eksperimentinio tyrimo metu surinktos informacijos buvo nepakankama nustatyti pažaidų masto lygius. Visų pamatuotų gatvių plyšių ir defektų ploto matavimų rezultatai pateikti 2.9 paveiksle.



2.9 pav. Defektų ploto matavimų rezultatai
Fig. 2.9. Defect area test results

Dangos įlinkis pamatuotas krintančio svorio deflektometru svyravo nuo 129,7 µm iki 724,6 µm, o vidutinis įlinkis – 302,1 µm. Visų pamatuotų gatvių dangos įlinkių matavimų rezultatai pateikti 2.10 paveiksle. Didžiausi vidutiniai įlinkiai buvo nustatyti gatvių ruožuose Nr. 1–4, 11, 14, 15. Šiuose ruožuose dangos įlinkiai svyravo nuo 140,5 iki 724,6 µm su vidutine reikšme 374,9 µm. Likusiuose ruožuose įlinkiai svyravo nuo 129,7 iki 542,8 su vidutine reikšme 282,3.



2.10 pav. Dangos konstrukcijos įlinkių matavimo rezultatai
Fig. 2.10. Deflection test results

2.3.2. Dangos būklės rodiklių ryšys su teorine dangos konstrukcijos klase

Absoliutūs gatvių dangos tyrimo rezultatai apibendrinami ir sugrupuojami pagal dangos konstrukcijos klasę. Kadangi nėra kiekvienos gatvės dangos storio faktinių duomenų, gatvėms priskiriamos teorinės klasės pagal išmatuotą visuomeninio (maršrutinio) transporto eismo intensyvumą. Pagal STR 2.06.04:2014 „Gatvės ir vietinės reikšmės keliai. Bendrieji reikalavimai (2020)“ B kategorijos gatvėms gali būti taikomos DK 1, DK 2 ir DK 3 dangos konstrukcijos klasės, t. y., mažiausia leidžiama klasė – DK 1. Dunojaus g. ir Geležinkelio g. ruožuose nevažiuoja maršrutinis visuomeninis transportas, tačiau juda nemažas krovininių transporto priemonių skaičius per parą (23,2 % ir 25,5 % atitinkamai), todėl šioms

gatvėms priskiriama DK 2 dangos konstrukcijos klasė. Likusiuose 13-oje ištirtų gatvių ruožų visuomeninis transportas kursuoja įvairiais intervalais ir daugumoje jų nėra atskiros visuomeniniam transportui skirtos eismo juostos. Todėl gatvės dangos konstrukcijos klasė turėtų būti parenkama pagal KPT SDK 19 „Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklėse“ (Lietuvos automobilių kelių direkcija 2019a) pateiktą lentelę (2.5 lentelė).

2.5 lentelė. Maršrutinio transporto eismo juostoms priskirtos dangų konstrukcijų klasės (Lietuvos automobilių kelių direkcija 2019a)
Table 2.5. Required pavement class depending on the amount of public transport (Lietuvos automobilių kelių direkcija 2019a)

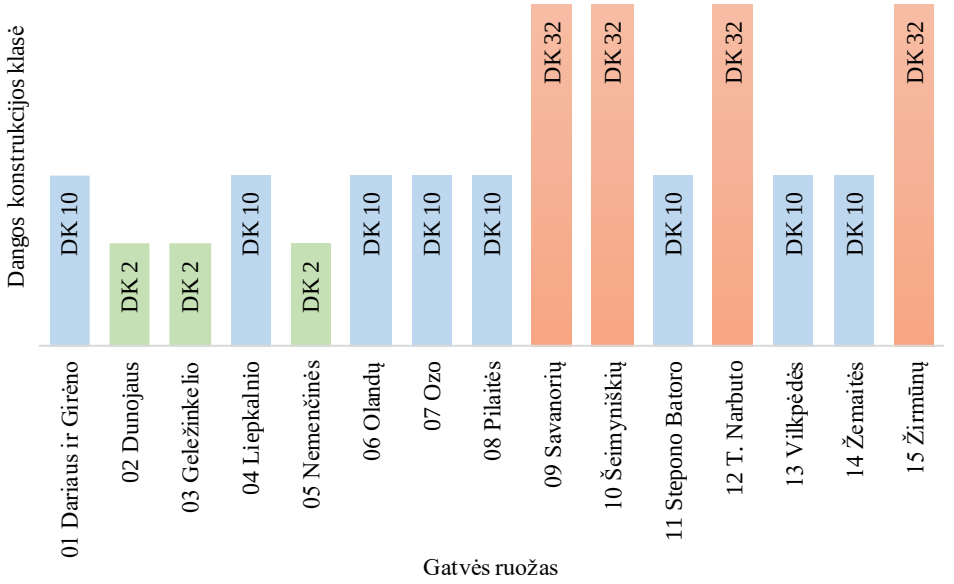
Eil. Nr.	Maršrutinio transporto eismo intensyvumas, t. p./parą	Dangų konstrukcijų klasė
1.	daugiau kaip 1400	DK 100
2.	daugiau kaip 425 iki 1400	DK 32
3.	daugiau kaip 130 iki 425	DK 10
4.	daugiau kaip 65 iki 130	DK 3
5.	iki 65[1)]	DK 2
Pastabos: [1)] – jeigu maršrutinio transporto eismo intensyvumas yra mažesnis kaip 15 t. p./parą, tai dangos konstrukcija gali būti projektuojama žemesnė nei DK 2 klasė		

Visi gatvių ruožai buvo priskirti vienai iš trijų teorinių dangos konstrukcijos klasių: DK 2, DK 10 ir DK 32 (žr. 2.11 pav.).

Šiame etape analizuojami ir 2017 metais, ir 2019 metais atlikti dangos būklės matavimai. Papildomai prie ankstesniame skyrelyje išvardytų parametrų, tokių kaip nelygumas, provėža, įlinkis apskaičiuojami sekantys įvairiuose gyliuose dangos konstrukcijos stiprumą apibrėžiantys parametrai, aprašyti Talvik et al. (2009):

- SCI200 arba SCI300 – atspindi surištųjų sluoksnių laikomąją gebą. Apskaičiuojamas kaip skirtumas tarp centrinio FWD daviklio (D0) įlinkio ir daviklio, nutolusio per 20 cm arba 30 cm atitinkamai įlinkio. Vienas ar kitas parametras pasirenkamas priklausomai nuo tiriamos dangos konstrukcijos surištųjų sluoksnių storio;
- BDI – atspindi pagrindo sluoksnių laikomąją gebą. Apskaičiuojamas kaip skirtumas tarp FWD daviklio, nutolusio per 30 cm (D300) nuo centrinio, įlinkio ir daviklio, nutolusio per 60 cm (D600), įlinkio;
- BCI900 arba BCI1200 – atspindi sankasos laikomąją gebą. BCI900 apskaičiuojamas kaip skirtumas tarp FWD daviklio, nutolusio per 60 cm (D600) nuo centrinio, įlinkio ir daviklio, nutolusio per 90 cm (D900), įlinkio. BCI200 apskaičiuojamas kaip skirtumas tarp FWD daviklio,

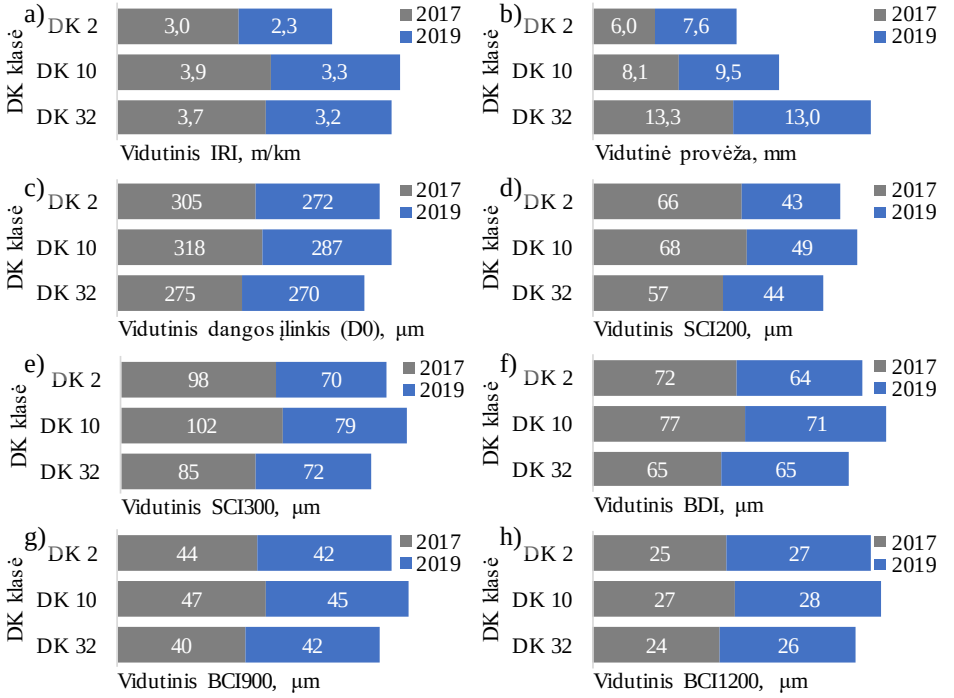
nutolusio per 90 cm (D900) nuo centrinio, įlinkio ir daviklio, nutolusio per 120 cm (D1200), įlinkio.



2.11 pav. Teorinė dangos konstrukcijos klasė pagal visuomeninio transporto eismo intensyvumą

Fig. 2.11. Theoretical pavement class calculated by amount of public transport

Vidutinių dangos būklės techninių parametrų palyginimas pagal metus ir dangos konstrukcijos klases pavaizduotas 2.12 paveiksle. Visi iš pateiktų parametrų interpretuojami taip, kad kuo didesnė vertė, tuo blogesnė būklė. Iš duomenų matyti, kad visų parametrų, išskyrus provėžos gylį, didžiausias vidutines reikšmes turi gatvės ruožai su teorine DK 10 dangos konstrukcijos klase. Pavyzdžiui, nelygumas (IRI) DK 10 klasės ruožuose 2,0–3,4 % didesnis už vertes DK 32 klasės ruožuose ir 26,6–3,3 % didesnis už vertes DK 2 klasės ruožuose. Visi atskirų sluoksnių laikomosios gebos parametrai (SCI, BDI ir BCI) DK 10 klasės ruožuose 1,6–19,5 % didesni už vertes DK 2 ir DK 32 klasės ruožuose. Provėžos gylis didėja proporcingai dangos konstrukcijos klasei. Pavyzdžiui, provėžos gylis DK 10 dangos konstrukcijos klasės ruožuose 24,2–35,7 % didesnis už DK 2 ruožų vertes, o DK 32 vidutinės vertės 36,9–64,1 % didesnės už DK 10 klasės vertes. Tai parodo tiesioginę provėžų priklausomybę nuo visuomeninio transporto skaičiaus eisme.



2.12 pav. Vidutinių dangos būklės techninių parametrų palyginimas pagal metus ir dangos konstrukcijos klases: a) IRI; b) provėžos gylis; c) įlinkis; d) SCI200; e) SCI300; f) BDI ; g) BCI900; a) BCI1200

Fig. 2.12. Comparison of average technical parameters calculated from 2017 and 2019 test data distributed by pavement class: a) IRI; b) rutting; c) deflection; d) SCI200; e) SCI300; f) BDI ; g) BCI900; a) BCI1200

Lyginant 2019 ir 2017 metų matavimų rezultatus nelygumas (IRI) bei surištųjų sluoksnių laikomosios gebos parametrai (SCI) ir pagrindo sluoksnių laikomosios gebos parametrai (BDI) sumažėjo: vidutinis IRI 14,2–23,1 %, vidutinis SCI 15,5–34,3 %, o vidutinis BDI 0,5-12,0 %. Tikėtina priežastis dėl ko sumažėjo nelygumas – daliniai ištirtų ruožų asfalto paviršiaus sluoksnio taisymo ir atnaujinimo darbai. SCI ir BDI sumažėjimas galėtų būti registruojamas dėl to, kad laikui bėgant viršutinė dangos konstrukcijos dalis konsoliduojasi ir parodo geresnę laikomąją gebą. Analogiškus rezultatus gavo Žiliūte et al. (2016). Ištyrus bandomojo ruožo laikomosios gebos kaitą nuo ruožo įrengimo momento, paaiškėjo jog bent 5 metus po eksploatacijos pradžios visos dangos konstrukcijos laikomoji geba didėjo. Atvirkštinė tendencija matoma su provėžomis ir žemės sankasos laikomosios gebos parametru BCI. Provėžos padidėjo DK 2 ir DK 10 klasės ruožuose vidutiniškai 16,9–27,7 %. Giliausių sluoksnių laikomąją gebą

atvaizduojantis parametras BCI1200 vidutiniškai padidėjo nuo 0,6 μm iki 2,0 μm, t. y. 2,2–8,2 % per du metus. Tokia priklausomybė galėtų reikšti, jog provėžų atsiradimas susijęs su žemės sankasos laikomosios gebos būklės pablogėjimu. Iš kitos pusės, įvertinus krintančio svorio deflektometrų įlinkių matavimų paklaidą (2 % ± 1 μm įlinkiams bei 2 % ± 0,2 kN suteikiamai apkrovai), tikėtina jog BCI parametro pokyčiai nėra absoliutūs ir atspindi netikslumus tarp dviejų matavimų skirtingų prietaisų modeliais. Tęsiant šioje disertacijoje atliktus tyrimus, būtų tikslinga patikrinti žemės sankasos laikomąją gebą ateityje ir palyginti su jau turimais rezultatais.

2.3.3. Laikomosios gebos vertinimas pagal tampriąją deformaciją

Laikomosios gebos vertinimo metodas pagal M_0, l, T_z parametrus, apskaičiuotus pagal krintančio svorio deflektometro įlinkių duomenis naudojamas Vokietijoje (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Arbeitspapier Tragfähigkeit 2014). Taip pat šis dokumentas yra adaptuotas Lietuvoje, o pats metodas aprašytas MN KSD 18 „Automobilių kelių dangos konstrukcijos sluoksnių laikomosios gebos matavimo krintančio svorio deflektometru metodiniuose nurodymuose“ (Lietuvos automobilių kelių direkcija 2019b). Siekiant apskaičiuoti nesurištų medžiagų puserdvės modulį M_0 ir tamprios deformacijos ilgį l, turi būti nustatyta deformacija, kuri išeina už dangos apkrovos ploto, ją nustatant nuo normalizuotos deformacijos w_i. Ji aprašoma standartinei 300 mm skersmens apkrovos perdavimo plokštei taikomoje teorinėje lygtyje:

$$w_{i,ri} = A \cdot \left(a_0 \cdot e^{B \cdot a_1 \cdot r_i} + a_2 \right), \tag{2.13}$$

čia: $w_{i,ri}$ – deformacija už apkrovos taikymo ribų, išmatuota deformacijos jutikliu atstumu r nuo apkrovos centro, mm; r_i – atstumas nuo apkrovos centro, mm; a_0 = 0,392948; a_1 = –0,398483; a_2 = 0,0137024; A, B – regresijos parametrai mm ar mm^{-1}.

Regresijos parametrai A ir B cikliškai keičiami kol teorinė įlinkių kreivė (pagal apskaičiuotus taikant 2.13 formulę įlinkius) bus kuo artimesnė pamatuotų įlinkių kreivei tame pačiame taške. Parametrų apskaičiavimas vykdomas taikant programos Microsoft Excel bei VBA programavimo kalbos sudarytą skaičiuoklę. Pradiniai regresijos dydžiai yra: A = 0,6 mm ir B = 0,002 mm^{-1}.

Remiantis regresijos parametrais A ir B, apskaičiuojamas dangos konstrukcijos nesurištųjų pagrindo sluoksnių puserdvės modulis M_0 (2.14 formulė). Puserdvę sudaro skaldos pagrindo sluoksnis, apsauginis šalčiui atsparus sluoksnis arba šalčiui nejautrių medžiagų sluoksnis ir nesurišta žemės sankasa.

$$M_0 = \frac{E_0}{1-\mu_0^2} = F \cdot \frac{B}{A}, \tag{2.14}$$

čia: M_0 – dangos konstrukcijos nesurištųjų pagrindo sluoksnių modulis, N/mm^2; E_0 – dangos konstrukcijos nesurištųjų pagrindo sluoksnių standumo modulis, N/mm^2; μ_0 – dangos konstrukcijos nesurištųjų pagrindo sluoksnių Puasono koeficientas (μ_0 = 0,5); F – perduodama smūgio jėga, kN; A, B – regresijos parametrai mm ar mm^{-1}.

Apskaičiuojamas tamprios deformacijos ilgis l:

$$l = \frac{1}{B}, \tag{2.15}$$

čia: l – tamprios deformacijos ilgis, mm; B – regresijos parametras, mm^{-1}.

Apskaičiuojamas įlinkio kreivės spindulys R_0 (nuo apkrovos centro):

$$R_0 = 24,494 \cdot \left(w_0 - w_{200}\right)^{-0,899}, \tag{2.16}$$

čia: R_0 – įlinkio kreivės spindulys nuo apkrovos centro, m; w_0 – išmatuotas įlinkis apkrovos centre, mm; w_{200} – išmatuotas įlinkis 200 mm atstumu nuo apkrovos centro, mm

Apskaičiuojamas laikomosios gebos skaičius T_z:

$$T_Z = \left(\frac{R_0 \cdot 1000}{w_0} \right)^{0,5}, \tag{2.17}$$

čia: T_z – laikomosios gebos skaičius; R_0 – įlinkio kreivės spindulys nuo apkrovos centro, m; w_0 – išmatuota deformacija apkrovos centre, mm.

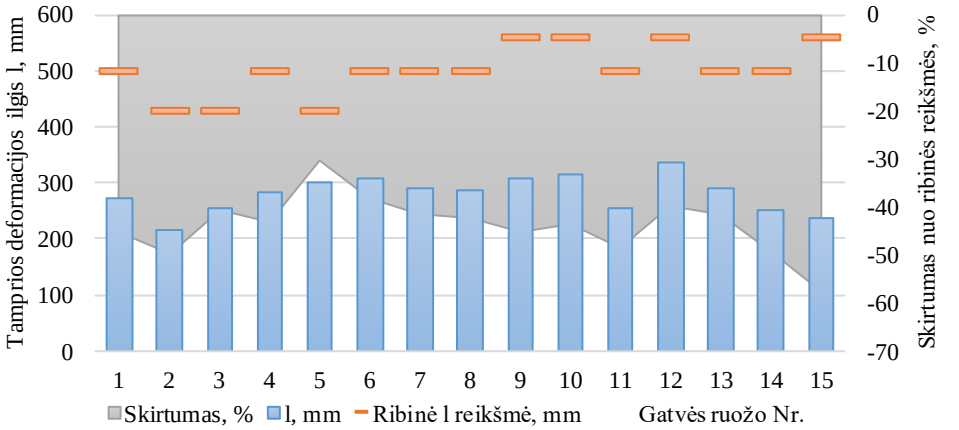
Visi parametrai apskaičiuojami pagal 2.13–2.17 formules kiekvienam FWD matavimo taškui. Pagal 2.6 lentelę iš anksto žinant tiriamos dangos konstrukcijos klasę galima nustatyti ribinius l, M_0 ir T_z parametrus, o tada palyginti juos su klasifikacijos diagrama, pateikta nurodymuose (Lietuvos automobilių kelių direkcija 2019b) ir pagal ją nuspręsti kokių dangos konstrukcijos sluoksnių laikomoji geba yra nepakankama, ar ji tenkina visus reikalavimus.

Apskaičiavus l, M_0 ir T_z parametrus jie palyginami su ribinėmis reikšmėmis. Kai parametras neviršija šios reikšmės, tai reiškia jog atitinkamų sluoksnių laikomoji geba ne pilnai tenkina reikalavimus (M_0 atveju – nesurištųjų sluoksnių, o l ir T_z atveju – surištojo sluoksnio). Ribinės reikšmės nustatomos kiekvienam gatvės ruožui atskirai, priklausomai nuo teorinės dangos konstrukcijos klasės, nustatytos kiekvienam gatvės ruožui pagal apkrovas.

2.6 lentelė. *l*, M_0 ir T_z dangos konstrukcijoms pagal apkrovų klasę orientaciniai dydžiai
Table 2.6. *l*, M_0 ir T_z values based on pavement class

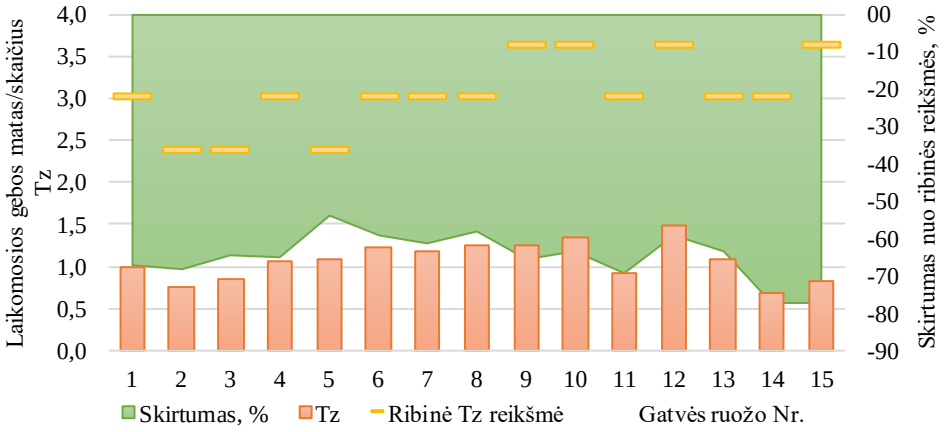
Vertinimo charakteristika	Orientacinis dydis (ribinė vertė) pagal DK klasę							
	DK0,1	DK0,3	DK1	DK2	DK3	DK10	DK32	DK100
Tamprios deformacijos ilgis *l*, mm	130	130	360	430	460	500	560	620
Sluoksnio modulis M_0, N/mm^2	125	125	150	150	150	150	150	150
Laikomosios gebos matas / skaičius T_z	0,15	0,17	1,48	2,38	2,67	3,02	3,65	4,35

Kiekvienos tirtos gatvės ruožo vidutinių tamprios deformacijos ilgio *l* reikšmių palyginimas su ribinėmis reikšmėmis ir jų procentinis skirtumas pavaizduotas 2.13 paveiksle. Vidutinė *l* reikšmė kito nuo 216,7 mm iki 337,5 mm. Ribinė reikšmė svyravo nuo 430 mm iki 560 mm. Visais atvejais apskaičiuota vidutinė reikšmė nesiekė ribinės, trūkumas svyravo nuo 30,2 % iki 57,8 %.



2.13 pav. Vidutinių tamprios deformacijos ilgio *l* reikšmių palyginimas su ribinėmis reikšmėmis
Fig. 2.13. Average elastic deformation length *l* comparison with threshold values

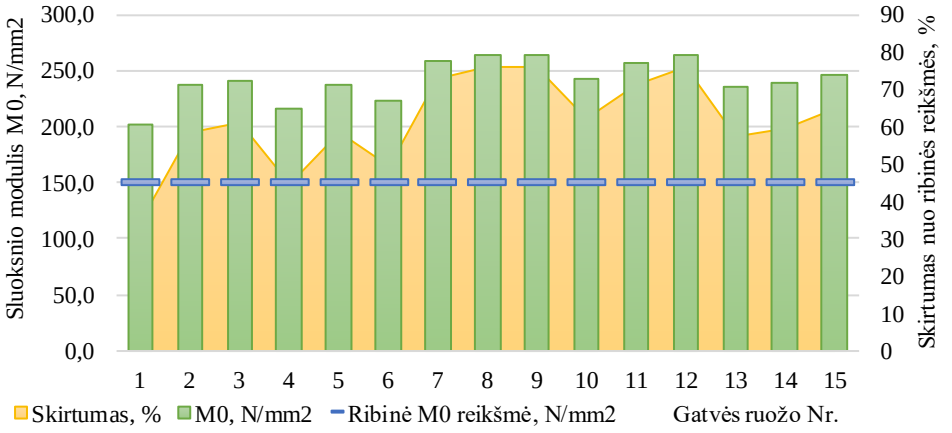
Kiekvienos tirtos gatvės ruožo vidutinių laikomosios gebos mato T_z reikšmių palyginimas su ribinėmis reikšmėmis ir jų procentinis skirtumas pavaizduotas 2.14 paveiksle. Vidutinė T_z reikšmė svyravo nuo 0,682 iki 1,484. Ribinė reikšmė svyravo nuo 2,38 iki 3,65. Visais atvejais apskaičiuota vidutinė reikšmė nesiekė ribinės, trūkumas svyravo nuo 54,1 % iki 77,5 %.



2.14 pav. Vidutinių laikomosios gebos mato T_z reikšmių palyginimas su ribinėmis reikšmėmis

Fig. 2.14. Average bearing capacity index T_z comparison with threshold values

Kiekvienos tirtos gatvės ruožo vidutinių sluoksnio modulio M_0 reikšmių palyginimas su ribinėmis reikšmėmis ir jų procentinis skirtumas pavaizduotas 2.15 paveiksle. Vidutinė M_0 reikšmė svyravo nuo 201,7 N/mm^2 iki 337,5 N/mm^2. Ribinė visiems ruožams buvo lygi 150 N/mm^2. Visais atvejais apskaičiuota vidutinė reikšmė viršijo ribinę, atsarga svyravo nuo 34,5 % iki 76,2 %.



2.15 pav. Vidutinių sluoksnio modulio M_0 reikšmių palyginimas su ribinėmis reikšmėmis

Fig. 2.15. Average layer modulus M_0 comparison with threshold values

Kadangi šiame darbe tyrimai atliekami su jau eksploatuojamomis gatvėmis ir tiksli jų dangos konstrukcijos klasė nėra žinoma, atliktas atvirkštinis procesas, t. y., turint l, M_0 ir T_z parametrus apskaičiuojama, kokia didžiausia dangos konstrukcijos klasė gali tenkinti šių parametrų vertes kiekviename matavimo taške. Kadangi iš visos duomenų imties sluoksnio modulis M_0 praktiškai visais atvejais buvo didesnis už 150 N/mm^2 (>99 %), dangos konstrukcijos klasė buvo nustatoma pagal likusius 2 parametrus – tamprios deformacijos ilgį l bei laikomosios gebos matą T_z.

Sudarytas skirstinys sudalintas pagal matuotas gatves pavaizduotas 2.7 lentelėje bei A priede. Kiekvienai gatvei dangos konstrukcijos klasė buvo parinkta pagal dominuojančią tos gatvės matavimo taškų dangos konstrukcijos klasę. Apskaičiuota DK klasė pagal abu parametrus (l ir T_z) abiem matavimo laikotarpiams (2017 metais ir 2019 metais) skyrėsi nežymiai. Papildomai buvo nustatoma teorinė kiekvienos gatvės DK klasė, remiantis (STR 2.06.04:2014 2020) pagal gatvės kategoriją bei pagal visuomeninio transporto skaičių eisme. Palyginus apskaičiuotą ir teorinę DK klasę, nustatyta, kad visais atvejais išmatuota DK klasė nesiekė teorinės reikalaujamos klasės nei pagal gatvės kategoriją, nei pagal visuomeninio transporto priemonių skaičių eisme. Pagal (Lietuvos automobilių kelių direkcija 2019b) galima padaryti išvadą, jog nesurištų medžiagų puserdvės (skaldos pagrindo sluoksnis (SPS), apsauginis šalčiui atsparus sluoksnis (AŠAS) ir žemės sankasa) turi aukštą laikomąją gebą (sluoksnio modulis M_0), o surištas dangos konstrukcijos sluoksnis ne visai standus.

2.7 lentelė. Apskaičiuotos DK klasės ir teorinės DK klasės palyginimas
Table 2.7. Comparison of calculated and reference pavement class

Nr	Gatvė	Apskaičiuota DK klasė				Teorinė DK klasė	
		2017 matavimai		2019 matavimai		pagal gat. kat.	pagal VT
		pagal l	T_z	pagal l	T_z		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Dariaus ir Girėno g.	DK 1	DK 1	DK 1	DK 1	DK 10	DK 10
2	Dunojaus g.	DK 0,3	DK 1	DK 1	DK 1	DK 10	DK 2
3	Geležinkelio g.	DK 1	DK 0,3	DK 0,3	DK 0,3	DK 2	DK 2
4	Liepkalnio g.	DK 1	DK 1	DK 1	DK 1	DK 10	DK 10
5	Nemenčinės pl.	DK 1	DK 1	DK 1	DK 1	DK 10	DK 2
6	Olandų g.	DK 1	DK 1	DK 1	DK 1	DK 10	DK 10
7	Ozo g.	DK 1	DK 1	DK 1	DK 1	DK 10	DK 10
8	Pilaitės pr.	DK 1	DK 1	DK 1	DK 1	DK 10	DK 10
9	Savanorių pr.	DK 1	DK 1	DK 1	DK 1	DK 10	DK 32

2.7 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6	7	8
10	Šeimyniškių g.	DK 1	DK 1	DK 1	DK 1	DK 10	DK 32
11	Stepono Batoro g.	DK 1	DK 1	DK 1	DK 1	DK 10	DK 10
12	T. Narbuto g.	DK 1	DK 1	DK 1	DK 1	DK 10	DK 32
13	Vilkpėdės g.	DK 1	DK 1	DK 1	DK 1	DK 3	DK 10
14	Žemaitės g.	DK 1	DK 0,3	DK 1	DK 1	DK 3	DK 10
15	Žirmūnų g.	DK 0,3	DK 1	DK 1	DK 1	DK 10	DK 32

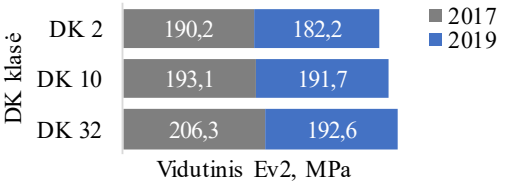
Papildomai, pagal laikomosios gebos parametrą M_0, nustatomas statinio deformacijos modulio E_{v2} dydis:

$$E_{v2} \approx \frac{M_0}{1,25}, \tag{2.18}$$

čia: E_{v2} – statinis deformacijos modulis, MPa; M_0 – nesurištų medžiagų puserdvės sluoksnio modulis, N/mm^2.

(Lietuvos automobilių kelių direkcija 2019a) reglamentuojamas deformacijos modulis E_{v2} = 150 MPa ant skaldos pagrindo sluoksnio su AŠAS sluoksniu apačioje. Vidutinė E_{v2} reikšmė apskaičiuota kiekvienam gatvės ruožui svyravo nuo 161,4 MPa iki 211,4 MPa. Šiuo metu visi ruožai tenkina reikalavimą, vertinant gatvės ruožą kaip visumą, tačiau vertinant atskirus pavienius matavimo taškus, 17,1 % visos duomenų sekos nesiekė reglamentuojamos minimalios 150 MPa vertės. 4-iose gatvėse iš 15-os E_{v2} buvo ne mažesnis už ribinį visuose atskiruose taškuose. Kitose gatvėse nuo 7,1 % iki 47,6 % nesiekė ribinės reikšmės.

Analogiškai 2.3.2 skyreliui, apskaičiuojami statinio deformacijos modulio vidurkiai, suskirsčius į kategorijas pagal dangos konstrukcijos klases, apskaičiuotas pagal visuomeninio transporto kiekį. Skaičiavimo rezultatai pateikti 2.16 paveiksle.



2.16 pav. Statinio deformacijos modulio palyginimas pagal metus ir dangos konstrukcijos klases

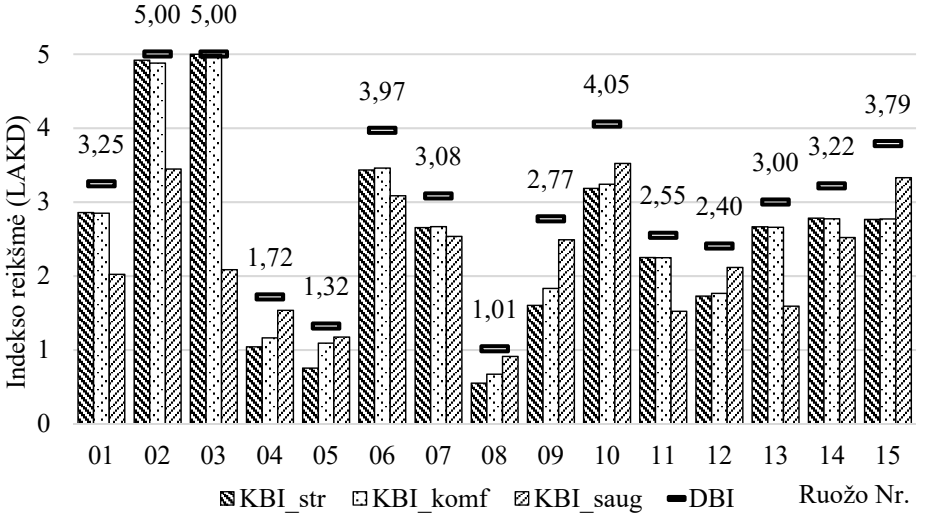
Fig. 2.16. Comparison of average elastic modulus calculated from 2017 and 2019 test data distributed by pavement class

Galima daryti išvadą, kad statinis deformacijos modelis tiesiogiai priklauso nuo gatvės dangos konstrukcijos klasės. Per du metus statinis deformacijos modulis sumažėjo 0,7–6,6 %. Taigi, nors šiuo metu nesurištų sluoksnių deformacijos modelis ir tenkina galiojančius reikalavimus, laikui bėgant pagrindo sluoksnio standumas gali būti jau per mažas.

2.4. Dangos būklės vertinimo metodikų palyginimas

Lyginant anksčiau aprašytas dangos būklės vertinimo metodikas buvo apskaičiuoti trys kombinuoti būklės indeksai (KBI): struktūrinis, komforto ir saugumo bei suminis dangos būklės indeksas (DBI) (žr. 2.2.2 poskyrį). Indeksai skaičiuojami visose 15-oje ištirtų Vilniaus miesto gatvių pagal 2017 metų matavimo duomenis. Būklė išreiškiama besistemiais vienetais penkiabalėje sistemoje, kur 0 – geriausia būklė, o 5 – blogiausia būklė.

Lietuvos valstybinės reikšmės keliams taikomos metodikos (Lietuvos automobilių kelių direkcija 2018) KBI ir DBI skaičiavimo rezultatai pateikti 2.17 paveiksle. Vidutinė DBI reikšmė atskirose gatvėse svyravo nuo 1,01 iki 5,0, o vidutinė reikšmė visose išmatuotose B kategorijos gatvėse – 3,07. Nei viena iš gatvių nepriskiriama „labai gerai“ būklei, o trys gatvės priskiriamos „labai blogai“ būklei.



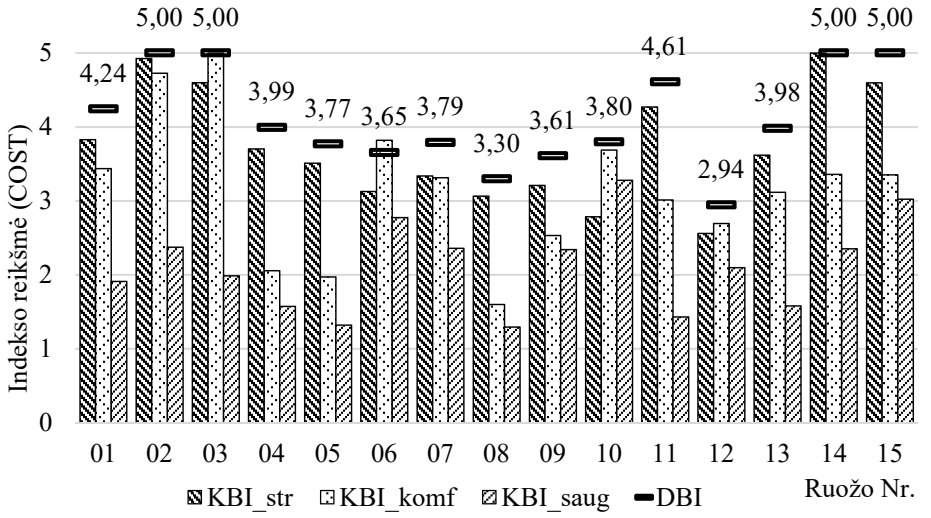
2.17 pav. Gatvių dangos kombinuoti bei suminis būklės rodikliai pagal LAKD metodiką
Fig. 2.17. Pavement combined performance indices and general performance index calculated by LRA methodology

Dviem (Geležinkelio ir Dunojaus g.) iš trijų tokių gatvių nevažiuoja visuomeninis transportas (Geležinkelio g. nevertinama žiedinė dalis ties autobusų stotimi). Šios dvi gatvės buvo ženkliai pažeistos, jų struktūrinio ir komforto KBI reikšmės buvo artimos 5. Kitos trys gatvės su aukštomis DBI reikšmėmis buvo Olandų g. (Nr. 6 – 3,97), Šeimyniškių g. (Nr. 10 – 4,05) bei Žirmūnų g. (Nr. 15 – 3,79). Šiose 3-ose gatvėse buvo užregistruoti vieni didžiausių visuomeninio transporto eismo intensyvumo skaičiai – atitinkamai 162 aut./parą, 603 aut./parą ir 612 aut./parą.

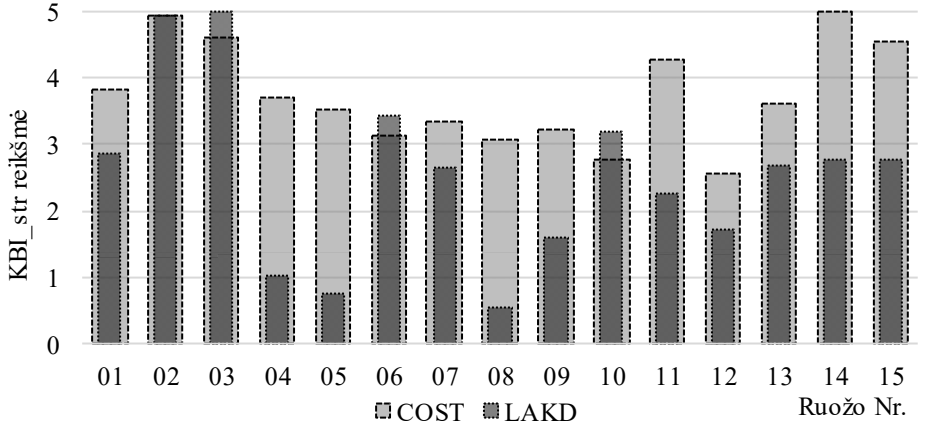
Beveik pusėje gatvių (7 iš 15) saugumo KBI tapo lemiamu faktoriumi, apskaičiuojant DBI, nors vidutinė šio indekso reikšmė per visus 15 gatvių ruožų buvo mažesnė nei struktūrinė ir komforto (atitinkamai 2,26 prieš 2,55 ir 2,61). Be to, saugumo KBI parametras turėjo mažiausią vidutinį standartinį nuokrypį, lyginant su struktūriniu ir komforto (atitinkamai 0,75 prieš 1,21 ir 1,15). Tai reiškia, jog saugumo KBI skiriasi sąlyginai nedaug miestų gatvių dangose, ir lemiamu jis tampa tik, kai kiti KBI yra pakankamai maži.

COST Action 354 (2008) metodikos KBI ir DBI skaičiavimo rezultatai pateikti 2.18 paveiksle. Vidutinė DBI reikšmė atskirose gatvėse svyravo nuo 2,94 iki 5,0, o vidutinė reikšmė visose išmatuotose B kategorijos gatvėse – 4,11. Pagal šią metodiką, didžioji dalis gatvių (10 iš 15) buvo „patenkinamos“ būklės, tačiau nei viena iš gatvių nepriskiriama „labai gerai“ būklei, o 1 gatvė priskiriama „labai blogai“. Didžiojoje dalyje gatvių (11 iš 15) struktūrinis KBI tapo lemiamu faktoriumi, apskaičiuojant DBI, likusiose 4 ruožuose – komforto KBI. Pagal COST metodiką vidutinis saugumo KBI buvo labai panašus (2,11), lyginant su LAKD metodika (2,26), tačiau dėl to, kad kiti 2 kombinuoti indeksai buvo didesni, nei viename gatvės ruože šis KBI nebuvo lemiamu.

Atskirai reikėtų palyginti struktūrinį KBI tarp dviejų metodologijų, kadangi būtent šio kombinuoto indekso apskaičiavimas skiriasi labiausiai. COST metodikoje vertinamas laikomosios gebos techninis parametras ir jo svorinis koeficientas yra didžiausias. LAKD metodologijoje didžiausią svorinį koeficientą turi nelygumo techninis parametras, o laikomoji geba nėra vertinama. 2.3 skyriuje išskirti gatvių ruožai, kuriuose buvo užregistruoti didžiausi dangos įlinkiai: 1–4, 11, 14, 15. Lyginant struktūrinį KBI šiuose ruožuose matomi ženklūs skirtumai tarp reikšmių. Pavyzdžiui, Liepkalnio g. (Nr. 4) rezultatas skiriasi daugiau nei 3 kartus: KBI_str pagal LAKD – 1,04; pagal COST – 3,70. Apie 2 kartus skiriasi rezultatas Stepono Batoro g. (Nr. 11), Žemaitės g. (Nr. 14) ir Žirmūnų g. (Nr. 15). Kadangi šiose gatvėse nustatyta prastesnė laikomoji geba, COST metodą galima laikyti patikimesniu, vertinant visos dangos būklę. LAKD metode dangos būklės vertinimas remiasi tik paviršiniais parametrais. Struktūrinio KBI abiem metodais palyginimas pateiktas 2.19 paveiksle.



2.18 pav. Gatvių dangos kombinuoti bei suminiai būklės rodikliai pagal COST metodiką
Fig. 2.18. Pavement combined performance indices and general performance index calculated by COST methodology



2.19 pav. Struktūrinio kombinuoto būklės indekso palyginimas pagal COST ir LAKD metodikas
Fig. 2.19. Comparison of structural combined performance indices calculated by COST and LRA methodologies

Lyginant suminį dangos būklės indeksą nustatyta, jog COST metodu apskaičiuotos reikšmės buvo didesnės už LAKD metodu apskaičiuotas reikšmes – atskirose gatvėse skirtumai svyruoja nuo –0,31 iki 2,45. Vidutiniškai COST metodu apskaičiuotas DBI buvo 1,4 karto didesnis už LAKD metodu apskaičiuotą DBI. Tai parodo, jog nevertinant laikomosios gebos (pvz., LAKD metodikoje) apskaičiuotos būklės indekso reikšmės gali neatspindėti faktinės gatvės dangos būklės, atsižvelgiant į jos struktūrines savybes. Kadangi struktūrinis KBI buvo reikšmingiausias, nepriklausomai nuo metodikos, yra svarbu kuo tiksliau jį apskaičiuoti.

2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Analizuojant gatvių ruožus, suskirstytus pagal normatyvinę projektinę dangos konstrukcijos klasę (nuo DK 2 iki DK 32), DK 10 gatvių ruožai buvo blogiausios būklės, atsižvelgiant į visus nustatomus techninius parametrus, išskyrus provėžas (2,7–26,6 % blogesnė būklė, lyginant su DK 2 ir 3,4–19,5 % blogesnė būklė, lyginant su DK 32). Pastebėta, jog provėžų gylis tiesiogiai priklauso nuo visuomeninio transporto priemonių skaičiaus eisme.
2. Matavimais pagrįsta dangos konstrukcijos klasė, nustatyta pagal tampriosios deformacijos ilgį l bei laikomosios gebos matą T_z, visose gatvėse buvo žemesnė už teorinę projektinę dangos konstrukcijos klasę, apskaičiuotą pagal visuomeninio transporto priemonių skaičių arba gatvės kategoriją (vidutinis l buvo 30,2–57,8 % mažesnis už ribinį, o T_z – 54,1–77,5 % mažesnis už ribinį). Tai apibrėžia, kad didžioji tirtų gatvių dalis turi nepakankamą dangos konstrukcijos laikomąją gebą, lyginant su normatyvine faktinei apkrovai priskirtina dangos konstrukcijos laikomaja geba.
3. Dangos įlinkių matavimu grindžiamas apskaičiuotas tirtųjų gatvių nesurištojo pagrindo sluoksnio deformacijos modulis E_{v2} tiesiogiai priklauso nuo normatyvinės gatvės dangos konstrukcijos klasės, nustatytos pagal visuomeninio transporto kiekį. Visoms gatvėms apskaičiuotas vidutinis E_{v2} nesiekė 150 MPa, t. y., galiojančiuose reglamentuose keliamų reikalavimų. 4-ose gatvėse iš 15-os kiekviename matavimo taške nustatytos E_{v2} reikšmės tenkino reikalavimą. Kitose gatvėse nuo 7,1 % iki 47,6 % taškų nesiekė ribinės reikšmės.
4. Per du metus nelygumas bei surištųjų ir pagrindo sluoksnių laikomoji geba pagerėjo (vid. IRI – 12 gatvių iš 15, vid. SCI – 14 gatvių iš 15, vid. BDI – 12 gatvių iš 15). Tikėtinos priežastys – daliniai viršutinio asfalto sluoksnio tvarkymo ir atnaujinimo darbai bei dangos

konstrukcijos sluoksnių konsolidacija. Atvirkštinė tendencija matoma su provėžomis ir žemės sankasos laikomąja geba – šių parametrų reikšmės padidėjo (t. y., būklė pablogėjo: vid. provėža – 12 gatvių iš 15, vid. BCI – 10 gatvių iš 15). Daroma prielaida, jog provėžų atsiradimas susijęs su žemės sankasos laikomosios gebos būklės pablogėjimu. Tai parodo, kad laikomoji geba taip pat labai svarbus parametras dangos būklės vertinime.

5. Palygintos dvi dangos būklės vertinimo metodikos – COST 354 veiklos pagrindu sukurta metodika bei VĮ Lietuvos automobilių kelių direkcijos naudojama metodika valstybinės reikšmės keliams. Pagal eksperimentinio tyrimo duomenis COST metodika apskaičiuotas suminis dangos būklės indeksas buvo vidutiniškai 1,4 karto didesnis už indeksą, apskaičiuotą pagal LAKD metodiką. Remiantis eksperimentiniais tyrimais bei dangos būklės kitimo tendencijos skaičiavimais, akivaizdu, jog laikomoji geba turi reikšmingą įtaką bendrai dangos būklei. Kadangi LAKD metodas nevertina laikomosios gebos būklės indekso, COST metodika priimta tinkamesne taikymui miestų gatvių DVS.

3

Suminio dangos būklės rodiklio įverčių reikšmingumo nustatymas

Šiame skyriuje aprašomas ir pritaikomas segmentavimo algoritmas įvairiems dangos būklę nusakantiems parametrams. Palyginamos visos algoritmų ir segmentuojamų parametrų kombinacijos. Išrenkama patikimiausia kombinacija ir pagal ją segmentuojami visi gatvių ruožai. Apskaičiuojamas kiekvieno būklės indekso reikšmingumas, įvertinama laikomosios gebos įtaka suminiam dangos būklės indeksui. Nustatomas ryšys tarp laikomosios gebos rodiklio reikšmingumo bei krovininio transporto sraute dalies. Pateikiamos rekomendacijos remonto ir priežiūros prioritetiniam sąrašo sudarymui. Aprašomas automatizuotos segmentavimo skaičiuoklės veikimo principas. Nustatoma viršutinio sluoksnio atnaujinimo darbų įtaka dangos konstrukcijos būklės kitimui.

Skyriaus tematika paskelbti du autoriaus straipsniai (Kravcovas et al. 2020; Kravcovas 2018).

3.1. Gatvių homogeninių ruožų sudarymas ir tikslinimas

3.1.1. Segmentavimo metodo parinkimas

Pirmame skyriuje buvo aprašyta keletas segmentavimo metodų. Du pagrindiniai plačiausiai pasaulyje naudojami metodai – tarp jų kumuliacinio skirtumo (KS) metodas bei absoliučių slenkančių vidurkių (SV) metodas. Siekiant nustatyti kuris metodas yra labiausiai tinkamas tirti miesto gatvių dangų duomenis, šie du metodai buvo palyginti. Taip pat segmentavimas su tais pačiais rodikliais buvo pritaikytas „žaliems“ duomenims bei patikrinta pirmųjų dviejų metodų kombinacija. Norint atlikti įvairių metodų palyginimą, turi būti sudarytos duomenų sekos ir pagal jas segmentavimo kreivės. Segmentavimo kreivė kiekvienam metodui buvo sudaryta skirtingai. Toliau aprašomas šis procesas kiekvienam metodui.

„Žalių“ duomenų segmentavimas – metodas, kai turimi įvesties duomenys niekaip neapdirbami ir segmentavimo kreivė sudaroma tiesiogiai iš tam tikrų dangos būklės rodiklių.

Kumuliacinio skirtumo metodas (KS) (angl. *cumulative difference approach*) – anksčiausiai civilinės inžinerijos srityje taikomas metodas, kuomet . sudaroma duomenų seka, kurios kiekviena vertė apskaičiuojama taikant 1.2–1.3 formules. Pagal sudarytą duomenų seką braižoma segmentavimo kreivė, pagal kurią vizualiai nustatomi būdingi „pikai“. Praktiniais tikslais taikant KS metodą buvo įvestas apribojimas mažiausiam ruožo ilgiui – 300 m.

Absoliučių slenkančių vidutinių verčių skirtumų metodas (SV) (angl. *absolute differences in sliding mean values*) – metodas, kai kiekvienam matavimų taškui išvedamas gretimų reikšmių vidurkis. Taikant 1.4–1.5 formules iš „žalių“ duomenų sekos kiekvienam taškui apskaičiuojamas aritmetinis vidurkis, sumuojant pačio taško reikšmę, q reikšmių, einančių prieš skaičiuojamą tašką bei q reikšmių, einančių už skaičiuojamo taško. Apskaičiavus vidurkį kiekvienam taškui, gaunama nauja seka, pagal kurią sudaroma segmentavimo kreivė. Svarbu parinkti tokį q skaičių, kad gauta kreivė nebūtų pernelyg išlyginta (kai skaičius q yra per didelis) arba pernelyg laužyta, t. y., artima „žalių“ duomenų kreivei (kai skaičius q yra per mažas). Eksperimento metu buvo nustatyta, kad apskaičiuojant mobiliosios laboratorijos pamatuotų rodiklių (IRI, provėžų ir kt.) vidurkius, t. y., esant 10 m žingsniui tarp kreivės taškų, racionalus skaičius q turėtų būti nuo 15 iki 25. Apskaičiuojant FWD pamatuotų arba pagal juos apskaičiuotų rodiklių (D0, E0, SCI, BDI, BCI ir kt.) vidurkius, t. y., esant 75–150 m žingsniui tarp kreivės taškų, racionalus skaičius q turėtų būti nuo 1 iki 3. Reikia turėti omenyje, kad homogeninių ruožų ribos duomenų sekos pradžioje bei pabaigoje gali būti sunkiai

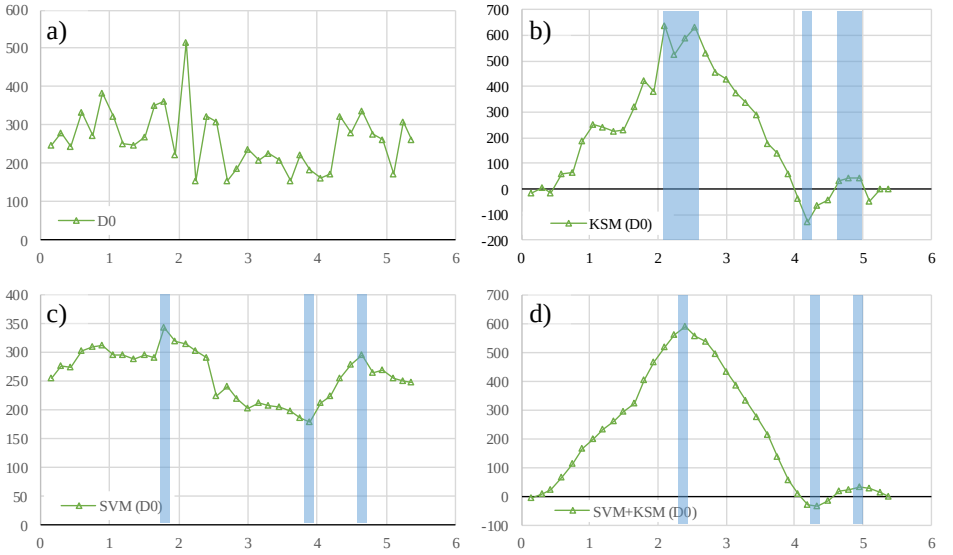
identifikuojamos, tačiau esant dideliam matavimų skaičiui tai neturės esminės įtakos.

Jungtinis metodas – kumuliacinio skirtumo metodo ir slenkančių vidurkių metodo kombinacija (SV+KS), kuri siūloma disertacijoje. Metodo esmė – visų pirma pagal SV metodą sudaryti suvidurkintų reikšmių seką, kurią vėliau panaudoti kaip įvesties duomenis KS metode.

Pagrindinė problema, atliekant segmentavimą yra ta, kad tam tikrose kreivėse gali būti sudėtinga įžvelgti tendencijas. Tai gali būti nuo per didelių lokalinių svyravimų tarp sekančių matavimų arba dėl vieno matavimo „iššokimo“ esant trumpam gatvės ruožui, kuriame buvo užregistruotas ekstremalus parametras. Segmentavimo metodo parinkimas pirmiausia priklauso nuo duomenų sekos. Gali būti, kad nereikės taikyti jokių metodų, ir „žalių“ duomenų, kreivėje matysis ribos ir tendencijos. Toks variantas yra tiksliausias, kadangi duomenys nėra niekaip modifikuojami ar iškreipiami, tačiau yra maža tikimybė gauti būtent tokią duomenų seką.

3.1 paveiksle pavaizduotos keturiais metodais sudarytos segmentavimo kreivės. Visos kreivės sudarytos pagal tuos pačius pradinius duomenis. Palyginimui paimti Savanorių pr. K1 eismo juostoje 2017 metais krintančio svorio deflektometru pamatuotų centrinio daviklio įlinkių (D0) duomenys. 3.1 paveiksle a) dalyje pavaizduota išmatuotų „žalių“ įlinkių kreivė. Kreivė pasižymi dideliu gretimų duomenų svyravimu. Analizuojant šią kreivę sudėtinga nustatyti homogeninių ruožų ribas. 3.1 paveiksle b) dalyje pavaizduota kumuliacinio skirtumo metodu (KS) sudaryta įlinkių kreivė. Joje galima įžvelgti keletą pikų: pirmasis, ties 2,100–2,550 km, antrasis, ties 4,200 km ir tikėtina trečiasis, ties 4,650–4,950 km. 3.1 paveiksle c) dalyje pavaizduota slenkančių vidurkių metodu (SV) sudaryta kreivė. Kiekvienas kreivės taškas sudarytas, priimant $q = 2$, t. y., išvedant vidurkį penkioms reikšmėms. Šioje kreivėje įžvelgiami keli pikai: ties 1,796 km, 3,900 km bei 4,650 km. KS ir SV metodais įžvelgiami pikai nėra visiškai identiški, bet yra gana artimai išsidėstę ir bendras jų skaičius yra toks pats. Jungtiniu metodu (KS+SV) sudaryta kreivė pavaizduota 3.1 paveiksle d) dalyje. Šioje kreivėje reikšmių svyravimas visiškai eliminuojamas ir pikai yra lengvai identifikuojami, nors ir galima ± 1–2 matavimo taškų paklaida: ties 2,400 km, 4,340 km ir 4,950 km.

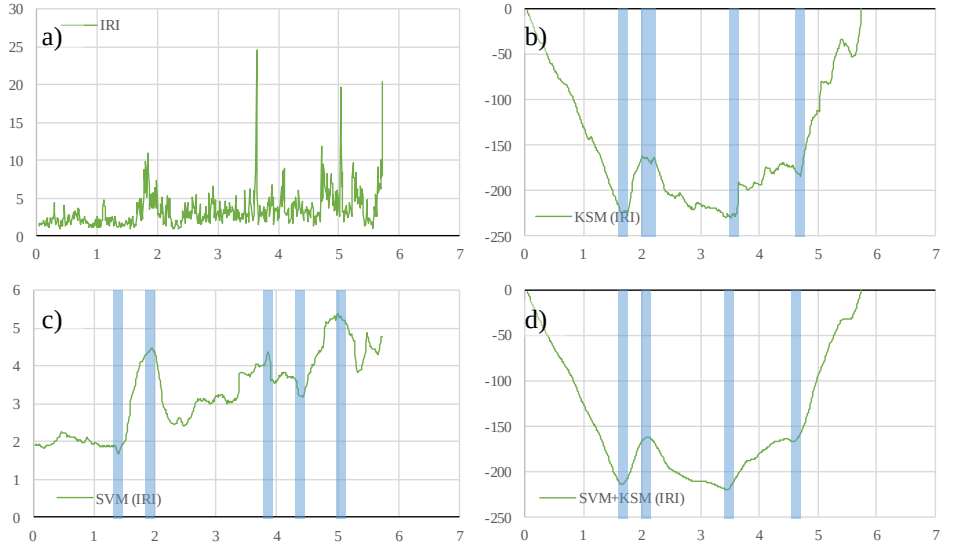
Išnagrinėtame pavyzdyje duomenų seka yra sudaryta iš 36 reikšmių – sąlyginai nedidelio kiekio. Kai atstumas tarp pamatuotų taškų yra gana didelis (šiuo atveju apie 150 m), jungtiniu segmentavimo metodu sudarytoje kreivėje yra lengviausia įžvelgti ruožų ribas (pikus).



3.1 pav. Keturiais metodais sudarytų segmentavimo kreivių palyginimas: a) „žali“ duomenys (D0); b) kumuliacinio skirtumo metodas (KS); c) slenkančių vidurkių metodas (SV); d) kombinuotas KS ir SV metodas

Fig. 3.1. Comparison of segmentation curves composed by different methods based on deflection (D0) data: a) raw data; b) cumulative difference approach (CD); c) sliding mean value approach (SMV); d) combined SMV and CD approach

Siekiant patikrinti segmentavimo metodų pritaikymą duomenų sekai su tankiai išsidėsčiusiais matavimo taškais, palyginimui paimti nelygumo (IRI) duomenys toje pačioje gatvėje ir eismo juostoje. Iš viso duomenų sekoje yra 570 taškų, tarp kurių atstumas yra po 10 m. 3.2 paveiksle pavaizduotos keturiais metodais sudarytos segmentavimo kreivės. Šio paveikslo a) dalyje pateikta „žalių“ nelygumo duomenų kreivė. Jau net šioje kreivėje įmanoma įžvelgti tam tikras tendencijas, tačiau tiksliai nustatyti homogeninių ruožų ribas vis dar sudėtinga. 3.2 paveiksle c) dalyje pavaizduota slenkančių vidurkių metodu (SV) sudaryta kreivė. Kiekvienas kreivės taškas sudarytas, priimant q = 25, t. y., išvedant vidurkį 51 reikšmėms. Šioje kreivėje gana sudėtinga tiksliai nustatyti pikus dėl per didelio duomenų svyravimo. Norint gauti sklandesnę kreivę, galima būtų didinti skaičių q, apimant daugiau duomenų kiekvieno taško vidurkio išvedimui, tačiau šiuo atveju kreivės pikai pernelyg „apvalėja“. 3.2 paveiksle b) dalyje pavaizduota kumuliacinio skirtumo metodu (KS), o d) dalyje – jungtiniu metodu gautos kreivės. Abiem atvejais homogeninių ruožų ribos įžvelgiamos pakankamai lengvai ir sutampa kelių matavimo taškų tikslumu.



3.2 pav. Keturiais metodais sudarytų segmentavimo kreivių palyginimas: a) „žali“ duomenys (IRI); b) kumuliacinio skirtumo metodas (KS); c) slenkančių vidurkių metodas (SV); d) kombinuotas KS ir SV metodas

Fig. 3.2. Comparison of segmentation curves composed by different methods based on IRI data: a) raw data; b) cumulative difference approach (CD); c) sliding mean value approach (SMV); d) combined SMV and CD approach

Remiantis išnagrinėtais pavyzdžiais, galima daryti išvadą, jog kumuliacinio skirtumo metodas leidžia gana paprastai įžvelgti ruožų ribas, esant tankiai sudėliotai duomenų sekai. KS metodą kombinuojant su slenkančių vidurkių metodu ruožų ribos įžvelgiamos dar geriau, tame tarpe ir duomenų sekoje, kai matavimo taškai nutolę gana toli vienas nuo kito. Segmentavimas SV metodu gali pasirodyti komplikuotas, kadangi kreivėje dažnai būna skirtingo dydžio pikų ir sudėtinga įvertinti kuris iš jų yra reikšmingas, t. y., atvaizduoja kreivės atsaką į duomenų tendencijos pasikeitimą ir kuris atvaizduoja atsaką į momentinę ekstreminę reikšmę duomenų sekoje. Vertinant tyrimo metu surinktus duomenis pagal „žalių“ duomenų kreivę, įžvelgti ruožus praktiškai neįmanoma,tačiau toliau ši duomenų kreivė bus naudojama patikrinti segmentavimo tinkamumui.

3.1.2. Segmentavimo efektyvumo patikrinimas

Parinkus tinkamiausią segmentavimo metodą, jo efektyvumas turėtų būti pagrįstas. Norint tai patikrinti, dangos būklės rodikliai buvo segmentuoti pasirinktu jungtiniu (SV+KS) metodu: IRI, D0, SCI300, BDI, Ev2, BI_L ir kt.

Renkantis gatvės ruožą, kuriam galėtų būti atliktas efektyvumo patikrinimas, buvo iškelti tokie reikalavimai:

- ruožo ilgis turėtų būti pakankamai ilgas (>3 km), kad matavimo taškų skaičiaus užtektų nustatyti bent keletui homogeninių ruožų;
- gatvėje neturėtų būti sankryžų, ties kuriomis ženkliai pasikeičia eismo srautas, sudėtis ar gatvės konfigūracija;
- gatvės danga neturėjo būti remontuota laikotarpyje tarp dviejų matavimų (tarp 2017 ir 2019 metų).

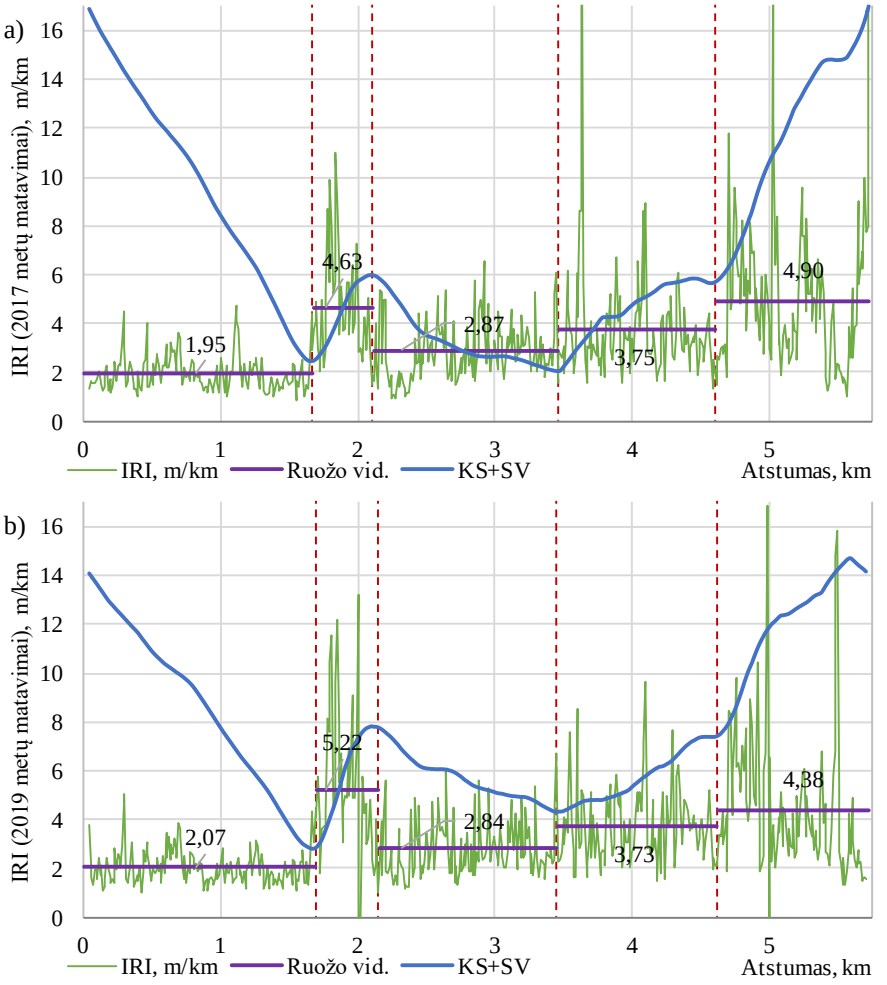
Šiuos kriterijus tenkino Savanorių pr. ruožas (Nr. 9). Ruože atliktų matavimų pagrindu buvo nustatyti homogeniniai ruožai bei kiekvienam iš jų apskaičiuoti vidurkiai. Kadangi dviejų atliktų matavimų 2017 ir 2019 metais duomenys yra nepriklausomi, priimama, jog segmentavimo efektyvumas bus įrodytas, jei rezultatai tenkins tokias sąlygas:

- toje pačioje eismo juostoje to paties dangos būklės rodiklio pagrindu nustatytos homogeninių ruožų ribos pagal 2017 ir 2019 metų matavimus sutampa,
- nustatytų homogeninių ruožų rodiklių vidutinės vertės bus panašios, lyginant 2017 ir 2019 metų matavimų duomenis;
- dviejų gretimų nustatytų homogeninių ruožų rodiklių vidutinės vertės nebus artimos.

3.3 paveiksle pavaizduotos Savanorių pr. K1 eismo juostos 2017 ir 2019 metų matavimų IRI duomenų pagrindu sudarytos segmentavimo kreivės ir nustatyti homogeniniai ruožai. 3.1 lentelėje pateikiamas ruožų ribų skirtumas bei ruožų vidutinės IRI reikšmės pokytis. Iš viso išskirti 5 ruožai, kurių ribos sutampa 0,01–0,04 km (1–4 taškų skirtumu). Dėl IRI duomenų tankumo (10 m atstumas tarp matavimo taškų) segmentavimo kreivė yra gana nuosekli. Vietiniai svyravimai nedaro daug įtakos rezultatui. Ruožų vidutinės IRI reikšmės skyrėsi nuo 0,5 % iki 12,6 %. Tokius skirtumus gali lemti dangos remontas lopais (tai nėra registruojama), matavimų paklaidos ir lokaliniai netikslumai.

3.1 lentelė. Savanorių pr. K1 eismo juostos 2017 ir 2019 metų matavimų IRI duomenų pagrindu ruožų ribų skirtumas bei ruožų vidutinės IRI reikšmės pokytis
Table 3.1. Savanoriu ave. K1 lane homogenous section boundary and average change based on 2017 and 2019 IRI measurement data

Parametro pokytis	1 ruožo vid.	1/2 ruožo riba	2 ruožo vid.	2/3 ruožo riba	3 ruožo vid.	3/4 ruožo riba	4 ruožo vid.	4/5 ruožo riba	5 ruožo vid.
Atstumas, km		0,02		0,04		0,01		0,01	
IRI, %	6,3 %		12,6 %		–1,2 %		–0,5 %		–10,6 %

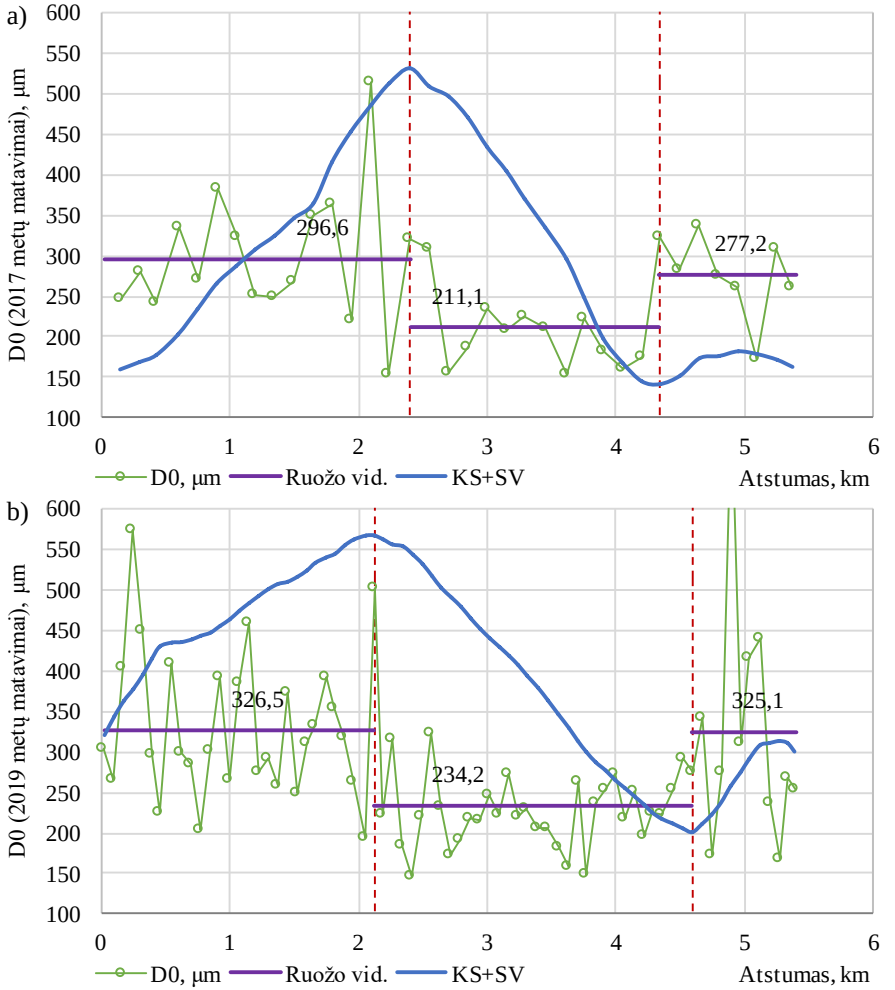


3.3 pav. Savanorių pr. K1 eismo juostos IRI duomenų pagrindu nustatyti homogeniniai ruožai: a) 2017 metų duomenys; b) 2019 metų duomenys

Fig. 3.3. Savanoriu ave. K1 lane homogenous sections based on IRI data obtained during: a) 2017; b) 2019 tests

3.4 paveiksle pavaizduotos Savanorių pr. K1 eismo juostos 2017 ir 2019 metų matavimų FWD įlinkių (D0) duomenų pagrindu sudarytos segmentavimo kreivės ir nustatyti homogeniniai ruožai. 3.2 lentelėje pateikiamas ruožų ribų skirtumas bei ruožų vidutinės IRI reikšmės pokytis. Iš viso išskirti 3 ruožai, kurių ribos sutampa 0,255–0,280 km (2–4 taškų skirtumu). Dėl D0 duomenų mažo tankio (75–150 m atstumas tarp matavimo taškų) segmentavimo kreivė svyruoja

pakankamai daug, tačiau ruožų ribos sutapo pakankamai tiksliai. Ruožų vidutinės D0 reikšmės skyrėsi nuo 10,1 % iki 17,3 %. Tokius skirtumus gali lemti natūralus laikomosios gebos pablogėjimas, matavimų paklaidos ir lokaliniai netikslumai.



3.4 pav. Savanorių pr. K1 eismo juostos matavimų dangos įlinkių (D0) duomenų pagrindu nustatyti homogeniniai ruožai: a) 2017 metų duomenys; b) 2019 metų duomenys

Fig. 3.4. Savanoriu ave. K1 lane homogenous sections based on deflection (D0) data obtained during: a) 2017; b) 2019 tests

3.2 lentelė. Savanorių pr. K1 eismo juostos 2017 ir 2019 metų matavimų įlinkių (D0) duomenų pagrindu ruožų ribų skirtumas bei ruožų vidutinės IRI reikšmės pokytis
Table 3.2. Savanoriu ave. K1 lane homogenous section boundary and average change based on 2017 and 2019 deflection (D0) measurement data

Parametro pokytis	1 ruožo vid.	1/2 ruožo riba	2 ruožo vid.	2/3 ruožo riba	3 ruožo vid.
Atstumas, km		0,280		0,255	
IRI, %	10,1 %		10,9 %		17,3 %

Remiantis pavyzdžiais, galima teigti, jog esant tankiai išsidėsčiusiems duomenims, segmentavimo efektyvumas yra aukštas, nes visais išnagrinėtais pavyzdžiais homogeniniai ruožai sutapo iki 0,100 km arba 10 matavimo taškų tikslumu. Tačiau parenkant ruožus būtina stebėti ir pradinių duomenų kreivę, kadangi tam tikrais atvejais, trumpose atkarpose (pvz., sankryžos zonoje) gali ženkliai pakisti ir atsispindėti vienų metų matavimo duomenų kreivėje, bet ne kitų. Šiuo atveju reikėtų įvesti papildomas ruožų ribas.

Segmentavimo objektu gali būti parenkamas bet koks išmatuotas techninis parametras arba apskaičiuotas kombinuotas / suminis būklės indeksas. Segmentavimo objekto parinkimas, t. y. nustatymas, pagal kurį dangos būklės rodiklį arba įlinkį yra tikslinga segmentuoti, priklauso nuo planuojamų priežiūros ir remonto darbų pobūdžio. Jeigu tam tikroje gatvėje dar nei karto nebuvo ištirta laikomoji geba, rekomenduotina ją nustatyti ir suskirstyti ruožą pagal vieną iš galimų laikomosios gebos rodiklių (įlinkius, SCI, BDI, BCI ir kt.) arba pagal kombinuotą dangos būklės indeksą, kuriame būtų įvertinta laikomoji geba (KBI_str, DBI ir kt.). Šiuo atveju homogeninius ruožus galima būtų sudaryti racionaliau (žr. 3.3 poskyrį). Taip pat segmentavimas, įvertinant laikomąją gebą, rekomenduojamas planuojant rekonstravimo darbus. Paprastajam viršutinių sluoksnių remontui planuoti užtektų dangos paviršiaus būklės rodiklių, tokių kaip IRI, provėžos arba kombinuoti, pažaidas vertinantys, dangos būklės indeksai.

Lyginant IRI (ar kitą RST28 laboratorijos pamatuotą rodiklį) su įlinkiais (ar kitais pagal FWD duomenis apskaičiuotais rodikliais) homogeninės kreivės vaizdo ir matavimo tarp taškų atžvilgiu galima teigti, jog disertacijoje pasirinktas 10 m IRI matavimo žingsnis yra pakankamas homogeninių ruožų sudarymui. FWD pirmam matavimų etapui parinktas 150 m žingsnis buvo per didelis, todėl antrame etape matavimų žingsnis buvo du kartus sumažintas – iki 75 m. Tačiau atlikus rezultatų analizę, nustatyta, kad ir šis žingsnis per didelis. Esant retai išsidėsčiusiems duomenims segmentavimas negarantuojamas, nors ir įmanomas. Apie 20 % išnagrinėtų pavyzdžių parodė visiškai skirtingus homogeninius ruožus. Neatlikus papildomų tyrimų sudėtinga nustatyti koks FWD matavimų žingsnis būtų racionaliausias. Kiekviena valdančioji organizacija matavimų žingsnį turėtų rinktis pagal savo galimybes, kadangi tankesni tyrimai didina kaštus ir prailgina

matavimų laiką. Tačiau, remiantis Lietuvoje atliekamais FWD matavimų pagrįstais tyrimais, galima teigti, jog šis žingsnis turėtų būti ne mažesnis nei 25 m.

3.1.3. Automatizuotas segmentavimo algoritmas

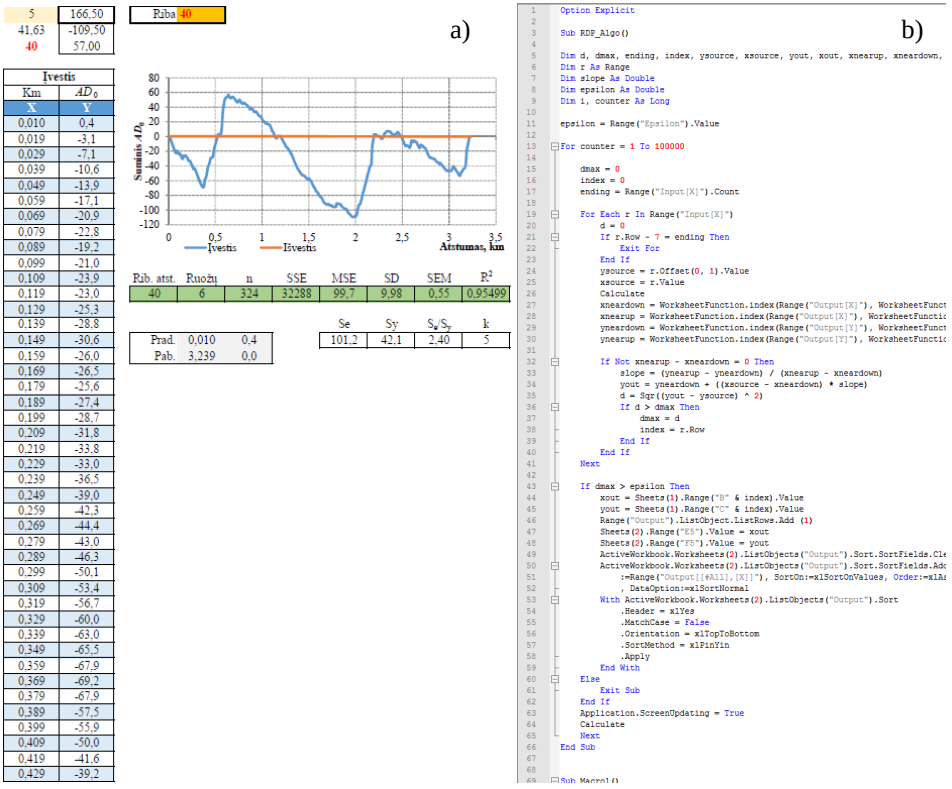
Segmentavimas vizualiai pagal kreivę yra gana tikslus būdas nustatyti ruožų ribas. Tačiau kai tą patį reikia pakartoti dideliam kelių ar gatvių tinklui, pagal įvairius dangos būklės rodiklius, segmentavimas gali užtrukti nemažai laiko. Be to, krintančio svorio deflektometro įlinkių duomenys, remiantis atliktu tyrimu, ženkliai svyruoja, todėl vizualiai atskirti homogeninius ruožus iš gauto grafiko gali būti sudėtinga. Todėl, siekiant supaprastinti ir automatizuoti procesą, turint kumuliacinio skirtumo metodu arba slenkančių vidurkių metodu sudarytą kreivę (AD_0), galima taikyti skaidymo-sujungimo algoritmą (angl. *split-and-merge*), dar vadinamą Ramer–Douglas–Peucker (RDP) algoritmu. Algoritmo skaičiavimai gali būti atliekami rankiniu būdu, vizualiai arba naudojantis kompiuterinėmis skaičiuoklėmis ir programėlėmis.

Siekiant palengvinti ir automatizuoti gatvių ruožų segmentavimo procesą pagal gatvių dangos būklę, buvo nuspręsta parengti automatizuotą skaičiuoklę. Ši skaičiuoklė sudaryta Microsoft Excel ir programavimo kalbos Visual Basic pagalba. Automatizuotos segmentavimo skaičiuoklės pagrindinis langas bei programinis kodas pavaizduotas 3.5 paveiksle.

Automatiškai parenkamas ribinis atstumas tarp pradinės kreivės bei išvesties tiesės, tačiau, esant poreikiui, šį atstumą galima pakoreguoti. Skaičiuoklės pagrindiniame lange įkeliami IRI, įlinkių, būklės indeksų ar kitų parametrų duomenys, iš karto matomas grafikas su pradine kreive bei išvesties tiese.

Paspaudus mygtuką „Skaičiuoti“ programa automatiškai parenka homogeninių ruožų ribas bei apskaičiuoja pagrindinius statistinius parametrus segmentavimo tikslumui įvertinti. Toliau aprašomi pritaikyto algoritmo Microsoft Excel ir programavimo kalbos Visual Basic pagalba sudarytoje programėlėje pagrindiniai žingsniai:

1 žingsnis. Pasirinkto metodo pagalba sudaryta segmentavimo (įvesties) kreivė pateikiama grafike. Išlyginamąją (išvesties) kreivę algoritmo pradžioje sudaro viena tiesė, jungianti įvesties kreivės pirmąjį ir paskutinį taškus. Paskutiniame taške y-ašies vertė paprastai lygi 0. Šiame žingsnyje prieš paleidžiant algoritmą turi būti įvedamas rankiniu būdu arba iš anksto apskaičiuotas skaičius ε – ribinis atstumas tarp įvesties ir išvesties kreivių. 1 žingsnio iliustracija pateikta 3.6 paveiksle.



5	166,50
41,63	-109,50
40	57,00

Įvestis	
Km	AD_0
X	Y
0,010	0,4
0,019	-3,1
0,029	-7,1
0,039	-10,6
0,049	-13,9
0,059	-17,1
0,069	-20,9
0,079	-22,8
0,089	-19,2
0,099	-21,0
0,109	-23,9
0,119	-23,0
0,129	-25,3
0,139	-28,8
0,149	-30,6
0,159	-26,0
0,169	-26,5
0,179	-25,6
0,189	-27,4
0,199	-28,7
0,209	-31,8
0,219	-33,8
0,229	-33,0
0,239	-36,5
0,249	-39,0
0,259	-42,3
0,269	-44,4
0,279	-43,0
0,289	-46,3
0,299	-50,1
0,309	-53,4
0,319	-56,7
0,329	-60,0
0,339	-63,0
0,349	-65,5
0,359	-67,9
0,369	-69,2
0,379	-67,9
0,389	-57,5
0,399	-55,9
0,409	-50,0
0,419	-41,6
0,429	-39,2

Rib. atst.	Ruožų	n	SSE	MSE	SD	SEM	R^2
40	6	324	32288	99,7	9,98	0,55	0,95499

Prad.	0,010	0,4
Pab.	3,239	0,0

Se	Sy	S_e/S_y	k
101,2	42,1	2,40	5

```
Option Explicit

Sub RDP_Algo()

Dim d, dmax, ending, index, ysource, xsource, yout, xout, xnearup, xneardown,
Dim r As Range
Dim slope As Double
Dim epsilon As Double
Dim i, counter As Long

epsilon = Range("Epsilon").Value

For counter = 1 To 100000

    dmax = 0
    index = 0
    ending = Range("Input[X]").Count

    For Each r In Range("Input[X]")
        d = 0
        If r.Row - 7 = ending Then
            Exit For
        End If
        ysource = r.Offset(0, 1).Value
        xsource = r.Value
        Calculate
        xneardown = WorksheetFunction.index(Range("Output[X]"), WorksheetFunct
        xnearup = WorksheetFunction.index(Range("Output[X]"), WorksheetFunctio
        yneardown = WorksheetFunction.index(Range("Output[Y]"), WorksheetFunct
        ynearup = WorksheetFunction.index(Range("Output[Y]"), WorksheetFunctio

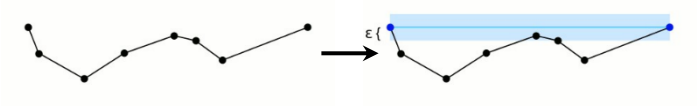
        If Not xnearup - xneardown = 0 Then
            slope = (ynearup - yneardown) / (xnearup - xneardown)
            yout = yneardown + ((xsource - xneardown) * slope)
            d = Sqr((yout - ysource) ^ 2)
            If d > dmax Then
                dmax = d
                index = r.Row
            End If
        End If
    Next

    If dmax > epsilon Then
        xout = Sheets(1).Range("B" & index).Value
        yout = Sheets(1).Range("C" & index).Value
        Range("Output").ListObject.ListRows.Add (1)
        Sheets(2).Range("E5").Value = xout
        Sheets(2).Range("F5").Value = yout
        ActiveWorkbook.Worksheets(2).ListObjects("Output").Sort.SortFields.Cle
        ActiveWorkbook.Worksheets(2).ListObjects("Output").Sort.SortFields.Add
            :=Range("Output[[#All],[X]]"), SortOn:=xlSortOnValues, Order:=xlAs
            , DataOption:=xlSortNormal
        With ActiveWorkbook.Worksheets(2).ListObjects("Output").Sort
            .Header = xlYes
            .MatchCase = False
            .Orientation = xlTopToBottom
            .SortMethod = xlPinYin
            .Apply
        End With
    Else
        Exit Sub
    End If
    Application.ScreenUpdating = True
    Calculate
    Next
End Sub

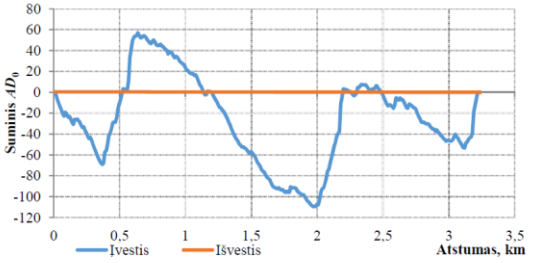
Sub Macro1()
```

3.5 pav. Automatizuotos segmentavimo skaičiuoklės elementai: a) pagrindinis langas; b) programinio kodo ištrauka

Fig. 3.5. Automatic segmentation tool elements: a) main window; b) code fragment



Įvestis	
Km	AD_0
X	Y
0,010	0,4
0,019	-3,1
0,029	-7,1
0,039	-10,6
0,049	-13,9
0,059	-17,1
0,069	-20,9
0,079	-22,8
0,089	-19,2

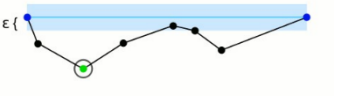


Išvestis		
Taško Nr.	Km	AD_0
	X	Y
1	0,010	0,4
2	3,239	0,0
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		

3.6 pav. 1 segmentavimo algoritmo žingsnis

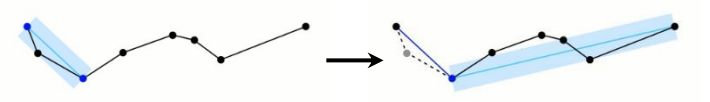
Fig. 3.6. 1st step of segmentation algorithm

2 žingsnis. Paleidus VBA kalba parašytą programėlę, jos algoritmas pradeda rekursyviai dalinti įvesties kreivę į atkarpas, kurios bus išvesties kreivės tarpiniais taškais. Pirmoje iteracijoje nuosekliai, pradedant nuo pirmojo taško, ieškomas didžiausias vertikalus atstumas tarp įvesties ir išvesties kreivių, t. y., skirtumas tarp abiejų kreivių y-reikšmių tame pačiame taške. 2 žingsnio iliustracija pateikta 3.7 paveiksle.



3.7 pav. 2 segmentavimo algoritmo žingsnis
Fig. 3.7. 2nd step of segmentation algorithm

3 žingsnis. Suradus tokį tašką, atstumo skaitinė vertė lyginama su 1 žingsnyje įvestą ε reikšme. Jei atstumas yra mažesnis už ribinę reikšmę, iteracija su šia išvesties kreive (segmentu) baigiama. Jei atstumas yra didesnis – šiame taške išvesties kreivė sudalinama į 2 segmentus, pirmoji iteracija baigiama. 3 žingsnio iliustracija pateikta 3.8 paveiksle.



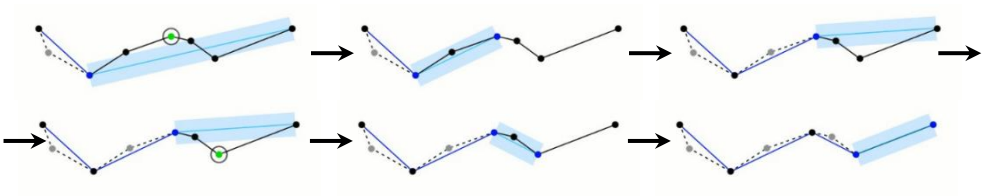
3.8 pav. 3 segmentavimo algoritmo žingsnis
Fig. 3.8. 3rd step of segmentation algorithm

4 žingsnis. Pradedama antroji iteracija. Dabar kiekvienas išvesties kreivės segmentas apdorojamas nepriklausomai. 2 ir 3 žingsniai pakartojami su kiekviena kreive. 4 žingsnio iliustracija pateikta 3.9 paveiksle.



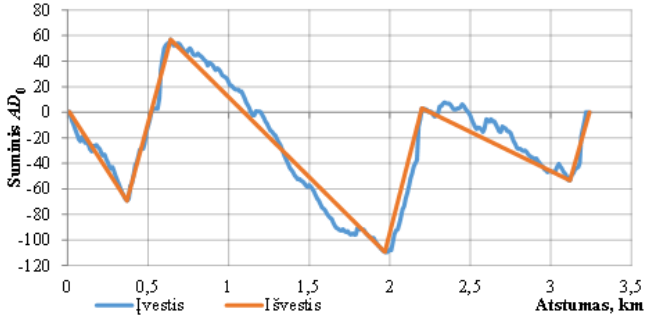
3.9 pav. 4 segmentavimo algoritmo žingsnis
Fig. 3.9. 4th step of segmentation algorithm

5 žingsnis. Algoritmas rekursyviai kartojamas kol joks išvesties kreivės segmentas daugiau neturi būti sudalintas, t. y., kol nei viename taške atstumas tarp įvesties ir išvesties kreivių nebus didesnis už ribinę reikšmę ε. 5 žingsnio iliustracija pateikta 3.10 paveiksle.



3.10 pav. 5 segmentavimo algoritmo žingsnis
Fig. 3.10. 5th step of segmentation algorithm

6 žingsnis. VBA programėlei baigus darbą, išvesties kreivės lūžio taškai paženklina homogeninių ruožų ribas. Ruožų ribų piketai surašomi į rezultatų lentelę. Jei lentelėje yra *n* reikšmių, tai reiškia, jog visame ruože nustatyta (n – 1) homogeninių ruožų. Ištrauka su rezultatais iš skaičiuoklės pateikta 3.11 paveiksle.



Rib. atst.	Ruožų	n	SSE	MSE	SD	SEM	R^2
40	6	324	32288	99,7	9,98	0,55	0,95499

Išvestis		
Taško Nr.	Km	AD_0
	X	Y
1	0,010	0,4
2	0,369	-69,2
3	0,639	57,0
4	1,969	-109,5
5	2,199	3,2
6	3,119	-53,4
7	3,239	0,0
8		
9		
10		
11		
12		

3.11 pav. Ištrauka iš segmentavimo skaičiuoklės rezultatų lango
Fig. 3.11. Automatic segmentation tool results fragment

Automatizuota segmentavimo skaičiuoklė pateikiama C priede. Šios skaičiuoklės pagalba vieno ruožo vieno būklės rodiklio segmentavimo laikas sutrumpėja nuo ~2 min. iki ~10 sek., lyginant su rankiniu-vizualiniu būdu. Taip pat mažinama žmogiškojo faktoriaus įtaka. Tačiau reikia turėti omenyje, jog net naudojant automatizuotą algoritmą, vis tiek vertėtų patikrinti kiekvieną grafiką, ypač jei parinkta ribinė vertė ε yra netinkama konkrečiam pavyzdžiui. Šiuo atveju ribinę vertę reikėtų didinti arba mažinti ir paleisti skaičiavimą iš naujo.

Segmentavimas gali būti atliekamas vienu iš pasiūlytų metodų, kiekvieną metodą pritaikius įvairiems parametrams. Segmentavimo objektu buvo parinkti tokie rodikliai: IRI, provėžos gylis, įlinkis (d0), SCI300, BDI, BCI1200, KBI_str (be laikomosios gebos) bei KBI_str (su laikomąja geba). Kiekvienas iš šių parametrų buvo segmentuotas kiekvienu iš keturių metodų gauta kreive RDP

algoritmo principu. Įvesties duomenys buvo 3.1.1. skyrelyje išnagrinėto Savanorių pr. ruožo. Kiekvieno metodo ir parametro segmentavimo patogumas ir tikslumas įvertinamas apibrėžtumo koeficientu R^2 (angl. *R squared*). Šis koeficientas parodo, kuri atsitiktinio dydžio Y sklaidos dalis apie vidurkį paaiškinama tiesine regresija. Kuo R^2 artimesnis vienetui, tuo didesnė dispersijos dalis paaiškinama tiesine regresija, t. y., tuo geriau regresijos lygtis aprašo kintamąjį Y. Šiuo atveju sklaidos X ir Y yra įvesties kreivės taškai ir išvesties kreivės taškai. Todėl kuo R^2 artimesnis vienetui, tuo tikslesnis ir patogesnis ruožų parinkimas šiuo metodu. Analizės rezultatai pateikti 3.3 lentelėje.

Kadangi RDP algoritmo rezultatas priklauso nuo įvestos ribinės reikšmės, automatiškai apskaičiuotą reikšmę kartais reikia patikslinti į didžiąją ar mažąją pusę, kai vizualiai iš kreivės matoma, jog algoritmas sukuria per daug ruožų arba atvirkščiai – kai kurias ribas praleidžia. Tačiau tam tikrais atvejais neįmanoma parinkti tinkamos ribinės reikšmės, pavyzdžiui, segmentuojant „žalius“ duomenis. Iš lentelės matyti, jog tik IRI ir provėžos atvejais pavyko išskirti homogeninių ruožų ribas pagal „žalius“ duomenis. Kitais atvejais dėl didelių duomenų svyravimų nebuvo galima įžiūrėti nei vieno homogeninio ruožo. Ir netgi IRI ir provėžos atvejais apibrėžtumo koeficientai R^2 buvo mažiausi iš viso eksperimento – 0,756 ir 0,735 atitinkamai. Taip pat pakankamai mažą koreliaciją parodė ir slenkančių vidurkių metodas – R^2 svyravo nuo 0,792 iki 0,953, vidutinis $R^2 = 0{,}883$. O ruožų skaičius, priklausomai nuo parametro, svyravo nuo 3 iki 8. Kumuliacinio skirtumo (KS) metodas parodė gerą koreliaciją (vidutinis $R^2 = 0{,}936$), tačiau jungtinis slenkančių vidurkių ir kumuliacinio skirtumo metodas – dar geresnę (vidutinis $R^2 = 0{,}958$). Kadangi jungtinis metodas, tai yra patobulintas KS metodas, pastarojo nėra prasmės išskirti. Jungtiniu metodu gauti apibrėžtumo koeficientai R^2 svyravo nuo 0,822 iki 0,987. O ruožų skaičius, priklausomai nuo parametro, svyravo nuo 3 iki 5. Toks ruožų skaičius panašus 3.1.1. skyrelyje gautiems rezultatams. Taip pat apie segmentavimo patikimumą pasako tai, kad tos pačios rūšies parametrų homogeninių ruožų ribos buvo labai artimos, pavyzdžiui, laikomosios gebos rodikliai D0, SCI300, BDI bei BCI1200. Kiekvieno iš šių parametrų kreivę segmentavus jungtiniu metodu, nustatytos ruožų ribos glaudžiuose intervaluose – pirmoji, ties 1,75–2,05 km ir antroji, ties 4,25–4,55 km.

3.3 lentelė. Segmentavimas RDP algoritmo pagrindu
Table 3.3. Segmentation based on RDP algorithm

Hom. param.	Metodas*	Ruožų	R^2	Ruožų ribos vieta, km								
				1/2	2/3	3/4	4/5	5/6	6/7	7/8	8/9	9/10
IRI	Ž	6	0,756	1,55	1,85	2,25	4,65	4,75	–	–	–	–
	KS	4	0,934	1,65	2,05	3,95	–	–	–	–	–	–
	SV	6	0,955	1,35	1,85	2,35	4,45	4,75	–	–	–	–
	J	4	0,965	1,55	2,15	3,75	–	–	–	–	–	–
Provėža	Ž	6	0,735	1,55	1,95	2,25	3,45	3,65	–	–	–	–
	KS	2	0,834	2,35	–	–	–	–	–	–	–	–
	SV	3	0,876	3,25	3,75	–	–	–	–	–	–	–
	J	2	0,822	2,45	–	–	–	–	–	–	–	–
D0	Ž	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	KS	3	0,953	1,85	4,35	–	–	–	–	–	–	–
	SV	6	0,881	0,65	1,65	3,55	4,55	4,85	–	–	–	–
	J	3	0,983	**2,05**	**4,35**	–	–	–	–	–	–	–
SCI300	Ž	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	KS	3	0,947	2,25	4,25	–	–	–	–	–	–	–
	SV	3	0,829	3,65	4,85	–	–	–	–	–	–	–
	J	3	0,976	**2,05**	**4,25**	–	–	–	–	–	–	–
BDI	Ž	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	KS	3	0,950	1,95	4,25	–	–	–	–	–	–	–
	SV	6	0,892	0,65	1,65	2,55	3,65	4,85	–	–	–	–
	J	3	0,983	**2,05**	**4,35**	–	–	–	–	–	–	–
BCI1200	Ž	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	KS	3	0,957	1,75	4,45	–	–	–	–	–	–	–
	SV	5	0,792	0,65	1,05	3,45	4,55	–	–	–	–	–
	J	3	0,987	**1,75**	**4,55**	–	–	–	–	–	–	–
KBI_str (be LG)	Ž	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	KS	4	0,981	1,65	2,05	3,45	–	–	–	–	–	–
	SV	7	0,953	1,35	1,85	2,35	3,85	4,45	4,95	–	–	–
	J	3	0,978	1,65	3,45	–	–	–	–	–	–	–
KBI_str (su LG)	Ž	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	KS	7	0,933	0,25	1,65	2,25	3,55	4,65	4,95	–	–	–
	SV	8	0,882	1,45	1,95	2,25	3,25	3,85	4,45	4,95	–	
	J	5	0,973	1,55	2,15	3,55	4,55	–	–	–	–	–

* Ž – „žali“ duomenys; KS – kumuliacinio skirtumo metodas, SV – slenkančių vidurkių metodas, J – jungtinis metodas

3.2. Dangos būklės indeksų reikšmingumas

3.2.1. Bendro įverčių reikšmingumo nustatymas

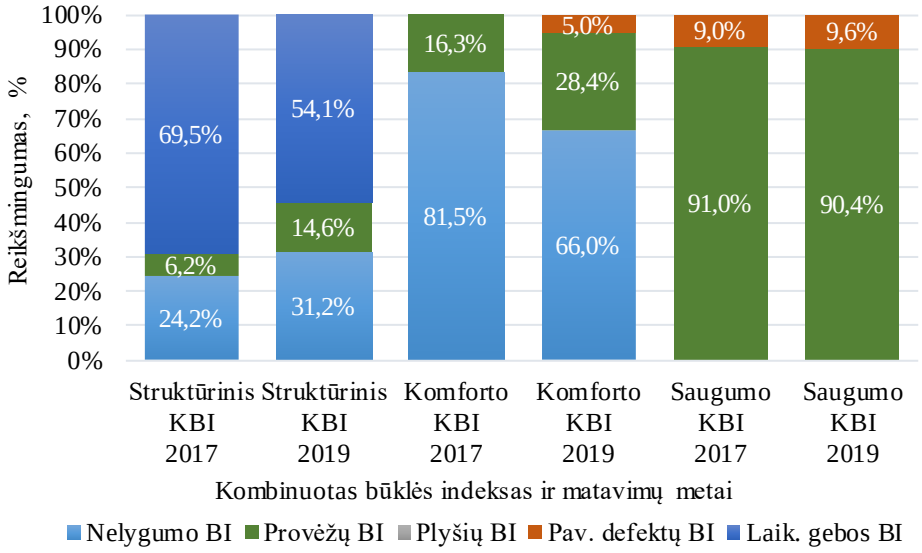
Dangos būklės įverčių reikšmingumas siejamas su kiekvieno indekso svoriniais koeficientais. Kuo tam tikras indeksas turi daugiau įtakos suminiam dangos būklės indeksui, tuo svorinis koeficientas yra didesnis (max 1,0). Svorinių koeficientų kiekvienam indeksui nustatymo procesas, įgyvendinant DVS miestų gatvėse, yra kruopštus ir daug tyrimo duomenų reikalaujantis procesas. Idealiausia svorinius koeficientus parinkti pagal viso gatvių tinklo matavimų rezultatus, skirstant gatves pagal kategoriją, eismo intensyvumą arba naudojant kitus klasifikatorius. Šiame darbe svoriniai koeficientai nustatomi pagal atlikto eksperimentinio tyrimo duomenis. Pateiktą metodą galima ir rekomenduotina taikyti didesniu mastu, tačiau gautas reikšmes galima laikyti pradiniu atskaitos tašku įdiegiant DVS miestų gatvių tinklo valdymui.

Indeksams apskaičiuoti taikoma 2 skyriuje pasirinkta dangos būklės vertinimo metodika pagal COST 354. Dangos būklės indekso (DBI) įverčiais laikomi kombinuoti dangos būklės indeksai (KBI). Apskaičiuojant DBI naudojami trys KBI – struktūrinis, saugumo bei komforto. Aplinkosaugos KBI nebuvo vertinamas dėl jo nustatymo sudėtingumo bei dėl pradinių duomenų stokos, kadangi nežinomas taršos lygis, triukšmo sklaida ir kiti parametrai. Pačioje COST metodikoje šis KBI yra įvardijamas kaip pagalbinis, naudojamas tik tam tikrais atvejais, kai būtina įvertinti poveikį aplinkai. Kiekvienas KBI apskaičiuojamas taikant 1.7–1.8 formules, priimant, kad kiekvieno iš sudedamųjų būklės indeksų (BI) svoriniai koeficientai yra lygus vienetui. Kiekvieno KBI sudėtis yra tokia:

- struktūrinis KBI susideda iš nelygumo, provėžų, plyšių ir laikomosios gebos BI;
- komforto KBI susideda iš nelygumo, provėžų, plyšių ir paviršiaus defektų BI;
- saugumo KBI susideda iš provėžų ir paviršiaus defektų BI.

Apskaičiuojant KBI, kiekvieno iš sudedamųjų BI reikšmingumas įvertinamas nustatant koks būklės indeksas buvo identifikuotas kaip svariausias. Įvertinimas atliekamas visoms eksperimentinio tyrimo metu pamatuotoms gatvėms, imant vidurkius 100 m ilgio ruožams pagal 2017 ir 2019 metų duomenis. BI reikšmingumas išreiškiamas procentais, t. y., kokioje dalyje visų 100 m ilgio ruožų šis indeksas buvo didžiausios vertės. Trijų KBI apskaičiuoti atskirų būklės indeksų reikšmingumai pagal matavimų metus pavaizduoti 3.12 paveiksle. Visų pirma, reikėtų pastebėti, jog nors plyšių BI buvo naudojamas skaičiuojant struktūrinį bei komforto KBI, jo apskaičiuotas reikšmingumas buvo mažiau nei

0,1 %, t. y., priklausomai nuo KBI ir matavimo metų, šis indeksas buvo svariausias nuo 1 iki 8 ruožų iš vidutiniškai apie 490 ruožų.

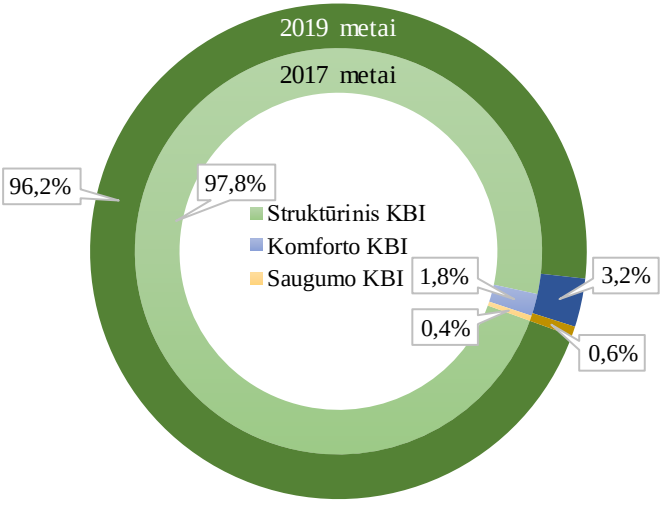


3.12 pav. Atskirų BI reikšmingumai pagal metus apskaičiuoti kiekvienam KBI
Fig. 3.12. Significance of each PI calculated for each CPI

Iš 3.12 paveikslo rezultatų taip pat galima įžvelgti, kad laikomosios gebos BI buvo reikšmingiausias struktūriniame KBI – 61,9 % vidutiniškai (arba 69,5 % ir 54,1 % 2017 ir 2019 metais atitinkamai), antras pagal reikšmingumą nelygumo BI – 27,7 % vidutiniškai (arba 24,2 % ir 31,2 % atitinkamai). Skaičiuojant komforto KBI reikšmingiausias buvo nelygumo BI – 73,8 % vidutiniškai (arba 81,5 % ir 66,0 % 2017 ir 2019 metais atitinkamai), antras pagal reikšmingumą provėžų BI – 22,3 % vidutiniškai (arba 16,3 % ir 28,4 %). Skaičiuojant saugumo KBI naudojami tik 2 komponentai ir reikšmingiausias iš jų buvo provėžų BI – 90,7 % vidutiniškai (arba 91,0 % ir 90,4 % 2017 ir 2019 metais atitinkamai), antras pagal reikšmingumą paviršiaus defektų BI – 9,3 % vidutiniškai (arba 9,0 % ir 9,6 %).

DBI apskaičiuojamas taikant 1.9–1.10 formules pagal jau minėtus tris KBI. Taip pat kiekvienam jų nustatomas reikšmingumas, apskaičiuojant didžiausią KBI kiekviename iš 100 m ruožų. Reikšmingumas taip pat išreiškiamas procentine dalimi. 3.13 paveiksle pavaizduoti apskaičiuoti DBI įverčių reikšmingumai. Išryškėja, jog esminis kombinuotas būklės indeksas yra struktūrinis. Jo reikšmė buvo didžiausia 97,0 % vidutiniškai (arba 97,8 % ir 96,2 % 2017 ir 2019 metais atitinkamai). Sekantis pagal reikšmingumą yra komforto KBI, jo

reikšmingumas – 2,5 % vidutiniškai (arba 1,8 % ir 3,2 % 2017 ir 2019 metais atitinkamai) ir mažiausiai reikšmingas – saugumo KBI, kurio reikšmingumas buvo 0,5 % vidutiniški (arba 0,4 % ir 0,6 % 2017 ir 2019 metais atitinkamai).



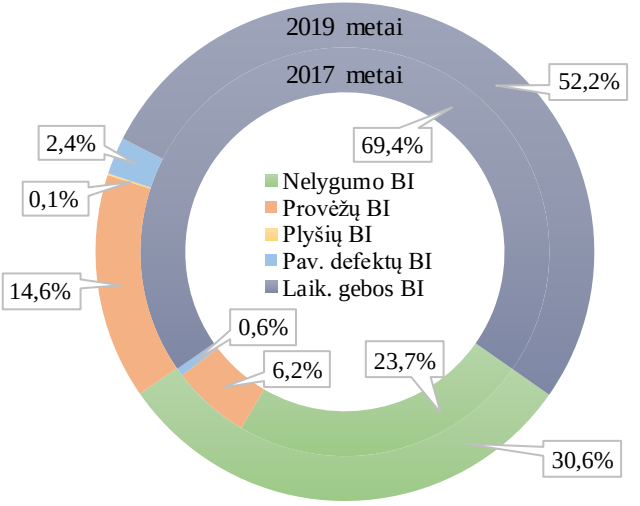
3.13 pav. DBI įverčių reikšmingumai
Fig. 3.13. GPI component significance

Taip pat papildomai buvo apskaičiuojama kiekvieno iš penkių nustatytų būklės indeksų įtaka suminiam būklės rodikliui (žr. 3.14 pav.). Daugiausiai įtakos turėjo būtent laikomosios gebos būklės indeksas (60,9 % vidutiniškai), antras pagal reikšmingumą – nelygumo BI (27,2 % vidutiniškai), trečias – provėžų BI (10,4 % vidutiniškai) ir mažiausiai įtakos turėjo plyšių bei paviršiaus defektų BI (vidutiniškai 1,5 % ir 0,1 % atitinkamai).

Pagal aukščiau aprašytus rezultatus galima teigti, jog laikomosios gebos parametras yra esminis įvertis gatvių dangos būklės nustatyme. Kadangi atliekant gatvių dangos būklės tyrimus dažnai laikomoji geba iš viso nematuojama, galima daryti prielaidą, kad nustatomi suminiai dangos būklės indeksai nėra objektyvūs ir, todėl, prastėja remonto bei priežiūros prioritetinio sąrašo sudarymo racionalumas.

Pagal gautus rezultatus sudaroma svorinių koeficientų lentelė (žr. 3.4 lentelė). Kadangi pasirinkta vertinimo metodika yra parengta COST 354 pagrindu, svoriniai koeficientai turėtų būti parenkami tarp mažiausios ir didžiausios rekomenduojamos reikšmės, nurodytos 1.10 lentelėje. Taip pat buvo laikomasi taisyklės, jei mažiausiai reikšmingo indekso svorinis koeficientas parinktas pagal nuostatose mažiausią rekomenduojamą reikšmę, sekančio pagal

reikšmingumą indekso svorinis koeficientas turėtų būti ne mažesnis už nustatytą prieš tai.



3.14 pav. Atskirų BI įtaka suminiam DBI
Fig. 3.14. Separate PI significance in GPI calculation

Nors eksperimentinio tyrimo metu ir nebuvo matuotas dangos sukibimas, paliekama galimybė jį vertinti pateiktoje metodikoje. Sukibimas yra gana svarbus parametras, apskaičiuojant saugumo koeficientą, kadangi miestų gatvėse yra aukštas eismo intensyvumas bei didelis pažeidžiamų eismo dalyvių judėjimas per gatves. Taip pat automobiliai dažnai juda arti vienas kito. Siekiant mažinti stabdymo kelią bei akvaplanavimo arba transporto priemonių „užsinešimo“ galimybę, svarbu užtikrinti gerą transporto priemonių ratų sukibimą su gatvių danga. Analogiškai, paliktas vidutinio profilio gylio būklės indeksas.

Reikia pabrėžti, jog nustatyti svoriniai koeficientai labiausiai tinkami eksperimentinio tyrimo metu išnagrinėtų gatvių ir jiems analogiškų gatvių būklei analizuoti. Pagal pateiktą algoritmą, turint didesnio masto ir platesnės laiko apimties duomenis, svorinius koeficientus galima būtų nustatyti tiksliau bei, esant poreikiui, atlikti klasifikaciją pagal gatvės kategoriją, eismo intensyvumą ar kt. Taip pat, tęsiant šiame darbe atliktus tyrimus, reikėtų papildomai išmatuoti ir dangos sukibimo parametrą bei vidutinį profilio gylį.

3.4 lentelė. Siūlomi būklės indeksų bei kombinuotų būklės indeksų reikšmingumai
Table 3.4. Proposed PI and CPI weights

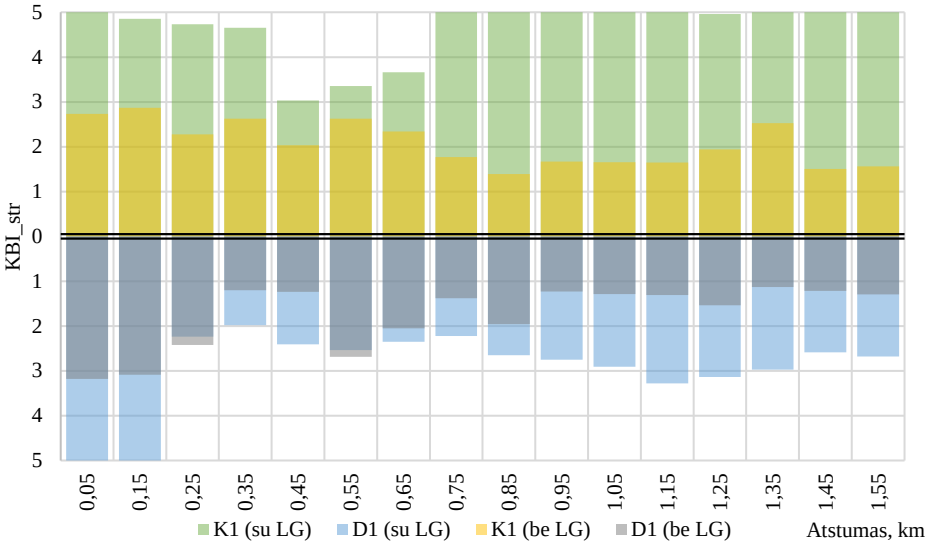
DBI	KBI svor. koef.	KBI	BI	BI svor. koef.
Dangos būklės indeksas	1	**Struktūrinis**	Nelygumo	0,8
			Provėžų	0,6
			Plyšių	0,8
			Laikomosios gebos	1
	0,7	**Komforto**	Nelygumo	1
			Provėžų	0,7
			Plyšių	0,5
			Paviršiaus defektų	0,6
			Vidutinio profilio gylio	0,4*
	0,5 (0,7*)	**Saugumo**	Provėžų	1
			Paviršiaus defektų	0,5
			Vidutinio profilio gylio	0,5*
			Sukibimo	1*

*Jei yra galimybė pamatuoti

3.2.2. Laikomosios gebos įtaka suminiam dangos būklės indeksui

Atsižvelgiant į praeito skyrelio rezultatus šiame skyrelyje analizuojama laikomosios gebos būklės indekso įtaka struktūriniam kombinuotam būklės indeksui. Siekiama parodyti koks skirtumas gaunamas jį vertinant ir jo nevertinant, t. y., kai laikomoji geba yra matuojama ir nematuojama.

Nustatyta, jog 11 iš 15 gatvių struktūrinis kombinuotas būklės indeksas buvo apskaičiuotas didesnis, vidutiniškai apie 1,5–2,0 karto, tuo atveju, kai vertinama laikomoji geba ir nevertinama laikomoji geba (žr. 3.15 pav.). 2-ose gatvėse, kuriose vyrauja žemiausias krovininio transporto eismas, laikomosios gebos rodiklis ženklios įtakos neturėjo (iki 10 %).



3.15 pav. Dariaus ir Girėno g. struktūrinio KBI palyginimas, vertinant laikomąją gebą ir jos nevertinant

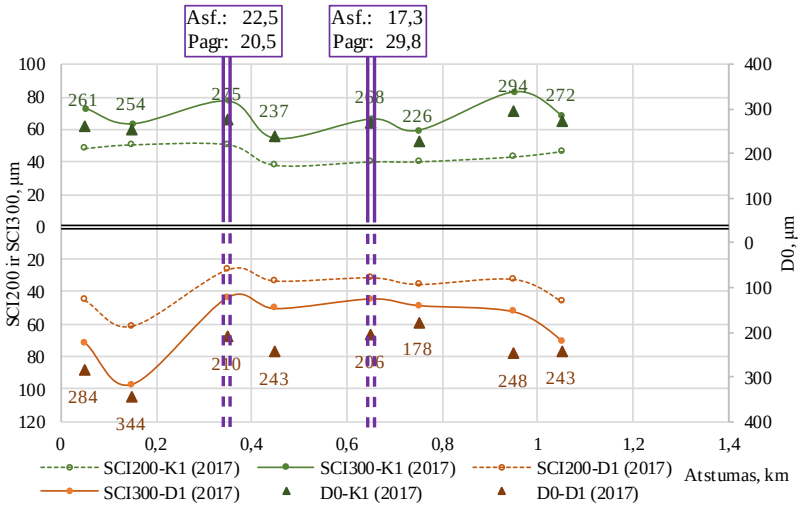
Fig. 3.15. Dariaus ir Girėno st. bearing capacity PI significance in structural CPI calculation

Aprašytoje COST metodikoje siūlomas laikomosios gebos techninis parametras SCI300. Teoriškai šis parametras turėtų tiksliausiai atspindėti asfalto sluoksnių laikomąją gebą, kai asfalto storis yra 30 cm. Tačiau tokio storio asfalto sluoksniai būna klojami gana retai, todėl tikslinga patikrinti ar SCI300 laikomosios gebos rodiklis atspindi realią situaciją gatvėse. Tam tikslui patikrinama koreliacija tarp SCI300 ir SCI200 parametrų. Daroma prielaida, kad jei koreliacija yra didelė, tuomet, vertinant dangos būklę, galima naudoti bet kurį iš rodiklių. Koreliacijai pagrįsti gali būti taikomas apibrėžtumo koeficientas R^2, kuris parodo kuri atsitiktinio dydžio Y sklaidos dalis aplink vidurkį apibūdinama tiesine regresija. Kuo R^2 artimesnis vienetui, tuo didesnė sklaidos dalis apibūdinama tiesine regresija. Šiuo atveju X sklaida bus laikomi SCI200 duomenys, o Y sklaida – SCI300 duomenys. 3.5 lentelėje pavaizduoti visų tirtų gatvių ruožų apibrėžties koeficientai R^2. Beveik visi ruožai parodė didelę koreliaciją – virš $R^2 = 0{,}866$. Vienintelis nukrypimas – Šeimyniškių g 2017 metų kairės gatvės pusės matavimai – šiuo atveju koreliacija yra tik $R^2 = 0{,}243$. Nepaisant to, galima teigti, jog surištųjų sluoksnių laikomajai gebai išreikšti ir palyginti gali būti naudojami abu SCI parametrai.

3.5 lentelė. Ištirtų gatvių ruožų apibrėžties koeficientai R^2 lyginant SCI200 ir SCI300
Table 3.5. R squared for all urban road sections comparing SCI200 to SCI300

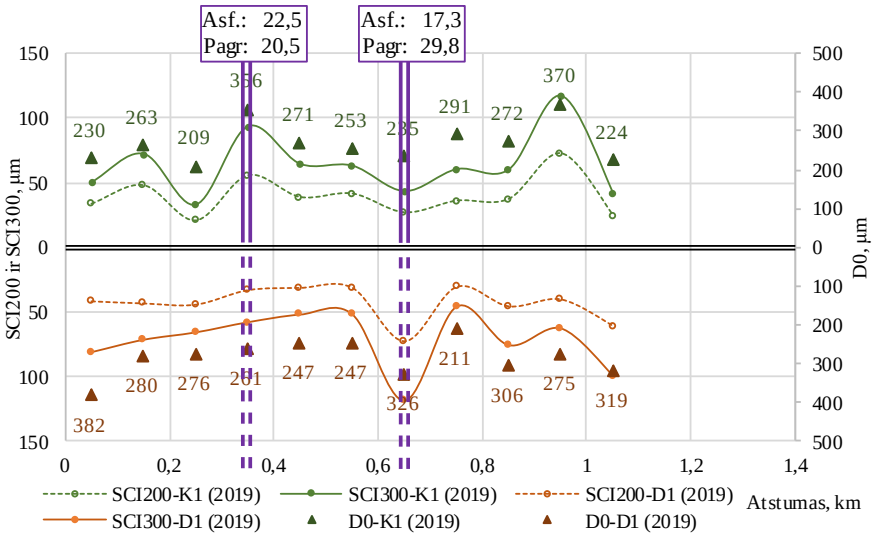
Nr.	Gatvė	Kairė pusė		Dešinė pusė	
		2017	2019	2017	2019
1	Dariaus ir Girėno g.	0,981	0,971	0,947	0,972
2	Dunojaus g.	0,869	0,968	0,985	0,976
3	Geležinkelio g.	0,866	0,913	0,967	0,956
4	Liepkalnio g.	0,992	0,985	0,986	0,974
5	Nemenčinės pl.	0,960	0,939	0,970	0,963
6	Olandų g.	0,972	0,977	0,918	0,986
7	Ozo g.	0,969	0,918	0,935	0,979
8	Pilaitės pr.	0,987	0,986	0,924	0,971
9	Savanorių pr.	0,969	0,973	0,977	0,979
10	Šeimyniškių g.	0,243	0,986	0,970	0,948
11	Stepono Batoro g.	0,978	0,981	0,979	0,953
12	T. Narbuto g.	0,980	0,951	0,955	0,982
13	Vilkpėdės g.	0,994	0,982	0,990	0,964
14	Žemaitės g.	0,931	0,977	0,976	0,993
15	Žirmūnų g.	0,948	0,983	0,979	0,981

Siekiant nustatyti kodėl Šeimyniškių g. buvo užfiksuotas ženklus nukrypimas, šioje gatvėje (kairėje jos pusėje) buvo atlikti papildomi dangos konstrukcijos matavimai. 0,350 km taške nustatytas 22,5 cm storio asfalto sluoksnis bei 20,5 pagrindo sluoksnis. 0,650 km taške nustatytas 17,3 cm asfalto sluoksnis bei 29,8 cm pagrindo sluoksnis. 3.16–3.17 paveiksluose pateiktas Šeimyniškių gatvės centrinio daviklio dangos įlinkio ir SCI parametrų palyginimas. Iš grafiko matoma, kad SCI200 kreivė beveik nesvyruoja ir neatkartoja SCI300 kreivės. Taip galėjo būti dėl esamo storo asfalto sluoksnio ties 0,350 km. Asfalto storis šioje vietoje yra 2,5 cm didesnis už teorinį SCI200 modeliuojamą asfalto storį. Taigi standumas visame ruože išlieka beveik nepakitęs.



3.16 pav. Centrinio daviklio dangos įlinkio ir SCI palyginimas Šeimyniškių g. 2017 metais

Fig. 3.16. Deflection (D0), SCI200 and SCI300 parameter comparison on Šeimyniškių str. based on 2017 test data

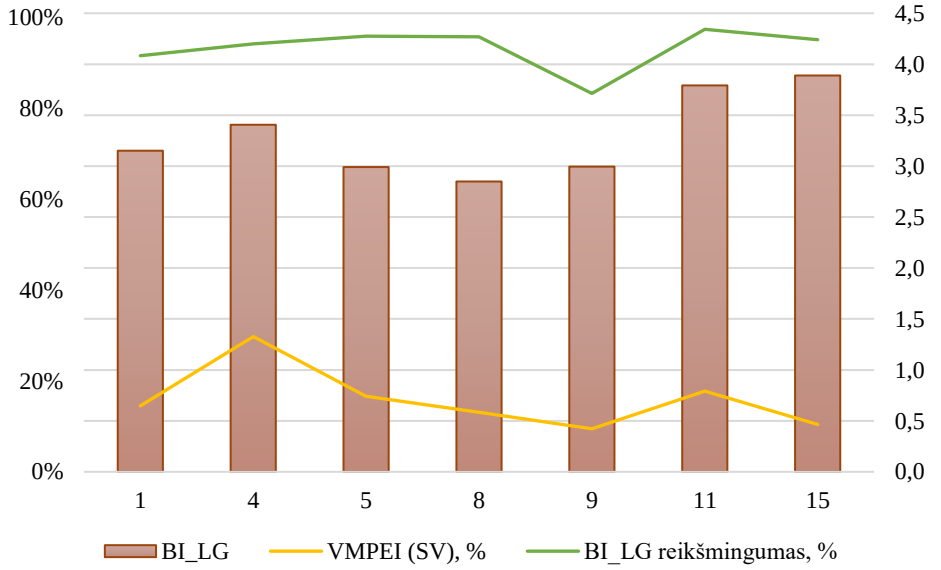


3.17 pav. Centrinio daviklio dangos įlinkio ir SCI palyginimas Šeimyniškių g. 2019 metais

Fig. 3.17. Deflection (D0), SCI200 and SCI300 parameter comparison on Šeimyniškių str. based on 2019 test data

3.2.3. Krovininio eismo rodiklio įtaka laikomosios gebos indeksui

Nors visos analizuojamos gatvės yra B kategorijos, krovininio transporto dalis kiekvienos gatvės bendrame sraute ženkliai skiriasi. Nustatyta, kad kuo didesnis krovininio eismo rodiklis, tuo didesnę įtaką turi laikomosios gebos rodiklis suminiam dangos rodikliui. 3.18 paveiksle pavaizduoti ruožai su didžiausiu krovininio transporto intensyvumo rodikliu. Visuose šiuose ruožuose laikomosios gebos būklės indekso įtaka buvo didesnė nei 65 %, tuo tarpu, kai anksčiau nustatytas vidurkis buvo lygus 60,7 %.

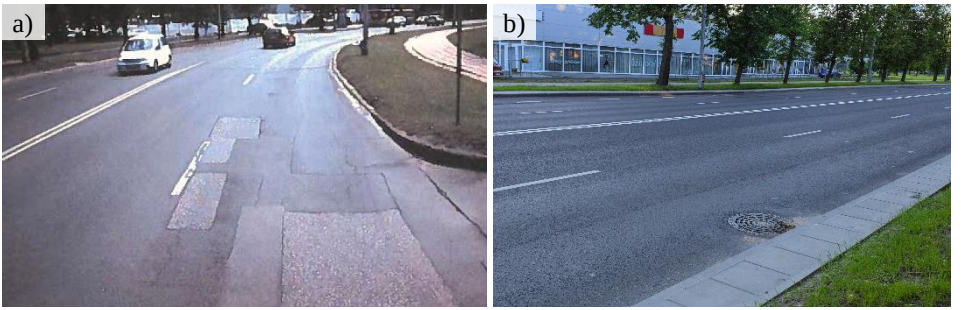


3.18 pav. Gatvių ruožai su didžiausia krovininio eismo intensyvumo dalimi
Fig. 3.18. Urban road sections with highest heavy traffic percentage

3.3. Viršutinio sluoksnio atnaujinimo darbų įtaka dangos konstrukcijos būklės kitimui

Vienoje iš 15-os ištirtų Vilniaus miesto B kategorijos gatvių – Žirmūnų g., laikotarpyje tarp pirmojo ir antrojo gatvių dangos būklės tyrimo etapų, 2019 metų birželio-liepos mėnesiais buvo atliktas Žirmūnų g. paprastasis remontas. Darbai buvo atliekami ruože nuo sankryžos su Kareivių g. (~425 m nuo ruožo pradžios) iki Šilo tilto (~2100 m nuo ruožo pradžios). Remonto darbų metu buvo klojamas išlyginamasis asfalto sluoksnis, frezuojama ir įrengtas 3 cm storio viršutinis asfalto sluoksnis iš mišinio Rugovia TM 11 (BBTM 11 A 25/55-60). Papildomai

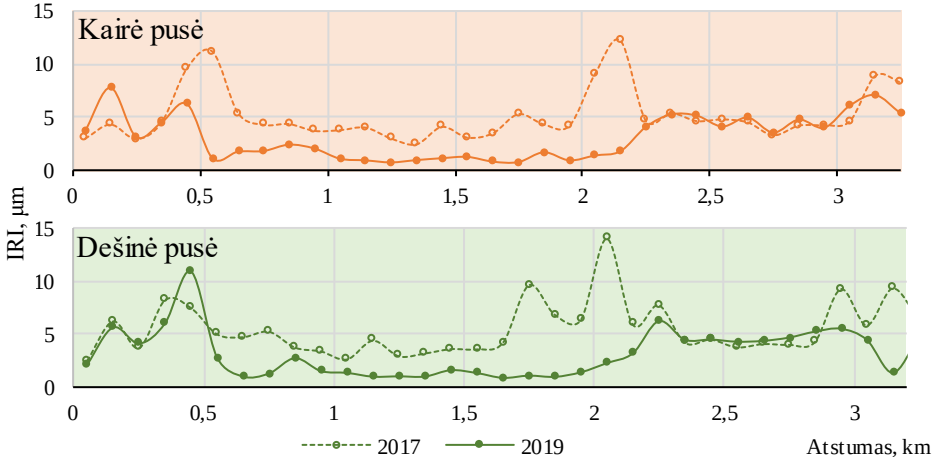
ties Šilo tiltu išfrezavus provėžomis pažeistą asfaltą buvo įrengtas 9 cm storio apatinis asfalto sluoksnis iš mišinio AC 22 AS (PMB 25/55-60). 3.19 paveiksle pavaizduota Žirmūnų g. dangos būklė prieš ir po remonto darbų.



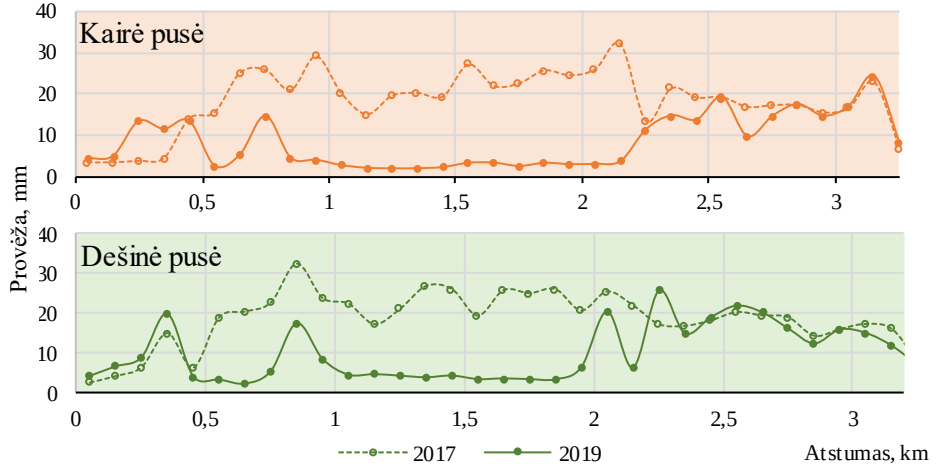
3.19 pav. Žirmūnų g. dangos būklė: a) prieš remontą; b) po remonto
Fig. 3.19. Žirmūnų str. pavement condition: a) before repairs; b) after repairs

Žirmūnų g. pavyzdžiu buvo palyginti pagrindiniai matavimų metu nustatyti techniniai rodikliai, suvidurkinti į 100 m atkarpas: nelygumai (IRI) (žr. 3.21 pav.) bei provėžos (žr. 3.22 pav.). Įvertinant matavimo vietų išdėstymą priimama, jog ruože nuo 0,520 km iki 2,100 km buvo atliktas viršutinio asfalto sluoksnio pakeitimas. Lyginant tarp 2017 ir 2109 metų matavimų, vidutinis IRI šiame ruože sumažėjo nuo 4,60 m/km iki 1,31 m/km (t. y., apie 3,5 karto) kairėje gatvės pusėje, pirmoje eismo juostoje bei nuo 5,23 m/km iki 1,34 m/km (t. y., apie 3,9 karto) dešinėje gatvės pusėje, pirmoje eismo juostoje. Vidutinis provėžų gylis remontuotame ruože sumažėjo nuo 22,59 m/km iki 3,84 m/km (t. y., apie 5,9 karto) kairėje gatvės pusėje, pirmoje eismo juostoje bei nuo 23,46 m/km iki 6,29 m/km (t. y., apie 3,7 karto) dešinėje gatvės pusėje, pirmoje eismo juostoje.

Padalinus visą išmatuotą Žirmūnų g. ruožą į 3 atkarpas (vidurinė iš kurių atitinka remontuotą ruožą nuo 0,520 km iki 2,100 km), buvo palyginti jų parametrai po remonto, t. y., pagal 2019 metų matavimų duomenis, kairėje ir dešinėje gatvės pusėje. sudalintos į ruožus Žirmūnų g. IRI matavimų rezultatai kairėje ir dešinėje gatvės pusėje pavaizduoti 3.22 paveiksle. Abejose gatvės pusėse net vizualiai ryškiai matosi mažesnės IRI reikšmės viduriniame remontuotame ruože. Skirtumas tarp pirmojo ir antrojo ruožo vidutinių IRI reikšmių sudaro 3,57 ir 4,11 karto kairėje ir dešinėje gatvės pusėje atitinkamai. Skirtumas tarp trečiojo ir antrojo ruožo – 3,54 ir 3,27 karto kairėje ir dešinėje gatvės pusėje atitinkamai.

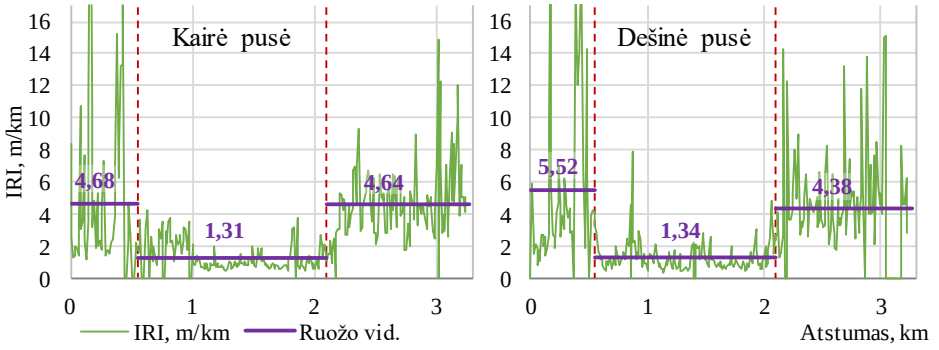


3.20 pav. IRI matavimo rezultatų palyginimas Žirmūnų g. ruože
Fig. 3.20. Comparison of IRI data from Žirmūnų str. section

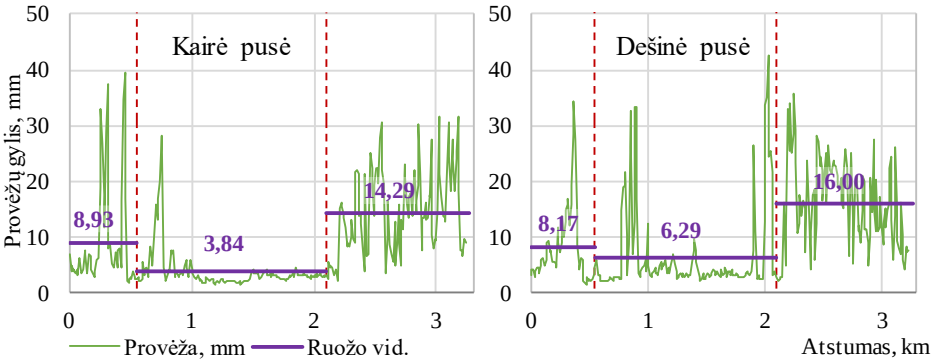


3.21 pav. Provėžų matavimo rezultatų palyginimas Žirmūnų g. ruože
Fig. 3.21. Comparison of rut depth data from Žirmūnų str. section

Žirmūnų g., sudalintos į ruožus, provėžų gylio matavimų rezultatai kairėje ir dešinėje gatvės pusėje pavaizduoti 3.23 paveiksle. Skirtumas tarp pirmojo ir antrojo ruožo vidutinių provėžų gylio reikšmių sudaro 2,32 ir 1,30 karto kairėje ir dešinėje gatvės pusėje atitinkamai. Skirtumas tarp trečiojo ir antrojo ruožo sudaro 3,72 ir 2,54 karto kairėje ir dešinėje gatvės pusėje atitinkamai.



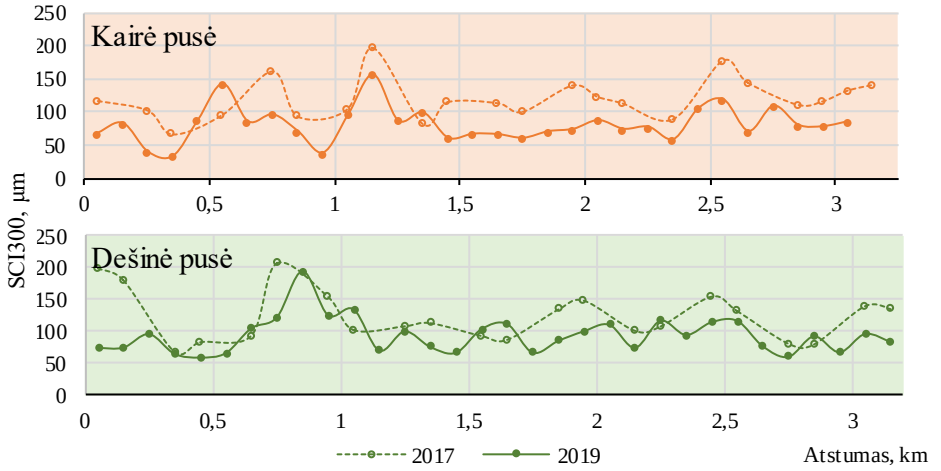
3.22 pav. Žirmūnų g. remontuoto ir neremontuotų ruožų IRI rezultatai
Fig. 3.22. Žirmūnų str. rehabilitated and non-rehabilitated section IRI results



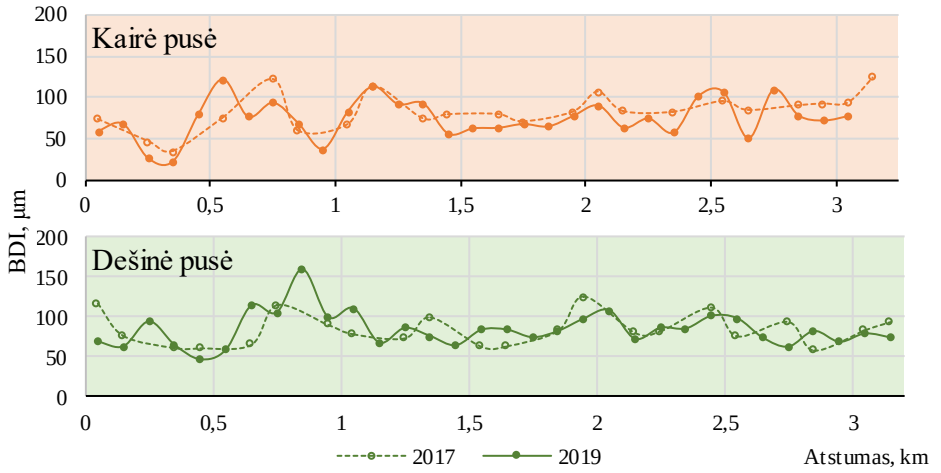
3.23 pav. Žirmūnų g. remontuoto ir neremontuotų ruožų provėžų gylio rezultatai
Fig. 3.23. Žirmūnų str. rehabilitated and non-rehabilitated section rut depth results

Siekiant nustatyti tokio remonto poveikį dangos konstrukcijos laikomajai gebai buvo palyginti dar 3 parametrai – SCI300 (žr. 3.24 pav.), parodantis surištųjų sluoksnių laikomąją gebą, BDI (žr. 3.25 pav.), atspindintis pagrindo sluoksnių laikomąją gebą bei BCI1200 (žr. 3.26 pav.), nusakantis žemės sankasos laikomąją gebą. Nustatyta, jog SCI300 remontuotame ruože pagerėjo – vidutiniškai nuo 120,3 µm iki 85,0 µm (t. y., apie 1,4 karto) kairėje gatvės pusėje, pirmoje eismo juostoje bei nuo 114,1 µm iki 103,8 µm (t. y., apie 1,1 karto) dešinėje gatvės pusėje, pirmoje eismo juostoje. Tuo tarpu BDI rodiklis pagerėjo tik kairėje gatvės pusėje ir nežymiai – vidutiniškai nuo 83,3 µm iki 79,6 µm (t. y., apie 1,05 karto), dešinėje gatvės pusėje BDI pablogėjo – vidutiniškai nuo 85,8 µm iki 92,5 µm (t. y. apie 1,08 karto). BCI1200 pablogėjo abejose gatvės pusėse – vidutiniškai nuo 24,8 µm iki 31,6 µm (t. y., apie 1,27 karto) kairėje gatvės pusėje

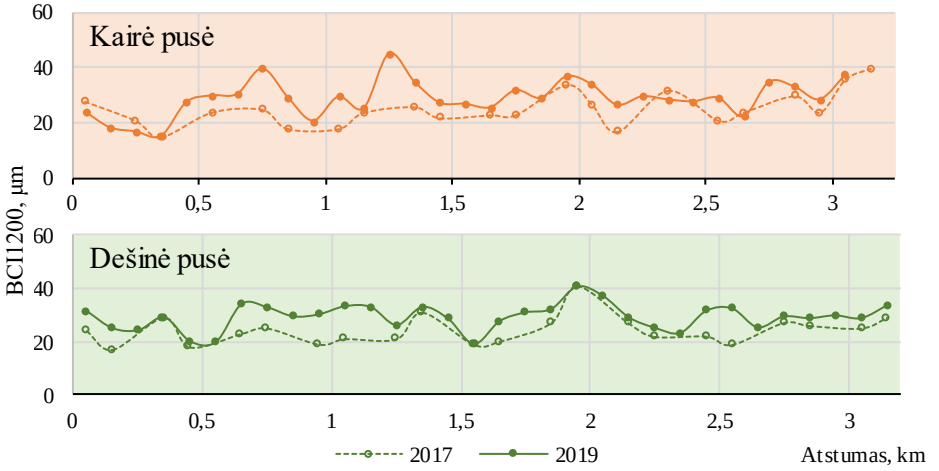
bei nuo 25,0 μm iki 31,4 μm (t. y., apie 1,26 karto) dešinėje gatvės pusėje. Tokie rezultatai rodo, jog viršutinio sluoksnio remontas nepadidina pagrindų laikomosios gebos, o tai reiškia, jog tokios pažaidos, kaip provėžos gali vėl pasireikšti kelių metų eigoje. Tęsiant disertacijoje atliktus darbus, po kelių metų būtų tikslinga iš naujo ištirti Žirmūnų g. dangą, siekiant patvirtinti ar paneigti šį teiginį.



3.24 pav. Laikomosios gebos rodiklio SCI300 palyginimas Žirmūnų g.
Fig. 3.24. Comparison of SCI300 data from Žirmūnų str. section

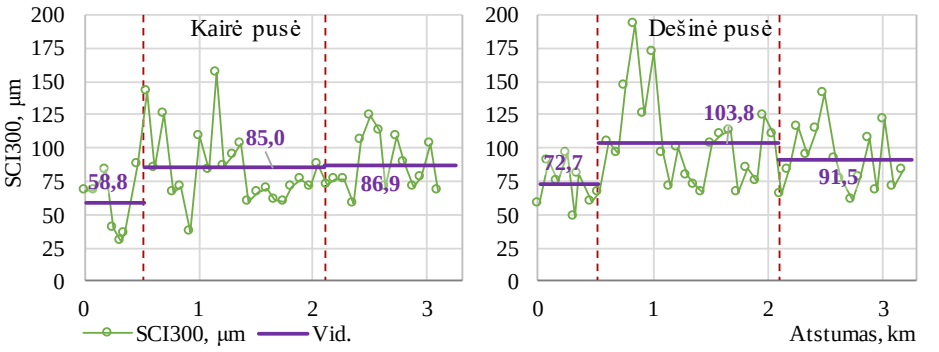


3.25 pav. Laikomosios gebos rodiklio BDI palyginimas Žirmūnų g.
Fig. 3.25. Comparison of BDI data from Žirmūnų str. section



3.26 pav. Laikomosios gebos rodiklio BCI1200 palyginimas Žirmūnų g.
Fig. 3.26. Comparison of BCI1200 data from Žirmūnų str. section

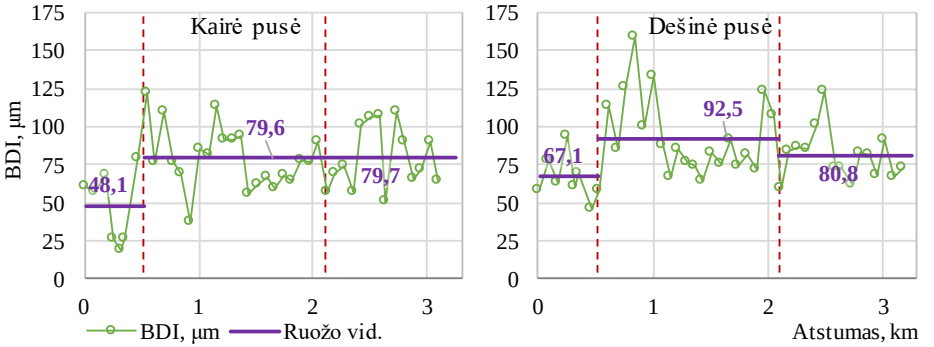
Žirmūnų g., sudalintos į ruožus, SCI300 matavimų rezultatai kairėje ir dešinėje gatvės pusėje pavaizduoti 3.27 paveiksle. Abejose gatvės pusėse matomas skirtumas tarp pirmo ir antro ruožo – ir vizualiai, ir pagal ruožo skaitinę išraišką. Skirtumas tarp vidutinių SCI300 reikšmių sudaro 1,45 ir 1,43 karto kairėje ir dešinėje gatvės pusėje atitinkamai. Skirtumas tarp trečiojo ir antrojo ruožo kairėje gatvės pusėje beveik neįžiūrimas, o dešinėje taip pat nėra didelis – jis sudaro 1,02 ir 1,13 karto kairėje ir dešinėje gatvės pusėje atitinkamai.



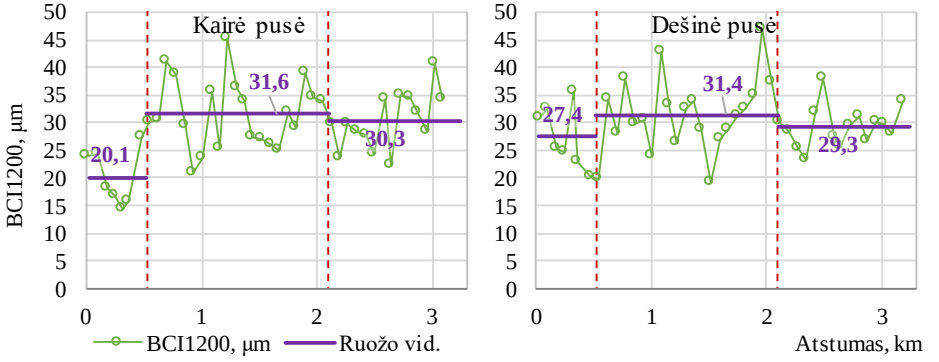
3.27 pav. Žirmūnų g. remontuoto ir neremontuotų ruožų SCI300 rezultatai
Fig. 3.27. Žirmūnų str. rehabilitated and non-rehabilitated section SCI300 results

Analogiška priklausomybė išryškėja ir su BDI (žr. 3.28 pav.) bei BCI1200 rezultatais (žr. 3.29 pav.). Skirtumas tarp pirmo ir antro ruožų vidutinių BDI

reikšmių sudaro 1,65 ir 1,38 karto kairėje ir dešinėje gatvės pusėje atitinkamai. Skirtumas tarp trečio ir antro ruožų vidutinių BDI reikšmių sudaro 1,00 ir 1,14 karto kairėje ir dešinėje gatvės pusėje atitinkamai. Skirtumas tarp pirmo ir antro ruožų vidutinių BCI1200 reikšmių sudaro 1,57 ir 1,15 karto kairėje ir dešinėje gatvės pusėje atitinkamai. Skirtumas tarp trečio ir antro ruožų vidutinių BDI reikšmių sudaro 1,15 ir 1,07 karto kairėje ir dešinėje gatvės pusėje atitinkamai.



3.28 pav. Žirmūnų g. remontuoto ir neremontuotų ruožų BDI rezultatai
Fig. 3.28. Žirmūnų str. rehabilitated and non-rehabilitated section BDI results



3.29 pav. Žirmūnų g. remontuoto ir neremontuotų ruožų BCI1200 rezultatai
Fig. 3.29. Žirmūnų str. rehabilitated and non-rehabilitated section BCI1200 results

Lyginant visų trijų laikomosios gebos rodiklių rezultatus tarp pirmojo neremontuoto ir antro remontuoto ruožo matyti, jog nustatytos reikšmės skiriasi pakankamai daug, todėl galima teigti, kad pirmo ir antro ruožo riba atitinka tikrąją homogeninio ruožo ribą. Lyginant rezultatus tarp trečio neremontuoto ir antro remontuoto ruožo pastebima, jog reikšmės skiriasi neženkliai – iki 15 %, nors tų pačių ruožų IRI vidutinės vertės skyriasi virš 3 kartų. Dangos būklės paviršiaus

rodiklis parodo ženklų skirtumą tarp ruožų, o laikomosios gebos dangos rodikliai šio skirtumo neparodo, todėl galima teigti, kad riba tarp antrojo ir trečiojo ruožų nėra tikroji homogeninių ruožų riba. Antrą ir trečią ruožą būtų tikslinga kombinuoti į vieną homogeninį ruožą, o tai reiškia, atėjus laikui atlikti pilną gatvės rekonstravimą, keičiant pagrindo sluoksnius visame ruože nuo 0,520 km iki gatvės pabaigos.

Jeigu gatvių segmentavimas būtų atliekamas vien tik pagal dangos būklės paviršiaus tyrimų duomenis, gatvė būtų netiksliai sudalinta į homogeninius gatvės ruožus, o tai gali vesti prie neracionalių dangos priežiūros ir remonto sprendinių. Dėl šios priežasties tikslinga segmentavimą atlikti pagal laikomosios gebos rodiklius arba pagal suminius dangos būklės indeksus, vertinant laikomosios gebos rodiklį.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Atlikus tirtų gatvių segmentavimą keturiais metodais (kumuliacinio skirtumo metodu, slenkančių vidurkių metodu, šių abiejų metodų kombinacija bei tiesioginiu matavimo duomenų segmentavimau) nustatyta, kad mažiausiai patikimas yra tiesioginio segmentavimo metodas, kadangi duomenų svyravimas yra per didelis, jog išsiskirtų aiškios ruožų ribos.

2. Nustatyta, jog parinkto atstumo tarp FWD matavimo taškų (150 ir 75 m) nepakanka patikimai išskirti homogeninių ruožų ribas, ypač kai segmentavimas grindžiamas laikomosios gebos parametru. IRI ir kitų dangos paviršiaus parametrų atveju, 10 m atstumas tarp taškų yra patenkinamas. Atsižvelgiant į tai, rekomenduojamas FWD siektinas atstumas tarp matavimo taškų yra 25 m, bet nedidesnis kaip 50 metrų.

3. Segmentavimui pagreitinti naudojamas RDP algoritmas, pritaikytas įvairiems dangos būklės rodikliams ir metodams jungtiniu slenkančių vidurkių ir kumuliacinio skirtumo segmentavimo metodu pasiekė didžiausią koreliaciją (R^2 nuo 0,822 iki 0,983, vidutinis R^2 = 0,958). Taip pat šis metodas laikomas patikimiausiu, kadangi juo nustatomos ruožų ribos pagal įvairius tos pačios rūšies rodiklius (pvz., laikomosios gebos rodikliai D0, SCI300, BDI bei BCI1200) yra pakankamai arti vienas kito. RDP algoritmo principu sukurta automatizuota skaičiuoklė, kurios pagalba vieno ruožo vieno rodiklio segmentavimo laikas sutrumpėja apie 10 kartų, lyginant su rankiniu-vizualiniu būdu.

4. Taikant COST dangos būklės vertinimo metodą, apskaičiavus kiekvieno KBI reikšmingumą, nustatyta, jog esminis kombinuotas būklės indeksas yra struktūrinis. Jo reikšmė buvo didžiausia – 97,0 %

atvejų, komforto ir saugumo KBI yra mažiau reikšmingi – 2,5 % ir 0,5 % atitinkamai. Esminis struktūrinio KBI komponentas – laikomosios gebos BI (vid. 61,9 %), komforto KBI – nelygumo BI (vid. 73,8 %), saugumo KBI – provėžų BI (vid. 90,7 %). Laikomosios gebos būklės indeksas miestų gatvėse yra esminis BI, skaičiuojant suminį dangos būklės indeksą (DBI) (vid. 60,9 % reikšmingumas). Pagal skaičiavimų rezultatus pasiūlyti būklės indeksų ir kombinuotų būklės indeksų svoriniai koeficientai.

5. 11 iš 15 tirtų gatvių struktūrinis kombinuotas būklės indeksas apskaičiuotas vidutiniškai apie 1,5–2,0 karto didesnis ,, kai buvo vertinama laikomoji geba. Vertinant laikomąją gebą bendra dangos būklė apie 61 % matavimo taškų buvo blogesnė nei nevertinant šio rodiklio.

6. Nustatyta, kad vertinant dangos konstrukcijos būklę bei sudarant homogeninius ruožus nepakanka naudoti pamatuotus dangos paviršiaus parametrus (pvz., IRI), kadangi jie ne visada atspindi bendrą dangos konstrukcijos laikomąją gebą. Žirmūnų g. tarp dviejų dangos tyrimų matavimų buvo atliktas paprastasis remontas, keičiant viršutinius asfalto sluoksnius, kas atsispindėjo IRI parametro pagerėjime (3,5–3,9 kartus priklausomai nuo eismo juostos), tačiau įlinkio koeficientas SCI300 tik vietomis pagerėjo (iki 1,4 karto), pagrindo laikomosios gebos parametrui BDI praktiškai neturėjo poveikio, o žemės sankasos laikomosios gebos rodiklis BCI1200 netgi 1,26 karto pablogėjo.

Bendrosios išvados

1. Dangų valdymo sistemų (DVS) pagalba sprendžiamas kompleksinis objektyviaisiais kriterijais pagrįstų gatvių ruožų prioritetinių sąrašų sudarymo uždavinys. Vienas pagrindinių DVS komponentų yra dangos būklės vertinimas, kuris atliekamas pagal atskirus dangos būklės rodiklius. Siekiant racionalizuoti kriterijų parinkimą ir norint tikslingai investuoti gatvių dangų tinklui skirtas lėšas turi būti patvirtinta dangos būklės vertinimo metodika, įskaitant dangos būklės rodiklių reikšmingumo nustatymą bei homogeninių ruožų sudarymo metodo parinkimą.
2. Atlikus 15-os Vilniaus miesto B kategorijos gatvių imties tyrimus nustatyta, kad dangos konstrukcijų laikomoji geba yra nepakankama, lyginant su normatyvine faktinei apkrovai priskirtina dangos konstrukcija. Per 2 metus nelygumas bei asfalto dangos ir pagrindo sluoksnių laikomoji geba pagerėjo (vid. IRI – 12 gatvių iš 15, vid. SCI – 14 gatvių iš 15, vid. BDI – 12 gatvių iš 15), tikėtina, dėl dalinai viršutinio asfalto sluoksnio tvarkymo ir atnaujinimo darbų bei dangos konstrukcijos sluoksnių konsolidacijos. Atvirkštinė tendencija matoma su provėžomis ir žemės sankasos laikomąja geba (t. y., būklė pablogėjo: vid. provėža – 12 gatvių iš 15, vid. BCI – 10 gatvių iš 15),

tikėtina, jog provėžų atsiradimas susijęs su žemės sankasos laikomosios gebos būklės pablogėjimu.

3. Atlikus gatvių dangos būklės analizę COST ir LAKD metodikomis nustatyta, kad pavieniai dangos būklės indeksai skiriasi nežymiai, tačiau kombinuotieji ir suminis dangos būklės indeksas skiriasi iki 36 %. COST metodikos suminis dangos būklės indeksas vidutiniškai 1,4 karto didesnis už LAKD. Suminio dangos būklės indekso skirtumus tarp šių metodikų nulemia laikomosios gebos indekso įtraukimas COST metodikoje. Kadangi LAKD metodas nevertina laikomosios gebos būklės indekso, COST metodika priimta tinkamesne adaptavimui miestų gatvių DVS.

4. Homogeninių ruožų sudarymui dažniausiai taikomas kumuliacinio skirtumo metodas, kurį lengva pritaikyti ir automatizuoti, tačiau jis gali būti nepatikimas esant dideliems gretimų matavimo verčių svyravimams. Tyrimo metu RDP algoritmo pagalba jungtiniu slenkančių vidurkių ir kumuliacinio skirtumo metodu sudarytos kreivės parodė didžiausią koreliaciją (vid. $R^2 = 0{,}958$). RDP algoritmo principu sukurta automatizuota skaičiuoklė, kurią naudojant segmentavimo laikas ženkliai sutrumpėja bei sumažinama žmogiškosios klaidos rizika.

5. Pagal atlikto eksperimentinio tyrimo duomenis laikomosios gebos būklės indeksas miestų gatvėse buvo reikšmingiausias, apskaičiuojant suminį dangos būklės indeksą (60,9 % matavimo taškų). Apskaičiavus kiekvieno KBI reikšmingumą, nustatyta, jog esminis kombinuotas būklės indeksas yra struktūrinis. Jo reikšmė nustatyta didžiausia – 97,0 % atvejų, kitas pagal reikšmingumą yra komforto KBI (2,5 %) ir mažiausiai reikšmingas – saugumo (0,5 %). Pagal skaičiavimų rezultatus pasiūlyti būklės indeksų ir kombinuotų būklės indeksų svoriniai koeficientai.

6. Gatvių dangos viršutinių asfalto sluoksnių remonto darbai turi įtakos nelygumui (virš 3,5 kartų IRI pagerėjimu) bei surištų sluoksnių laikomąją gebą atspindinčiam koeficientui SCI300 (vid. iki 1,4 karto pagerėjimas). Pagrindo sluoksnių laikomąją gebą atspindintis koeficientas BDI liko beveik nepakitęs, o žemės sankasos laikomąją gebą atspindintis koeficientas BCI1200 pablogėjo. Tai įrodo, jog viršutinio sluoksnio remontas nepadidina žemesnių sluoksnių laikomosios gebos. Darytina išvada, kad homogeninių ruožų sudarymas pagal laikomosios gebos rodiklius yra daug tikslesnis,

lyginant su ruožų segmentavimu tik pagal dangos būklės paviršiaus rodiklius.

7. Pritaikant darbe pasiūlytus dangos būklės vertinimo metodikos bei homogeninių ruožų sudarymo algoritmus, galėtų būti racionalizuojamas gatvių remonto prioritetinių ruožų sąrašo sudarymas, įvedant objektyvius atrankos kriterijus. Apskaičiuoti svoriniai koeficientai galėtų būti naudojami įdiegiant DVS miestų dangų valdymui, vėliau juos patikslinant pagal pateiktą reikšmingumo nustatymo algoritmą, turint viso gatvių dangų tinklo būklės duomenų imtį.

Rekomendacijos

1. Diegiant DVS miestų gatvių dangų remonto planavimui rekomenduojama pradėti nuo dangos būklės vertinimo metodo parinkimo. Renkantis metodą svarbu užtikrinti, kad būtų įtraukti visi reikšmingi dangos būklės rodikliai. Šio darbo rezultatai parodė, jog laikomosios gebos rodiklis yra svarbus suminio būklės rodiklio sudarymui, todėl kartu su nelygumu, plyšiais, provėžomis bei kitais defektais rekomenduojama tirti ir laikomąją gebą. Turint laikomosios gebos duomenis, galima tiksliau parinkti homogeninių ruožų ribas, net ir esant atnaujintai dangai. Reikia pabrėžti, jog pirmojo matavimo žingsnis turėtų būti parinktas tankesnis – bent 25 m. Kitu atveju dėl vietinių duomenų svyravimų gali būti problematiška parinkti homogeninių ruožų ribas.
2. Gatvių ruožus segmentuojant pagal dangos būklę, rekomenduojama pirmiausia rankiniu būdu nustatyti ribas vietose, kur dėl sankryžų pasikeičia gatvės konfigūracija (pavyzdžiui, keičiasi eismo juostų skaičius, atsiranda visuomeninio transporto juosta) arba ženkliai pasikeičia eismo intensyvumas. Rekomenduojama taikyti sukurtą skaičiuoklę ir jungtinį slenkančių vidurkių ir kumuliacinio skirtumo metodą, kurį taikant įvairiems būklės rodikliams nustatyti, ruožų skaičius ir jų ribos sutampa tarpusavyje su mažiausiu neapibrėžtumu.

Segmentavimo objektu rekomenduojama pasirinkti nelygumą (IRI), vieną iš laikomosios gebos rodiklių arba kombinuotą / suminį dangos būklės indeksą.

3. Pasiūlyti dangos būklės įverčių reikšmingumo nustatymo algoritmai galėtų būti taikomi turint didesnę dangos būklės matavimo duomenų imtį, optimalu – turint viso miesto gatvių tinklo tyrimo rezultatus. Šiuo atveju galima būtų tobulinti ir pasiūlytą dangos būklės vertinimo metodą. Pasiūlytas homogeninių ruožų sudarymo algoritmas taipogi galėtų būti tobulinamas, pasirenkant segmentavimo objektą ir metodą pagal konkretaus gatvių dangų tinklo specifiką ir poreikius.

Literatūra ir šaltiniai

AASHTO 1993. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*.

Adlinge S.S., Gupta A.K. 2013. Pavement Deterioration and its Causes.

Ali B., Sadek M., Shahrour I. 2008. Elasto-viscoplastic finite element analysis of the long-term behavior of flexible pavements application to rutting, *Road Materials and Pavement Design* 9(3): 463–479. DOI: 10.3166/rmpd.9.463-479 .

ASTM 2003. D 4695-03 Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements.

ASTM 2011. *D6433-11 Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys*. DOI: 10.1520/D6433-11.2 .

ASTM International 2003. D4694 Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load, : 1–3. DOI: 10.1520/D4694-09R15.2 .

Bennett C.R. 2004. Sectioning of road data for pavement management, *6th International Conference on Managing Pavements: The Lessons, The Challenges, The Way Ahead*.

Bernardo J.M., Smith A.F.M. 1994. *Bayesian Theory*. DOI: 10.1002/9780470316870 .

Braga A. 2005. Dangų degradacijos modeliai ir jų taikymas Lietuvos automobilių keliams (Models of Pavement Deterioration and their Adaptation to Lithuanian Automobile Roads), : 154.

Braga A., Puodžiukas V., Čygas D., Laurinavičius A. 2003. Investigation of automobile roads pavement deterioration trends in lithuania, *Journal of Civil Engineering and Management* 9(1): 3–9. DOI: 10.1080/13923730.2003.10531294 .

Cafiso S., Di Graziano A. 2012. Definition of Homogenous Sections in Road Pavement Measurements, *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 53(solution C): 1069–1079. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.09.956 .

Chamorro Giné M.A. 2012. *Development of a Sustainable Management System for Rural Road Networks in Developing Countries*. University of Waterloo.

Chopra T., Parida M., Kwatra N., Chopra P. 2018. Development of Pavement Distress Deterioration Prediction Models for Urban Road Network Using Genetic Programming, *Advances in Civil Engineering* 2018: 1–15. DOI: 10.1155/2018/1253108 .

COST Action 336 2005. *Use of Falling Weight Deflectometers in Pavement Evaluation*.

COST Action 354 2008. *Performance Indicators for Road Pavements. Final Report.*

Craiu R. V., Rosenthal J.S. 2013. Bayesian Computation Via Markov Chain Monte Carlo, *Annual Review of Statistics and Its Application* 1(1): 179–201. DOI: 10.1146/annurev-statistics-022513-115540 .

Dore G., Zubeck H.K.H., Doré G., Zubeck H.K.H. 2009. *Cold regions pavement engineering* 1st ed. L. S. Hager, sud.American Society of Civil Engineers.Prieiga per internetą: http://trid.trb.org/view.aspx?id=903094.

Du Y., Liu C., Wu D., Jiang S. 2014. Measurement of international roughness index by using Z -axis accelerometers and GPS, *Mathematical Problems in Engineering* 2014. DOI: 10.1155/2014/928980 .

Ellingwood B.R. 2005. Risk-informed condition assessment of civil infrastructure: state of practice and research issues, *Structure and Infrastructure Engineering* 1(1): 7–18. DOI: 10.1080/15732470412331289341 .

Farrukh Sohail, Terrence Dossey W.R.H. 1996. *Implementation of the Urban Roadway Management System*.

Flintsch G.W., McGhee K.K. 2009. *Quality Management of Pavement Condition Data Collection*. DOI: 10.17226/14325 .

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Arbeitspapier Tragfähigkeit 2014. *Teil C 2.1 Falling Weight Deflectometer (FWD): Auswertung und Bewertung - Asphaltbauweise (433 C 2.1)*, Köln.

Fwa T.F., Pasindu H.R., Ong G.P. 2010. Critical rut depth for pavement maintenance based on vehicle skidding and hydroplaning consideration, *Journal of Transportation Engineering* 138(4): 423–429. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000336 .

Gavilán M., et al. 2011. Adaptive road crack detection system by pavement classification, *Sensors* 11(10): 9628–9657. DOI: 10.3390/s111009628 .

El Gendy A.M., Shalaby A. 2005. Detecting Localized Roughness Using Dynamic Segmentation, *Journal of Chemical Information and Modeling* 12 Suppl 1(9): 1–29.

Gilbert Y. Baladi, Dawson T., Musunuru G., Prohaska M., Thomas K. 2017. *FHWA-HRT-17-095 Pavement Performance Measures and Forecasting and the Effects of Maintenance and Rehabilitation Strategy on Treatment Effectiveness (Revised)*Prieiga per internetą:

https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltpp/17095/17095.pdf.

Haas R., Hudson W.R. 1978. *Pavement Management Systems*, New York: McGraw-Hill.

Haas R., Hudson W.R., Falls L.C. 2015. *Pavement Asset Management*. DOI: 10.1002/9781119038849 .

Haas R., Hudson W.R., Zaniewski J. 1994. *Modern Pavement Management*, Malabar, Fla: Krieger Publishing Company.

Haide S.W., Varm S. 2015. Another Look at Delineation of Uniform Pavement Sections Based on FWD Deflections Data, *Canadian Journal of Civil Engineering* 43(1): 40–50. DOI: 10.1139/cjce-2015-0281 .

Harris D. 2013. *Development of Methods and Specifications for the Use of Inertial Profilers and the International Roughness Index for Newly Constructed Pavement*. DOI: 10.5703/1288284315211. .

Hicks R.G., Stephen B. Seeds, Peshkin D.G. 2000. *Selecting a Preventive Maintenance Treatment for Flexible Pavements*.

Van Hiep D., Tsunokawa K. 2010. Methodological Development of Strategy Analysis with Dynamic Sectioning for a Nationwide Road Network: Option Evaluation Systems with Dynamic Sectioning, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies* 8(2): 1513–1528Prieiga per internetą: https://pdfs.semanticscholar.org/a4dd/6fe640c296c91ae180a2f920f6bc29a7175b.pdf.

Hudson W.R., McCullough B.F., Brown J., Peck G., Lytton R.L. 1976. CFHR 1-8-69-123-3OF Overview of Pavement Management Systems Developments in the State Department of Highways and Public Transportation, 7(2).

Huidrom L., Das L.K., Sud S.K. 2013. Method for Automated Assessment of Potholes, Cracks and Patches from Road Surface Video Clips, *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 104: 312–321. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.11.124 .

Ismail N., Ismail A., Atiq R. 2009. An overview of expert systems in pavement management, *European Journal of Scientific Research* 30(1): 99–111.

Jordaan G., Steyn W.J. 2015. The Identification of Uniform Pavement Sections during the Initial Assessment of a Project Level Rehabilitation Project, (August).

Jorge D., Ferreira A. 2012. Road network pavement maintenance optimisation using the HDM-4 pavement performance prediction models, *International Journal of Pavement Engineering* 13(1): 39–51. DOI: 10.1080/10298436.2011.563851 .

Khattak M.J., Nur M.A., Bhuyan M.R.U.K., Gaspard K. 2014. International roughness index models for HMA overlay treatment of flexible and composite pavements, *International Journal of Pavement Engineering* 15(4): 334–344. DOI: 10.1080/10298436.2013.842237 .

Kirbaş U., Karaşahin M. 2016. Performance models for hot mix asphalt pavements in urban roads, *Construction and Building Materials* 116: 281–288. DOI:

10.1016/j.conbuildmat.2016.04.118 .

Koch C., Brilakis I. 2011. Pothole detection in asphalt pavement images, *Advanced Engineering Informatics* 25(3): 507–515. DOI: 10.1016/j.aei.2011.01.002 .

Krawczyk B., Szydło A. 2013. Identification of homogeneous pavement sections, *Roads and Bridges - Drogi i Mosty* 12(3): 269–281. DOI: 10.7409/rabdim.013.019 .

Kulkarni R.B., Miller R.W. 2003. Pavement Management Systems: Past, Present, and Future, *Transportation Research Record* (1853): 65–71. DOI: 10.3141/1853-08 .

LaCroix A.T. 2013. *Performance Prediction of the NCAT Test Track Pavements Using Mechanistic Models*. North Carolina State University.Prieiga per internetą: https://pdfs.semanticscholar.org/a9b6/91fa56835cf9d019c50f496d1ea8c711fccf.pdf.

Lang J. 2012. Comparison of Pavement Management in the Nordic Countries, *4th EPAM Conference*.

Lietuvos automobilių kelių direkcija 2019a. KPT SDK 19 Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės.

Lietuvos automobilių kelių direkcija 2017a. KPV PN-14 Kelių priežiūros vadovo I dalis. Automobilių kelių priežiūros normatyvai, : 133.

Lietuvos automobilių kelių direkcija 2019b. MN KSD 18 Automobilių kelių dangos konstrukcijos sluoksnių laikomosios gebos matavimo krintančio svorio deflektometru metodiniai nurodymai.

Lietuvos automobilių kelių direkcija 2018. Valstybinės reikšmės kelių dangos būklės vertinimo tvarkos aprašas, 16(V).

Lietuvos automobilių kelių direkcija 2017b. Valstybinės reikšmės kelių pažaidų matavimo ir nustatymo tvarkos aprašas, (6): 25.

Lietuvos Respublikos valstybės kontrolė 2013. *Ar sudarytos sąlygos efektyviai naudoti valstybės lėšas, skiriamas vietinės reikšmės keliams ir gatvėms prižiūrėti ir modernizuoti?*

Lietuvos Respublikos valstybės kontrolė 2020. *Kelių infrastruktūros valdymas*.

Lovas T., Kert?sz I., Fi I., Barsi A. 2008. Photogrammetric pavement detection system, *Pavement Cracking: Mechanisms, Modeling, Detection, Testing and Case Histories* (Figure 2).

Mandhani J. 2016. *Development of Pavement Maintenance Management System (PMMS) of Patiala City Road Network using HDM-4 Model*. Thapar University, Patiala. DOI: 10.24107/ijeas.286473 .

Marcelino P., Lurdes Antunes M. de, Fortunato E. 2018. Comprehensive performance indicators for road pavement condition assessment, *Structure and Infrastructure Engineering* 14(11): 1433–1445. DOI: 10.1080/15732479.2018.1446179 .

Miller J.S., Bellinger W.Y. 2014. *FHWA-HRT-13-092 Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program (Fifth Revised Edition)*.

Misra R., Das A. 2003. Identification of homogeneous sections from road data,

International Journal of Pavement Engineering 4(4): 229–233. DOI: 10.1080/10298430410001672237 .

Morosiuk G., Riley M. 2004. *HDM-4 Volume 6. Modelling road deterioration and works effects*.

Motiejunas A., Paliukaite M., Vaitkus A., Čygas D., Laurinavičius A. 2010. Research on the dependence of asphalt pavement stiffness upon the temperature of pavement layers, *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 5(1): 50–54. DOI: 10.3846/bjrbe.2010.07.

Mubaraki M. 2010. *Predicting Deterioration for the Saudi Arabia Urban Road Network*. University of Nottingham.

Múčka P. 2017. International Roughness Index specifications around the world, *Road Materials and Pavement Design* 18(4): 929–965. DOI: 10.1080/14680629.2016.1197144.

NCHRP 1-37A 2004. *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*, Champaign, Illinois, USA.

Nguyen T.D., Le L.X. 2016. Research of asphalt pavement rutting on national roads in Vietnam, (August)Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/307373551.

Nik A.A., Moghadas Nejad F., Zakeri H. 2019. A Survey on Pavement Sectioning in Network Level and an Intelligent Homogeneous Method by Hybrid PSO and GA, *Archives of Computational Methods in Engineering* (0123456789). DOI: 10.1007/s11831-019-09360-w .

Nik A.A., Nejad F.M., Zakeri H. 2016. Hybrid PSO and GA approach for optimizing surveyed asphalt pavement inspection units in massive network, *Automation in Construction* 71(Part 2): 325–345. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.08.004 .

Noureldin A.S., Zhu K., Li S., Harris D. 2003. Network Pavement Evaluation with Falling-Weight Deflectometer and Ground-Penetrating Radar, *Transportation Research Record* (1860): 90–99. DOI: 10.3141/1860-10 .

Oertelt S., Maerschalk G., Krause G., für Verkehr Bau- und Stadtentwicklung. Abteilung Strassenbau S. 2007. *Verbesserung der praxisnahen Bewertung des Straßenzustandes*Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, Abt. Strassenbau, Strassenverkehr.Prieiga per internetą: https://books.google.lt/books?id=9Ax-GQAACAAJ.

Oficialios statistikos portalas 2020. Kelių transporto rodikliaiPrieiga per internetą: https://osp.stat.gov.lt/statistiniu-rodikliu-analize?indicator=S5R121#/.

Ognjenovic S., Krakutovski Z., Vatin N. 2015. Calibration of the crack initiation model in HDM 4 on the highways and primary urban streets network in Macedonia, *Procedia Engineering* 117(1): 559–567. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.214 .

Osorio A. 2015. *Development of Performance Models and Maintenance Standards of Urban Pavements for Network Management*.

Pantuso A., Loprencipe G., Bonin G., Teltayev B.B. 2019. Analysis of pavement condition survey data for effective implementation of a network level pavement management program for Kazakhstan, *Sustainability (Switzerland)* 11(3). DOI: 10.3390/su11030901 .

Perera R., Kohn S. 2002. Issues in Pavement Smoothness: A Summary Report, *NCHRP Web Document* 42.

Ping W. V, Yang Z., Gan L., Dietrich B. 1999. Development of Procedure for Automated Segmentation of Pavement Rut Data, *Transportation Research Record* 1655: 65–73. DOI: 10.3141/1655-10 .

Pinkofsky L., Jansen D. 2018. Structural pavement assessment in Germany, *Frontiers of Structural and Civil Engineering* 12(2): 183–191. DOI: 10.1007/s11709-017-0412-z .

Pradena M., Houben L. 2016. Functional criteria for sustainable design of urban pavements, *Gradjevinar* 68(6): 485–492. DOI: 10.14256/JCE.1464.2015 .

Ragnoli A., De Blasiis M.R., Di Benedetto A., Blasiis M.R. De, Benedetto A. Di 2018. Pavement Distress Detection Methods: A Review, *Infrastructures* 3(4): 58. DOI: 10.3390/infrastructures3040058 .

Rübensam J., Schulze F. 1996. *Entwicklung einer Methodik zur zweckmäßigen Zusammenfassung maßnahmebedürftiger Abschnitte der BAB-Betriebsstrecken auf der Grundlage von Zustands- und Bestandsdaten*Bundesministerium für Verkehr, Abt. Straßenbau.Prieiga per internetą: https://books.google.lt/books?id=7PZkMgAACAAJ.

Saba R.G. 2011. *Pavement Performance Models - Summary Report.*

Sandra A.K., Sarkar A.K. 2013. Development of a model for estimating International Roughness Index from pavement distresses, *International Journal of Pavement Engineering* 14(8): 715–724. DOI: 10.1080/10298436.2012.703322 .

Savivaldybės įmonė „Vilniaus planas" 2009. *Vilniaus miesto savivaldybės teritorijos bendrasis planas iki 2015 metų*. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.004 .

Shah Y.U., Jain S.S., Tiwari D., Jain M.K. 2013. Development of Overall Pavement Condition Index for Urban Road Network, *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 104: 332–341. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.11.126 .

Shahin M.Y. 2005. *Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots*Springer US.Prieiga per internetą: https://books.google.lt/books?id=MuDjN0hNPj0C.

Singh A., Chopra T. 2018. Development of Pavement Maintenance Management System for the Urban Road Netwrok By Calibrating the HDM-4 Distress Models, (December): 1–8.

Singh A.P., Sharma A., Mishra R., Wagle M., Sarkar A.K. 2018. Pavement condition assessment using soft computing techniques, *International Journal of Pavement Research and Technology* 11(6): 564–581. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.12.006 .

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

Stampley B.E., Miller B., Smith R.E., Scullion T. 1995. Pavement management information system concepts, equations, and analysis models, (TX-96/1989-1).

STR 2.06.04:2014 2020. Gatvės ir vietinės reikšmės keliai. Bendrieji reikalavimai, : 46.

Sun L., Gu W. 2011. Pavement condition assessment using fuzzy logic theory and analytic hierarchy process, *Journal of Transportation Engineering* 137(9): 648–655. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000239 .

Talvik O., Aavik A. 2009. Use of fwd deflection basin parameters (SCI, BDI, BCI) for pavement condition assessment, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 4(4): 196–202. DOI: 10.3846/1822-427X.2009.4.196-202 .

The Ohio Department of Transportation 2006. Pavement condition rating system.

Thomas F, Weninger-Vycudil A., Simanek P. 2004. Automated Segmentation of Pavement Measurements Based on Bayesian Ideas : Experiences from Austria, *6th International Conference on Managing Pavements*.

Thomas Fridtjof, Weninger-Vycudil A., Simanek P. 2004. Generating homogeneous road sections based on surface measurements: available methods, *6th International Conference on Managing Pavements* (48): 21–23.

TKTI 1994. *Asfaltbetonio dangų defektų nustatymo metodika*.

Uechi S.T., Uechi H. 2018. The Profiling of International Roughness Index (IRI) Based on Lagrangian Method, *World Journal of Engineering and Technology* 06(04): 885–902. DOI: 10.4236/wjet.2018.64059 .

Vaitkus A., Laurinavičius A., Oginskas R., Motiejunas A., Paliukaite M., Barvidiene O. 2012. The road of experimental pavement structures: Experience of five years operation, *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 7(3): 220–227. DOI: 10.3846/bjrbe.2012.30 .

Vaitkus A., Čygas D., Kleizienė R. 2014. Research of asphalt pavement rutting in Vilnius city streets, *9th International Conference on Environmental Engineering* (May). DOI: 10.3846/enviro.2014.172 .

VĮ Transporto ir kelių tyrimo institutas 2009. *Kelio dangų valdymo sistemų analizė, tinkamos Lietuvai dangų valdymo sistemos charakteristikų nustatymas, pasiūlymų įdiegimui parengimas*.

Vilniaus miesto savivaldybė 2019. Vilniaus gyventojų statistikaPrieiga per internetą: https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiYmNmY2E1ZWQtMDgwYi00YjM2LTlmNjgtZGJkMzAyOWZjMTBlIiwidCI6ImFmZjM2MzMxLTNlNWUtNDdlOC1hZjkzLTE4NTFkNmQxZmUzYiIsImMiOjh9.

Wang T., Gopalakrishnan K., Smadi O., Somani A.K. 2018. Automated shape-based pavement crack detection approach, *Transport* 33(3): 598–608. DOI: 10.3846/transport.2018.1559 .

Wolters A., Zimmerman K., Schattler K., Rietgraf A. 2011. Implementing Pavement Management Systems for Local Agencies: Implementation Guide, (December). DOI:

10.13140/RG.2.2.12588.36481 .

Xu B., Huang Y. 2005. Automatic inspection of pavement cracking distress, *Applications of Digital Image Processing XXVIII* 5909(22): 590901. DOI: 10.1117/12.613770 .

Yang Hsien Huang 2004. Pavement analysis and design (2nd edition).

Yogesh U.S., Jain S.S., Devesh T. 2016. Adaptation of HDM-4 Tool for Strategic Analysis of Urban Roads Network, *Transportation Research Procedia* 17(December 2014): 71–80. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.11.062 .

Zheng Wu P.D., Groeger J.L., Simpson A.L., Hicks R.G. 2010. *FHWA-HIF-10-020 Performance Evaluation of Various Rehabilitation and Preservation Treatments*Prieiga per internetą: http://www.fhwa.dot.gov/pavement/preservation/pubs/perfeval/perfeval.pdf.

Ziliute L., Laurinavicius A., Kleiziene R. 2011. Investigation and analysis of heavyweight traffic running loads in streets of Vilnius city, *8th International Conference on Environmental Engineering* (January): 1261–1267.

Zofka A., Josen R., Paliukaite M., Vaitkus A., Mechowski T., Maliszewski M. 2014. Elements of pavement management system: Case study, *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 9(1): 1–9. DOI: 10.3846/bjrbe.2014.01 .

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Vaitkus A., Gražulytė J., Kravcovas I., Mickevič R. 2021. Comparison of the Bearing Capacity of Pavement Structures with Unbound and Cold Central - Plant Recycled Base Courses Based on FWD Data, *Sustainability* 13(11): 1–17. DOI: 10.3390/su13116310.

Kravcovas I., Vaitkus A., Kleizienė R. 2020. Comparison of pavement performance models for urban road management system, *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 15(3): 111–129. DOI: 10.7250/bjrbe.2020-15.487.

Vaitkus A., Gražulytė J., Skrodenis E., Kravcovas I. 2016. Design of frost resistant pavement structure based on road weather stations (RWSs) data, *Sustainability* 8(12): 1–13. DOI: 10.3390/su8121328.

Straipsniai kituose leidiniuose

Vaitkus A., Čygas D., Gražulytė J., Andrejevas V., Kravcovas I. 2018. Comparative Analysis of Cold Central-Plant Recycled and Unbound Base Course Bearing Capacity, *Proceedings of 7th transport research arena (TRA 2018)*: 1–9, Vienna. DOI: 10.5281/zenodo.1484068.

Žiliūte L., Motiejūnas A., Kleiziene R., Gribulis G., Kravcovas I. 2016. Temperature and Moisture Variation in Pavement Structures of the Test Road, *Transportation Research Procedia 14*: 778–786, Warsaw. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.067.

Kravcovas, I. 2018. Automobilių kelių dangų valdymo sistemų įvesties duomenų poreikis, *21-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis" teminė konferencija „Civilinė inžinerija ir geodezija“:* 1–5, Vilnius.

Summary in English

Introduction

Problem formulation

Urban road networks of modern European and other countries is well developed and requires complex measures to keep it maintained. Every urban road network is a huge asset requiring rational solutions to conserve, maintain and preserve it. Budget for maintenance and repair is often distributed according to the needs of the society or based on pavement distress visual inspections. The funds allocated for this purpose are often used irrationally, as the application of similar measures to urban road sections of similar conditions may have different effects. Excluding the pavement bearing capacity evaluation leads to more simple solutions being chosen, such as replacement of the top layer of the pavement. In this case, especially on higher category streets, the same type of damage occurs in the following seasons of operation after the renewal. Three key factors should ensure cost-effective urban pavement management:

- an accurate assessment of the current pavement condition, including evaluation of bearing capacity;
- urban road segmentation into sections of the same or very similar condition;
- selection of adequate measures depending on current and future pavement condition.

During pavement condition assessment, usually it is not enough to only visually inspect visible pavement distresses. Complex criteria called pavement condition index (PCI) are used. These indices take into account three basic pavement performance

indicator groups: structural, comfort and safety. Each component of PCI has its own weighting factor which should be established experimentally.

In order to simplify the pavement condition assessment, urban road network is divided into sections with similar parameters (e.g. configuration of street traffic lanes, pavement condition, bearing capacity, etc.). Such sections are called homogeneous, and the process of forming these sections is called segmentation. There are several segmentation methods in use worldwide, though there is no single best method chosen for urban pavements.

Relevance of the thesis

In countries that do not have automated pavement management systems (PMS) for the maintenance and evaluation of the urban road network, the effective use of limited funds to maximize their impact on the improvement of the urban road network remains a pressing issue. The specificity of the degradation of pavement structures dictates that when a certain level of degradation is reached, pavement structure requires a complete overhaul. This necessitates the application of the necessary measures immediately. Therefore, it is necessary not only to constantly assess the condition of the urban road network, but also to look for ways to determine the actual condition and select a suitable renovation solution. More importantly, the condition and the rehabilitation solution chosen could be applied to sections with the same or very similar pavement performance.

The dissertation deals with the issues of urban road pavement condition evaluation, estimation the significance of individual pavement performance indicators for the global pavement condition index. The proposed methodology for pavement condition evaluation could be used in municipalities to compile priority lists for repair and maintenance of streets. The described method of weight factor estimation could be used in any urban road network. Segmentation of streets has so far been carried out by assessing urban road parameters and / or the level of pavement deterioration. The proposed segmentation algorithm can be used to delineate urban roads into homogeneous sections.

Object of the thesis

Urban road pavement condition evaluation based on measurable and calculated pavement performance indicators delineating homogeneous sections.

Aim of the thesis

To determine the significance of bearing capacity as well as other pavement performance indicators used in pavement performance evaluation process, while proposing the approach for urban road sectioning.

Objectives of the thesis

To achieve the goals of the thesis, the following tasks were set:

1. To review the existing methods of pavement condition evaluation and to analyse the methods of road segmentation, selecting appropriate solutions to apply to urban road network.

2. To determine the trends of various pavement technical parameters, depending on the reference pavement class.
3. After analysing the technical parameters of the urban road pavement condition, perform calculations using the selected pavement condition assessment methods (COST 354 and LRA) and identify the differences between them.
4. To propose an algorithm for urban road pavement segmentation and to provide guidelines for its application.
5. To determine the influence of urban pavement bearing capacity on the global pavement performance index, and to evaluate the significance of other indicators on pavement condition.
6. To evaluate the influence of the upper asphalt layer renovation works on the urban road pavement structure condition.

Research methodology

Experimental studies of pavement condition evaluation were performed using pavement roughness (IRI) and pavement distress measurements by a mobile road research laboratory and pavement deflection measurements by a falling weight deflectometer. Statistical regression and comparative analysis methods were used to compare the results of pavement condition evaluation methodologies. Regression analysis methods are used to calculate the bearing capacity of the pavement structure. Cumulative difference and moving average methods were used in urban road segmentation. Calculations, analysis and summarization of results are performed using software. A automatic segmentation tool is programmed in the Visual Basic language using a spreadsheet.

Scientific novelty of the thesis

During the research, the following results were obtained that are new and significant for civil engineering:

1. To date, there has been no universal urban road pavement condition evaluation methodology. To propose one, the COST 354 activity-based methodology with calibrated weights of individual pavement performance indicators was evaluated during the analysis. An algorithm for determining weight factors from a larger sample of urban road pavement data is described. The proposed methodology helps to comprehensively assess the overall pavement condition, taking into account the safety, comfort and structural pavement characteristics.
2. A combined segmentation method of moving averages and cumulative differences methods is proposed. The Ramer – Douglas – Peucker (RDP) algorithm is recommended to simplify segmentation. An automatic segmentation tool has been developed to help automatically delineate the boundaries of homogeneous sections based on pavement performance

indicators data. The tool speeds up the segmentation process and reduces the influence of the human factor.

Practical value of the research findings

The research results can help implement a fully or partially automated pavement management system for an urban road pavement network. Also, based on the presented algorithms, it is possible to evaluate the condition of the pavement of individual urban roads or by compiling a priority list of repairs of individual homogeneous sections.

Defended statements

1. The bearing capacity index of a pavement structure is an essential component of the total pavement condition index.
2. Urban road segmentation should be performed by assessing the bearing capacity of the pavement structure.

Approval of the research findings

4 scientific articles have been published on the topic of the dissertation: three – in scientific journals included in the Clarivate Analytics Web of Science database (Vaitkus et al. 2021; Kravcovas et al. 2020; Vaitkus et al. 2016); one in a peer-reviewed scientific journal (Žiliūte et al. 2016).

The results of the research carried out in the dissertation were published in three scientific conferences in Lithuania and abroad:

- Young Scientists Conference *"Science – the Future of Lithuania"* in 2018, Vilnius;
- International conference "*Transport research arena*" in 2018, Vienna;
- International Conference "*4th international conference on road and rail infrastructures*" in 2016, Zagreb.

Structure of the thesis

The thesis consists of an introduction, three chapters, general conclusions, recommendations, a list of references, a list of the author's scientific articles on the topic of the thesis and summary in English. There are also six annexes.

Thesis consists of 140 pages, excluding annexes, 24 numbered formulas, 59 figures and 15 tables. 106 literature sources were used while writing the thesis.

Acknowledgements

The author of the thesis sincerely grateful to her scientific supervisor Prof. Dr Audrius Vaitkus for consultations, advice and valuable scientific insights, as well as for trust and encouragements for improvements. The author expresses gratitude to Dr Rita Kleizienė for useful ideas and various help, especially in the initial stages of thesis preparation. Author is grateful to the thesis experts for their valuable comments and remarks. The author is grateful to Vilnius Tech University Road Research Institute for the opportunity to improve through experimental research and to all employees of the institute for their

help and support during the study. Of course, the author expresses gratitude to all his relatives and closed ones, for their trust, understanding and support.

1. Analysis of pavement evaluation methods

Many urban roads of modern cities and towns were built 30 or even more years ago. Meanwhile, the design life of newly constructed urban road pavement is 20 years. Asphalt pavements in such cities makes up at least 75% of all pavement types. On such pavements surface distresses appear during first few years of operation of newly rehabilitated urban roads. Typical methods of dealing with surface distress are patching potholes every 1-2 years or replacing top asphalt layer altogether every 8-10 years, provided that the design load has not changed. Due to the limited amount of funds, these measures are applied untimely and their effectiveness is questionable, as it is likely that the time has come to overhaul the entire pavement structure. In any case, the adequacy of these periodic measures should be based on an assessment of the whole urban road network. For this purpose, pavement condition assessment procedures are widely used internationally.

In many countries, including Lithuania, for most urban road networks the renovation of roads is planned on the basis of subjective criteria. In most cases, there is a lack of a multi-criteria evaluation system and segmentation based on pavement condition. Optimal road network management must be ensured by collecting and storing accurate data on the condition of the road or urban road throughout the life of the facility. It is important to ensure that road condition data is updated periodically or after certain repairs. No less important is the composition of the infrastructure-building structure and its change during operation. Because all of these aspects alone are very difficult to manage, pavement management systems have been widely used for these purposes worldwide for more than 50 years (Haas et al. 1978).

At the end of the twentieth century, the development and implementation of PMS began in Eastern and Central European countries, as well as in the Baltic States. Pavement management helps to make decisions at various levels (Dore et al. 2009; Haas et al. 2015; Wolters et al. 2011):

- At the strategic level, politicians and experts make decisions about long-term strategies at the country or organization level. Issues to be considered may include the setting of various permissible road condition indicators, the allocation of funding or the selection of a sustainability strategy. Often the strategic level is equated with the network level.
- Network level analysis identifies the need for maintenance and repairs, forecasts changes in pavement condition under different funding scenarios, prioritises the list of network elements (urban roads or road sections) in need of repairs and further analysis at project level and the timing of repairs . The typical period for which decisions are made is 5 years.
- At the project level, solutions are concentrated for the next 1-2 years. The main issues to be addressed are the planning of maintenance and repair work in order to prolong the service life as much as possible and to rationalize the allocated funds.

For PMS, it is important to have input data on the road or urban road in operation with sufficient periodicity and accuracy. The more different road parameters will be collected, the more accurate pavement degradation models can be used in PMS. Braga

(2005) identifies the following key data required for the operation of road surface condition management and road development planning systems:

- Data on the road section, roads or road network – geometrical, technical and operational characteristics of the road and road surface construction; other data on the road and its condition.
- Data on vehicles and their traffic – traffic intensity, traffic flow composition, traffic growth forecast; traffic conditions; technical and operational characteristics of motor vehicles.
- Data on road works – requirements for road maintenance, repairs, reconstruction and construction of new roads, standards, prices; schedule of planned works.

When assessing the condition of the road network, measurements are performed automatically throughout the road network, analysing the main technical parameters of the road surface. This method allows you to:

- determine the level of condition of the entire road network,
- determine the deterioration level of individual road sections,
- assess whether the individual road surface parameters in question meet the qualitative requirements set for them,
- to compare the condition of individual road sections throughout the road network.

In order to reliably and fully determine the condition of the pavement, a number of individual factors should be considered – pavement performance indicators (PPI). Indicators can be divided into structural and functional. Functional indicators include traffic safety and driving comfort parameters, and structural indicators include pavement structure damage, bearing capacity and pavement resistance to traffic loads (AASHTO 1993). These indicators of pavement condition may include roughness, rut depth, cracks, surface roughness, stiffness modulus, surface condition, comfort index, and so on. (Haas et al. 2015).

Typically, the condition of the pavement is determined by a number of different lesions and other factors. The most widely used is the pavement condition index (PCI). The calculation of this index is described in the current US ASTM D6433 standard (ASTM 2011). It is expressed as a number from 0 to 100, where 100 is a perfect pavement without any noticeable defects and 0 is a pavement with the highest level of damage, spread over the highest volume level. Zofka et al. (2014) conducted a study to calculate PCI based on longitudinal and transverse cracks and roughness (IRI) data. The researchers predicted a change in this index over 20 years using 6 typical maintenance and repair scenarios. The results of the study showed that it is most effective not to wait for the pavement condition index PCI to reach a critical level, and to repair the pavement while it is in good condition.

Commonly used and adapted methodology for European road pavement evaluation is based on COST Action 354 “Performance Indicators for Road Pavements”. This methodology was derived involving 23 European countries and the FHWA/USA. Based on a comprehensive investigation that included an extensive literature research and the analysis of questionnaires sent to road operators in the participating countries, a set of performance indicators was developed. The report defines a performance indicator as a superior term of a technical road pavement parameter, which can define its condition. COST Action 354 distinguishes four levels of performance indicators:

- Technical parameter (TP) – a physical characteristic of the road pavement condition, derived from various measurements, or collected by other forms of investigation (e.g., rut depth, friction value, etc.).
- Performance index (PI) – an assessed technical parameter of the road pavement, dimensionless number or letter on a scale that evaluates the technical parameter involved (e.g., rutting index, skid resistance index, etc.) on a 0 to 5 scale, 0 being a very good condition and 5 – a very poor one.
- Combined performance indicator (CPI) – a dimensionless number related to two or more different characteristics of the road pavement, which indicate the condition of all the characteristics involved.
- Global performance indicator (GPI) – a mathematical combination of single and/or combined indicators, which describe the pavement condition concerning different aspects like safety, structure, riding comfort and environment.

Due to the flexibility of the COST 354 methodology, the good practice of Lithuania and other countries, this methodology for assessing the condition of the pavement was chosen for the analysis in this work. Although it is intended to determine the condition of roads of national importance, it could be adapted to use with the urban road network by experimentally calculating the significance (weighting factors) of individual and combined condition indices. The Lithuanian Road Administration methodology for state road pavement evaluation was chosen for comparison, as it is calibrated under Lithuanian environmental and traffic conditions.

An important part of pavement management is to divide whole urban road network into sections with similar condition and characteristics. Such sections are called homogenous. The exact definition of a homogeneous section varies in each road / urban road network management organization, depending on the development and capabilities of the pavement management system and the road survey equipment available this year (F Thomas et al. 2004). Not all of the characteristics identified relate to the same reference system, but the system still depends on the following characteristics and general structural conditions:

- information characteristics (slip resistance, ruts, cracks, etc.);
- data collection method (visual, manual measuring device, automated device, etc.);
- measuring device (falling weight deflectometer, mobile laboratory, etc.);
- level of research (road / urban road network scale, project scale).

Bennett (2004) describes several ways of segmentation that can divide a path into individual segments:

- Breakdown by fixed section length. For example, the road is divided into 500 m sections until the very end.
- Breakdown by changes in value. For example, at places where the width of a road or urban road changes, or the structure of the pavement. Also, the section boundary is often placed at places of change of the administrative unit, such as at the city boundary or between districts of the state.
- Breakdown by value range. For example, measuring roughness (IRI) on the urban road could be broken down by IRI values: <5 m / km; 5-10 m / km; 10-15 m / km; > 15 m / km.

- Breakdown by value deviation. For example, if the roughness (IRI) is measured on a urban road, the boundary of the section would be at locations where the IRI changes by more than 1.5 m/km compared to the starting value of that section.

There are a number of methods used to delineate urban road sections. The most popular is the cumulative difference method, which is easy to apply and automate, but it can be unreliable in the case of large fluctuations in adjacent measurement values, from which the boundaries of the sections are more difficult to distinguish. Therefore, it may be appropriate to refine this method or use another method, such as moving averages. In order to select the most rational method for segmenting the urban road network, an experimental study should be performed.

The absolute differences in sliding mean values method has been introduced in Germany. Rübensam et al. (1996) proposed a way to potentially reduce the errors associated with large variability in response values. The authors propose to first align the series of measurement of response values and further analyse it. For each measurement point, the average of the value itself is calculated together with its neighbouring values.

2. Urban road pavement performance research

Experimental research consists of 2 essential components of urban road pavement management – segmentation of homogenous sections and pavement condition evaluation. For this purpose, an experimental study of the condition of Vilnius urban road pavement was planned, during which data was be collected for further analysis, selection of methodologies and development of algorithms.

It was decided to conduct the study on category B (B1 and B2 until 2019) urban roads (STR 2.06.04: 2014 2020) with different traffic intensity and traffic flow composition. A total length of 15 urban road sections of about 48 km has been selected. Each urban road had from 2 to 6 lanes in both directions. Category B urban roads should reflect most high-intensity urban roads in Vilnius. Category A urban roads have not been studied, as they usually have speeds above 80 km/h, which would not reflect typical traffic conditions in the city. There is also less public transport on Category A urban roads, which has a significant impact on the pavement deterioration. On the practical side, it is difficult to carry out surveys on high-speed urban roads, as traffic in the lane under study should be closed. The experimental study was conducted in two stages:

1. In 2017 measurements of the condition of the pavement were carried out with mobile laboratory RST28 and falling weight deflectometer on 15 B-category urban roads of Vilnius, determining the damage, condition and bearing capacity of the pavement, while also measuring the traffic intensity and determining the layers of the pavement structure.
2. In 2019 similar measurements of urban road condition and distress were carried out.

The assessment of the condition of the paved urban roads was performed according to the two methodologies described in the first chapter – the method used by LRA – Lithuanian Road Administration, to assess the condition of state roads and the COST Action 354 method. Both methods allow calculation of the pavement condition indices, the combined condition indices and overall pavement condition index based on the data of the technical parameters obtained during pavement measurements. The technical

parameters used to calculate the condition indices (PI) and the applicable conversion formulas are given in Table S.2.1.

Table S.2.1. Calculation of performance indices based on COST 354 and LRA methodologies

Performance Index	Technical parameter	Equation*	
		COST 354	LRA
Longitudinal roughness, PI_N	Roughness (IRI), m/km	0.816 · IRI	$2 \cdot IRI - 5.02$
Transversal roughness, PI_P	Rut Depth (RD), mm	−0.0015 ·RD2 + 0.2291·RD	0.2·RD
Bearing Capacity, PI_L	SCI300, μm	SCI300 /129	–
Cracks, PI_Pl	Cracking (CR), %	0.1333·CR	kai CR ≥ 8.73 % tada 5 kai CR < 8.73 % tada $-0.0669 \cdot CR^2 + 1.1379 \cdot CR$
Surface defects, PI_Pd	Surface defects (SD), %	0.1333·SD	kai SD ≥ 6.9 %, tada 5 kai SD < 6.9 %, tada $-0.0942 \cdot SD^2 + 1.3412 \cdot SD$

The absolute results of the urban road pavement survey are summarized and grouped according to the pavement construction class. As there are no actual data on the thickness of the pavement of each urban road, the urban roads are assigned theoretical classes according to the measured intensity of public (route) traffic. According to STR 2.06.04: 2014 "Urban roads and roads of local significance. General requirements (2020)" category B urban roads may be paved with DK 1, DK 2 and DK 3 pavement structures. i.e., the minimum allowable class is DK1. Comparing the results of 2019 and 2017 measurements, the roughness (IRI) and the bearing capacity parameters (SCI) of the bonded layers and the bearing capacity parameters (BDI) of the base layers decreased: average IRI 14.2–23.1%, average SCI 15.5–34,3% and an average BDI of 0.5–12.0%. The probable reason for the decrease in roughness is the partial repair and renovation of the asphalt surface layer of the investigated sections. Decreases in SCI and BDI could be recorded as the upper part of the pavement structure consolidates over time and shows better bearing capacity. Similar results were obtained by Žiliūte et al. (2016). Examining the change in the bearing capacity of the test section from the construction. It turned out that the bearing capacity of the entire pavement structure increased at least 5 years after the start of operation. The opposite trend is seen with the ruts and the BCI bearing capacity parameter. Rutting increased on average in DK 2 and DK 10 class sections by 16.9–27.7%. The parameter representing the bearing capacity of the deepest layers, BCI1200, increased on average from 0.6 μm to 2.0 μm, i. e. 2.2–8.2% over two years. Such trend could mean that rutting is associated with subgrade deterioration. On the other hand, considering the measurement error of the falling weight deflectometers (2% ± 1 μm for bends and 2% ±

0.2 kN for the applied load), it is likely that the changes in the BCI parameter are not absolute and reflect inaccuracies between the two measurements by different models. Continuing the research carried out in this dissertation, it would be expedient to check the bearing capacity of the subgrade in the future and to compare it with the already available results.

Three combined condition indices (CPI) were calculated by comparing the previously described pavement condition assessment methodologies: structural, comfort and safety, and total pavement condition index (GPI). The indices are calculated in all 15 surveyed Vilnius city urban roads according to the 2017 measurement data. The condition is expressed in dimensionless units in a five-point scale, where 0 is the best condition and 5 is the worst condition.

In two years, the unevenness and the bearing capacity of the bonded and base layers have improved (average IRI – 12 urban roads out of 15, average SCI – 14 urban roads out of 15, average BDI – 12 urban roads out of 15). Probable causes are partial maintenance and renovation works of the upper asphalt layer and consolidation of the pavement structure layers. The opposite trend can be seen with the ruts and the bearing capacity of the ground bed – the values of these parameters increased (i.e., the condition deteriorated: average rut – 12 urban roads out of 15, average BCI – 10 urban roads out of 15). The occurrence of ruts is assumed to be related to the deterioration of the bearing capacity of the subsoil. This shows that the bearing capacity is also a very important parameter in the assessment of the condition of the pavement.

3. Analysis of pavement performance indicator significance

In the first section, several segmentation methods were described. The two main methods most widely used in the world are the cumulative difference (CD) method and the absolute moving average (MA) method. To determine which method is most appropriate for studying urban road pavement data, the two methods were compared. Segmentation with the same indicators was also applied to the "green" data and a combination of the first two methods was tested. In order to compare different methods, data sequences and segmentation curves were used. The segmentation curve was constructed differently for each method. Using these curves visually or using tools homogenous section borders should be apparent.

The main problem with segmentation is that it can be difficult to see trends in certain curves. This may be due to excessive local fluctuations between subsequent measurements or due to a peaking of a single measurement on a short stretch of urban road where an extreme parameter has been recorded. The choice of segmentation method depends primarily on the data sequence. It may not be necessary to use any methods, and with green data, the curve will show the boundaries and trends. This option is best because the data is not modified or distorted in any way, but it is very rare to obtain such a sequence of data.

Based on the analysed examples, it can be concluded that the cumulative difference method allows to determine the segment boundaries in a relatively simple sequence of data. By combining the CD and MA methods, the boundaries of the sections are seen even better, including in the data sequence, when the measurement points are quite far from each other. Segmentation by the MA method can prove complicated because the curve often has peaks of different sizes and it is difficult to estimate which one is significant,

i.e., represents the response of the curve to the change in the trend of the data and which represents the response to the instantaneous extreme value in the data sequence. It was practically impossible to see the sections according to the "green" data curve with the data collected during the study, but further the green data curve will be used to check the suitability of segmentation.

Any measured technical parameter, calculated combined or overall condition index can be selected as the object of segmentation. Selection of the segmentation object, i.e. the determination according to which it is expedient to segment the condition or deflection of the pavement depends on the nature of the planned maintenance and repair works. If bearing capacity has never been tested on a given urban road, it is recommended to determine it and divide the section according to one of the possible bearing capacity indicators (deflections, SCI, BDI, BCI, etc.) or according to the combined bearing capacity index (CPI_str, GPI, etc.). In this case, homogeneous sections could be delineated more rationally. Also, segmentation by assessing the bearing capacity is recommended when planning reconstruction works. For the planning of simple repairs of the upper layers, the condition indicators of the surface condition of the pavement surface, such as IRI, ruts or combined, assessing damage, would suffice.

Comparing IRI (or other indicator measured by RST28 laboratory) and deflection (or other indicators calculated from FWD data) segmentation curves, it can be concluded that the 10 m IRI measurement step chosen in the dissertation is fully suitable for homogeneous sections. The 150 m step selected for the first stage of FWD measurements proved to be too long, thus in the second stage the step was halved to 75 m. However, results showed that this step was too long as well. In the case of sparse data, homogenisation is not guaranteed, although it is possible. About 20% of the samples examined showed completely different homogeneous stretches. Without additional research, it is difficult to say which step of FWD measurements would be the most rational. Each managing organization should choose the step according to its capabilities, as more intensive research increases costs and prolongs measurement time. However, based on studies based on FWD measurements performed in Lithuania, it can be stated that the step should be at least 25 m long.

Graphical segmentation using curves is a fairly accurate way to determine the boundaries of sections. However, when the same needs to be repeated for a large urban road network, according to various indicators of pavement condition, segmentation can take a long time. In addition, the deflection data of the falling weight deflectometer, according to the study, varies significantly, which can make it difficult to distinguish homogeneous sections from the graph visually. Therefore, in order to simplify and automate the process, a split-and-merge algorithm, also known as the Ramer – Douglas – Peucker (RDP) algorithm, was proposed to be used with the cumulative difference method or the moving average method or the combined method. Algorithm calculations can be performed manually, visually, or using software such as spreadsheets and other tools. In order to facilitate and automate the urban road segmentation process automated tool was developed in the form of a spreadsheet. This spreadsheet coded with the help of Microsoft Excel software and Visual Basic programming language.

The significance of pavement performance indicators is related to the weigh factors of each index. The more a certain index affects the total surface condition index, the higher the weighting factor (max 1.0). The process of determining weighting factors for each index in the implementation of PMS on city urban roads is a meticulous and data-intensive process. Ideally, the weighting factors should be selected based on the results of measurements of the entire urban road network, dividing the urban roads by category, traffic intensity, or using other classifiers. In this work, weighting factors are determined based on the data of the performed experimental study. The presented method can and should be applied on a larger scale, but the values obtained can be considered as a starting point.

The calculation of the indices is based on the pavement condition assessment methodology chosen in Chapter 2 according to COST 354. The estimates of the pavement condition index (GPI) are considered to be the combined pavement condition indices (CPI). Three CPIs are used to calculate GPI – structural, security and comfort. The environmental CPI was not assessed due to the complexity of its identification and the lack of baseline data, as the level of pollution, noise dispersion and other parameters are unknown. In the COST methodology itself, this CPI is identified as ancillary, used only in certain cases where it is necessary to assess the environmental impact. Each CPI is calculated, assuming that the weight factors for each of the component condition indices (PIs) are equal to one. The composition of each CPI is as follows:

- structural CPI consists of unevenness, ruts, cracks and bearing capacity PI;
- comfort CPI consists of unevenness, ruts, cracks and surface defects PI;
- safety CPI consists of ruts and surface defects PI.

In calculating the CPI, the significance of each of the component PIs is assessed by determining which index has been identified as the most important. The assessment is performed for all urban roads measured during the experimental study by averaging all measured points to a 100 m long sections according to 2017 and 2019 data. The significance of PI is expressed as a percentage of a number of all 100 m long sections on which this index had the highest value.

Results showed that the bearing capacity PI was the most significant in the structural CPI – 61.9% on average (or 69.5% and 54.1% in 2017 and 2019, respectively), the second most significant roughness PI – 27.7% on average (or 24.2% and 31.2% respectively). In calculating the comfort CPI, the most significant was the roughness PI – 73.8% on average (or 81.5% and 66.0% in 2017 and 2019, respectively), the second most significant was the rutting PI – 22.3% on average (or 16.3% and 28.4%). Only 2 components are used in the calculation of safety CPI and the most significant of them was rutting PI – 90.7% on average (or 91.0% and 90.4% in 2017 and 2019, respectively), the second most significant surface defect PI – 9.3% on average (or 9.0% and 9.6%, respectively).

The GPI is calculated according to the three CPIs already mentioned. For each of them, significance is also determined by calculating the maximum CPI in each of the 100 m long sections. Significance is also expressed as a percentage. It turns out that the essential combined performance index is structural. Its value was highest at 97.0% on average (or 97.8% and 96.2% in 2017 and 2019, respectively). Next in significance is the comfort CPI, with a value of 2.5% on average (or 1.8% and 3.2% in 2017 and 2019,

respectively), and the least significant is the safety CPI with a value of 0.5% on average (or 0.4% and 0.6% in 2017 and 2019, respectively).

Based on the results described above, it can be stated that the bearing capacity parameter is an essential estimate in determining the condition of urban road pavement. As the bearing capacity is often not measured at all in road surface condition surveys, it can be assumed that the total pavement condition indices determined are not objective and, therefore, the rationality of compiling a priority list for repair and maintenance deteriorates.

Based on the obtained results, a table of weighting factors (Table S.3.1) is created. As the chosen assessment methodology is based on COST 354, the weighting factors should be selected within the range between the minimum and maximum recommended value. The rule was also followed, if the weighting factor of the least significant index was selected according to the lowest recommended value from the provisions, the weighting factor of the next most significant index should be not less than the one previously determined.

Although the friction parameter was not measured during the experimental study, it is possible to evaluate it in the presented methodology. It is a rather important parameter when calculating the safety CPI, as urban roads have high traffic intensity and high movement of vulnerable road users through the urban roads. Vehicles also move more densely to each other. In order to reduce the stopping distance and the possibility of aquaplaning or vehicle entanglement, it is important to ensure good adhesion of vehicle wheels to the road surface.

Table S.3.1. Proposed PI and CPI weights

GPI	CPI weight	CPI	PI	PI weight
General Performance Index	1	**Structural**	Roughness	0.8
			Rut depth	0.6
			Cracking	0.8
			Bearing Capacity	1
	0.7	**Comfort**	Roughness	1
			Rut depth	0.7
			Cracking	0.5
			Surface defects	0.6
			Mean profile depth	0.4*
	0.5 (0.7*)	**Safety**	Rut depth	1
			Surface defects	0.5
			Mean profile depth	0.5*
			Friction	1*

It should be emphasized that the established weighting factors are the most appropriate for the analysis of the condition of the urban roads examined in the

experimental study and their similar urban roads. According to the presented algorithm, with larger and wider time span data, weighting factors could be determined more accurately, and, if necessary, classification according to urban road category, traffic intensity, etc. could be performed. Also, continuing the research carried out in this work, the friction parameter as well as mean profile depth should be additionally measured.

In one of the studied urban roads between two measurement stages top layer repair works were conducted. The works were performed in Žirmūnų st. During the repair works, a levelling layer of asphalt was laid, milled and a 3 cm thick top layer of asphalt from the mixture Rugovia TM 11 (BBTM 11 A 25/55–60) was installed. In addition, a 9 cm thick lower layer of asphalt from the mixture AC 22 AS (PMB 25/55–60) was installed at the section with high rutting after milling the asphalt damaged by the ruts.

In the example, the main technical parameters determined during the measurements, averaged over 100 m sections: roughness (IRI) and ruts were compared. Assessing the layout of the measurement sites, it is assumed that a change of the upper asphalt layer was made in the section from 0.520 km to 2,100 km. Comparing between the measurements of 2017 and 2109, the average IRI in this section decreased from 4.60 m/km to 1.31 m/km (i.e. about 3.5 times) on the left side of the urban road, in the first lane and from 5.23 m/km to 1.34 m/km (i.e. about 3.9 times) on the right side of the urban road, in the first lane. The average rut depth in the repaired section decreased from 22.59 m/km to 3.84 m/km (i.e. about 5.9 times) on the left side of the urban road, in the first traffic lane and from 23.46 m/km to 6.29 m/km (i.e. about 3.7 times) on the right side of the urban road, in the first lane.

Comparing the results of all three bearing capacity indicators between the first unrepaired and the second repaired section, it can be seen that the values differ sufficiently, so it can be stated that the boundary of the first and second section corresponds to the true boundary of the homogeneous section. Comparing the results between the third unrepaired and the second repaired section, it can be seen that the values do not differ much – up to 15%, although the average IRI values of the same sections differed more than 3 times. The surface condition of the pavement shows a significant difference between the sections, and the indicators of the bearing capacity of the pavement do not show this difference, so it can be concluded that the boundary between the second and third sections is not the true boundary of homogeneous sections. If urban road segmentation were performed solely on the basis of pavement surface survey data, the urban road would be inaccurately divided into homogeneous sections of the urban road, which could lead to irrational pavement maintenance and repair solutions. For this reason, it is appropriate to perform the segmentation on the basis of the bearing capacity indices or on the basis of the total surface condition indices including the bearing capacity index.

General conclusions

1. With the help of pavement management systems (PMS), the complex task of compiling priority lists of urban road sections based on objective criteria is solved. One of the main components of PMS is the pavement condition evaluation, which is performed by assessing separate pavement performance indicators. In order to rationalize the selection of criteria and to purposefully allocate the urban road network maintenance and rehabilitation funds, the

pavement evaluation method must be approved, including the determination of the significance of pavement performance indicators and the selection of road segmentation method.

2. Experimental research results show that bearing capacity of the pavement structures is insufficient in comparison with the reference pavement structure class. In 2 years, IRI and the bearing capacity of the asphalt and base layers have improved, possibly due in part to the treatment of the upper asphalt layer and consolidation of all pavement structure layers. The opposite trend is observed with the rut depth and bearing capacity of the embankment. It is likely that rutting is related to the deterioration of the subgrade observed in its lowered bearing capacity. According to these findings, bearing capacity is an important parameter in pavement condition evaluation.

3. Calculations using COST and LRA methodologies show that individual pavement condition indices differ slightly, but the combined and global pavement condition indices differ by up to 36%. The global pavement condition index of the COST methodology is on average 1.6 times higher than the LRA. The differences in the total pavement condition index between these methodologies are determined by the inclusion of the bearing capacity index in the COST methodology. Since the LRA method does not evaluate the bearing capacity index, the COST methodology has been selected to be more suitable for integration into PMS of urban road networks.

4. Segmentation is usually done using the cumulative difference method, which is easy to implement and automate, but it may be unreliable in case of large fluctuations in adjacent measured values. In the study, curves generated by the proposed combined moving averages and cumulative difference method with the help of the RDP algorithm showed the highest correlation (R^2 = 0.958). An automated calculation tool has been developed based on the RDP algorithm, which significantly shortens the segmentation time and reduces the risk of human error.

5. According to the study results, the bearing capacity condition index in urban urban roads was the most significant when calculating the global pavement condition index (60.9%). After calculating the significance of each combined performance index it was found that structural CPI was the dominant. Its significance was highest in 97.0% of cases, followed by comfort CPI (2.5%) and security (0.5%). Based on these results, weights of each condition index and combined condition index were proposed.

6. Asphalt layer rehabilitation positively affects the roughness (IRI improved over 3.5 times) and the bound layer bearing capacity indicator SCI300 (up to 1.4 times improvement on average). The base layers bearing capacity indicator BDI remained almost unchanged, while subgrade bearing capacity number BCI1200 of the subsoil deteriorated, though it could have been due to statistical measurement errors. This proves that the repair of the upper layer does not increase the bearing capacity of the lower layers. Also, the formation of

homogeneous sections according to the bearing capacity indicators would be more accurate if compared to the case when the segmentation is performed only based on the pavement surface condition indicators.

7. By applying proposed pavement condition assessment methodology and segmentation algorithms, the composition of maintenance and repair priority list for urban road network could be rationalized by introducing objective selection criteria. The calculated weight factors could be used while implementing the PMS for urban pavement management, later adjusted according to the presented weight factor calculation algorithm, having a sample of the state data of the entire street pavement network.

Recommendations

1. When implementing PMS for urban road pavement repair planning, it is recommended to start with the selection of the pavement condition evaluation method. When choosing a method, it is important to ensure that all relevant pavement condition indicators are included. The results of this work showed that the bearing capacity indicator is important for determining the global pavement condition, therefore, it is recommended to gather not only roughness and defect data but to examine the bearing capacity. Using bearing capacity data, it is possible to more accurately select the boundaries of homogeneous sections even with renewed pavement. It should be emphasized that the measurement step of first ever measurements on a road should be chosen denser – at least 25 m. Otherwise, due to local variation in the data, it may be problematic to select the boundaries of homogeneous sections.

2. When determining homogenous section boundaries of urban pavements according to the condition of the pavement, it is recommended, to manually set boundaries at places where the urban road configuration changes due to intersections (e.g. number of lanes, public transport lane, etc.) or significant change in traffic intensity. It is recommended to use the developed automatic calculation tool based on the proposed combined method of moving averages and cumulative difference, in which the number of sections and their boundaries coincide with the least uncertainty for various pavement condition indicators. It is recommended to select the roughness (IRI), one of the load-bearing capacity indicators or the combined / total coating condition index as the object of segmentation.

3. The proposed algorithms for determining the significance of pavement condition indicators could be applied with a larger sample of pavement condition measurement data – preferably with the results of a survey of the entire urban road network. The proposed segmentation algorithm could also be improved by selecting the object and method of segmentation according to the specifics and needs of a particular urban road pavement network.

Priedai[3]

A priedas. Dangos konstrukcijos klasės apskaičiavimas bei jos palyginimas su teorine
B priedas. Keturiais metodais sudarytų segmentavimo kreivių palyginimas
C priedas. Automatizuota segmentavimo skaičiuoklė
D priedas. Autoriaus sąžiningumo deklaracija
E priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje
F priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

[3] Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Igoris KRAVCOVAS

GATVIŲ DANGOS BŪKLĖS VERTINIMO
RODIKLIŲ ĮVERČIŲ REIKŠMINGUMO TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
statybos inžinerija (T 002)

ANALYSIS OF URBAN ROAD PAVEMENT
PERFORMANCE INDICATORS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Civil Engineering (T 002)

2021.07.16. 12,0 sp. Tiražas 20 egz.
Leidinio el. versija https://doi.org/10.20334/2021-038-M
Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius
Spausdino BĮ UAB „Baltijos kopija“,
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius