

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Paulius PAPLAUSKAS

VALSTYBINĖS REIKŠMĖS KELIŲ ASFALTO DANGOS BŪKLĖS BLOGĖJIMO SPARTOS VERTINIMO MODELIS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (T 002)

Vilnius, 2024

Disertacija rengta 2019–2024 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. Donatas ČYGAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Statybos inžinerija – T 002).

Nariai:

prof. dr. Marija BURINSKIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Statybos inžinerija – T 002),

doc. dr. Vaidas LUKOŠEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, Transporto inžinerija – T 003),

prof. dr. Ainars PAEGLITIS (Rygos technikos universitetas, Latvija, 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 **2024 m. birželio 7 d. 13 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto SRA-I posėdžių salėje.

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

Tel. +370 5 274 4956; faksas +370 5 270 0112; el. paštas doktor@vilniustech.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2024 m. gegužės 6 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto talpykloje <https://etalpykla.vilniustech.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto 2024-027-M mokslo literatūros knyga

<https://doi.org/10.20334/2024-027-M>

© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2024

© Paulius Paplauskas, 2024

paulius.paplauskas@vilniustech.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Paulius PAPLAUSKAS

**A MODEL FOR ASSESSING THE RATE OF
DETERIORATION OF ASPHALT PAVEMENT
CONDITION OF NATIONAL ROADS**

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (T 002)

Vilnius, 2024

The doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2019–2024.

Supervisor

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

Chairman

Prof. Dr Donatas ČYGAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

Members:

Prof. Dr Marija BURINSKIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002),

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

Prof. Dr Ainars PAEGLITIS (Riga Technical University, Latvia, 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 Defense Council of the Scientific Field of Civil Engineering in the SRA-I Meeting Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **1 p.m. on 7 June 2024**.

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 intended defence of the dissertation was sent on 6 May 2024. A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Vilnius Gediminas Technical University repository <https://etalpykla.vilniustech.lt> and the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjama valstybinės reikšmės kelių tinklo asfalto dangų degradacijos dinamika ir jos prognozavimas. Disertacijos tikslas – sukurti valstybinės reikšmės kelių asfalto dangos blogėjimo spartos įvertinimo modelį, grindžiamą empirinių duomenų analize nustatytais dangos būklės blogėjimo scenarijais bei suminiu asfalto dangos būklės rodikliu ir jo kitimo prognoze.

Disertacijoje išspręsti šie uždaviniai: išanalizuota ir įvertinta valstybinės reikšmės kelių tinklo struktūra bei sandara, išanalizuoti kelio dangos būklės degradacijos modeliai ir įvertintos jų paklaidos, sukurtas teorinis modelis kelių tinklo degradacijos spartai įvertinti, atliktas eksperimentinis tyrimas Lietuvos valstybinės reikšmės kelių tinklo būklei įvertinti ir degradacijos kitimui poremontiniu laikotarpiu nustatyti naudojant 3D dangų skenerį, išanalizuoti ir įvertinti ryšiai tarp kelio dangos degradacijos ir kelio dangos konstrukcijos, sudarytas ir įvertintas regresinis degradacijos modelis.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, rekomendacijos ir vienas priedas.

Įvade aptarta tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašytas tyrimų objektas, suformuluotas darbo tikslas ir uždaviniai, mokslinis naujumas, praktinė darbo rezultatų reikšmė, ginamieji teiginiai.

Pirmajame disertacijos skyriuje pateikiama literatūros analizė apie kelių turto valdymo bei dangų valdymo sistemų sampratą, įvairias dangų valdymo sistemas, dangų būklės vertinimo ir degradacijos modelius, dangų būklę apibūdinančius rodiklius ir vertinimo metodus. Skyriaus pabaigoje suformuluojami pagrindiniai disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje analizuojami dangos būklę apibūdinantys ir jai įtakos turintys rodikliai, aprašyti istoriniai kelio asfalto dangos nelygumo duomenys, gauti iš karto po atliktų remonto darbų. Taip pat pateiktas tyrimo planas, aprašyta tyrimo metodika ir gauti eksperimentinio tyrimo metu gauti rezultatai.

Trečiajame skyriuje pateikiama kelio dangos nelygumo duomenų, gautų iš karto po atliktų remonto darbų, analizė ir nustatyti teoriniai dydžiai, skirti naudoti dangų valdymo sistemoje pritaikius remonto scenarijus. Pateikiama regresinė panelinių duomenų analizė, nustatant ryšius tarp dangos būklės indekso ir kitų kokybinių bei kiekybinių kintamųjų, jų reikšmingumas ir sudarytas dangos būklės indekso degradacijos modelis.

Disertacijos tema paskelbti trys moksliniai straipsniai: du – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazę (Paplauskas & Vaitkus, 2022; Paplauskas et al., 2023), vienas – recenzuojamame tarptautinės konferencijos pranešimų rinkinyje (Paplauskas & Vaitkus, 2020). Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo pristatyti dviejose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje.

Abstract

The dissertation investigates the evolution of deterioration in significant national road network surfaces and its prediction. Its objective is to develop a model for evaluating the asphalt pavement deterioration rate on national roads, derived from scenarios of surface condition deterioration analyzed from empirical data, along with forecasting changes in the cumulative pavement condition indicator.

The dissertation undertook multiple tasks, including analyzing and evaluating the national road network structure, studying road surface deterioration models and their errors, developing a theoretical model to assess road network deterioration rates, conducting experimental assessments with a 3D pavement scanner of the Lithuanian national road network post-renovation deterioration, analyzing relationships between road surface deterioration and construction class, and compiling and evaluating a regression deterioration model.

The dissertation consists of an introduction, three chapters, general conclusions, recommendations, and one annex.

The introduction discusses the research problem and the relevance of the work, describes the object of research, and formulates the purpose and tasks of the work, scientific novelty, practical significance of the work results, and defended statements.

The first chapter of the dissertation presents a literature analysis on the concept of multiple asset management and pavement management systems, various pavement management systems, pavement condition assessment, and deterioration models, pavement condition indicators, and assessment methods. At the end of the chapter, the main tasks of the dissertation are formulated.

The second chapter scrutinizes pavement condition indicators and their influencing factors. It delves into historical data concerning road pavement unevenness post-repair. Additionally, it outlines the research plan, methodology, and experimental findings.

The third chapter analyzes road surface roughness data acquired post-repair, deriving theoretical values for integration into the PMS post-repair scenarios. It includes a regression analysis of panel data, elucidating relationships between PCI and various qualitative and quantitative variables, assessing their significance, and constructing a deterioration model for the pavement condition index.

Three scientific articles were published on the topic of the dissertation: two in scientific journals included in the *Clarivate Analytics Web of Science* database (Paplauskas & Vaitkus, 2022; Paplauskas et al., 2023) and one in the peer-reviewed material of an international conference (Paplauskas & Vaitkus, 2020). The results of the research conducted in the dissertation were presented at two scientific conferences in Lithuania and abroad.

Žymėjimai

Simboliai

ESA_{100M} – metinis transporto srauto poveikis dangų nusidėvėjimui kelio ruože, vnt. (angl. *Annual impact of traffic flow on pavement wear on a road section*);

ESA_{100P} – vidutinis metinis vienos paros transporto srauto poveikis dangų nusidėvėjimui kelio ruože, vnt. (angl. *Average annual impact of one day's traffic flow on pavement wear on a road section*);

ESA_{100TP} – bendras transporto priemonės standartinių ašių ekvivalentas, vnt. (angl. *The total equivalent of the vehicle's standard axles*);

ESA_{100A} – vienos ašies standartinių ašių ekvivalentas, vnt. (angl. *Single axle equivalent of standard axles*);

FC_{Total} – nuovargio plyšiai (kombinuoti tinkliniai plyšiai, išilginiai ir atspindžio plyšiai ratų trajektorijoje), % (angl. *Fatigue cracks*);

IRI_0 – pradinis IRI, in/mi (angl. *Initial IRI*);

V_{pot} – duobių kiekis, m³/km (angl. *Duobių kiekis*);

k_0 – bendras modelio kalibravimo koeficientas (angl. *Overall model calibration factor*);

ε_i – liekamosios paklaidos (angl. *Residual errors*);

ΔRI_c – dangos nelygumo padidėjimo plyšių komponentas, m/km (angl. *Crack component of pavement roughness increase*);

ΔRI_e – aplinkos poveikio lygumo pablogėjimui komponentas, m/km (angl. *Component of environmental impact of pavement roughness increase*);

ΔRI_r – dangos nelygumo padidėjimo provėžų komponentas, m/km (angl. *Rutting component of pavement roughness increase*);

ΔRI_s – dangos nelygumo padidėjimo struktūrinis komponentas – dangos nelygumo padidėjimas dėl eismo apkrovų sukkelto konstrukcijos susilpnėjimo, m/km (angl. *Structural component of the increase of pavement roughness*);

ΔRI_t – dangos nelygumo padidėjimo duobių komponentas, m/km (angl. *Pothole component of pavement roughness increase*);

ΔACA – bendro plyšių ploto metinis padidėjimas, % (angl. *Annual increase in total crack area*);

ΔIRI – bendras asfalto dangos nelygumo padidėjimas (pokytis) per nagrinėjamą laikotarpį, m/km (angl. *International Roughness Index*);

ΔRDS – provėžų gylio standartinio nuokrypio pokytis per metus, mm (angl. *Change in standard deviation of rut depth per year*);

A – automobilio ašies apkrova, kN (angl. *Car axle load*);

AGE – viršutinio dangos sluoksnio naudojimo trukmė nagrinėjamo periodo pabaigoje, metai (angl. *The lifetime of the top coating layer at the end of the considered period*);

A_i – i -tosios automobilio ašies apkrova, kN (angl. *i -th car axle load*);

DBI – dangos būklės indeksas, bedimensis (angl. *Pavement Condition Index, PCI*);

FI – vidutinis metinis užšalimo indeksas, °F dienos (angl. *Average annual freezing index*);

$YE4$ – vidutinės metinės automobilių eismo apkrovos, mln. ESA/metus (angl. *Average annual traffic loads*);

I_n – svoriniais koeficientais išreikšti būklės indeksai (angl. *Condition indices expressed as weighting factors*);

j – transporto priemonių klasių skaičius pagal naudojamą klasifikavimo lentelę (angl. *The number of vehicle classes according to the used classification table*);

K_{gm} – aplinkos poveikio komponento kalibravimo koeficientas (angl. *Calibration factor for the environmental exposure component*);

m – aplinkos poveikio faktorius (angl. *Aplinkos poveikio faktorius*);

n – transporto priemonės ašių skaičius (angl. *The number of vehicle axles*);

N_j – j -tosios transporto priemonių klasės vidutinis metinis paros eismo intensyvumas, aut./p. (angl. *Average annual daily traffic intensity of the j -th vehicle class*);

p – poveikio faktorius, % (angl. *Impact factor*);

PI – dirvožemio plastiškumo procentas (angl. *Percentage of soil plasticity*);

$PRECIP$ – vidutinis metinis kritulių kiekis, in. (angl. *Average annual rainfall*);

RD – vidutinis provėžų gylis (angl. *Average rut depth*);

Ria – dangos nelygumas analizuojamų metų pradžioje, m/km (angl. *Unevenness of the pavement at the beginning of the analyzed year*);

SF – vietovės faktorius (angl. *Location factor*);

$SNPK$ – dangos stiprumo rodiklis – modifikuotas struktūrinis skaičius, įvertinus jo sumažėjimą dėl plyšių įtakos (angl. *Index of pavement strength*);

TC – skersinių plyšių ilgis (įskaitant ir atspindžio plyšius), ft/mi (angl. *Length of transverse cracks*).

Santrumpos

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

BI – būklės indeksas (angl. *Performance Index, PI*);

DBI – suminis dangos būklės indeksas (angl. *Pavement Condition Index, PCI*);

DBI2019, DBI2020, DBI2021 – suminis dangos būklės indeksas, nustatytas atitinkamai 2019, 2020 ar 2021 metais (angl. *total pavement condition index determined in 2019, 2020 or 2021, respectively, PCI2019, PCI2020, PCI2021*);

DBIo – suminis dangos būklės indeksas, nustatytas iškart po atlikto remonto (angl. *Total Pavement Condition Index determined immediately after the repair, PCIo*);

DK – dangos konstrukcija (angl. *Pavement Construction*);

DKKG – dangos konstrukcijos klasių grupė (angl. *Road construction Class Group, RCCG*);

DVS – dangų valdymo sistema (angl. *Pavement Management System, PMS*);

EBPO – Ekonominio bendradarbiavimo ir plėtros organizacija (angl. *Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD*);

ESA – ekvivalentinės standartinės ašys (angl. *Equivalent Standard Axle*);

FHWA – Federalinė greitkelių administracija (angl. *Federal Highway Administration*);

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

GIS – geografinės informacinės sistemos (angl. *Geographic Information Systems*);

HDM – Greitkelių plėtros ir valdymo nurodymai (angl. *Highway Development and Management*);

HDM-III – dangų valdymo sistema HDM (angl. *Pavement Management System HDM*);

IAM – Jungtinėje Karalystėje veikiantis turto valdymo institutas (angl. *The Institute Of Asset Management*);

IPWEA – Australijos ir Naujosios Zelandijos viešojo sektoriaus inžinerijos institutas (angl. *Institute of Public Works Engineering Australasia*);

IRI – tarptautinis dangos nelygumo indeksas (angl. *International Roughness Index*);

ISO – organizacijos kokybės sistema (angl. *International Organization for Standardization*);

ISOHDM – tarptautinis greitkelių projektavimo ir priežiūros standartų tyrimas (angl. *International Survey Of Highway Design and Maintenance standards*);

ITS – išmaniosios transporto sistemos (angl. *Intelligent Transport Systems*);

KBI – kombinuotas būklės indeksas (angl. *Combined Performance Index*);

KPPP – kelių priežiūros ir plėtros programa (angl. *Road Maintenance and Development Programme*);

KTVIS – kelių turto valdymo informacinė sistema (angl. *Road Asset Management Information System*);

LAKD – Lietuvos automobilių kelių direkcija (angl. *Lithuanian Road Administration, LRA*);

LCMS-2 – lazerinė plyšių matavimo sistema (angl. *Laser Crack Measurement System*);

LTPP – ilgalaikiai kelių dangų stebėsenos tyrimai (angl. *Long Term Pavement Performance*);

MEPDG – mechanistinis empirinis dangų projektavimo metodas (angl. *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*);

PBC – rodikliais grįstos rangos sutartys (angl. *Performance Based Contracts*);

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

RST28 – mobilioji kelių tyrimų laboratorija (angl. *Mobile road research laboratory*);

RST63 – mobilioji kelių tyrimų laboratorija (angl. *Mobile road research laboratory*);

SHRP – Strateginė kelių tyrimo programa (angl. *Strategic Highway Research Program*);

STVP – Strateginis turto valdymo planas (angl. *Strategic Asset Management Plan*);

TKTI – Transporto ir kelių tyrimo institutas (angl. *Transport and Road Research Institute*);

TRB – Transporto tyrimų taryba (angl. *Transport Research Board*);

TSD – spartusis laikomosios gebos matavimo metodas (angl. *Traffic Speed Deflectometer*);

TVS – turto valdymo sistema (angl. *Asset Management System*);

VMPEI – vidutinis metinis bendras paros eismo intensyvumas (angl. *Annual Average Daily Traffic, AADT*);

VPSP – viešojo ir privataus subjektų partnerystė (angl. *Partnership of Public and Private entities, PPP*).

Terminai ir apibrėžimai

COST – Europos bendradarbiavimo mokslinių ir techninių tyrimų srityje programa (angl. *European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research*), koordinuojanti europinio lygio nacionalinius tyrimus. Įsteigta tarpvyriausybiniu susitarimu 1971 m. vykusioje Europos valstybių Ministrų konferencijoje.

Danga (angl. *Pavement*) – vieno arba dviejų sluoksnių viršutinė (dėvimoji) dangos konstrukcijos dalis.

Dangos konstrukcijos funkcionavimas (angl. *Pavement Performance*) – dangos konstrukcijos būklės analitinis konstrukcijos atsparumo struktūrinių pažaidų susidarymui įvertinimas per projekcinį laikotarpį, nustatomas taikant funkcionavimo modelius.

Dangos konstrukcijos klasė (angl. *Pavement Construction Class*) – konstrukcijų klasifikacija pagal projekcinės apkrovos A intervalus, taikoma standartizuotų dangų konstrukcijoms parinkti.

Dangos naudojimo laikas (dangos amžius) (angl. *Pavement Age*) – laikotarpis metais tarp paskiausiai atliktų statybos darbų metų ir metų, iki kurių analizuojama.

Defektas – (angl. *Defect*) naujo gaminio arba gamybos proceso metu atsiradęs kokybės trūkumas.

Degradacija (angl. *Deterioration*) – kelio kokybinių ir eksploatacinių savybių laipsniškas praradimas, mažėjimas nuo geriausių savybių (naujo kelio) iki blogiausių (nebeeksploatuojamas kelias).

Durbino–Vatsono testas (angl. *Durbin–Watson test*) naudojamas siekiant nustatyti, ar skirtingų stebinių liekamosios paklaidos koreliuoja (yra autokoreliacija). Priimant sprendimą tariama, kad reikšmingumo lygmuo yra lygus 0,05. Durbino–Vatsono statistika skaičiuojama tik tada, kai duomenys yra laikiniai, t. y. kintamieji stebimi bėgant laikui, bet norime taikyti paprastą tiesinę regresiją, o ne sudėtingą laiko eilučių modelį.

Efektyvumas – (angl. *Efficiency*) veiklos veiksmingumas ir rezultatyvumas, išreiškiamas ta veikla pasiekto rezultato ir sąnaudų jam pasiekti santykiu.

Kapitalinis remontas – (angl. *Major repair*) statybos rūšis, kai pagal kelio kategorijai reglamentu nustatytus reikalavimus visiškai atstatomi ar sustiprinami kelio konstrukcijos elementai kartu su visais kelio kompleksui priklausančiais statiniais, įrenginiais ar juos įrengiant naujai arba iki 30 % keičiama kelio trasa plane, didinant horizontaliųjų kelio kreivių spindulius ar atliekant vietinius jo ištiesinimo darbus papildomai skirtame žemės sklype.

Kelio dangos lygumas – rodiklis, rodantis, kiek dangos paviršius (važiavimo kryptimi) yra nukrypęs nuo tam tikros idealios linijos, rodančios visišką (idealų) dangos lygumą. Dangos lygumas vertinamas tarptautinio lygumo indekso IRI (angl. *International Roughness Index*) vienetais, išreikštais m/km. Rodiklis IRI – tai suma automobilio vibracijų, kurias sukelia kelio išilginio profilio nelygumai vėžėse – standartinio automobilio, važiuojančio 80 km/h greičiu, pakabos vertikaliųjų poslinkių sumos ir nuvažiuoto kelio santykis.

Kelio homogeninis ruožas – (angl. *A homogeneous section of the road*) vienodų techninių parametrų ruožas, kuriame dangos konstrukcijos sluoksnių storiai, dangos techniniai parametrai (nelygumas, vėžės ir kt.), automobilių eismo intensyvumas kinta nežymiai.

Kelio ruožo klasteris – (angl. *Road section cluster*) analizuojamų duomenų apie kelių suskirstymas į grupes (klasterius) atsižvelgiant į jų tarpusavio panašumus.

Kelių priežiūra (nuolatinė) – (angl. *Routine maintenance*) tai nuolatiniai kelio elementų priežiūros darbai: sniego valymas ir kelių barstymas žiemą, asfalto dangų defektų (išdaužų, plyšių) taisymas, žvyro dangų profilavimas, šienavimas, tiltų bei vandens pralaidų priežiūros ir kiti darbai.

Kelių tinklo lygis – tyrimai, atliekami dalyje ar visuose kelių tinklo kelių homogeniniuose ruožuose.

Kelių transporto infrastruktūra – (angl. *Road transport infrastructure*) fizinis turtas, apimantis pačius kelius ir viską, kas su jais susiję, pavyzdžiui, autobusų stotelės, terminalai, ženklai, takai, lietaus nuvedimo sistemos ir statiniai, tokie kaip tiltai ar pralaidos.

Kelių turto valdymas – (angl. *Road asset management*) procesų visuma, apimanti vieno ar daugiau kelių turto elementų priežiūros, eksploatavimo, tobulinimo ir plėtojimo veiklą.

Koreguotas determinacijos koeficientas – (angl. *Adjusted R-Square*) regresijos modelio tinkamumui nustatyti skirtas rodiklis ir determinacijos koeficiento alternatyva, taikoma,

kai modelyje yra daug regresorių ir mažai stebinių. Determinacijos koeficientas – modeli-uojamų ir stebimų priklausomo kintamojo reikšmių skirtumų matas.

Krovininis transportas (sunkiasvoris transportas) – (angl. ...*Heavy vehicle*) didesnis kaip 3,5 t masės krovininis automobilis su priekaba ar puspriekabe ir daugiau kaip 9 sėdimųjų vietų, įskaičiuojant vairuotojo vietą, turintis autobusus.

Likęs naudojimo intervalas (angl. *Remaining service interval, RSI*) – tai laikas, kurio reikia dangai pasiekti nepriimtina būklę ir tuomet ją atnaujinti arba rekonstruoti.

Likęs naudojimo laikas (angl. *Remaining service life, RSL*) – sukelia neapibrėžtumų ir gali apimti keletą statybos istorijos momentų.

Objekto lygmuo – tyrimai, atliekami viename kelio homogeniniame ruože (objekte).

Panelinių duomenų (blokuotieji duomenys arba sekiniai) (angl. *Panel data*) – stebimas tų pačių *N* objektų kitimas laiku *T*. Gali būti dviejų tipų blokuotieji duomenys: subalansuoti ir nesubalansuoti. Subalansuotais duomenis laikome tuomet, kai visi objektai stebimi vi-sais laiko momentais, nesubalansuoti – kai ne visais laiko momentais objektai buvo ste-bėti. Laikoma, kad atski-ro objekto reikšmės per laiką gali būti koreliuotos, tačiau atskiri objektai yra nepriklausomi.

Paprastasis remontas – (angl. ...*Simple repair*) statybos rūšis, kai iš dalies ar visiškai pa-gal reglamentu nustatytus reikalavimus atstatomi nusidėvėję kelio konstrukciniai elemen-tai: dėvimųjų sluoksnių pakeitimas ar regeneravimas; dangų naujų dėvimųjų palengvintos konstrukcijos sluoksnių įrengimas naudojant šlamus, daugiasluoksnių paviršiaus apdoro-jimų technologiją, seno asfaltbetonio trupinius ir kt.; plonasluoksniu dėvimojo sluoksniu dangų įrengimas ir kiti kelio komplekso elementų paprastojo remonto darbai pagal tai kelio kategorijai reglamentu nustatytus reikalavimus.

Paslaugos lygis (angl. *Level of service*) – tai priemonė, jungianti dangos projektavimo kriterijus keliams su eismo sąlygomis (greitis, kelionės laikas), naudotojo patogumas (komfortas) ir kiti panašūs kriterijai, kurie gali būti apibrėžti tiek kelio naudotojo (lūkesčiai), tiek kelio valdytojo (techniniai reikalavimai).

Paviršiaus defektai – (angl. ...*Surface defects*) lopai, išdaužos (duobės), bitumo išplauki-mas, dangos lukštenimasis, dangos sluoksniu lupimasis, esantys kelio dangos paviršiuje.

Pažaida – (angl. *Defect*) eksploatacijos metu atsiradęs kelio elementų kokybės trūkumas, atsiradęs dėl išorinių veiksnių naudojant kelią, aplinkos, transporto priemonių apkrovų ir dangos konstrukcijos sluoksnių kokybės poveikio.

Plyšiai – (angl. *Cracks*) tai kelio dangoje esantys skersiniai, išilginiai, tinkliniai ar užtaisyti plyšiai.

Prevencinė priežiūra – (angl. *Preventive maintenance*) asfalto dangos remonto darbai, siekiant sušvelninti esamos asfalto dangos konstrukcijos degradaciją ir pratęsti naudojimo laikotarpį. Dažniausiai taikomos technologijos – paviršiaus apdaro įrengimas ant išlyginamojo sluoksniu.

Projektinė apkrova A – (angl. *Design load A*) ekvivalentinės 10 t svorio ašies apkrovų skaičius, nustatytas projektiniam laikotarpiui.

Provėžos – (angl. *Rutting*) neatstatoma kelio dangos sluoksnių deformacija nuo eismo ap-krovų, atsirandanti automobilių ratų sąveikos su kelio danga vietose.

Rekonstrukcija – (angl. *Reconstruction*) statybos rūšis, kai esamas kelias pertvarkomas į aukštesnės kategorijos kelią pagal reglamentu nustatytus reikalavimus, pertvarkant visus ar dalį kelio konstrukcinių elementų; kelio kompleksui priklausančius statinius ir įrenginius; daugiau kaip 30 % keičiant kelio trasą, didinant kelio horizontaliųjų kreivių spindulius (plane) ar atliekant jo ištiesinimo darbus papildomai skirtame žemės sklype

Suminis kelio dangos būklės indeksas – (angl. *Total pavement condition index*) apibendrinamasis būklės indeksas, apibūdinantis kelio dangos būklę, įvertinant saugumo, komforto ir kitus indeksus.

Techninių parametrų nustatymas – (angl. *Determination of technical parameters*) automatizuoti matavimai ir (arba) vizualus įvertinimas, siekiant nustatyti kelio dangos techninius parametrus.

Turinys

IVADAS	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.....	5
Disertacijos struktūra.....	5
Padėka	5
1. DANGŲ BŪKLĖS, PABLOGĖJIMO SPARTOS IR REMONTO PRIORITETO PARINKIMO METODIKŲ ANALIZĖ.....	7
1.1. Kelių turto valdymo samprata	7
1.2. Kelių dangų valdymo sistemos ir remonto prioritetų parinkimo modeliai	13
1.3. Dangų būklės vertinimo ir degradacijos modeliai	21
1.4. Valstybinės reikšmės kelių tinklo apžvalga.....	35
1.5. Lietuvoje taikoma dangų valdymo sistema	37
1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	54

2. ASFALTO DANGOS EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI	57
2.1. Eksperimentinio tyrimo planas ir vietos parinkimas	57
2.2. Eksperimentinio tyrimo metodika	60
2.3. Dangos būklės degradaciją įvertinančių rodiklių tyrimai pasirinktose tyrimų vietose Lietuvos automobilių kelių tinkle.....	72
2.4. Antrojo skyriaus išvados	84
3. ASFALTO BLOGĖJIMO KREIVIŲ SUDARYMAS IR JŲ TAIKYMAS	
LIETUVOS DANGŲ VALDYMO SISTEMOJE.....	85
3.1. Kelio dangos nelygumo teorinių reikšmių nustatymas.....	86
3.2. Regresinė duomenų analizė	88
3.3. Trečiojo skyriaus išvados	102
BENDROSIOS IŠVADOS	105
REKOMENDACIJOS	109
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	111
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA	
SĄRAŠAS	117
SUMMARY IN ENGLISH.....	119
PRIEDAI.....	135
A priedas. Dangos būklės indekso skaičiavimo pavyzdys	136

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of problem	1
Relevance of the dissertation.....	2
Research object	2
Aim of the dissertation	2
Tasks of the dissertation	3
Research methodology	3
Scientific novelty of the dissertation	3
Practical value of the research findings.....	4
Defended statements	4
Approval of research findings	5
Structure of the dissertation.....	5
Acknowledgment	5
 1. ANALYSIS OF PAVEMENT CONDITION, DETERIORATION RATE AND REPAIR PRIORITY SELECTION METHODS	 7
1.1. Road asset management concept	7
1.2. Pavement management systems and repair priority selection models	13
1.3. Pavement condition assessment and deterioration models.....	21
1.4. The overview of the national road network	35
1.5. Pavement management systems applied in Lithuania	37
1.6. Conclusions of the First Chapter and formulation of dissertation tasks	54

2. ASPHALT PAVEMENT EXPERIMENTAL RESEARCH.....	57
2.1. Experimental study plan and site selection.....	57
2.2. Experimental research methodology	60
2.3. Measurement of performance indicators assessing pavement condition deterioration at selected research sites in the Lithuanian road network.....	73
2.4. Conclusions of the Second Chapter.....	85
3. COMPILATION OF ASPHALT DETERIORATION CURVES AND THEIR APPLICATION IN LITHUANIAN PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEM.....	85
3.1. Determination of theoretical values of road surface roughness.....	86
3.2. Regression data analysis.....	88
3.3. Conclusions of the Third Chapter.....	102
GENERAL CONCLUSIONS	105
RECOMMENDATIONS	109
REFERENCES	111
LIST OF THE SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	117
SUMMARY IN ENGLISH	119
ANNEXES	135
Annex A. Example of pavement condition index calculation	136

Įvadas

Problemos formulavimas

Europos kelių direkčių vadovų organizacija CEDR (angl. *Conference of European Directors of Roads*) 2019–2021 m. strateginiame veiklos plane automobilių kelių tinklo eksploatacinį funkcionalumą išskiria kaip vieną pagrindinių prioritetų. Šis funkcionalumas grindžiamas transporto priemonių (TP) srauto pralaidumu ir geros kelių būklės užtikrinimu didelio ir vidutinio eismo intensyvumo keliuose. Europos ekonomikos augimą padeda palaikyti įgyvendinama ES transporto politika, kuri suteikia galimybę keliauti saugiau ir greičiau naudojantis šiuolaikine transporto infrastruktūra. Kelių infrastruktūros valdytojai susiduria su didžiuliais iššūkiais bei atsakomybe rūpindamiesi jiems patikėtu viešojo sektoriaus turtu – keliais ir jiems priskiriamais statiniais. Jų užduotis – racionaliai ir efektyviai plėtoti ir prižiūrėti valstybės turtą, tuo tikslu objektyviai nustatyti kelių tinklo ir priežiūros prioritetus.

Kelių transporto infrastruktūrai skiriamas didelis finansavimas įpareigoja, kad ji būtų valdoma taip, kad, naudodamiesi aukštos kokybės keliais, optimaliai, greitai ir saugiai pasiektume reikiamą tikslą. Nepertraukiamai ir tinkamai prižiūrimi bei laiku remontuojami keliai padeda tai užtikrinti. Veiksniai, užtikrinantys efektyvesnį turto valdymo procesą, yra šie:

- dangos degradacijos spartos vertinimas, atliekant dangų būklės vertinimą ir nustatant kelių ruožų remonto prioritetą yra ekonomiškai naudingas;
- tinkamai pasirinkti ir pritaikyti degradacijos modeliai lemia lėtesnę viso tinklo degradaciją ir mažesnę lėšų poreikį.

Praktikoje taikant dangų valdymo sistemą, galima racionaliai paskirstyti turimas lėšas dabar ir vėliau ateityje, susiplanuoti reikiamą biudžetą visu analizės laikotarpiu.

Darbo aktualumas

Planuoti kelių tinklo remontą ir užtikrinti kelių kokybę šiuolaikiniais metodais – naudoti turto valdymo sistemas (toliau – TVS) arba dangų valdymo sistemas (toliau – DVS). DVS yra aiškus ir skaidrus kelių tinklo planavimo ir priežiūros procesas, kurio tikslas – kuo labiau sumažinti biudžeto išlaidas ir poveikį aplinkai, maksimaliai padidinti dangos naudojimo laiką ir vartotojų saugumą. DVS labai svarbu turėti patikimus įvesties duomenis ir dangos būklės pokyčių modelius, veiksmų parinkimo algoritmus ir kt., nustatytus ilgalaikiais stebėjimais ir tyrimais pagrįstais metodais.

Disertacijoje nagrinėjami kelių dangų valdymo sistemose taikomi elementai: dangų būklės tyrimai, dangų būklės vertinimas, dangų būklės modeliavimas, remonto prioriteto parinkimas.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – valstybinės reikšmės automobilių kelių su asfalto danga tinklas, skirtas transporto eismui šalyje, jo dangos būklė ir degradacija.

Darbo tikslas

Šio darbo tikslas – sukurti valstybinės reikšmės kelių asfalto dangos blogėjimo spartos įvertinimo modelį, grindžiamą empirinių duomenų analize nustatytais dangos būklės blogėjimo scenarijais bei suminiu asfalto dangos būklės rodikliu ir jo kitimo prognoze.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Išanalizuoti ir įvertinti valstybinės reikšmės kelių tinklo suskirstymą, būklę ir jos pokyčio vertinimo principus bei skiriamą finansavimą kelių priežiūrai ir plėtrai.
2. Išanalizuoti kelio dangos būklės degradacijos modelius ir įvertinti jų tinkamumą Lietuvos sąlygoms.
3. Sukurti teorinį modelį valstybinės reikšmės kelių pablogėjimo spartai įvertinti.
4. Atlikti eksperimentinį tyrimą Lietuvos valstybinės reikšmės kelių būklei įvertinti ir degradacijos kitimui nustatyti naudojant 3D dangos skenerį.
5. Išanalizuoti ir įvertinti ryšius tarp kelio dangos degradacijos ir kelio dangos konstrukcijos dangų degradacijos modeliuose, remiantis eksperimentinio tyrimo metu surinktais duomenimis.
6. Sudaryti asfalto dangos būklės indekso DBI degradacijos modelį remiantis eksperimentinio tyrimo duomenimis.
7. Įvertinti sudarytą regresinį asfalto dangos degradacijos modelį.

Tyrimų metodika

Norint pasiekti disertacijos tikslą ir įgyvendinti uždavinius, buvo atlikti kelių tinklo dangos būklės tyrimai su mobiliąja kelių tyrimo įranga RST63, susisteminti ir išanalizuoti istoriniai dangos būklės rodiklių duomenys, taikant statistinius regresinės analizės metodus nustatytos dangos degradacijos kreivės kelio dangos būklės indeksui.

Darbo mokslinis naujumas

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

1. Egzistuojantys kelių asfalto dangų degradacijos modeliai yra sudėtingi, reikalaujantys didelės duomenų įvesties apie analizuojamus kelio ruožus. Pasiūlytas dangos būklės indekso prognozavimo modelis atvirojo tipo dangų valdymo sistemoje reikalauja mažesnės duomenų

imties, lyginant su esamais sudėtingais modeliais. Supaprastintas naujas modelis tinkamas atskirų kelio ruožų dangos būklės kitimui kelių tinklo lygmeniu analizuoti ir vertinti.

2. Dangų valdymo sistemose remonto parinkimo scenarijams modeliuoti ir būklės rodiklių pagerinimui nustatyti (angl. *Reset*) po remonto naudojamos fiksuotos kelio dangos rodiklių vertės. Analizuojant būklę, vėžių gylio, plyšių ir pažaidų dydžiai prilyginami 0, nes tariama, kad visos šios kelio dangos pažaidos atlikus remontą yra pašalinamos. Iki šiol Lietuvoje buvo nustatomos leidžiamosios ribinės kelio dangos nelygumo vertės pagal galiojančias dangos įrengimo taisykles. Darbe nustatytos ir pasiūlytos kelio dangos nelygumo leidžiamosios ribinės vertės yra žemesnės (geresnės) už iki šiol taikytas DVS, todėl gaunamas tikslesnis suminės dangos degradacijos kitimo modeliavimo rezultatas.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Disertacijoje pateiktos tyrimais nustatytos kelio dangos nelygumo IRI vertės, kurias galima būtų praktiškai taikyti planuojant kelio remontą ir lyginant skirtingus remonto tipus (skirtingų projektų). Nustatytos kelio dangos nelygumo vertės darbe suskirstytos į 12 grupių, jas klasifikuojant pagal kelio tipą (automagistralė, magistralinis, krašto ir rajoninis kelias) ir remonto būdą (asfalto dėvimojo sluoksnio atnaujinimas, kapitalinis remontas ir rekonstrukcija). Šių verčių taikymas Lietuvoje naudojamoje dangų valdymo sistemoje padidins analizės tikslumą parenkant remonto scenarijų.

Sudarytieji automobilių kelių tinklo dangų būklės indekso kitimo prognozavimo modeliai skirti kelio ruožų dangos būklės indekso kitimui modeliuoti atvirojo tipo dangų valdymo sistemose. Šiais modeliais galima pakeisti iki šiol taikytus suminės dangos būklės indekso modelius, kurie buvo labai sudėtingi, nes, atliekant daug modeliavimo procesų, reikia didelės apimties įvesties duomenų.

Ginamieji teiginiai

1. Asfalto dangos degradacijos kitimo sparta (dinamika) priklauso nuo jos pradinio būklės (defektų) rodiklio, kuris susietas su kelio statybos rūšimi ir darbų kokybe.

2. Dangos būklės suminės degradacijos prognozavimas gali būti paremtas bendru eismo apkrovų ESA, dangos funkcionavimo trukmės ir kelio dangos nelygumo IRI modeliais.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema paskelbti trys moksliniai straipsniai: du – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazę (Paplauskas et al., 2023; Paplauskas & Vaitkus, 2022), vienas paskelbtas recenzuojamame tarptautinės konferencijos straipsnių rinkinyje (Paplauskas & Vaitkus, 2020):

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

- Tarptautinėje konferencijoje „Transport means“ 2020 m. Kaune, Lietuvoje;
- Tarptautinėje konferencijoje „30th International Baltic Road Conference“ 2021 m. Rygoje, Latvijoje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir rezultatų apibendrinimas.

Darbo apimtis – 141 puslapis, neskaitant priedo. Tekste pateiktos 24 numeruotos formulės, 45 paveikslai ir 18 lentelių. Rašant disertaciją panaudoti 79 literatūros šaltiniai.

Padėka

Nuoširdžiai dėkoju visiems, kurie mane palaikė ir drąsino rengiant šią disertaciją.

Visų pirma nuoširdžiai dėkoju savo moksliniam vadovui, prof. dr. Audriui Vaitkui už vadovavimą, kompetenciją ir neįkainojamas įžvalgas viso bendradarbiavimo metu. Profesoriaus mentorystė atliko pagrindinį vaidmenį formuojant šios disertacijos rezultatus.

Taip pat norėčiau išreikšti nuoširdų dėkingumą savo mylimai žmonai Editai, kurios nepaliaujama parama, kantrybė ir supratimas buvo mano kertinis akmuo. Dėkoju brangiai dukrai Austėjai ir sūnui Dominykui už palaikymą, entuziazmą ir retkarčiais išsiblaškimus. Taip pat esu dėkingas savo šeimai – tėvams Audronei ir Gediminui, taip pat Viltei, Ritai ir Raimondui už padrąšinimą ir palaikymą. Padrąšinamieji žodžiai ir supratimas kilus nerimui buvo neįkainojami.

Galiausiai dėkoju visiems draugams, kolegoms ir mentoriams, kurie įvairiais būdais prisidėjo prie mano asmeninio ir akademinio augimo. AČIŪ!

Dangų būklės, pablogėjimo spartos ir remonto prioriteto parinkimo metodikų analizė

Šiame skyriuje pateikiama kelių turto valdymo ir dangų valdymo sistemų samprata. Apžvelgiamos pasaulyje taikomos turto valdymo sistemos, kelių dangų valdymo sistemų veiklos schemos, dangų būklę apibūdinantys rodikliai ir vertinimo metodai. Taip pat šiame skyriuje aprašomi dangų degradacijai prognozavimo modelių tipai.

Skyriaus tematika paskelbti trys autoriaus straipsniai (Paplauskas et al., 2019; Salini et al., 2017, Paplauskas & Vaitkus, 2020).

1.1. Kelių turto valdymo samprata

Kelių transporto infrastruktūros valdytojai susiduria su didžiuliais iššūkiais ir įsipareigojimais kasdieniame darbe – rūpintis patikėtu viešojo sektoriaus turtu: keliais ir jų elementais (tiltais, pėsčiųjų ir dviračių takais, apšvietimo sistemomis, vandens nuvedimo sistemomis, ITS įranga ir kt.). Jų užduotis – rasti pusiausvyrą tarp klientų reikalavimų, susijusių su kelių kokybe, prieinamomis kainomis, taip pat kelio savininkų (dažnu atveju valstybės ar mažesnio administracinio vieneto)

poreikio gauti tinkamą investuoto kapitalo grąžą (Schneider et al., 2006). Nuolatinis teisinio reguliavimo ir politinės krypties kitimas apsunkina infrastruktūros valdytojo veikimą planuojant bei įgyvendinant strategiją. Visi šie veiksmai bendrąja prasme vadinami turto valdymu (angl. *Asset Management*). Organizacijos kokybės sistemos turto valdymą apibūdina kaip organizacijos valdomo turto veiklą, tokių kaip finansavimo, priežiūros, rizikos, valdymo ar kitų su turtu susijusių veiklų koordinavimą, siekiant gauti kuo daugiau vertės (naudos).

Terminas *turto valdymas* apima vieno ar daugiau (bendruoju atveju visų) kelių turto elementų valdymo veiklas. Pirmiausia turima omenyje šių statinių priežiūros ir eksploatavimo veikla ir tik vėliau šio turto tobulinimas bei plėtojimas (Deix et al., 2012).

EBPO ir „Austroads“ specialistai turto valdymą apibūdina kaip sistemingą turto eksploatavimo, atnaujinimo ir priežiūros procesą, kai inžineriniai principai derinami su pagrįsta patikima verslo praktika bei ekonominiu pagrindu. Taip pat teikiant priemones geriau organizuotam ir lankstesniam požiūriui priimančioms sprendimus, reikalingus visuomenės lūkesčiams įgyvendinti. Terminas *turto valdymo sistema* apima visus procesus, įrankius, duomenis ir politiką (išreikštą norminiuose dokumentuose), reikalingą efektyviam turto valdymui pasiekti (Gordon et al., 2018a; Oecd, 2001).

Kiek kitokį požiūrį į turto valdymą pateikia Jungtinės Karalystės turto valdymo institutas (angl. *The Institute of Asset Management*, IAM), kuris teigia, kad turto valdymas nėra tik darbas (veikimas) dėl turto. Tai taip pat ir turto naudojimas vertei sukurti, siekiant organizacijos išsikeltų tikslų įgyvendinimo. Tai nustato visai kitokį požiūrį ir mąstymą bei verčia keistis organizacijas (The Institute of Asset Management, 2015).

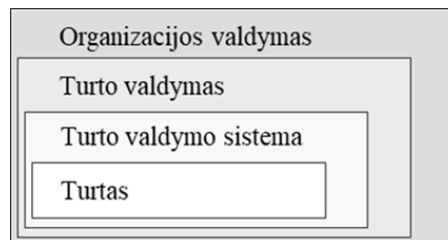
Turto valdymo tikslas, kurį apibendrina Gordon, Sharp ir Martin, – užtikrinti dabartiniams ir būsimiems kelių eismo dalyviams reikiamą paslaugų lygį už mažiausią gyvavimo ciklo kainą remiantis visos organizacijos konceptu, kai skirtingų atsakomybių jungtinė veikla kuria rezultatą įgyjant ir valdant turtą (Gordon et al., 2018a).

Turto valdymas ir TVS taikymas aktualus visoms organizacijoms, nepriklausomai nuo jų dydžio, juridinio statuso ar finansinių organizacijos tikslų. Siekis racionaliai paskirstyti lėšas, užtikrinant reikiamą paslaugų lygį, yra prioritetas bei tikslas, kurio siekiant valdomas turtas ir taikoma TVS. Organizacijos – turto valdytojai bei savininkai – turi nustatyti, kuris sprendinys užtikrins aukštesnę, nei reikalaujama, kokybę ir kartu padės pasiekti maksimalų finansinį efektyvumą. Resursai bei investicijos turi būti skirstomi struktūrizuoti ir planuoti.

Svarbu atskirti turto valdymą ir TVS, tai puikiai atsispindi 1.1 pav. Čia pateiktas ryšys tarp turto, TVS, turto valdymo bei pačios organizacijos valdymo (International Organization for Standardization, 2014):

- turtas – objektas ar elementas, kuris yra TVS objektas;

- turto valdymo sistema – tarpusavyje susijusių arba sąveikaujančių elementų rinkinys, skirtas turto valdymo politikai nustatyti, turto valdymo tikslams ir turto valdymo procesams šiems tikslams pasiekti;
- turto valdymas – visa įmonės veikla ir verslo procesai, kurie drauge padeda siekti išsikeltų turto valdymo tikslų ir teikia paslaugas kelių naudotojams;
- visos organizacijos valdymas apima platesnį verslo veiklos rinkinį nei turto valdymas, įskaitant finansų bei žmogiškųjų išteklių valdymą ir vadovavimo kryptį.



1.1 pav. Ryšys tarp turto, turto valdymo, turto valdymo sistemos ir pačios organizacijos valdymo (International Organization for Standardization, 2014)

Fig. 1.1. Relationship between asset, asset management, asset management system, and management of the organization (International Organization for Standardization, 2014)

Pateiktoje ryšių schemeje (1.1 pav.) pavaizduotas ryšys tarp pagrindinių turto valdymo sričių – organizacijoje turto valdymo sistema per turto valdymo procesus naudojama turto valdymo veiklai vykdyti.

Išskiriami trys turto valdymo lygiai – strateginis, taktinis ir veikimo. Strateginiu lygmeniu kuriami (apsibrėžiami) normatyvai, formuluojami tikslai, strategijos ir planai, kurie atliepia dabartinius bei ateities paslaugų tikslus ilgesniu nei penkerių metų laikotarpiu. Taktiniu lygmeniu kuriamos prioritetinių darbų programos keliamiems iššūkiams bei lūkesčiams spręsti dvejų–penkerių metų laikotarpiu. Veikimo lygmeniu vykdomas programų įgyvendinimas ir užduotys planuojamos iki dvejų metų laikotarpiu (Van der Velde et al., 2013; Vanier, 2000).

ISO 55001 standarte pateikti septyni reikalavimai, keliami TVŠ. Jie apima tokias sritis, kaip organizacija, vadovavimas, planavimas, palaikymas, operacijų (veiklos) vykdymas, veiklos vertinimas ir tobulinimas.

Dažna praktika, kad kiekviena turto grupė yra stebima, matuojama ir analizuojama atskirai, o į pagrindinę TVŠ yra įkeliami rezultatai iš atskirų statinių grupių valdymo sistemų, o tada atliekama optimizacija ir analizė tarp skirtingų turto rūšių (angl. *Cross Asset Analysis*). Yra kuriamos atskirų turto rūšių valdymo sistemos, pavyzdžiui, kelių transporto infrastruktūros TVŠ, kuri gali turėti atskirus

posistemius, pvz., dangų valdymo sistema, tiltų valdymo sistema, vandens nuvedimo sistemų valdymo sistema, ženklavimo valdymo sistema ir kitas smulkesnes. Atskiros valdymo sistemos leidžia pasirinkti tinkamus priežiūros sprendimus / strategijas, naudojant skirtingus analizės metodus (pvz., prioritetų nustatymą, gyvavimo ciklo analizę, gyvavimo ciklo sąnaudų analizę), skirtus būtent konkrečiai turto rūšiai. Rekomenduojamam remontui parinktas taikomas metodas priklauso nuo turimų duomenų ir charakteristikų, kurios apibūdina elemento degradaciją.

TVS teikia integruotą požiūrį į visas administravimo išlaidas: kelių naudojimo, darbų, administravimo, aplinkosaugos ar socialinių išlaidų ir naudojamų esamų administravimo duomenų šaltinius. TVS integruoja esamas atskirų statinių (individualaus turto) valdymo sistemas. Turto valdymas taip pat suteikia galimybę horizontaliai ir vertikalčiai integruotis pačioje įmonės administracijoje, nes turto valdymas apima finansų, planavimo, inžinerijos, personalo ir informacijos valdymą (Oecd, 2001).

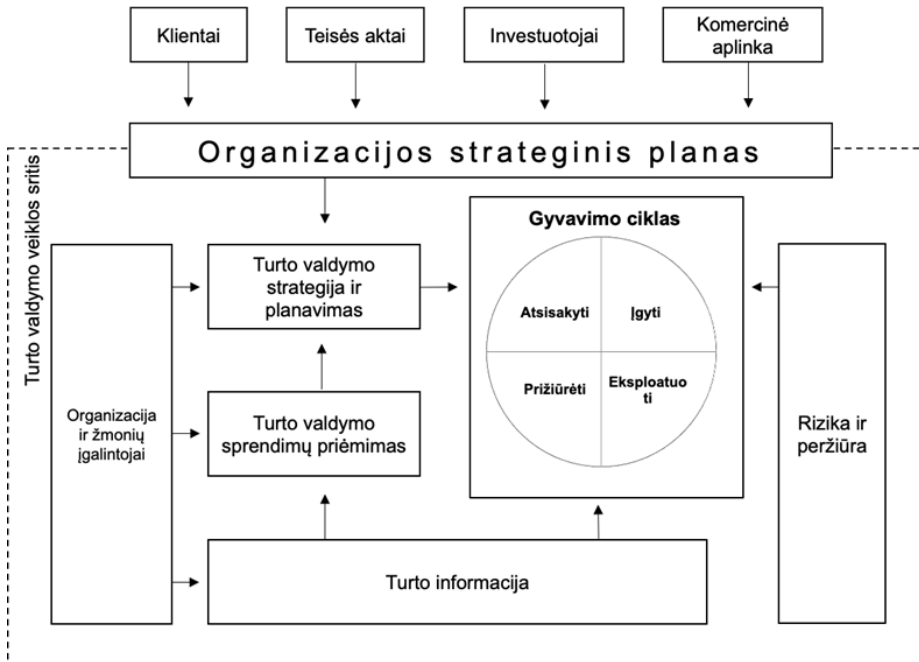
Turtas gali būti valdomas kaip grupė objektų arba atskirai (atsižvelgiant į poreikius) sugrupuotas pagal turto tipą, turto sistemą ar turto grupę. Kelių infrastruktūros srityje turtą galima sujungti į tokias grupes (Gordon et al., 2018b):

- didelės finansinės vertės valstybės turtas, pavyzdžiui, keliai (kelių dangų būklė) ir tiltai (tiltų būklė);
- turtas, kuriantis didelę naudą klientams, pavyzdžiui, ženklai, apšvietimas ir eismo valdymo įrenginiai ar pan.;
- turtas, teikiantis paslaugas įvairioms klientų grupėms, pavyzdžiui, krovinių transporto vairuotojai, pėstieji ar dviratininkai;
- kitas turtas, kurį organizacija naudoja netiesiogiai teikdama paslaugas, pvz., administracinės, gamybinės patalpos, poilsio aikštelės.

Jungtinėje Karalystėje veikiantis turto valdymo institutas yra sudaręs konceptualų turto valdymo modelį, kuris parengtas atsižvelgiant į Pasaulinio priežiūros ir turto valdymo forumo išleistas turto valdymo gaires (angl. *The Asset Management Landscape*). IAM modelio schema iliustruoja veiklas (1.3 pav.), reikalingas turtui valdyti ir apibrėžia jų tarpusavio ryšius ir poreikį jas integruoti. Taip pat šioje scheme parodoma, koks lemiamas turto valdymo vaidmuo yra organizacijoje, kai derinamas organizacijos strateginis planas ir jo tikslų vykdymas (The Institute of Asset Management, 2015).

Turto valdymo veiklos sritis susideda iš šešių dalių (sričių), kurios apima 39 veiklas ar procesus, nuodugniai pristatytus IAM parengtoje studijoje „Turto valdymas: anatomija“. Šios šešios sritys – turto valdymo strategija ir planavimas, turto valdymo sprendimų priėmimas, gyvavimo ciklas, turto informacija, organizacija ir žmonės bei rizika ir peržiūra. Išvardytos veiklos sritys buvo sudarytos laikantis sąlygos, kad turto valdymo sistemos standartas nurodys turto valdymo sistemai, kas turi būti taikoma turto valdymo sistemoje, tačiau neanalizuos, kaip turi būti vykdomas turto valdymas (The Institute of Asset Management, 2015).

Atskirų dalykų svarba kinta priklausomai nuo kiekvienos organizacijos – nuo jos profilio ir tikslų. Nepriklausomai nuo organizacijos struktūros, turto valdymui reikalingas aiškus bei efektyvus padalinių bendravimas ir bendradarbiavimas. Svarbiausia – turto valdymas yra inžinerinė užduotis, turinti finansinių elementų, bet ne atvirkščiai.



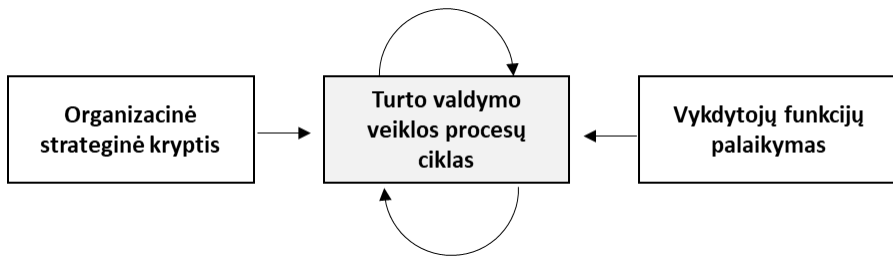
1.3 pav. IAM modelio schema (The Institute of Asset Management, 2015)

Fig. 1.3. IAM model diagram (The Institute of Asset Management, 2015)

Autoriai Gordon, Sharp ir Martin palygino Australijos ir Naujosios Zelandijos viešojo sektoriaus inžinerijos instituto IPWEA sudarytą turto valdymo schemą su IAM valdymo sistemos schema ir išskyrė tris pagrindinius bendrus elementus (1.4 pav.), apibendrinančius visą turto valdymo procesą (Gordon et al., 2018b):

- organizacinė strateginė sritis;
- turto valdymo veiklos procesų ciklas;
- vykdytojų funkcijų palaikymas.

Vyriausybės politika, galiojantys teisės aktai, klientų lūkesčiai, investuotojai, finansuotojai ir kiti išoriniai veiksniai turi įtakos organizacijos strateginiams tikslams ir planams. Tai lemia, kaip turto valdymas bus nukreiptas ir įgyvendintas organizacijoje – tai organizacinė strateginė kryptis.



1.4 pav. Pagrindiniai TVS elementai (Gordon et al., 2018b)

Fig. 1.4. Main AMS elements (Gordon et al., 2018b)

Turto valdymo veiklos procesų ciklas visada turėtų būti vykdomas atsižvelgiant į paslaugos gavėjus (naudotojus), kurių yra daug ir įvairių: eismo dalyviai (pėstieji, dviratininkai, automobilių vairuotojai) ir pramonės šakos bei bendruomenės, su kuriomis šie eismo dalyviai dirba ar yra susiję. Turto valdytojai turi nuspręsti dėl šiems klientams teikiamo paslaugos lygio (angl. *Level of Service*) ir numatyti keliamus lūkesčius paslaugos lygiui ateityje. Turtas, reikalingas paslaugoms teikti, jo būklė, eksploatacinės savybės ir rizikos charakteristikos – visa tai turi būti aprašyta ir suskirstyta į kategorijas. Analizei atlikti ir darbo programoms optimizuoti bei prioritetams nustatyti naudojami specializuoti įrankiai ir metodai. Visa tai finansuojama vykdamas biudžeto planavimo veiksmus kaip operacijas – priežiūros, remonto, atnaujinimo ar pakeitimo bei kapitalinio remonto darbų programas, kol pasibaigs turto gyvavimo ciklas. Turto valdymo ciklas negali būti užbaigtas efektyviai ir veiksmingai, neskiriant išteklių ir pajėgumų, įskaitant žmones, informacines sistemas, pirkimų ir pristatymo procesų bei nuolatinio tobulėjimo procesus (Gordon et al., 2018b).

Šiuolaikinės tendencijos – integruoti dangos, tiltų ir kitų elementų sistemas, susijusias su kelių transporto infrastruktūros valdymu, į visapusiškas kelių turto valdymo sistemas. Turto valdymas nagrinėja visapusišką kelių tinklo ir visų jo komponentų sistemą, kad būtų galima tiksliai valdyti ribotus išteklius.

Turto valdymo sistemų įdiegimas ir plėtojimas kelius prižiūrinčioms įmonėms gali didinti naudą, kurią galima suskirstyti į šias kategorijas (OECD, 2001):

- ryšiai (administracijos tiek vidiniai, tiek ir išoriniai);
- turto inventorių, būklė ir naudojimo lygis;
- kelių tinklo būklės kitimas;
- turto valdymo įrankiai;
- biudžeto procesas;
- personalo tobulinimas.

Lietuvoje už kelių priežiūrą ir vystymą atsakinga akcinė bendrovė Lietuvos automobilių kelių direkcija, kuri šiuo metu diegia kelių turto valdymo informacinę

sistemą KTVIS. Šioje sistemoje bus išskirti trys pagrindiniai lygmenys: naudo-tojų, veiklos ir duomenų. Sistema kuriama taip, kad būtų integruotos jau naudoja-mos ar kuriamos vidinės informacinės sistemos.

Kelių transporto infrastruktūros turto valdymo sistemos apima modulius arba integruoja atskiras mažesnes valdymo sistemas: kelių, tiltų, vandens nuvedimo sistemų, šaligatvių, ITS įrenginių ir kitas smulkesnes.

1.2. Kelių dangų valdymo sistemos ir remonto prioritetų parinkimo modeliai

Šiame skirsnyje nagrinėjamas kelių dangų valdymas ir dangų valdymo sistemų vaidmuo. Jame aptariami kelių dangų priežiūros iššūkiai ir DVS svarba, priimant sprendimus. Be to, aptariamos DVS veikimo schemas ir jų pasirinkimo principai.

1.2.1. Kelių dangų valdymas ir dangų valdymo sistemos

Dangų valdymas – tai visuma procesų, skirtų padėti sprendimų priėmėjams rasti geriausią strategiją, kaip išlaikyti kelių tinklo dangos būklę tinkama eksploatuoti tam tikru laikotarpiu už mažiausią kainą. Šie procesai apima reikalingų duomenų DVS rinkimą ir jų valdymą, kitimo prognozę, ekonominę analizę, prioritetų ver-tinimą ir kt. (Kulkarni & Miller, 2003).

Pasaulio banko 1969 m. inicijuota Greitkelių projektavimo ir priežiūros stan-dartų studija, kuri vėliau išsiplėtė iki plataus masto tarptautinės programos ISOHDM (*International Study of Highway Design and Maintenance Standards*), nustatė, kad yra tam tikros empirinės priklausomybės tarp kelio naudotojų išlaidų, investicijų į kelius ir jų eksploatacijos išlaidų bei paties kelio – jo techninių para-metrų ir eksploatacinių charakteristikų. Tolesnių tyrimų tikslas buvo nustatyti tas priklausomybes ir sukurti jų pagrindu veikiančius modelius (Braga, 2005).

Vieną pirmųjų kelių dangų valdymo sistemų galima laikyti HDM-III (Greit-kelių projektavimo ir priežiūros valdymo modelis), kuri buvo pradėta kurti 1969 m. Pasaulio banko iniciatyva. Joje naudojamos empirinės kelių dangų deg-radacijos parametrų priklausomybės, kurios buvo tikslinamos 30-yje šalių. Kelių turto valdymo srityje labiausiai išvystytos yra kelių dangų valdymo sistemos (DVS), kurios atsirado prieš 50 metų. Pastaruoju metu pasaulyje yra stipriai vys-tomos tiltų ir tunelių valdymo sistemos, vandens nuvedimo sistemų valdymo sis-temos (Braga, 2005).

Dangų valdymo sistema – tai ne tik turto valdymo filosofija, bet ir programi-nės įrangos paketas. DVS – pirmiausia inžinieriams ir tik paskui sprendimų priė-mėjams skirta programinė įranga, teikianti objektyvią informaciją ir analizės re-zultatus, kad šie galėtų priimti nuoseklius bei ekonomiškai pagrįstus sprendimus,

susijusius su kelių tinklo dangos būklės lygio palaikymu ir gerinimu, t. y. padėtų priimti sprendimus, kur, kada ir kaip atlikti veiksmus. Dangų valdymo sistemoje danga laikomi visi dangos ir pagrindo sluoksniai, t. y. visa dangos konstrukcija kaip vienas elementas.

Kelių valdytojas turi apsispręsti, kokio tipo dangų valdymo sistemą diegs savo organizacijoje kelių tinklo būklei valdyti. Yra išskiriami du DVS tipai: vietinės DVS ir komercinės DVS (angl. *Commercial off-the-shelf*, COTS). Vietinės DVS yra sukurtos konkrečioje šalyje pagal toje šalyje esamas specifines sąlygas, norminius dokumentus, kaupiamus duomenis ir kt. Komercinės DVS kuriamos privačių organizacijų, jų struktūros sudarytos taip, kad jas būtų galima lengvai pritaikyti skirtingiems klientams. Šios komercinės sistemos būna dviejų tipų: uždaros ir atviros (kompleksinės) DVS (Rusu et al., 2015; Transporto ir kelių tyrimo institutas, 2009).

Uždaroje sistemoje visos struktūros, moduliai ir modeliai jau yra įtraukti į programinį paketą, ir jų redagavimas ar pakeitimas yra minimalus. Dėl šios savybės jos vadinamos juodosiomis dėžėmis (angl. *Black Box*). Atvirose sistemose programinės įrangos naudotojas gali adaptuoti programinę įrangą ar jos skaičiavimo algoritmus pagal savo keliamus tikslus ir reikalavimus (Transporto ir kelių tyrimo institutas, 2009).

McPherson ir Bennett (2005) teigia, kad dangų valdymo srityje populiareesnė yra komercinio tipo DVS, negu specialiai pačios organizacijos ar konsultantų kurta programinė įranga dėl tokių gaunamų naudų: mažesnės kainos; sistemos savininko priklausomybės nuo vieno įrangos plėtotėjo; sistemos įdiegimo trukmės lyginant su naujos sistemos kūrimu; funkcionalumo tobulinimo atsižvelgiant į visų klientų poreikius bei įžvalgą; nuolatinio tobulinimo ir kitų priežasčių. Autoriai taip pat apibrėžia ir bendruosius funkcionalumo reikalavimus kelių valdymo sistemoms, pvz., kelių tinklo atvaizdavimas ir tinklo redagavimas, vartotojo redaguojami atributai lentelėse, duomenų saugojimas, išvedimas ir atvaizdavimas GIS, duomenų saugumas, automatinis sekcionavimas, duomenų transformavimas, tendencijų analizės, auditai, sąsajos tarp skirtingų turto valdymo sistemų ir kt. Šie reikalavimai yra rekomendaciniai ir nėra privalomi, nes pagrindinius reikalavimus turi apibrėžti būsimas sistemos naudotojas (McPherson & Bennett, 2005).

Lietuva, sekdamą kitų šalių pavyzdžiu, 1993 m. pradėjo kurti lietuviškąją DVS – „Davasemą“. Šiai sistemai kurti buvo pasitelkti ekspertai iš Didžiosios Britanijos, kurie taip pat dalyvavo kuriant pasaulyje paplitusį HDM–III modelį.

1994 m. VĮ Transporto ir kelių tyrimo institutas (TKTI) pristatė pirmąją „Davasemos“ versiją, o jau 1995 m. toliau buvo vystomi skaičiavimų algoritmai ir tobulinama programinė įranga: papildyta duomenimis apie kelių dangų defektus; sudaryta dalinio optimizavimo programa, skirta skaičiavimams vykdyti kelių tinklo lygiu; išplėstas transporto priemonių eksploatacinių išlaidų skaičiavimo ir

eismo intensyvumo prognozės modeliai (Transporto ir kelių tyrimo institutas, 2009).

Tuo metu tai buvo vienintelė tokio tipo programa, skirta investicijų kelių priežiūrai bei plėtrai ekonomiškai pagrįsti Lietuvoje, ir suteikė galimybę spręsti du pagrindinius uždavinius (Transporto ir kelių tyrimo institutas, 2009):

- sudaryti remontuojamų kelių objektų prioritetų sąrašus;
- prognozuoti Lietuvos kelių tinklo būklę ateityje priklausomai nuo kelių priežiūrai, remontams ir rekonstravimui skiriamas lėšas.

Taip pat Lietuvoje buvo naudojamas žvyrkelių asfaltavimo projektų ekonominei analizei ir pagrindimui lietuviškasis modelis KAMIS, grįstas HDM-III bei kitomis duomenų bazėmis. Šia sistema grindžiami kelių su žvyro danga renovacijos projektai, kai būtina atlikti ekonominį įvertinimą. Ši metodika pritaikyta tik investicijų į žvyrkelius tikslingumui nustatyti. Taip pat ji taikoma paskolas teikiančių ar investicijų tikslingumą tiriančių organizacijų darbe, konkrečių transporto priemonių kelių ruožų nuostoliams įvertinti (Lingaitis, 2009). 2000 m. TKTĮ įsigijo atnaujintą greitkelių plėtos ir priežiūros valdymo metodą HDM-4.

HDM-III ir HDM-4 DVS yra uždarojo tipo dangų valdymo sistemos, kuriose analizės modelių ir skaičiavimo algoritmų redagavimas ar pakeitimas yra minimalus ar negalimas. „Davasema“ yra vienetinio tipo sistema, kurta adaptuojant HDM modelius vietinėms sąlygoms. Jose įdiegti degradacijos modeliai yra sudėtingi taikyti tinklo lygmeniu, nes turto valdytojas stokoja duomenų apie savo kelių tinklą – nežinoma istorinė informacija apie dangos naudojimo laikotarpį (dangos amžius), apie taikytus projektinius sprendimus kelio ir dangos konstrukcijai, nežinomos naudotos medžiagos bei jų mišiniai. Neturint šių įvesties duomenų ir taikant standartizuotus koeficientus, tinklo lygio analizės rezultatai būdavo nepakankami. Dėl šios priežasties Lietuvoje buvo pereita prie atvirojo tipo dangų valdymo sistemos dTIMS, pradėtos diegti 2013 m. dTIMS sistema leidžia jos naudotojui įvesti savo skaičiavimo modelius ar formules, kurti analizės kintamuosius, kriterijus, pagal ką parenkami sprendimai ir pan.

dTIMS yra sukurta įmonės „Deighton“ ir plačiai naudojama visame pasaulyje. Ši programa naudojama keliose dešimtyse valstijų JAV, daugiau kaip 20-yje kitų šalių, tarp kurių yra Slovėnija, Šveicarija, Austrija, Belgija, Kroatija, Meksika, Ispanija, Vokietija, Airija, Australija, Naujoji Zelandija, Pietų Afrikos Respublika ir kt.

Pasitelkus dTIMS galima ne tik atlikti asfalto dangų būklės modeliavimą, ekonominius vertinimus ir prognozes, bet galima aprašyti nuo DVS iki kelių sektoriaus TVS – įtraukiant tiltų, tunelių, vertikalios ir horizontalios ženklinimo, pralaidų, šaligatvių ir kitų statinių posistemius. JAV dTIMS sistema jau taikoma ne tik kelių, bet ir susisiekimo sektoriaus turtui – kelių, geležinkelių ir oro uostų – valdyti. Ši sistema turi integruotą SQL duomenų bazę, kurioje galima kaupti in-

ventorinius ir dangų būklės duomenis, kuriuos lengvai pasiekia ir naudoja skaičiavimo algoritmai ir skaičiavimo rezultatus išsaugo toje pačioje duomenų bazėje. Ekonominių skaičiavimų ir analizės duomenys taip pat saugomi šioje duomenų bazėje. Kai tik šioje programoje sukuriama duomenys apie statinius ir priskiriami taikytini modeliai šioms duomenims, dTIMS analizės modulis iš karto parengia (Deighton Associates Limited, 2014):

- kiekvienam elementui (homogeniniam ruožui) – remonto strategiją;
- optimalų remontuotinų ruožų sąrašą pagal užsibrėžtą finansavimo lygį;
- diagramas, palyginančias alternatyvių investicinių scenarijų ilgalaikes pasekmes.

Šios programinės įrangos pranašumą lemia tai, kad naudotojas gali susikurti savo analizės sistemą, atsižvelgdamas į savo technines galimybes matuoti ir kaupti duomenis.

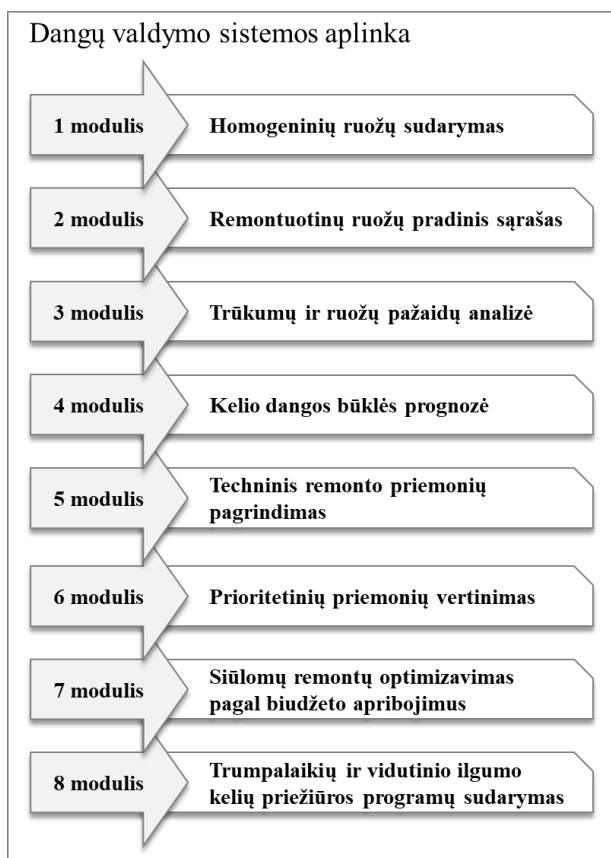
1.2.2. Dangų valdymo sistemos veiklos schemos

Skirtingos DVS gali turėti daug skirtingų modulių ir procedūrų, tačiau jas galima suskirstyti į tris pagrindines sritis: duomenų, analizės ir rezultatų pateikimo. Visi galimi moduliai ir procedūros bus priskirti vienai iš šių sričių. Kokie moduliai bus DVS, priklauso tik nuo užsakovo keliamų tikslų.

Duomenų bazių moduliai skirti inventoriniams, būklės, geometriniams, eismo intensyvumo ir kitiems duomenims kaupti. Prie duomenų srities būtų galima priskirti ir modulius ar procedūras, padedančius apdoroti ir agreguoti duomenis prieš importuojant į pačią DVS. Analizės sritis apima visus su dangų valdymu susijusius modulius ir procedūras – dangų būklės vertinimą, dangų būklės kitimo prognozavimą, optimizavimą ir kt. Rezultatų pateikimo sričiai priskiriami moduliai, skirti rezultatams pateikti ir atvaizduoti (AASHTO, 1990).

Vokietijoje naudojamos dangų valdymo sistemos veikimo schema vaizduojama kaip 8 atskiri, tačiau nuosekliai veiksmus vykdantys moduliai (1.5 pav.).

Sistemos moduliai nuosekliai atlieka šiuos veiksmus: suskaido analizuojamų kelių tinklą homogeniniais ruožais (homogeninių ruožų sudarymo modelis); iš jų atrenka ruožus, reikalingus remonto (remontuotinų ruožų pradinio sąrašo modulis); analizuoja atrinktų ruožų būklę ir priežastis (trūkumų ir ruožų defektų analizės modulis); prognozuoja ruožų būklės kitimo scenarijus (kelio dangos būklės prognozės modulis); pasiūlo struktūriškai galimas remonto priemones (techninis remonto priemonių pagrindimo modulis); įvertina priimtų taikyti priemonių veiksmingumą ir pateikia įvairių alternatyvų reitingą (prioritetinių priemonių vertinimo modulis); atlieka sudarytų alternatyvų optimizavimą atsižvelgiant į biudžeto apribojimus (siūlomų remontų optimizavimo modulis); pateikia sudarytas remonto programas (trumpalaikių ir vidutinio ilgumo kelių priežiūros programų sudarymo modulis) (Transporto ir kelių tyrimo institutas, 2009; bast.de).

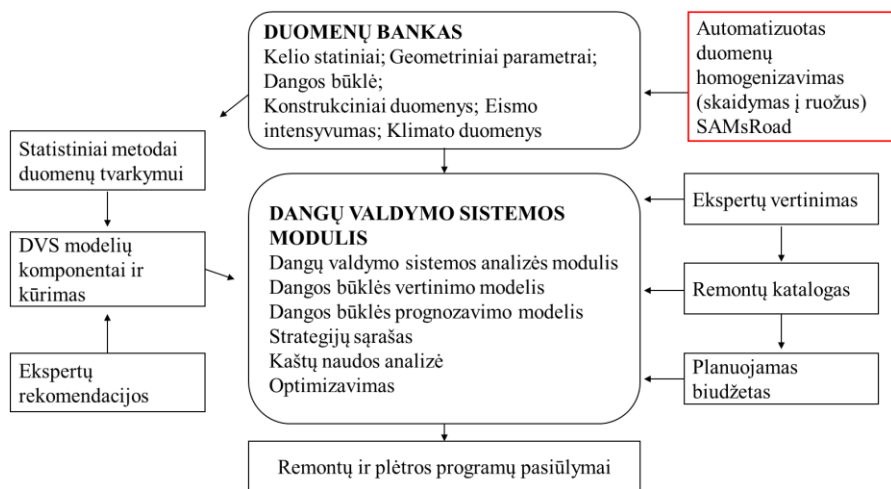


1.5 pav. Vokietijos DVS pagrindiniai elementai
(Transporto ir kelių tyrimo institutas, 2009)

Fig. 1.5. Main components of German PMS (Transporto ir kelių tyrimo institutas, 2009)

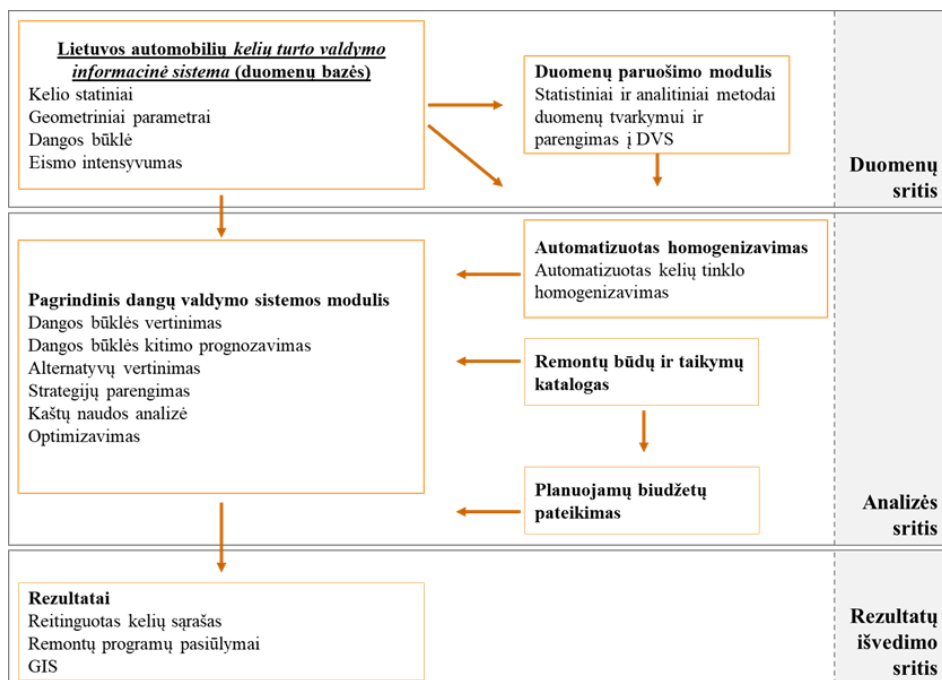
Austrijoje naudojama sudėtinga dangų būklės valdymo sistemos schema, kurioje apibrėžti pagrindiniai elementai ir ryšiai. Dangų valdymo sistema naudojama dangos duomenims kaupti, dangos būklei prognozuoti ir dangos priežiūros strategijų gyvavimo ciklo analizei atlikti. Analogiška schema taikoma ir Slovėnijoje – tik nėra taikomo automatizuoto duomenų homogenizavimo modulis. Austrijos dangos valdymo sistemos struktūra parodyta 1.6 pav. (Hall et al., 2007).

Iš schemos matome, kad aplink pagrindinį DVS modulį, kuriame atliekama duomenų analizė, būklės vertinimas, prognozavimo strategijų kūrimas, kaštų naujos analizė ir strategijų optimizavimas išdėstyti papildantys moduliai ir procesai. Labai panaši ryšių tarp modulių schema taikoma ir Lietuvoje, kuri pavaizduota 1.7 pav.



1.6 pav. Austrijos DVS pagrindiniai elementai ir jų sąryšiai (Hall et al., 2007)

Fig. 1.6. Main components of Austrian PMS (Hall et al., 2007)



1.7 pav. Lietuvoje taikomos DVS pagrindiniai elementai ir jų sąryšiai

Fig. 1.7. Main components of Lithuanian PMS

Lietuvos automobilių kelių turto valdymo informacinė sistema (KTVIS) yra pagrindinis duomenų ir aktualios informacijos saugojimo šaltinis, iš kurios gaunama pagrindinė informacija apie kelio statinius, geometrinius parametrus, dangos būklę ir eismo intensyvumą. Remiantis šiuo šaltiniu, duomenys agreguojami, analizuojami ir parengiami tiek homogeninių ruožų sudarymo moduliui, kuris kelių tinklą suskirsto į panašios būklės ir parametrų homogeninius ruožus, tiek yra parengiami būklės duomenims importuoti į dangų valdymo sistemą. Dangų valdymo sistemoje kelių tinklo būklė yra vertinama, prognozuojamas būklės kitimas, skaičiuojami ir vertinami alternatyvūs sprendiniai, atliekamas sąnaudų ir naudos vertinimas, optimizuojami rezultatai. DVS reguliariai papildoma atnaujinta informacija apie daromus remontus ir prognozuojamą biudžetą. Sistema išveda analizes rezultatus vartotojui ir į GIS sistemą.

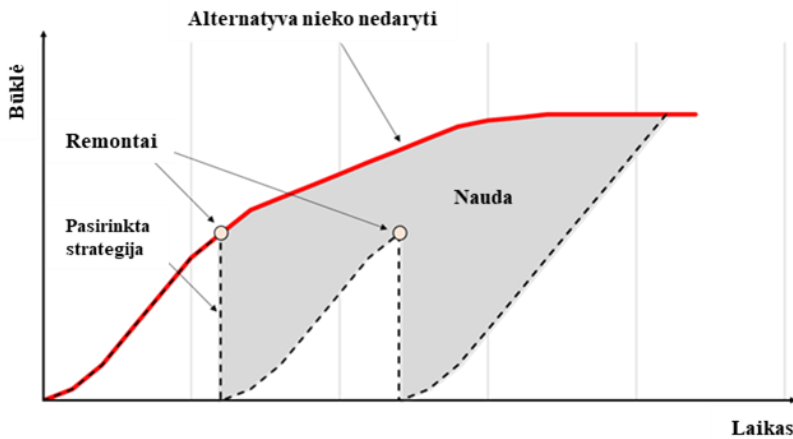
1.2.3. Prioritetai ir jų parinkimo principai

Objektams prioritetizuoti taikomi penki metodai: „Blogiausias pirmiausias“, matematiniai optimizavimo metodai, euristiniai (angl. *heuristic*) metodai, neuroninių tinklų (angl. *neural networks*) bei neapibrėžtos logikos (angl. *fuzzy logic*) optimizavimo metodai (Dabous et al., 2020; Donev et al., 2022).

Taikomi metodai dažnai priklauso nuo naudojamos DVS įrangos, normatyvinio reguliavimo ir turimo biudžeto. Metodas „Blogiausias pirmiausias“ praktikoje taikomas ne DVS arba naudojant labai mažo funkcionalumo DVS, siekiant sudaryti prioritetinių objektų sąrašą pagal vieną ar kelis pasirenkamus kokybinius ar ekonominius kriterijus. Tai labiausiai paplitęs kelio ruožų reitingavimo metodas, ypač regioninio ar mažesnio lygmens organizacijose, taip pat besivystančiose šalyse. Taikant šį metodą būklė nėra prognozuojama ir nėra atsižvelgiama į atliekamo remonto poveikį. Metodas „Blogiausias pirmiausias“ tinka skirtingiems projektams (kelio ruožams) lyginti, bet ne skirtingoms to paties projekto remonto alternatyvoms. Remonto tipas paprastai nustatomas remiantis ribinių saugiklių (angl. *triggers*) taisyklėmis arba sprendimų medžiais (Donev et al., 2022).

Matematiniai optimizavimo metodai skirti alternatyvoms vertinti, kurios didina arba mažina tikslo funkciją pagal taikomus kriterijus (Dabous et al., 2020).

Euristiniais metodais gauti rezultatai dažnai yra panašūs į gautus atliekant matematinį optimizavimą, ieškant geresnių sprendimų pagal apribojimus, naudojant papildomos naudos ir sąnaudų santykį (angl. *Incremental Benefit/Cost*). Nauda traktuojama kaip kelio naudotojo išlaidų sutaupymas dėl pagerėjusios dangos būklės arba ploto po dangos charakteristikų kreivę (1.8 pav.), o kaina (sąnaudos) yra pradinė statybos kaina.



1.8 pav. Naudos ir sąnaudų santykio grafikas

Fig. 1.8. Cost-benefit graph

Kiti optimizavimo metodai apima neuroninius tinklus ir neapibrėžtą logiką. Pagrindinė papildomos naudos ir sąnaudų metodo idėja – įvertinti iš anksto nustatytų strategijų rinkinį kiekvienai kelio atkarpai ir pasirinkti tą, kuri maksimaliai padidina individualią naudą per planuojamą laikotarpį, atsižvelgiant į esamus metinio biudžeto apribojimus. Šis metodas įgauna pranašumą už paprastą reitingavimą, nes tinklo lygmens analizėje atsižvelgiama į kelias to paties kelio ruožo remonto alternatyvas ir pasiekiamą naudą. Naudos ir sąnaudų metodas labiausiai pasiteisina, kai analizė turi tik vieną ar kelis apribojimus, pavyzdžiui, naudojamas biudžetas, palaikomas tinklo būklės lygis ar objektų paskirstymas regioniniu požiūriu (Donev et al., 2022).

Kitas scenarijus gali būti tinklo būklės atstatymas (pagerinimas) ir nuolatinės būsenos palaikymas, siekiant išlaikyti panašų finansavimo lygį. Tokiam tikslui pasiekti naudos ir sąnaudų metodo gali nepakakti, todėl būtina pasitelkti optimizavimo metodus. Optimizavimo metodais siekiama sudaryti optimalią dangos remonto strategiją. Taikant šiuos metodus, galima tikėtis maksimaliai padidinti tam tikrą naudą, išlaikant biudžeto ir kitus taikomus strategijos suvaržymus, arba sumažinti bendras išlaidas, atsižvelgiant į konkrečius veiklos tikslus ir strategijos suvaržymus (Kulkarni & Miller, 2003).

Neuroniniai tinklai apibendrina ir generuoja sprendimus, mokydami iš pavyzdžių. Jie gali imituoti žmonių gebėjimą priimti sprendimus nenaudodami jokių iš anksto nustatytų matematinių lygčių (Donev et al., 2022).

1.3. Dangų būklės vertinimo ir degradacijos modeliai

Šiame skyriuje nagrinėjamas kelio dangos nusidėvėjimas ir naudojimo laikas, kaip įvairūs veiksniai daro įtaką dangos ilgaamžiškumui. Aptariama dangos būklės stebėsenos ir periodinių matavimų svarba kelių kokybei įvertinti. Taip pat apžvelgiami dangos būklės rodikliai, pateiktos išvalgos apie pagrindines metrikas, kuriomis remiantis priimami priežiūros sprendimai.

1.3.1. Kelių dangų degradacija ir naudojimo laikotarpis

Kelių dangų degradacija – nuolatinis kelio dangos būklės kitimas – tai procesas, kurio metu kelio danga yra veikiamas atskirų veiksmų visumos: kelio konstrukcijos savybių, aplinkos veiksnių ir eismo apkrovų. Kelio konstrukcijos savybės, veikiančios dangos degradaciją, – tai medžiagų savybės ir jų senėjimas, statybos darbų kokybė, dangos naudojimo trukmė, projektiniai sprendimai ir kt. Aplinkos veiksniai – temperatūros lygis ir kaita, saulės spinduliuotė, krituliai, išalo gylis, gruntai ir kt. Eismo apkrovos – lengvojo ir sunkiasvorio transporto eismas, tankis, ašių skaičius ir kt. Kelio dangos būklė degraduoja laikui einant net nesant eismo apkrovų, t. y. pakanka kelio konstrukcijos savybių ir aplinkos poveikio.

Siekiant priimti ir įgyvendinti efektyvius sprendimus priimant remonto strategijas, svarbu turėti patikimą informaciją apie analizuojamą kelių tinklą. Vienas iš tokių rodiklių – projektinis naudojimo laikotarpis, kuris užsienio literatūroje įvardijamas kaip likęs naudojimo intervalas (angl. *Remaining Service Interval*, RSI) arba likęs naudojimo laikas (angl. *Remaining Service Life*, RSL). Likęs naudojimo intervalas – tai laikas, kurio reikia dangai pasiekti nepriimtina būklę ir tuomet ją atnaujinti arba rekonstruoti, o terminas *likęs naudojimo laikas* sukelia neapibrėžtumų ir gali apimti keletą statybos istorijos momentų (Elkins et al., 2013).

Žinant arba prognozuojant likusį dangos naudojimo laiką, galima tiksliau sudėlioti metinius planus ir užduotis. Žinoti projektinį naudojimo laikotarpį naudinga sudarant remonto programas, skirstant lėšas ar prognozuojant ilgalaikius poreikius ir yra būtina siekiant optimaliai išnaudoti esamų dangų konstrukcijų pajėgumą (Karballeezadeh et al., 2019).

Yra atlikta daug aplinkos poveikio reikšmingumo vertinimo tyrimų ir nustatyta, kad sunkiasvorio transporto eismo sukeltos apkrovos yra kelio dangos degradaciją labiausiai veikiantis veiksnys. Tačiau degradacijos sparta labai padidėja esant kelių veiksmų sąveikai.

1987 m. JAV šešių skirtingų klimatinių regionų penkiose valstijose atlikti 14-likos ruožų stebėjimai. Siekta nustatyti dominuojantį veiksnį kelių degradacijos procese – aplinkos veiksniai ar eismo apkrovos yra pagrindinis dominuojantis veiksnys. Tiriamieji ruožai buvo išsidėstę skirtingomis klimato sąlygomis, eismo

apkrovos ruožuose buvo išdėstytos taip, kad sunkiasvorių transporto priemonių eismas vyko tik viena kryptimi. Šių stebėjimų metu buvo nustatyta, kad sunkiųjų transporto priemonių apkrovos turi daug didesnę įtaką dangų ir jų konstrukcijų degradacijai nei žemės sankasos gruntai, drėkinimo sąlygos ar kiti aplinkos veiksniai (Hudson & Flanagan, 1987). Kelio danga tiesiogiai perima transporto priemonių sukiamas apkrovas, nulemia važiavimo kokybę, saugumą, padangų sukimą su danga (Vaitkus et al., 2014).

Aplinkos veiksniai, ypač temperatūra ir drėgmė, turi įtakos nestandžių dangų veikimui. Šie veiksniai jau seniai buvo vertinami rengiant dangų projektus ir praktikoje, nes jie gali veikti dangos medžiagų degradaciją bei standumą, kartu ir dangos eksploatacines savybes. Siekiant tinkamai suprojektuoti dangą, būtina atsižvelgti į klimato veiksnius, nes aplinkos veiksnių sukiamos apkrovos yra neišvengiamos ir kartais lemiamos. Tyrimo metu nustatyta, kad temperatūra (tiek vidutinės metinės temperatūros padidėjimas, tiek sezoniniai svyravimai) daro didelę įtaką dangos pažaidoms, įskaitant dangos išilginius plyšius, nuovargio plyšius ir provėžų formavimąsi (Qiao et al., 2013).

Raffaniello et al. (2022) atliko tyrimą kurdami temperatūrinių plyšių ir provėžų vystymo (nusidėvėjimo) modelius, kuriuose nepriklausomi kintamieji buvo laikomi dangos amžius, vidutinis metinis eismo intensyvumas ir užšalimo indeksas. Gautuose modeliuose determinacijos koeficientas R^2 buvo 82–99 % diapazone.

2015 m. patvirtintas „Automobilių kelių investicijų vadovas“, skirtas padėti rengiant investicinius projektus. Šiame vadove pateikiami rekomendaciniai projektų gyvavimo ciklai vidutiniam ir kapitaliniam remontams, kelio rekonstrukcijai, naujo kelio tiesimui. Remiantis šiuo vadovu pateikta 3.3.1 lentelė, vidutinis magistralinių ir krašto kelių remontas turi būti planuojamas 8 metams, o rajoninių kelių – 10 metų periodui. Kapitalinis magistralinių kelių remontas turi būti planuojamas 12 metų, krašto kelių – 15 metų periodui. Visų tipų kelių rekonstrukcija arba naujų kelių tiesimas turi būti planuojamas 30 metų laikotarpiui (Lietuvos automobilių kelių direkcija, 2015). Lietuvoje galiojančiose Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklėse yra apibrėžta siektinos naujai projektuojamos dangos konstrukcijos naudojimo trukmė pagal atskiras dangos konstrukcijos dalis: 12–18 metų – viršutiniams dangos sluoksniui; 20–30 metų – apatiniams dangos sluoksniams; 40–50 metų – surištiems pagrindo sluoksniams. Vadovaujantis kelių projektavimo taisyklėse pateikiamu algoritmu, standartizuotos konstrukcijos skaičiavimo terminai parenkami dvidešimčiai arba trisdešimčiai metų (Lietuvos automobilių kelių direkcija, 2019). Tačiau eismo intensyvumas ir natūrinis eismo intensyvumas niekada nebūna vienodas, todėl dangų būklės degradacijos prognozavimas gali būti tik iš dalies patikimas, jeigu nėra atliekami eismo intensyvumo tyrimai.

Kelio dangos ir jos konstrukcijos ilgaamžiškumui įtakos turi pačios dangos būklės lygis ir jį apibūdinančių rodiklių dydžiai: provėžų gylis, kelio dangos išilginis nuolydis, laikomoji geba, skersinis nuolydis ir kt.

Kelių statybos ir remonto sektoriuje atliktiems darbams suteikiama garantija. Vadovaujantis Lietuvos Respublikos civilinio kodekso 6.698 straipsniu, atliktiems statybos rangos darbams (nauja statyba ar remontas) turi būti taikomas penkerių metų garantinis laikotarpis arba dešimt metų esant paslėptiesiems statinio elementams.

Lietuvoje kelių tiesimo srityje dar nėra taikomas eksploataciniais rodikliais grįstas (angl. *Performance Based Contracts*, PBC) statybos darbų sutarčių sudarymo modelis. Toks sutarties modelis yra grįstas ilgalaikės garantijos principu, sutartys sudaromos 10 metų ar ilgesniam laikotarpiui. Šis darbų pirkimo modelis yra gana populiarus išsivysčiusiose šalyse, kai galima projekto rizika perkeliama objekto rangovui, tačiau kartu tokie projektai skatina pritaikyti naujas technologijas ar inovacijas. Taikomas PBC modelis padeda gauti maksimalią naudą ir rangovui, ir užsakovui – nuo abiejų pusių įsipareigojimų, objektyviai pasirinktų ir pamatuojamų eksploatacinių rodiklių ar garantijų ir bendrai sutartų matavimo metodų (Haas et al., 2008).

Viešojo ir privataus subjektų partnerystė (VPSP) – tai valstybės arba savivaldybės institucijos ir privataus subjekto įstatymų nustatyti bendradarbiavimo būdai, kuriais valstybės arba savivaldybės institucija perduoda jos funkcijoms priskirtą veiklą privačiam subjektui, o privatus subjektas investuoja į šią veiklą ir jai vykdyti reikalingą turtą, už tai gaudamas įstatymų nustatytą atlyginimą. Sutardamos dėl VPSP partnerystės, abi šalys susitaria sutelkti atitinkamus išteklius ir pasidalyti siūlomo infrastruktūros projekto riziką, siekdamos abipusės naudos ir visuomenės narių ar mokesčių mokėtojų interesų (Fatokun et al., 2015). Į tokius projektus valdžios ir privataus subjektų partnerystės sutartyje nustatytais sąlygomis investuoja privatus subjektas. Tokios PBC ir VPSP finansavimo sutartys dažniausiai būna grindžiamos eksploatacinių rodiklių matavimais ir stebėsena. Šiuo metu Lietuvos kelių sektoriaus kelių infrastruktūros srityje yra vienas objektas, kuriame taikoma viešojo ir privataus sektorių partnerystė (angl. *Public Private Partnership*, PPP).

1.3.2. Dangų būklės stebėsena ir periodiniai matavimai

Kelio dangos būklė kartu su kelio ženklais ir kelio ženklinimu, ITS įrenginiais, klimatinėmis poilsio ir aptarnavimo zonų vietomis turi įtakos kelionės saugumui, komfortui ir patrauklumui. Dangos eksploatavimo sąlygos turi įtakos dangos būklei. Dangos eksploatavimo sąlygos ir dangos konstrukcija bei naudojimo trukmė priklauso nuo intensyvių objektų apkrovų, klimato sąlygų, dangos konstrukcijos

sluoksnių ir geologinių sąlygų bei kitų veiksnių (pvz., gruntinio vandens lygio, kelio sankasos būklės) (Petkevičius et al., 2019)

Siekiant suprasti kelių dangų būklės degradacijos procesą, būtina stebėti dangos būklės parametrų ir kitų veiksnių kitimą. Šiuo tikslu atliekami ilgalaikiai kelio dangos būklės stebėsenos tyrimai (angl. *Long Term Pavement Performance*). Kelių tinklo būklei nustatyti atliekami periodiniai matavimai kelių tinklo lygmeniu (visą ar dalį kelių tinklo apimantys tyrimai), periodiškai išmatuojant kelių tinklo būklės rodiklius.

Kelio dangos eksploatacinių savybių prognozavimas įvairiomis sąlygomis yra svarbus elementas valdant brangiai kainuojantį kelių tinklo dangų turtą, atsižvelgiant į galimą lėšų taupymą priežiūros ir remontų darbams (Choummanivong & Martin, 2019).

Dangų būklės periodinė stebėseną vykdoma dėl dviejų priežasčių – mokslinių tyrimų veiklai vykdyti, tiriant dangų ilgaamžiškumo savybes, ir dangų būklės lygiui nustatyti organizuojant dangų būklės valdymą.

Moksliniais pagrindais JAV 1980 m. pradėjo ilgalaikio dangos būklės stebėjimo tyrimų projektą, kurį inicijavo Amerikos TRB ir AASHTO organizacijos. Šis projektas prasidėjo JAV greitkelių dangų būklės lygio stebėjimu ir gautų stebėsenos rezultatų kaupimu duomenų bazėje. Vienas iš gautų rezultatų buvo strateginė greitkelių tyrimų programa SHRP, kurioje daugiausia dėmesio buvo skirta LTPP stebėsenos programai. Projektas išsiplėtė ir 1989 m. prie projekto prisijungė Kanada. Atskiras LTPP tyrimų programas pradėjo kurti Švedija 1984 m., Australija 1994 m., Naujoji Zelandija 2000 m. (Choummanivong & Martin, 2019; Svensson, 2013).

JAV LTPP programos stebėsenos metu buvo tiriama daugiau nei 2500 asfalto ir portlandcemenčio dangos ruožų JAV ir Kanadoje, atspindinčiose įvairiausias klimato ir gamtines (grunto) sąlygas žemyne. Australija 1994 m. sukūrė savo SHRP-LTPP programą, kurios metu Australijos žemyne stebėjo daugybę kelių ruožų įvairiomis eismo ir klimato sąlygomis. Švedijoje LTPP programos metu buvo stebima apie 650 kelio ruožų (Choummanivong & Martin, 2019).

Lietuvoje prie ilgalaikių kelio dangos būklės stebėsenos tyrimų galima priskirti tris projektus. 1997–2000 m. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie susisiekimo ministerijos kartu su VĮ Kelių ir transporto tyrimo institutu vykdė Lietuvos kelių dangų degradacijos tyrimus. Tyrimų rezultatai buvo panaudoti HDM degradacijos modeliams adaptuoti ir kalibruoti dangų valdymo sistemoje „Davasema“. Buvo tiriami 35 naujai įrengti, rekonstruoti arba suremontuoti kelių ruožai. 2007 m. buvo įrengtas eksperimentinių dangos konstrukcijų bandomasis ruožas kelyje netoli Vilniaus miesto, vedančiame į Pagirių karjerą. Šiame kelyje buvo įrengtos 27-ios skirtingos sudėties III dangos konstrukcijos klasės kelio dangos konstrukcijos. Bandomojo ruožo vieta buvo specialiai pasirinkta taip, kad viena

kryptimi vyktų tuščių vilkikų eismas kelyje į karjerą, o iš karjero jau ruožu važiuotu pakrauti vilkikai – tokiu būdu viena bandomojo ruožo eismo juosta yra apkraunama gerokai didesne apkrova negu kita. Šiame bandomajame ruože stebėsena vykdyta iki 2018 m. imtinai. Nuo 2017 m. Lietuvoje įrengtas triukšmą mažinančių asfalto mišinių bandomasis ruožas. Jis įrengtas automagistralėje A2 Vilnius–Panevėžys. Šio bandomojo ruožo stebėsena orientuota ne į dangos būklės degradaciją, bet į triukšmo problematiką: keliu važiuojančių transporto priemonių skleidžiamo triukšmo matavimus, padangos ir dangos kontakto sukeliama triukšmo matavimą, vidutinio tekstūros gylio ir vidutinio paviršiaus profilio gylio matavimus, garso sugerties nustatymus (Braga et al., 2003; Lietuvos automobilių kelių direkcija, 2018; www.vgtu.lt).

Galima išskirti du infrastruktūros objektų būklę apibūdinančios informacijos tipus: informacija apie dabartinę statinių būklę, nustatoma inspektavimų ar periodinių tyrinėjimų metu, ir informacija apie būsimą būklę, nustatoma būklės kitimo modeliais ją prognozuojant (Madanat, 1993).

Dangų valdymo sistemos ir jų sprendimai yra grįsti būklės vertinimu. Būklės tyrimų metu gauti rezultatai naudojami vertinant tiriamų objektų būklę, todėl būtina užtikrinti išmatuotų duomenų tikslumą.

Kelių tinklo būklės tyrimai gali būti atliekami objekto arba kelių tinklo lygmenimis. Objekto lygmuo – tyrimai atliekami viename kelio homogeniniame ruože (objekte). Šie tyrimai pasižymi detalumu ir tikslumu. Tokių matavimų metu atliekami tyrimai, kuriuos dėl savo sudėtingumo ar matavimo pritaikymo dideliu mastu negalima atlikti tinklo lygmeniu. Kelių tinklo lygis – tyrimai atliekami dalyje ar visuose kelių tinklo kelių homogeniniuose ruožuose.

Tradiciškai, iki atsirandant šiuolaikinei tyrimų įrangai, inžinieriai, planuodami techninę priežiūrą, remdavosi sukaupta inžinerine patirtimi ir vizualių apžiūrų rezultatais, kurie dažnai būdavo subjektyvūs (COST, 1997). Kokybinių dangos būklės rodiklių tyrimai yra plačiai taikomi visame pasaulyje ir gali būti atliekami rankiniu matavimu (toliau – vizualiu) ar automatizuotu būdu (Okine & Adarkwa, 2013; Pierce & Weitzel, 2019).

Vizualiniai tyrimai yra lėti, einant ar lėtai važiuojant sužymimi visi paviršiaus defektai, matomi kelio dangos paviršiuje, išmatuojamos kitos dangos ir dangos profilio savybės. Dažniausiai atliekami pasirinktų objektų tokio tipo tyrimai. Automatizuoti matavimai atliekami naudojant tam skirtą specifinę mobiliąją kelių tyrimų įrangą, fiksuojančią kelio dangos paviršiaus profilį ir vaizdinę informaciją, tyrimus atliekant eismo srauto greičiu. Tokio tipo tyrimai atliekami dideliu mastu. Atliekant vizualius ir automatizuotus tyrimus, labai svarbus esminis reikalavimas – tyrimo rezultatų kartojamumas ir patikimumas. Ypač vertinant rankinių ir vizualių tyrimų rezultatus, praktikoje pasitaiko subjektyvių vertinimo elementų, kai vertintojai, vadovaudamiesi tomis pačiomis gairėmis, pateikia skirtingą tos

pačios charakteristikos vertinimą – tai kelia patikimumo, objektyvumo ir matavimo atkartojamumo klausimą, kurį automatizuoti dangų būklės tyrimai eliminuoja. Būklės tyrimai kelių tinklo lygmeniu yra brangus ir tęstinis procesas, reikalaujantis laiko sąnaudų. Nuo dangų valdymo sistemoje įdiegtų dangos vertinimo, degradacijos modelių ir analizės lygio priklauso ir tiriamų rodiklių spektras bei detalumas. Dažniausiai brangesni metodai būna tikslesni, yra labiau atkartojami ir nuodugnesni.

Dangų būklės rodiklių tyrimus galima suskirstyti į keturis pagrindinius tipus (Okine & Adarkwa, 2013):

- lygumo (važiavimo kokybės) tyrimai;
- pažaidų tyrimai;
- laikomosios gebos tyrimai;
- rato sukibimo su danga tyrimai.

Kelio naudotojams svarbiausi kriterijai yra saugumas ir komfortiškumas (Litzka et al., 2008), todėl kelio dangos lygumas ir rato sukibimas su danga yra aktualūs kriterijai kelio naudotojams. Kelio savininkams ir inžinieriams svarbiausios yra inžinerinės būklės ir funkcinės būklės analizės. Inžinerinėje analizėje paprastai atliekami pažaidų tyrimai ir laikomosios gebos matavimai. Su dangų eksploatacinėmis savybėmis susijęs dangos vertinimas visų pirma nukreiptas į tai, kaip danga užtikrina paslaugos tinkamumą naudotis keliu, koks paviršiaus pažaidų mastas, esamas konstrukcijos tinkamumas ir dangos paviršiaus sukibimo su automobilio ratu savybės. Šie keturi dangos būklės veiksniai gali būti naudojami nustatant bendrą dangos būklę ir nustatant ekonomiškiausią ir optimalų priežiūros bei remonto būdą.

Būklės tyrimų metu matuojamus rodiklius galima suskirstyti į dvi grupes (Peraka & Biligiri, 2020; Pierce & Weitzel, 2019; Wadalkar et al., 2018):

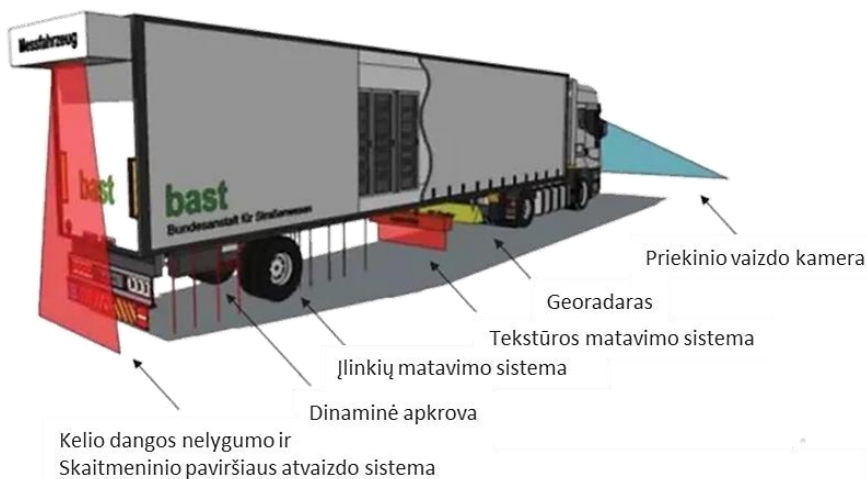
- Kokybiniai (funkciniai) dangos rodikliai:
 - kelio dangos nelygumas;
 - provėžų gylis;
 - paviršiaus defektai (lopai, duobės, bitumo išsiliejimas, lukštenimas);
 - vidutinis profilio gylis;
 - atsparumas slydimui (rato sukibimas su danga).
- Struktūriniai dangos rodikliai:
 - dangos įlinkiai;
 - plyšiai (nuovargio, išilginiai, skersiniai).

Visi išvardinti rodikliai gali būti matuojami automatizuotai pasitelkiant specialią tyrimų įrangą, pritaikytą eismo srauto greičiu matuoti. Tyrinėjant objekto lygmeniu taip pat gali būti vertinamos papildomai struktūrinės savybės, medžiagų savybės ir kiti panašūs tyrimai, kurie nėra pritaikyti atlikti tinklo lygmeniu.

Analizuojant kelių tinklo būklės stebėsenos metu surinktus duomenis galima (Seedahmed & Zumrawi, 2020):

- įvertinti esamą tinklo būklę;
- nustatyti dangos degradacijos tempus;
- sumodeliuoti būklę ateityje;
- nustatyti priežiūros ir remonto poreikius;
- nustatyti remonto išlaidas;
- parengti remonto planus;
- įsivertinti biudžeto mažinimo ir atidėtos priežiūros poveikį;
- suplanuoti būsimu dangos priežiūros darbus;
- stebėti įvairių dangų konstrukcijų ir medžiagų būklės charakteristikų kitimą.

Dangų būklės parametrai turi skirtingą įtaką dangos eksploatacinėms savybėms ir nevienodą poveikį dangos būklei ir jos remontui. Pavyzdžiui, siekiant pašalinti didelį kelio dangos nelygumą, galima ištaisyti ir rato sukibimo su danga problemas ar užtaisyti paviršiaus defektus, o jeigu būtų tvarkomos laikomosios gebos savybės, greičiausiai būtų keičiama dalis arba visa dangos konstrukcija ir būklės rodikliai tokiu būdu atnaujinami iš esmės. Atliekant sudėtingesnius remontus, pagerinama daugiau būklės rodiklių savybių, prailginamas dangos gyvavimo ciklas.



1.9 pav. BAST TSD tyrimų įrangos konceptualus modelis (Jansen, 2016)

Fig. 1.9. Conceptual model of BAST TSD research equipment (Jansen, 2016)

Standartiniai kelių tinklo dangos būklės tyrimai įprastai atliekami pasitelkiant daugiafunkčę mobiliąją kelių tyrimo įrangą. Šių įrangų paplitimą ir masiškumą nulėmė XX a. 9-ajame dešimtmetyje išpopuliarėjusi kompiuterinė ir lazerinė

įranga, leidusi sukurti bekontaktę tyrimo įrangą – lazerinius profilometrus. Jie dar labiau išpopuliarėjo XXI a., kai buvo pradėtos integruoti išilginio ir skersinio profilių matavimo technikos, leidusios kurti trimačius profilius ir vaizdo fiksavimo kameras (Sjögren, 2015).

Tobulėjanti kompiuterinė ir lazerinė įranga leido integruoti skirtingų technologijų tyrimų įrangą į vieną transporto priemonę. Šiuolaikiniai dangų būklės tyrimai leidžia vienu metu su viena tyrimų įranga (1.9 pav.) tirti tris dangų būklės rodiklių grupes: kelio dangos nelygumą (išilgine ir skersine kryptimis); paviršiaus defektus ir laikomąją gebą.

Bėgant metams buvo sukurtos arba pritaikytos automatizuotiems dangos tyrimams įvairios vaizdo gavimo technologijos, įskaitant tradicines ploto nuskaitymo kameras (angl. *area-scan cameras*), kurios kiekviename kadre užfiksuoja vaizdą, apimančią stačiakampį plotą; linijinio skenavimo kameras (angl. *line-scan area cameras*), kurios kiekviename kadre užfiksuoja vieną pikselių eilutę; lazerinės 3D kameras, kurios kiekviename kadre nuskaityto vieną skersinės juostos profilį (Salini et al., 2017).

Dangų būklės tyrimų periodiškumas yra individualus kelių savininko apsisprendimas arba priklauso nuo techninio reguliavimo. Lietuvoje kelių tinklo būklės matavimai buvo vykdomi nereguliariai, vadovaujantis LAKD užsakymais (dažniausiai ne daugiau kaip 7000 km per metus). Tai nulemdavo skiriamas finansavimas. Nuo 2019 m. matavimai atliekami kasmet visuose valstybinės reikšmės kelių su asfalto danga ruožuose (apie 16 000 km), matuojant visas eismo juostas visomis kryptimis. Tai nustatyta LAKD parengtame Valstybinės reikšmės kelių su asfalto danga pažaidų matavimo ir nustatymo tyrimų vykdymo veiklos vadove (Lietuvos automobilių kelių direkcija, 2021).

Matavimų praktika labai skirtinga. Pavyzdžiui, kitose Baltijos šalyse matavimai atliekami periodiškai matuojant tam tikras tinklo dalis, ir tyrimus išskaidant į atskiras užduotis. Estijoje kelio dangos nelygumas matuojamas kasmet, tačiau kelio dangos nelygumo matavimai apima tik apie 6000 km, provėžų gylis – apie 3250 km, defektų tyrimai – 8000 km. Estijoje atliekami ir FWD matavimai tinklo mastu matuojant 6000–11 200 km kasmet. Latvijoje kelio dangos nelygumas ir provėžų gylis matuojamas kiekvienais metais pagrindiniuose keliuose ir trečdalyje rajoninių kelių – apie 3500 km. Kasmet atliekami viso valstybinės reikšmės tinklo pažaidų matavimai, dangų stiprumas su FWD tyrimų įranga tiriamas kiekvienais metais – apie 400–600 km.

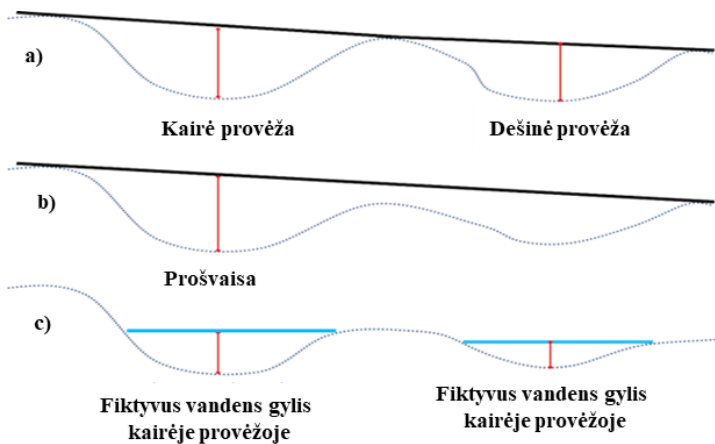
1.3.3. Dangos būklę apibūdinantys irties rodikliai

Praktikoje išskiriami trys skersinį dangos nelygumą apibūdinantys parametrai: provėžų gylis, maksimali prošvaista ir fiktyvus (menamas) vandens gylis provėžose.

Provėžų gylis (kairė ir dešinė provėžos) nustatomas atliekant automatizuotus dangos būklės matavimus, nustatant didžiausią atstumą nuo 1,2 m ilgio liniuotės tiesės iki dangos paviršiaus liniuotės metodu (1.10 pav., a). Prošvaisa – tai didžiausias atstumas nuo liniuotės apačios iki dangos paviršiaus visame eismo juostos plotyje (1.10 pav., b). Fiktyvus vandens gylis provėžose – tai didžiausias galimas atstumas nuo kelio dangos paviršiaus iki provėžose galinčio užsilaikyti vandens paviršiaus (1.10 pav., c) (Lietuvos automobilių kelių direkcija, 2021b).

Didėjant provėžų gyliui, didėja ir sklaida (dispersija), o tai daro įtaką transporto priemonės dinamikos didėjimui, sudaro vairavimo nepatogumų. Tai sukelia transporto priemonės vairuotojui stresą ir nuovargį, didina avarijos tikimybę (Sivilevičius & Vansauskas, 2013).

Kelio dangos išilginis nelygumas apibrėžiamas kaip dangos nelygumų skaičius ilgio vienetu. Tai vienas iš kelio dangos kokybės rodiklių, nusakančių kelio dangos pažaidų įtaką transporto priemonių važiavimo stabilumui, komfortui ir degalų sąnaudoms. Kelio dangos nelygumas – vienas iš pagrindinių rodiklių, pagal kurį pasirenkamos ir ekonomiškai pagrindžiamos remontuotinos kelių ruožų atkarpos. Kelio dangos išilginis nelygumas vadinamas tarptautiniu lygumo indeksu (IRI) ir ištiesai matuojamas m/km.



1.10 pav. Skersinio dangos nelygumo tipai: a) provėžų gylis; b) prošvaisa; c) fiktyvus vandens gylis provėžose (Lietuvos automobilių kelių direkcija, 2021b)

Fig. 1.10. Types of transverse pavement unevenness: (a) rut depth; (b) total rut; (c) water depth (Lietuvos automobilių kelių direkcija, 2021b)

Kelio dangos tekstūra yra svarbus kelio dangos būklės rodiklis, turintis įtakos transporto priemonės važiavimo keliu sąlygoms. Dinaminis automobilio elgesys

priklauso nuo tekstūros. Dangos tekstūra apibrėžiama kaip vidutinis dangos mikroprofilio gylis (MPD), matuojamas mm ištisiniam kelio dangos profilyje.

Plyšiai kelio dangoje gali atsirasti dėl kelio dangos konstrukcijos nuovargio, temperatūros poveikio arba atkartoti senus plyšius, esančius žemesniuose sluoksniuose. Plyšiai skirstomi į skersinius, išilginius ir tinklinius. Taip pat galima išskirti ketvirto tipo plyšius – tai užtaisyti plyšiai.

Plyšių atsiradimo priežasčių būna įvairių, tačiau dažniausiai skersiniai plyšiai atsiranda dėl staigių temperatūros svyravimų, taip pat provėžų, dangos nuovargio ar hidroterminio režimo. Skersiniai plyšiai pradeda formotis, kai kelio dangoje veikiantys tempimo įtempiai viršija asfalto dangos stiprį lenkiant ir danga lūžta. Šio tipo plyšiai taip pat gali atsirasti dėl netolygaus grunto judėjimo žiemą ir pavasarį, kai dangos konstrukcijos laikomoji geba būna mažiausia (Malinovski, 2011; Paliukaitė, 2010).

Išilginiai plyšiai formuojasi visoje važiuojamosios dalies zonoje, tačiau dažniausiai pradeda formotis provėžų zonose. Išsivysčius išilginiams plyšiams kelio dangoje, juos lydėti gali kas 1–4 m susidarę skersiniai plyšiai. Išilginių plyšių susidarymo priežastys gali būti įvairios: dėl nepakankamo dviejų sluoksnių sukibimo vienas su kitu, dėl nepakankamo dangos konstrukcijos pagrindo sluoksnio stiprio, dėl sunkiasvorio transporto priemonių apkrovų ar didelio slėgio padangose poveikio (Paliukaitė, 2010).

Tinkliniai plyšiai dažniausiai atsiranda esant silpniems kelio dangos konstrukcijos pagrindo sluoksniams. Šie plyšiai pirmiausia atsiranda rato riedėjimo vėžėje kaip išilginiai plyšiai ir vėliau vystosi į besijungiančių plyšių tinklą. Kita dažna tinklinių plyšių atsiradimo priežastis – netinkamas hidroterminis režimas kelio dangos konstrukcijoje ar dėl konstrukcijos sluoksnius sudarančių medžiagų savybių nepakankamumo (Paliukaitė, 2010).

Paviršiaus defektai kelio dangoje gali atsirasti dėl nepakankamo dalelių sukibimo su rišamąja medžiaga ar nepakankamo dangos sluoksnių sutankinimo, nekokybiškų medžiagų naudojimo, bitumo perteklius dangos paviršiuje (Paliukaitė, 2010). Paviršiaus defektai yra lopai, išdaužos, bitumo išplaukimas (Lietuvos automobilių kelių direkcija, 2021). Paviršiaus defektų rūšių galima išskirti ir daugiau, tačiau praktikoje dažniausiai naudojamos šios.

Išdaužos atsiranda, kai automobilių ratai atskirose vietose išardo kelio dangos medžiagą ne mažiau kaip per vieno asfalto dangos sluoksnio storį. Šio tipo kelio dangos paviršiaus defektai yra plyšių, plyšių tinklo ar ištrupų veikiamų transporto apkrovų ir klimato veiksnių irimo pasekmė. Išdaužos (duobės) sparčiausiai formuojasi pavasarį, kai temperatūra intensyviai svyruoja iš teigiamos į neigiamą, o asfalto dangos porose susikaupia drėgmė. Vanduo, patekęs tarp asfalto mikroporų ar mikroplyšių, veikiant šalčiui, plečiasi ir ardo kelio dangą. Lopai yra ankstesnių kito tipo paviršiaus defektų vystymosi pasekmė, kai remonto (taisymo) metu pašalintas pažeistos kelio dangos mažiausias plotas ir kelio danga užtaisyta nauju

asfalto sluoksniu. Lopai gali suirti – tai jau pašalintų paviršiaus defektų atsikartojimas naujai paklotoje asfalto dangoje (lopų), kai ankstesnio remonto metu nėra pašalintos pirminių defektų atsiradimo priežastys. Bitumo išplaukimas – tai kelio dangos paviršiuje susidarantis blizgantis, į stiklą panašus veidrodinis paviršius, kuris gali būti lipnus prisilietus. Dažniausiai bitumo išplaukimas susidaro dėl bitumo pertekliaus dangos paviršiuje ir pasirodo ratų riedėjimo vėžėse asfalto dangos paviršiuje, kai vasarą, įkaitus kelio dangai ir dėl šilumos besiplečiančiam rišikliui, asfalto medžiagoje nepakanka laisvų oro tuštymų ir bitumas, užpildęs jas, išsiveržia į kelio dangos paviršių ir sudaro minkštas bitumo dėmes (Lietuvos automobilių kelių direkcija, 2021; Paliukaitė, 2010).

Norint pasiekti ir išlaikyti efektyvų kelių infrastruktūros valdymo lygį, būtina tiksliai prognozuoti kelio dangos būklės degradaciją. Kelio dangos būklės prognozavimas yra pagrindinis dangos būklės valdymo sistemų komponentas, nuo kurio tikslumo priklauso kelių infrastruktūros tinklo valdymo efektyvumas (Lin & Madanat, 2002).

Dangų būklės prognozavimo modeliai – pagrindinis kelių infrastruktūros turto valdymo sistemų arba kelių dangos būklės valdymo sistemų elementas. Todėl sėkmingas šių sistemų diegimas labai priklauso nuo naudojamų dangų būklės prognozavimo modelių, nes gautų prognozių tikslumas lemia priimamų sprendimų pagrįstumą (Huvstig et al., 2008).

Dangų būklės kitimo prognozavimas apima dangos būklės numatymą tam tikromis eismo apkrovos ir aplinkos sąlygomis. Pirmosios dangų valdymo sistemos neturėjo būklės prognozavimo galimybių ir buvo skirtos esamai dangos būklei vertinti. Vėliau atsiradę pirmieji prognozavimo modeliai buvo paprasti ir paremti inžineriniu tikėtiniu projektiniu gyvavimo amžiumi, priklausomai nuo taikomų remonto veiksmų (Kulkarni & Miller, 2003).

Dangos būklės kitimo modeliai yra svarbūs ne tik kelius prižiūrinčioms įmonėms valdant savo kelių tinklą, bet ir atliekant kelių kainodaros bei reglamentavimo studijas. Tiek dangos degradavimas laikui bėgant, tiek santykinė įvairių veiksmų įtaka dangos degradavimui yra svarbūs tokių tyrimų duomenys. Tinkamais modeliais turėtų būti įmanoma apskaičiuoti svarbiausių kintamųjų įtaką dangos būklės degradacijai. Kai kurie iš šių kintamųjų yra dangos konstrukcija, transporto apkrovos (ašių skaičius ir ašių apkrovos) ir aplinkos sąlygos (temperatūra ir drėgmė) (Lin & Madanat, 2002).

Kelių gyvavimo ciklo sąnaudų analizė (angl. *Life Cycle Cost Analysis*, LCCA) yra tiesiogiai susijusi su dangos būklės kitimo prognozavimu. Yra įvairių modelių ir metodų, kuriuos galima suskirstyti ir taikyti skirtingais lygmenimis (Haas, 2011):

- strateginis lygmuo – numatyti tolimus kelių infrastruktūros poreikius (tam tikro komponento būsimus dėvimojo sluoksnio pakeitimo metus ar kapitalinį remontą);

- tinklo arba visos sistemos lygmuo – kai atliekami tinklo projektavimo, atkūrimo ar priežiūros galimybių efektyvumo įvertinimai (tinklo ar sistemos degradacijos modeliai taikomi komponentų grupėms arba pogrupiams komponente, pvz., tas pats modelis taikomas visiems ruožams su panašiu konstrukciniu sprendiniu);
- objekto (konkrečios vietos) ar projekto lygmuo – kai taikomos išsamesnės degradacijos modeliavimo funkcijos, atsižvelgiant į kelio komponentą ir žinias apie jį.

Dažniausiai literatūroje analizuojami du analizės ir modeliavimo lygiai – tinklo ir objekto. Jie yra aktualiausi, nes kelių tinklo būklė vertinama ir planuojama prižiūrėti vienu iš šių dviejų lygių. Tinklo ir objekto lygmenų įrankiai arba modeliai analizei atlikti skiriasi. Tinklo lygmeniu siekiama nustatyti ir numatyti bendrą kelių tinklo būklę ir jos kitimą, pvz., kiek procentų kelių ruožų yra blogos būklės dabar ir kiek jų bus po penkerių metų prie tam tikro finansavimo plano. Objekto lygmeniu visas dėmesys tenka vienam objektui, todėl tikslinga naudoti sudėtingesnius, daug papildomos informacijos apie medžiagas ar jų savybes reikalaujančius modelius, kurie didina modeliujamų rezultatų tikslumą. Tokią informaciją naudoti viso tinklo mastu yra sudėtinga ir brangu surinkti (Busch & Asmus, 2010; Kulkarni & Miller, 2003). Tinklo ir objekto analizės lygmenys yra tiesiogiai susiję su kelių dangų stebėseną ir periodiniais matavimais. Nuo šių tyrimų spektro priklauso ir duomenų įvestis skaičiuojant degradacijos kitimą modeliais.

Projekto lygmens modeliavimas pagrįstas prognozuojamais ateities eismo ir detaliais duomenimis apie kelio dangą (dėl šių reikalavimų gali reikėti atlikti būklės matavimus stacionaria įranga, pvz., krintančio svorio deflektometras (FWD) ir atlikti gręžtinius kernus sluoksnių storiams nustatyti). Remiantis šiais išplėstiniais duomenimis, galima priimti sprendimus dėl remonto darbų. Modeliuojant tinklo lygį siekiama numatyti vidutinį kelių tinklo pablogėjimą. Tinklo lygio modeliavimas dažniausiai grindžiamas prognozuojamu skirtingu transporto eismu ir duomenimis apie dangos būklę bei istoriniais duomenimis, kurie gali būti žinomi tik iš istorinių įrašų apie atliktus remontus ir kelių tinklo būklės matavimų. Projekto lygmeniu nustatomas kiekvieno kelio ruožo dangos būklės kitimas, o tinklo lygmeniu nustatoma vidutinė viso kelių tinklo būklės degradacija. Tai lemia, kad modeliujant tinklo lygį gali būti naudojami ne tokie sudėtingi modeliai, tačiau jie turėtų būti sukalibruoti, kad atitiktų vidutinius pokyčius, numatytus modeliujant projekto lygmenį (Busch & Asmus, 2010).

Kelio dangos degradacijos modelis – tai matematinė funkcija, kurios nepriklausomi kintamieji – kelio dangos konstrukcija, jos techninės ir eksploatacinės charakteristikos, dangos naudojimo trukmė, taikomi priežiūros ir remontų standartai, automobilių eismo intensyvumas, automobilių apkrovos į dangą, kelio geometriniai parametrai, klimato sąlygos ir kita – išreikšti fizikiniais dydžiais arba

faktoriais. Tai dinaminiai modeliai, nes visada vienas iš kintamųjų yra laikas (Braga, 2005; Madanat, 1993).

Dažniausiai pasitaikantys būklės kitimo prognozavimo modelių tipai yra empiriniai, mechanistiniai-empiriniai, mechanistiniai ir subjektyvūs.

Empiriniai modeliai nustatomi atliekant statistinę regresinę analizę, kai tam tikrų išmatuotų ar apskaičiuotų kintamųjų eksploatacinių savybių praradimas (pablogėjimas) yra susijęs ir turi ryšį su kitais parametrais, priklausančiais nuo kitų savybių, pvz., transporto apkrovų ar paprasčiausiai amžiaus.

Mechanistiniai modeliai gali prognozuoti dangos elgesį ar reakciją, kuri, pasiekusi slenkstinę ribą, sukelia blogėjimą, pavyzdžiui, lūžimą, išsikraipymą ar suirimą. Šis pirminio elgesio ir žalos susiejimo žingsnis visada yra empirinis.

Mechanistiniai-empiriniai modeliai, be empirinių modelių statistinių elementų, remiasi ir fundamentaliaisiais principais arba naudoja kai kurias fundamentalias priklausomybes, kitaip tariant, nustatomos fizinės dangos konstrukcijų įtempių priežastys, kurios kalibruojamos atsižvelgiant į pastebėtus dangos būklės rodiklius.

Subjektyvūs modeliai yra patirtimi grįsti modeliai, kurie dažnai pasitelkia metodus, tokius kaip Bajeso (angl. *Bayesian*) teorema ar Markovo grandinės. Mechanistinis-empirinis požiūris yra abiejų pusių konsolidacija. Empiriniai modeliai naudojami spragoms, egzistuojančioms tarp mechanikos teorijos ir dangos konstrukcijų kitimo, užpildyti. Paprastus mechanistinius atsakymus lengva apskaičiuoti darant prielaidas ir supaprastinimus, tačiau jų negalima naudoti tiesiogiai kelio dangos būklėms prognozuoti. Reikia tam tikro tipo empirinio modelio, kad rezultatai tinkamai koreliuotų, todėl mechanistiniai-empiriniai metodai laikomi tarpiniu žingsniu tarp empirinių ir visiškai mechanistinių metodų (Carvalho, 2006).

Kelių dangų degradacijos modeliai dar gali būti skirstomi į šias grupes (Braga, 2005):

- absoliutūs modeliai – jais galima prognozuoti kelio dangos būklės parametą tam tikru laiko momentu ateityje;
- padidėjimo arba pokyčio modeliai – jais galima prognozuoti kelio dangos būklės parametro pokytį per tam tikrą laiko tarpą.

Nepriklausomai nuo to, ar jie yra absoliutūs ar padidėjimo arba pokyčio modeliai, jie taip pat gali būti (Braga, 2005):

- diskretiniai, kuriuose laiko atskaita fiksuojama tam tikrais nustatytais intervalais (žingsniais);
- tolydieji, kuriuose kelio dangos būklė gali būti modeliuojama bet kuriuo laiku, arba pokytis gali būti skaičiuojamas per neribotą laiko tarpą.

Kurdami dangos būklės kitimo modelius, Prozzi ir Madanat pasinaudojo skirtingais duomenų šaltiniais (Lin & Madanat, 2002):

- atsitiktinai parinktos eksploatuojamos kelio ruožų dangos atkarpos;

- specialiai įrengti dangų bandymo poligonai, kuriose buvo užtikrintos realios eksploatuojamuose keliuose veikiančios eismo ir aplinkos sąlygos;
- specialiai įrengti dangų bandymo poligonai, veikiami padidintų eismo ir aplinkos sąlygų.

Pirmieji du duomenų tipai vadinami lauko matavimų duomenimis, o paskutiniai – eksperimentiniais. Tyrimo metu lauko matavimų duomenys labiausiai atspindėjo tikrąjį pablogėjimo – degradacijos – procesą. Anot autorių, duomenys iš eksploatuojamų dangų ruožų kartu su naudojamais eismo ir aplinkos sąlygų veiksniais labiausiai atspindi tikrąjį pablogėjimo procesą. Iš visų kitų duomenų šaltinių gaunami modeliai, kuriems įtaką gali daryti tam tikras tendencingumas, nebent vertinant modelio parametrus būtų atsižvelgta į specialiąsias aplinkybes (Lin & Madanat, 2002).

Taikant dangos infrastruktūros biudžeto optimizavimo metodus DVS, siekiama numatyti dangos būklės kitimą per tam tikrą laikotarpį. Šie metodai prognozuoja pagal šias veiksmų alternatyvas – veiksmų scenarijus (Elkins et al., 2013):

- Nieko nedaryti (angl. *Do nothing*) – kai nereikia nieko daryti (numatyti remonto įvykio), nes tikimasi, kad dangos konstrukcija vis dar bus priimtinos būklės.
- Rutininės reaktyviosios priežiūros taikymas vietos trūkumams pašalinti.
- Prevencinės priežiūros ir išsaugojimo veiklos, siekiant prailginti dangos eksploatavimo trukmę be reikšmingų dangos struktūrinių pakeitimų, kol prireikia reaktyvių priežiūros darbų.
- Alternatyvių remonto darbų taikymas.
- Dangos rekonstravimas.

DVS analizės metu pasitelkiami sprendimų priėmimo modeliai, priimančys veiksmų alternatyvas. Kulkarni ir Miller išskiria du sprendimų modelių tipus: statinius ir dinامينius. Taikant statinius sprendimų modelius, daroma prielaida, kad laikas, kai dangos būklė yra žemiau nurodytos ribos, gali būti tiksliai nuspėjamas, todėl galima nustatyti būsimų remonto veiksmų laiką. Statiniame modelyje alternatyvios remonto veiksmų strategijos apibrėžiamos pagal nurodytus būsimų remonto veiksmų metus ir tipą. Taikant dinامينius sprendimų modelius, numatomos skirtingos dangos būklės tikimybės, pagal kurias analizuojamos atitinkamos remonto alternatyvos. Gauta remonto strategija dinaminiam modelyje apibrėžta kaip dabartinis veiksmas (alternatyva) ir nuo jo priklausantys būsimi veiksmai, kurie yra sąlyginių sakinių (angl. *if-then*) nustatomos alternatyvos (Kulkarni & Miller, 2003).

Statinis sprendimo modelis – kai aiškiai žinomas darbų scenarijus, pirmasis remonto veiksmas ir laikas, o kiti remonto veiksmai žinomi, tačiau laikas priklauso nuo dangos funkcionavimo po jau atliktų remonto veiksmų. Dinaminio

sprendimo modelis veikia žinodamas, koks veiksmas atliekamas pasiekus iš anksto numatytą būklės ribinį būvį, o kitas veiksmas priklauso nuo pačios dangos funkcionavimo ir iš anksto numatytų apibrėžtų būklės ribinių dydžių.

Praktika rodo, kad statiniai modeliai dažniausiai sudaro reaktyvaus remonto strategijas, kurios dažnai apima sudėtingesnius remontus ir būna brangesni. Dinaminiai sprendimų modeliai linkę sudaryti proaktyvias remonto strategijas, kurios parenka paprastesnius remonto veiksmus ankstesnėje degradacijos stadijoje stabdant ar lėtinant prasidėjusius degradacijos procesus (Kulkarni & Miller, 2003).

1.4. Valstybinės reikšmės kelių tinklo apžvalga

Siekiant darniai plėtoti Lietuvos susisiekimo sistemą, efektyviai valdyti valstybės išteklius ir naudoti Europos Sąjungos struktūrinius fondus, didinti susisiekimo sektoriaus konkurencingumą, 2013 m. Lietuvoje buvo patvirtinta Nacionalinė susisiekimo plėtros 2014–2022 m. programa. Tai vidutinės trukmės kelių, geležinkelio, oro, jūrų ir vidaus vandenų transporto ir kitų susisiekimo sektoriaus sričių (logistikos ir pašto) strateginio planavimo dokumentas, kuriame išanalizuotos plėtros perspektyvos ir prioritetai. Programoje keliami penki uždaviniai, apimančys visas minimas susisiekimo sistemos sritis. Antrasis uždavinys apibrėžia TEN-T automobilių kelių tinklo ir jungčių su šio tinklo keliais infrastruktūros plėtojimą ir gerinimą. Vienas iš punktų pabrėžia, jog būtina pasiekti ir palaikyti pakankamą TEN-T plėtros gairėse apibrėžiamą infrastruktūros techninį lygį pagal greičio, eismo saugos, saugumo ir patogumo kriterijus (Lietuvos respublikos vyriausybė, 2013).

Pagrindiniai trys darnios plėtros kriterijai yra neigiamo poveikio aplinkai, žmonių sveikatai ir rūšių įvairovei sumažinimas ar bent esamos situacijos išlaikymas. Juos pasiekti galima statant aplinkkelius, atliekant kelių ir gatvių rekonstrukciją ir įrengiant kietąją dangą (Barauskas, 2019; Lietuvos Respublikos Vyriausybė, 2013).

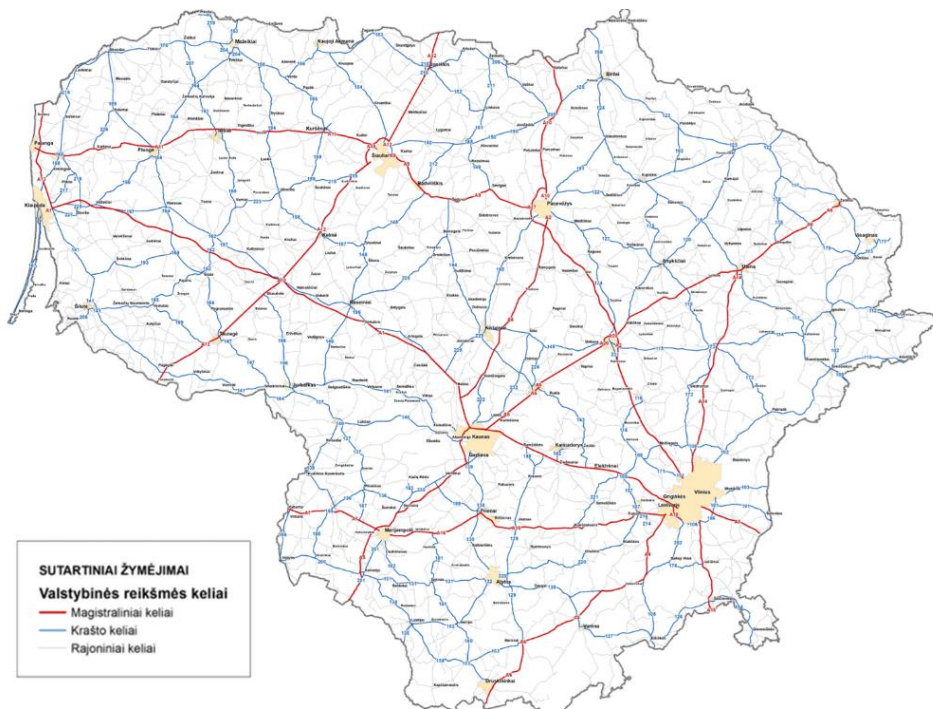
Lietuvos kelių transporto tinklas yra integrali Europos Sąjungos ir Baltijos jūros regiono transporto sistemos dalis. Valstybinės ir vietinės reikšmės automobilių keliai sudaro Lietuvos kelių infrastruktūrą (84 769 km), kurią, remiantis Statistikos departamento pateikiama informacija, 2020 m. sudarė valstybinės reikšmės keliai – 21 203 km ir vietinės reikšmės keliai – 50 982 km. Kelių tinklo svarbą atspindi tai, kad daugiau kaip pusė (54 %) gabenamų krovinių 2019 m. buvo gabenama būtent automobilių keliais ir apie 6 proc. bendrojo šalies vidaus produkto sukuria būtent kelių sektorius (Lietuvos automobilių kelių direkcija, 2020).

Lietuvos valstybinės reikšmės automobilių kelių tinklas yra gana tolygus tinklas, kurį sudaro magistraliniai (1751,293 km), krašto (4924,562 km) ir rajoniniai (14 527,289 km) keliai. Magistraliniais keliais vyksta pagrindinis eismas, jie

jungia regioninius šalies centrus. Krašto keliai, jungiantys regionų centrus ar magistralinius kelius su mažesniais miestais ir miesteliais, atlieka eismo paskirstymo funkciją. Rajoninės reikšmės keliai skirti eismo surinkimo ir privažiavimo funkcijai atlikti. Lietuvos automobilių kelių tinklo žemėlapis pateiktas 1.11 pav.

Remiantis KTVIS informacija apie kelio dangos tipus, 2023 m. rugpjūčio mėn. duomenimis, Lietuvos valstybinės reikšmės kelių tinkle yra su asfalto danga – 15 792,977 km; su cementbetonio danga – 56 603 km; su grindinio danga – 6725 km ir kelių su žvyro danga – 5346,772 km.

Lietuvos valstybinės reikšmės keliais vyksta tarptautinis, tranzitinis, turistinis ir vietinis intensyvus transporto priemonių eismas. Šie keliai įtraukti į Europos transporto koridorius – Lietuvą kerta I (šiaurės–pietų kryptimi) ir IX (rytų–vakarų kryptimi) koridoriai. Taip pat Lietuvą kerta šešios Europinės reikšmės magistralės, kurios vadinamos E keliais.



1.11 pav. Lietuvos valstybinės reikšmės automobilių kelių tinklas

Fig. 1.11. Lithuanian national road network

Įvairiems uždaviniams spręsti naudojamos skirtingos kelių klasifikavimo sistemos. Pavyzdžiui, kelių klasifikavimas pagal jų padėtį vietovėje (miesto gatvė, užmiesčio kelias, automagistralė), reikšmę (magistralinis, krašto ir rajoninis) ar

funkcinę paskirtį. Klasifikavimas pagal vietovę gali nulemti projektavimo reikalavimus, klasifikavimas pagal kelio reikšmę gali nulemti kelio priežiūros lygį ar finansavimo metodus ir kelio paslaugos lygį. Klasifikavimas pagal funkcinę paskirtį gali nulemti ir projektinius sprendinius, parodyti svarbą ir vietą automobilių kelių tinkle (Jakulytė et al., 2019; Vorobjovas, 2010).

Valstybinės reikšmės keliai užmiesčio teritorijoje skirstomi į pagrindinius ir nepagrindinius (jungiamuosius ir surenkančius eismą) kelių, o šių kelių paslaugų svarba ir kelių charakteristikos yra skirtingos. Pagrindinę užmiesčio kelių grupę sudaro (Vorobjovas, 2010):

- transporto koridoriai, kurių eismo intensyvumas didelis, skirti ilgoms keliuonėms tiek valstybės viduje, tiek jungiant tarptautinius maršrutus;
- keliai, kurie tęsiasi per visas ar beveik visas miesto zonas, turintys tam tikrą nustatytą gyventojų skaičių;
- keliai, kurie jungia kelius be galinių jungčių.

Kelių tinklo klasifikavimas pagal kelių grupes apima keturias pagrindines grupes (Vorobjovas, 2010):

- pagrindiniai keliai – tarptautinių maršrutų keliai;
- antraeiliai pagrindiniai keliai:
 - keliai, jungiantys miestus, dideles gyvenvietes ir kitus traukos taškus, kurie sudaro kelių tinklą, naudojamą susisiekti tarp valstybių ir tarp administracinių rajonų;
 - keliai iš miestų ar valstybės rajono centrų, kurie gali būti nutolę nustatyto atstumu nuo pagrindinės magistralės;
- nepagrindiniai jungiamieji ir eismą surenkantys keliai;
- vietiniai keliai.

Kelių klasifikavimą pagal funkcinę paskirtį formuoja transporto eismo paskirstymo kelių tinkle principas, kai keliai atlieka pasiekiamumo arba mobilumo paslaugą.

Taip pat keliai skirstomi į kelio kategorijas, pagal kurias nustatomos savybės ir tipiniai elementai. Priskyrimas kelio kategorijai priklauso nuo kelio geometrinių parametrų, kelio konstrukcijos stiprumo savybių ir kelio eksploatavimo požymių.

1.5. Lietuvoje taikoma dangų valdymo sistema

Šiame skyriuje apžvelgti Lietuvos valstybinio kelių tinklo asfalto dangos būklės vertinimo ir finansavimo pokyčius reglamentuojantys norminiai dokumentai, valstybinės reikšmės kelių tinklo būklė ir finansavimas, Lietuvoje taikoma remontų parinkimo technologija.

1.5.1. Asfalto dangų būklės nustatymą ir vertinimą reglamentuojantys dokumentai

Lietuvoje asfalto dangų būklės nustatymą ir vertinimą reglamentuoja du dokumentai:

- Tyrimų vykdymo veiklos vadovas – valstybinės reikšmės kelių su asfalto danga pažaidų matavimas ir nustatymas;
- Valstybinės reikšmės kelių dangos būklės vertinimo tvarkos aprašas.

Valstybinės reikšmės kelių su asfalto danga pažaidų matavimo ir nustatymo veiklos vadovas nustato valstybinės reikšmės kelių su asfalto danga pažaidų, kurių duomenys naudojami atliekant kelio dangos būklės vertinimą, matavimo, klasifikavimo ir nustatymo tvarką. Šis veiklos vadovas taikomas fiksuojant ir nustatant pažaidas valstybinės reikšmės keliuose ir gatvėse, kurios yra valstybinės reikšmės kelių tąsa su asfalto danga (Lietuvos automobilių kelių direkcija, 2018).

Šiame veiklos vadove pateikta nuostata, lemianti matavimų periodiškumą Lietuvoje: valstybinės reikšmės kelių su asfalto danga būklė turi būti matuojama kasmet ta pačia apimtimi ir tose pačiose vietose matavimus atliekant transporto priemonių važiavimo kryptimi kiekvienoje eismo juostoje.

Tyrimų vykdymo veiklos vadovas parengtas įvertinus Lietuvoje sukaupią tyrimų patirtį ir atsižvelgiant į taikomus tyrimų metodus bei naudojamą precizišką kelio dangos tyrimų įrangą RST 63, kuria vykdomas pažaidų matavimas ir identifikavimas automatizuotu būdu (Lietuvos automobilių kelių direkcija, 2018).

Skaiciuojant ruožo dangos būklės indeksą DBI, vertinamos penkios dangos būklės charakteristikos, kurios matuojamos vienu metu su mobiliąja tyrimų įranga RST 63. Tiriamos charakteristikos pateiktos 1.1 lentelėje. Čia pateikti ir kitose šalyse naudojami rodikliai panašiams būklės indeksams skaičiuoti.

1.1 lentelė. Lietuvoje ir pasaulyje asfalto dangų būklei vertinti matuojami dangos būklės rodikliai

Table 1.1. Measured pavement condition indicators in Lithuania and the world

Rodiklis	Matuojamas Lietuvoje	Matuojama kitose šalyse	Terminai anglų kalba
Kelio dangos nelygumas	Tarptautinis nelygumo indeksas IRI	Tarptautinis nelygumo indeksas IRI, išilginis profilis, lygumas, trumpų bangų ilgis ir ilgų bangų ilgis	<i>International roughness index, Longitudinal profile, Evenness, Wave length (Short wavelength, Long wavelength)</i>
Provėžų gylis	Provėžų gylis, prošvaisos gylis, skersinis nuolydis	Provėžų gylis, prošvaisos gylis, fiktyvus vandens gylis,	<i>Rutting, rut depth, mean water depth, cross-fall</i>

1.1 lentelės pabaiga

Rodiklis	Matuojamas Lietuvoje	Matuojama kitose šalyse	Terminai anglų kalba
		skersinis nuolydis	
Plyšiai (įvairių tipų)	Skersiniai, išilginiai ir tinkliniai plyšiai	Tinkliniai plyšiai, išilginiai plyšiai, skersiniai plyšiai, plyšių tinklas, temperatūriniai plyšiai, atspindžio plyšiai	<i>Alligator cracking, longitudinal cracking, transverse cracking, block cracking thermal cracking reflective cracking</i>
Paviršiaus pažeidos (įvairių tipų)	Išdaužos, lopai, bitumo išplaukimas, sluoksnio lupimasis, lukštenimasis	Bitumo išspaudimas, lukštenimasis, lopai, duobės, lukštenimasis	<i>Bleeding, ravelling, patching, potholes, delamination</i>
Mikrotekstūros gylis	Vidutinis profilio gylis	Vidutinis profilio gylis, profilografu išmatuotas tekstūros gylis, smėlio dėmės testo vertė	<i>Mean Profile Depth, Sensor Measured Texture Depth, Sand patch value</i>
Atsparumas slydimui	Lietuvoje į dangų būklės indeksą nėra įtraukta, tačiau objekto lygmeniu prireikus gali būti matuojama	Šoninės jėgos koeficientas, išilginės jėgos koeficientas, sukibimo skaičius, trintis, skersinio sukibimo koeficientas, atsparumas slydimui	<i>Sideways Force Coefficient, Longitudinal Force Coefficient, Grip Number, Friction, Transverse Adherence Coefficient, Skid resistance</i>
Laikomoji geba	Lietuvoje į dangų būklės indeksą nėra įtraukta, tačiau objekto lygmeniu prireikus gali būti matuojama	Liekamoji naudojimo trukmė, paviršiaus banguotumo indeksas, deformacija, konstrukcijos skaičius, e. modulis, deformacijos greitis	<i>Residual life, Surface Curvature Index, Deflection, Structural number, E-modulus, Deflection velocity.</i>

Valstybinės reikšmės kelių dangos būklės vertinimo tvarkos apraše automatizuotų matavimų metu nustatytos pažeidos klasifikuojamos į dvi grupes: plyšius (skersiniai, išilginiai, tinkliniai ir užtaisyti plyšiai) ir paviršiaus defektus (lopai, išdaužos ir bitumo išplaukimas), taip pat yra nurodyti šių rodiklių matavimo vienetai. Tvarkos apraše taip pat aprašyti ir kiti dangos parametrai – provėžos (provėžų gylis, prošvaisa, fiktyvus vandens gylis provėžose) ir kiti skersiniai dangos parametrai (Lietuvos automobilių kelių direkcija, 2018).

Valstybinės reikšmės kelių dangos būklės vertinimo tvarkos aprašas nustato valstybinės reikšmės automobilių kelių būklės vertinimo reikalavimus valstybinės reikšmės keliams su asfalto danga ir yra taikomas planuojant valstybinės reikšmės kelių remonto darbus. Tvarkos apraše pateikiamas kelio ruožo dangos būklės indekso DBI apskaičiavimo algoritmas. Šis aprašas parengtas atsižvelgiant į „COST Action 354. Performance Indicators for Road Pavements“ rekomendacijas, taikomas prie Lietuvoje taikomų standartų, sukaupimą kelio dangos būklės vertinimo patirtį (Lietuvos automobilių kelių direkcija, 2018).

Dangos būklės indeksas yra suminis rodiklis, kurio skaičiavimas susideda iš trijų dalių: atskirų dangos kokybinių rodiklių įvertinimo juos transponuojant į bedimensius dydžius – būklės indeksus (BI); šių rodiklių jungimo į kombinuotus būklės indeksus (KBI) ir kombinuotų būklės indeksų jungimas į globalų (suminį) dangos būklės indeksą (DBI). Atliekant kelių tinklo būklės vertinimą, analizuojamos pagrindinės kelio dangos būklės charakteristikos, kurių matavimai atlikti automatizuotai visame kelių tinkle eksperimentinio tyrimo metu. Šis metodas leidžia nustatyti viso kelių tinklo dangos būklės lygį, nustatyti atskirų kelio ruožų suirimo lygį ir ar nagrinėjamos atskiros kelio dangos charakteristikos atitinka joms keliamus kokybinius reikalavimus, palyginti atskirų kelio ruožų būklę viso tinklo mastu.

Skaičiuojant DBI vertinamos kelio dangos nelygumo, provėžų gylio, vidutinio profilio gylio, suminio plyšių kiekio ir suminio paviršiaus defektų kiekio charakteristikos perskaiciuotos į būklės indeksus. Šios charakteristikos įtraukiamos į kombinuotų būklės indeksų (komforto, saugumo ir struktūrinis) skaičiavimą priklausomai nuo jų savybių ir įtakos kiekvienam KBI. Kombinuotų kelio dangos būklės indeksų (komforto, saugumo ir struktūrinis) vertinimas svarbus analizuojant kokybinių dangos rodiklių įtaką eismo saugai, važiavimo kokybei ir stiprumo savybėms. Suminis kelio dangos būklės indeksas – pagrindinis kelio dangos būklės rodiklis, kuris įvertina tris kombinuotus būklės indeksus ir kurio vertė apibūdina kelio dangos būklę per penkiabalę sistemą: DBI = 0 reiškia labai gerą (naujai įrengtą) dangą, o DBI = 5 reiškia labai blogą dangos būklę. Visas perskaiciavimo algoritmas su transponavimo ir skaičiavimo formulėmis pateiktas valstybinės reikšmės kelių dangos būklės vertinimo tvarkos apraše (LAKD, 2018).

Paties DBI indekso skaičiavimo algoritmas sudarytas taip, kad būtų galima palyginti skirtingas pažaidas turinčius ruožus vieną su kitu. Skaičiuojant DBI visada vertinamas tas rodiklis, kuris turi didžiausią įvertį (1.1 formulė). Todėl nepriklausomai nuo to, kurios pažaidos kelio ruože vyrauja, didesnę (blogesnę) įvertinimą turintis būklės indeksas nulems DBI rezultatą. Toks skaičiavimo principas leidžia palyginti skirtingus rodiklius ir pažaidas, tačiau nulemia didesnę DBI įvertį ir viso tinklo vertinimą (LAKD, 2018).

$$DBI = \min \left[5; I_1 + \frac{p}{100} \cdot \left(\frac{I_2 + I_3}{2} \right) \right], \quad (1.1)$$

čia DBI – dangos būklės indeksas; p – poveikio faktorius (praktikoje naudojama 20 %), %; I_{1-3} – svoriniais koeficientais išreikšti būklės indeksai, kai $I_1 > I_2 > I_3$.

Detalesnis DBI skaičiavimo pavyzdys pateiktas šios disertacijos A priede. Toliau pateikiamas sutrumpintas skaičiavimo pavyzdys. Valstybinės reikšmės kelio ruožas, kuriame nustatyti vidutiniai kelio dangos būklės rodikliai: kelio dangos nelygumas (IRI) – 2,42 m/km; provėžų gylis (RUT) – 4,71 mm; vidutinis profilio gylis (MPD) – 1,15 mm; plyšių kiekis (TP_PL) – 2,92 %, paviršiaus defektai (TP_PD) – 26,14%. Visi šie rodikliai yra perskaičiuoti į būklės indeksus: kelio dangos nelygumo būklės indeksas BI_N – 1,81; provėžų būklės indeksas BI_P – 0,94; tekstūros būklės indeksas BI_T – 0; plyšių būklės indeksas BI_PL – 2,75 ir paviršiaus defektų būklės indeksas BI_Pd – 5 (bitumo išsiskyrimo nenustatyta). Šie atskiri būklės indeksai jungiami į kombinuotus būklės indeksus vadovaujantis Valstybinės reikšmės kelių dangos būklės vertinimo tvarkos aprašo VII skirsnyje pateiktais skaičiavimo žingsniais. 1.2 lentelėje pateikti tarpiniai rezultatai skaičiuojant kombinuotus būklės indeksus ir apskaičiuotų kombinuotų būklės indeksų skaičiavimo rezultatai.

1.2. lentelė. Kombinuotų būklės indeksų skaičiavimo tarpiniai rezultatai

Table 1.2. Intermediate results of the calculation of combined condition indices

Kombinuotas būklės indeksas	Būklės indeksai	Apskaičiuoti būklės indeksai	Normalizuoti svoriniai koeficientai	Apskaičiuotas kombinuotas būklės indeksas
Komforto KBI	Nelygumo BI	1,81	1	Komforto KBI – 3,19
	Provėžų BI	0,94	0,7	
	Paviršiaus defektų BI	5	0,6	
	Plyšių BI	2,75	0,5	
	Tekstūros BI	0	0,4	
Saugumo KBI	Provėžų BI	0,94	1	Saugumo KBI – 0,94
	Plyšių BI	2,75	0,667	
	Paviršiaus defektų (bitumo išsiskyrimo) BI	0	0,667	
Struktūrinis KBI	Plyšių BI	2,75	1	Struktūrinis KBI – 2,93
	Nelygumo BI	1,81	0,667	
	Provėžų BI	0,94	0,556	

Apskaičiavus kombinuotus būklės indeksus (KBI), gauti šie rezultatai: komforto būklės indeksas – 3,19, saugumo būklės indeksas – 0,94 ir struktūrinis būklės indeksas – 2,93. Vadovaujantis Valstybinės reikšmės kelių dangos būklės vertinimo tvarkos aprašo VIII skirsniu, apskaičiuojamas dangos būklės indeksas DBI. Pirmiausia kombinuoti būklės indeksai išreiškiami normalizuotais svoriniais koeficientais (1.3 lentelė), o tada apskaičiuojamas DBI pagal 1.1 formulę.

Svoriniais koeficientais išreikšti būklės indeksai sužymimi I_{1-3} pagal gautą rezultatą mažėjimo tvarka ir apskaičiuojamas DBI. Apskaičiuota DBI vertė – 2,66.

1.3. lentelė. Kombinuoti būklės indeksai ir jų normalizuoti svoriniai koeficientai

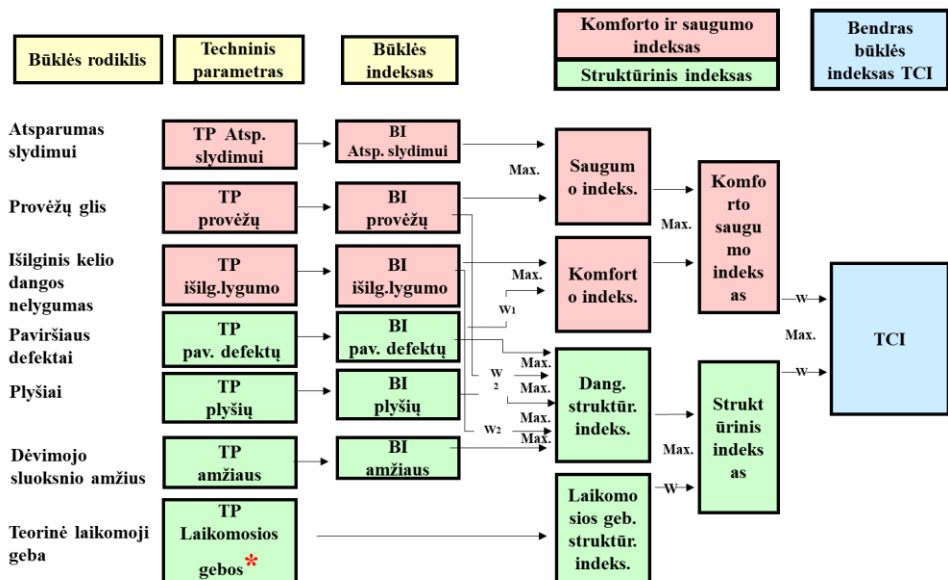
Table 1.3. Combined condition indices and their normalized weighting coefficients

Kombinuotas būklės indeksas	KBI	Normalizuoti svoriniai koeficientai	Svoriniais koeficientais išreikšti būklės indeksai	Žymėjimas
Komforto būklės indeksas KBI_Komf	3,19	0,7	2,233	I_2
Saugumo būklės indeksas KBI_Saug	0,94	1	0,94	I_3
Struktūrinis būklės indeksas KBI_Strukt	2,93	0,8	2,344	I_1

Lietuvoje taikomas DBI skaičiavimo algoritmas yra labai panašus į Austrijoje dangos būklei vertinti taikomą bendros būklės indekso (angl. *Total Condition Index*) skaičiavimo algoritmą. Bendros būklės indeksas skaičiuojamas panašiai kaip ir DBI – atskiri techniniai parametrai transponuojami į būklės indeksus, šie jungiami į kombinuotus būklės indeksus pagal atskirą sritį (saugumo ir komforto bei struktūrinį). Iš šių kombinuotų indeksų apskaičiuojamas bendras būklės indeksas (1.12 pav.).

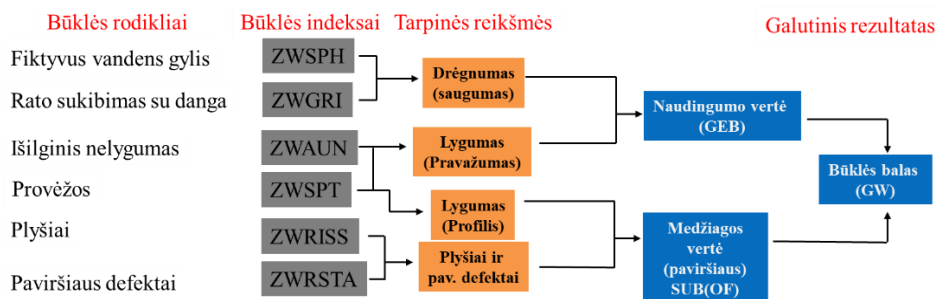
Kaip ir Lietuvoje, techniniai parametrai perskaičiuojami į kombinuotuosius indeksus: komforto, saugumo ir struktūrinis. Šie perskaičiuojami į bendrą būklės balą TCI. Austrijoje vertinami tie patys būklės rodikliai – išilginis kelio dangos nelygumas, provėžos, plyšiai ir paviršiaus defektai. Be šių rodiklių, vertinamas rato sukibimo su danga koeficientas, dėvimojo sluoksnio amžius ir vertinama teorinė laikomoji geba, kuri modeliuojama remiantis dangos naudojimo laikotarpiu ir dizaino funkcija (Litzka & Weninger-Vycudil, 2012).

Panašus asfalto dangų būklės vertinimo metodas taikomas ir Vokietijoje – šeši būklės rodikliai transponuojami į būklės indeksus, šie – į tarpinius ir galiausiai nustatomas bendras būklės balas (1.13 pav.).



1.12 pav. Austrijoje taikoma bendrojo būklės indekso skaičiavimo schema (Litzka & Weninger-Vycudil, 2012)

Fig. 1.12. The general condition index calculation scheme used in Austria (Litzka & Weninger-Vycudil, 2012)



1.13 pav. Vokietijoje taikomo būklės vertinimo skaičiavimo schema (Farwick zum Hagen & Lau, 2023)

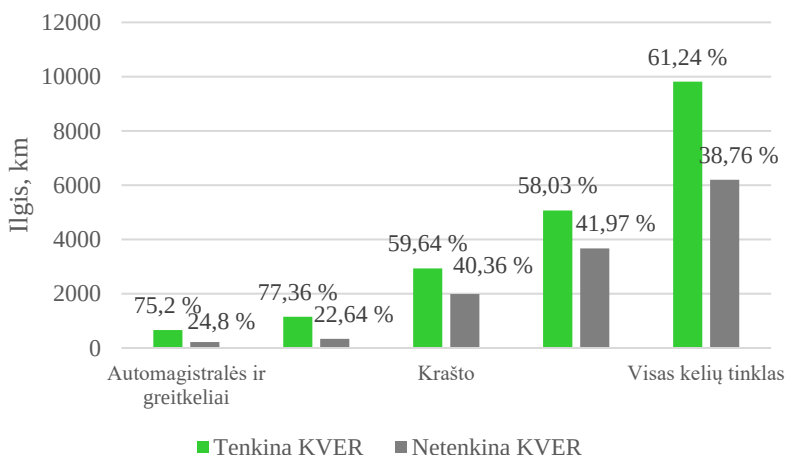
Fig. 1.13. General condition index calculation scheme used in Germany (Farwick zum Hagen & Lau, 2023)

Vokietijos sistema vertina šešis būklės rodiklius – išilginį nelygumą, provėžas, plyšius, paviršiaus defektus, rato sukibimo su danga ir fiktyvų vandens gylį. Šie rodikliai tarpiniame skaičiavimo etape agreguojami į keturias grupes: dangos

drėgnumo (saugumo), lygumo (pravažumo), lygumo (kelio profilio) bei pažaidų. Jos agreguojamos į du kombinuotus indeksus pagal savybes ir galiausiai apskaičiuojamas būklės indeksas (Farwick zum Hagen & Lau, 2023; Road & Transportation Research Association, 2018).

1.5.2. Lietuvos valstybinės reikšmės kelių tinklo būklės kitimas ir finansavimas

LAKD kiekvienais metais tiria kelių dangos būklę ir remdamasi šių tyrimų rezultatais priima sprendimus dėl investicijų prioritetų. Pagrindinis kriterijus, kuriuo vadovaujantis vertinama kelių dangų kokybė, yra dangos būklės indeksas (DBI). DBI nustatomas matuojant kelio dangos būklės rodiklius, naudojant patikimą sertifikuotą mobiliąją tyrimų įrangą. Vertinant kelių dangos būklę, tyrimų metu tikrinama, ar kelio DBI skiriasi nuo normatyvinės indekso reikšmės, atsižvelgiant į kelio kategoriją. Pagal kelių dangai keliamus reikalavimus (susisiekimo ministro įsakymu patvirtintas kelių valdymo efektyvumo rodiklis KVER) kelio ruožo būklė vertinama kaip bloga, jeigu ruožo DBI yra didesnis negu 2,8 – automagistralės ar greitkelio statusą turinčiame kelyje, didesnis negu 3,0 – magistraliniame kelyje, didesnis negu 3,5 – krašto kelyje ir didesnis negu 4,0 – rajoniniame kelyje. Blogos būklės keliuose greičiau vyksta degradacijos procesai, tokie keliai tampa nesaugūs ir reikalauja daug didesnių priežiūros išlaidų. Reikšminga kelių ruožų dalis dėl klimato kaitos veiksnių ir riboto finansavimo neatitinka KVER reikalavimų.



1.14 pav. Valstybinės reikšmės kelių pasiskirstymas procentais pagal KVER reikalavimus, %

Fig. 1.14. National roads percentage distribution according to KVER (road management efficiency indicator) requirements, %

2022 m. nustatyta (1.14 pav.), kad KVER reikalavimus atitiko 75,20 % automagistralių ir greitkelių, 77,36 % kitų magistralinių kelių, 59,64 % krašto kelių ir 58,03 % rajoninės reikšmės kelių ruožų. KVER reikalavimų neatitiko 24,80 % automagistralių ir greitkelių, 22,64 % kitų magistralinių kelių, 40,36 % krašto kelių ir 41,97 % rajoninės reikšmės kelių ruožų. Vertinant visą kelių su asfalto danga tinklą nustatyta, kad 61,24 % kelių ruožų atitinka keliamus KVER reikalavimus ir 38,76 % neatitinka.

Vertinant būklės kitimą nuo 2019 metų (1.4 lentelė), KVER keliamų reikalavimų neatitinkančių magistralinių kelių tinkle daugėja, rajoninių kelių tinkle, atvirkščiai, mažėja. Krašto kelių tinkle antraisiais stebėjimų metais būklė blogėjo, kitais – gerėjo. Iki 2022 m. vertinant KVER rodiklį, nebuvo išskiriami automagistralių ir greitkelių duomenys, todėl lentelėje jie nėra lyginami su ankstesniais metais.

1.4. lentelė. Kelių valdymo efektyvumo rodiklio (KVER) kitimas 2020–2022 m.

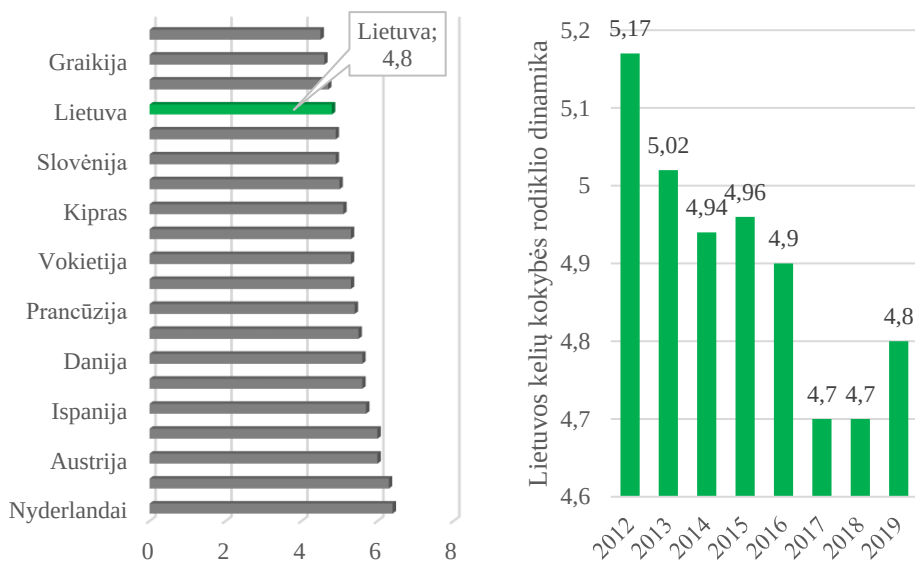
Table 1.4. Variation of road management efficiency indicator from 2020 to 2022

	2020 m. atitinkan- čių KVER	2021 m. atitinkan- čių KVER	2022 m. atitinkan- čių KVER	2020 m. neatitin- kančių KVER	2021 m. neatitin- kančių KVER	2022 m. neatitin- kančių KVER
Automagistralės ir greitkeliai	–	–	75,20	–	–	24,80
Magistraliniai	84,45	79,8	77,36	15,55	20,2	22,25
Krašto	60,31	56,24	59,64	39,69	43,76	40,36
Rajoniniai	56,61	57,23	58,03	43,39	42,77	41,97
Visas kelių tinklas	61,95	60,28	61,24	38,05	39,72	38,76

Pasaulio ekonomikos forumas (angl. *World Economic Forum*, WEF) sudaro pasaulio šalių kelių vertinimo būklės reitingą pagal kelių kokybės rodiklį, kuris yra kelių kokybės konkrečioje šalyje įvertinimas, pagrįstas WEF vadovų nuomonės tyrimo duomenimis. Tai ilgalaikė ir plati apklausa, kurioje atsižvelgiama į daugiau nei 14 tūkst. verslo lyderių nuomonę 144 šalyse. Kelių kokybės rodiklio balas pagrįstas tik vienu apklausos klausimu – respondentų prašoma atsakyti į klausimą, kokia jūsų šalyje kelių transporto infrastruktūros kokybė (išvystymas ir būklė), įvertinant pagal skalę nuo 1 (nepakankamai išvystytas) iki 7 (platus ir efektyvus pagal tarptautinius standartus).

Remiantis internete skelbiamais 2019 m. vertinimo rezultatais, Lietuva užėmė 38 vietą iš 141 vertinamos valstybės pasauliniame¹ reitinge ir 17 vietą Europos² reitinge. Lietuvos kelių būklės rodiklio kitimas šiame tyrime pavaizduotas 1.15 pav. dešinėje dalyje.

LAKD duomenimis, 2023 m. valstybinės reikšmės kelių tinklo vertė yra apie 2,894 mlrd. Eur, iš kurių 0,457 mlrd. Eur įvertinti tiltai (šaltinis: LAKD Finansų valdymo ir apskaitos informacinė sistema). Šiam turtui prižiūrėti skiriamas finansavimas, kurio naudojimo tvarką ir šaltinius reglamentuoja Kelių priežiūros ir plėtros programos (toliau – KPPP) finansavimo įstatymas.



1.15 pav. Pasaulio ekonomikos forumo skaičiuojamas kelių kokybės rodiklis: kairėje – Europos valstybių pirmosios 20 šalių; dešinėje – Lietuvos balo kitimas 2012–2019 m. (https://www.theglobaleconomy.com/rankings/roads_quality)

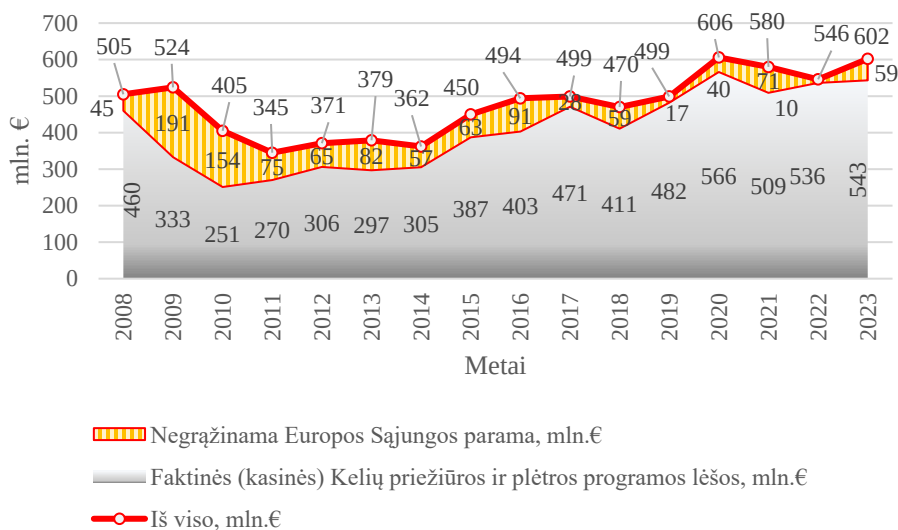
Fig. 1.15. Road quality indicator calculated by the World Economic Forum: on the left – the first 20 European countries; on the right – the change in Lithuania's score from 2012 to 2019 (https://www.theglobaleconomy.com/rankings/roads_quality)

Šiuo įstatymu siekiama sukaupti ir naudoti lėšas automobilių kelių tinklui plėsti, modernizuoti ir funkcionavimui užtikrinti. KPPP finansuojama iš 7 šaltinių,

¹ https://www.theglobaleconomy.com/rankings/roads_quality/

² https://www.theglobaleconomy.com/rankings/roads_quality/Europe/

kurių pagrindiniai yra šie (Lietuvos Respublikos Seimas, 2023): valstybės biudžeto lėšos; transporto priemonių savininkų mokestis; mokestis už važiavimą automobilių keliais ir naudojimąsi jų infrastruktūra užsienio šalyse įregistruotomis transporto priemonėmis; mokestis už važiavimą keliais transporto priemonėmis (jų junginiais), kurių matmenys su kroviniu ar be jo viršija leidžiamuosius arba kai viršijama leidžiamoji ašies apkrova ar transporto priemonės (jų junginio) leidžiamoji bendroji masė; mokestis už leidimą atlikti įvairius darbus bet kurioje kelių komplekso dalyje ir kiti šaltiniai.



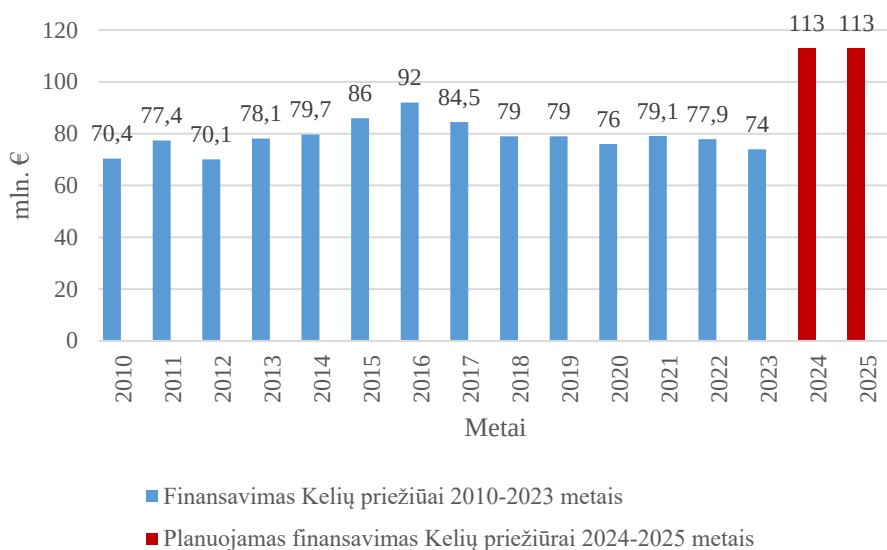
1.16 pav. Kelių priežiūros ir plėtros programos ir ES kelių lėšų finansavimo dinamika, mln. Eur

Fig. 1.16. Dynamics of financing of the road maintenance and development program and EU road funds, mln. Eur

2023 m. KPPP lėšos valstybinės reikšmės keliams sudarė 543 mln. Eur. Papildomai 59 mln. Eur sudarė negražinama Europos Sąjungos parama (1.16 pav.). Dar papildomai į kelių sektorių buvo skirta 148 mln. Eur kariniam mobilumui skirtų lėšų, kurios visą LAKD biudžetą 2023 m. padidino iki 750 mln. Eur.

Kelių priežiūros ir plėtros programos finansavimo lėšų naudojimo 2023–2025 m. sąmatoje (Lietuvos Respublikos Vyriausybė, 2023) nurodytos išlaidos valstybinės reikšmės kelių tinklui plėsti ir užtikrinti, kad šis tinklas veiktų. 2023 metams buvo numatyta skirti 263 mln. Eur, įskaitant visus strateginius projektus. Dar 74 mln. Eur skiriama VĮ Kelių priežiūrai kelių tinklui prižiūrėti.

Išanalizavus Lietuvos Respublikos Seimo tinklalapyje pateiktas 2010–2023 metų kelių priežiūros ir plėtros programos finansavimo lėšų naudojimo sąmatas, sudaryta apibendrinta diagrama, kurioje išskirtos nuolatinei kelių priežiūrai skiriamos lėšos (1.17 pav.). Papildomai kelių tinklui prižiūrėti iš KPPP finansavimo skiriama dalis lėšų VI „Kelių priežiūra“, kuri už šias lėšas turi vykdyti nuolatinės priežiūros darbus valstybinės reikšmės keliuose. Nuo 2010 iki 2023 metų vidutiniškai skiriama 78,8 mln. Eur, o nuo 2024 m. skiriama 113 mln. Eur/metus (Lietuvos Respublikos Vyriausybė, 2023).



1.17 pav. Nuolatinei priežiūrai skiriamas finansavimas, mln. Eur

Fig. 1.17. Funding is allocated for road maintenance, mln. Eur

Kelių transporto infrastruktūra dėl ribotų finansavimo galimybių yra nepakankamai sutvarkyta ir išvystyta – 38,76 % (6197,618 km) valstybinės reikšmės kelių būklė neatitinka Susisiekimo ministerijos nustatyto kelių valdymo efektyvumo rodiklio keliamų reikalavimų (KVER), yra prasta ir toliau blogėja. Ilgiau išlaikius reikalavimų neatitinkančius kelius neremontuotus, pažaidos kelio dangoje didės, gilės ir investicijų poreikis dangos atnaujinimui gerokai didės.

LAKD skaičiavimais, kad iki 2035 m. neliktų magistralinių ir krašto kelių, neatitinkančių DBI keliamų KVER reikalavimų, o rajoninių kelių, neatitinkančių KVER keliamų reikalavimų, DBI dalis sumažėtų iki 15 proc., per ateinančius 12 metų kiekvienais metais kelio dangų remontui reikėtų skirti apie 300 mln. Eur.

1.5.3. Lietuvoje taikoma remontų parinkimo technologija valstybinės reikšmės keliuose

LAKD taikoma tvarka, kai valstybinės reikšmės keliai su asfalto danga tvarkomi vadovaujantis prioritetinėmis eilėmis, išskyrus strateginius ir bendradarbiavimo projektus.

Kelio remonto darbai gali būti dvejopi – siekiant suremontuoti kelio atkarpą atliekant paprastojo remonto darbus, kapitalinį remontą, rekonstrukciją arba atliekant prevencinės priežiūros darbus. Prevencinės priežiūros darbų tikslas – taikant prevencinės priežiūros priemones, kurioms naudojamos paprasčiausios ir greičiausiai įgyvendinamos remonto technologijos (pvz., paviršiaus apdaras), sušvelninti ar pristabdyti esamos asfalto dangos konstrukcijos degradaciją ir pratęsti kelio naudojimo laikotarpį (dangoje esantys plyšiai sukelia kitų pažeidimų vystymąsi – duobių atsiradimą, kelio dangos nelygumo didėjimą ir vėžių formavimąsi). Kapitalinis remontas daromas siekiant visiškai atstatyti ar sustiprinti kelio konstrukcinius elementus ir vykdyti darbus prieš tai parengus techninį darbo projektą. Kelio paprastasis remontas apima kelio dėvimojo sluoksnio keitimą, regeneravimą ar naujo plonasluoksnio dėvimojo sluoksnio įrengimą.

LAKD kiekvienais metais gegužės mėnesį sudaro ir viešai skelbia šešių prioritetinių kelių ruožų sąrašus (automagistralės ir greitkeliai; krašto keliai; krašto kelių, kurie neatitinka kelio kategorijos (kelio dangos plotis ≤ 5 m); krašto keliai, kuriuose neužtikrinamas leidžiamasis važiavimo greičio režimas (išilginis kelio dangos nelygumas ≥ 5 m/km) ir rajoninių kelių ruožai) savo interneto svetainėje. Sąrašai rengiami vadovaujantis Rekonstruotinių ir remontuotinių valstybinės reikšmės kelių ruožų vertinimo ir prioritetinės eilės sudarymo metodika. Prioritetinė eilė sudaryta įvertinus metodikoje nurodytus kriterijus, už kuriuos skiriami balai: dangos būklė, bendras ir atskirai krovininis eismo intensyvumas, tiltų, patenkančių į kelio ruožą, remonto poreikis, sankryžos pertvarkymo poreikis, požymis ar kelias kerta gyvenvietę ar ne. Ruožus remontuoti pradedama nuo tų, kurie surinko daugiausia balų (nuo sąrašo viršaus). Remonto tipui nustatyti LAKD atlieka priešprojektinius tyrinėjimus su krintančio svorio deflektometru, siekdama įvertinti dangos konstrukcijos ir kelio konstrukcijos stiprumo savybes, georadaru ir gręžtiniais kernais nustato asfalto dangos ir pagrindo sluoksnių storius ir organoleptiniu būdu nustato naudotas medžiagas pagrindo sluoksniams įrengti. Susisteminus ir išanalizavus tyrimų rezultatus, priimamas sprendimas taikyti kapitalinio ar paprastojo remonto technologijas kelio ruožui remontuoti.

Sudaromi keturi prevencinės priežiūros prioritetiniai sąrašai: automagistralių ir greitkelių; magistralinių; krašto ir rajoninės reikšmės kelių. Parenkami kelių ruožai, kurių paskutinė remonto rūšis buvo naujo kelio tiesimas, rekonstravimas, kapitalinis remontas, dangos stiprinimas ir žvyrkelio asfaltavimas prieš 10–25 metus. Rengiant prevencinės priežiūros prioritetines eiles vadovaujama valstybinės

reikšmės kelių ruožų su asfalto danga atrankos ir prevencinės priežiūros prioritetinės eilės sudarymo metodika.

Prevencinės priežiūros prioritetinė eilė sudaroma įvertinus metodikoje nurodytus kriterijus: statybos rūšis, kelio naudojimo laikotarpis, kelio dangos nelygumas IRI; vidutinis provėžų gylis; plyšiai, lopai, dangos būklės indeksas. Prevencinei priežiūrai atlikti atrinkami valstybinės reikšmės kelių ruožai, kuriems paskutinio remonto metu buvo taikoma viena iš šių statybos rūšių: naujo kelio tiesimas, rekonstravimas, kapitalinis remontas, dangos stiprinimas, žvyrkelio asfaltavimas. Ruožo naudojimo laikotarpis turi būti ne mažesnis kaip 10 metų ir ne senesnis kaip 25 metai. Prevencinei priežiūrai parenkami ruožai turi būti su palyginti nedideliu kelio dangos nelygumu – magistraliniuose keliuose (įskaitant automagistralių ir greitkelių ruožus) kelio dangos nelygumas IRI turi neviršyti 2,0 m/km, krašto keliuose – 3,0 m/km, rajoniniams keliams IRI kriterijus netaikomas. Vidutinis provėžų gylis magistraliniuose (įskaitant automagistralių ir greitkelių ruožus) ir krašto keliuose turi būti ne didesnis kaip 10 mm, o rajoniniuose keliuose provėžų kriterijus nėra taikomas. Plyšių plotas turi būti ne didesnis kaip 5,0 % magistraliniuose (įskaitant automagistralių ir greitkelių ruožus) ir krašto keliuose, o rajoniniuose keliuose šis kriterijus netaikomas. Paviršiaus defektų plotas turi būti ne didesnis kaip 5,0 % magistraliniuose (įskaitant automagistralių ir greitkelių ruožus) ir krašto keliuose, o rajoniniuose keliuose šis kriterijus nėra taikomas. DBI vertė magistraliniuose (įskaitant automagistralių ir greitkelių ruožus) keliuose turi būti ne mažesnė kaip 2,5, krašto keliuose – ne mažiau kaip 3,0, o rajoniniuose keliuose – 4,0.

1.5.4. Asfalto dangos pablogėjimo proceso modeliavimas

Dangų būklės prognozavimo modeliams taikyti reikia didelių pastangų ir didelio kiekio įvesties duomenų. Reikalingų duomenų kiekis priklauso nuo taikomų modelių tipo. Paprastus empirinius modelius galima sudaryti ir taikyti naudojant duomenis, kurie buvo surinkti ir yra saugomi dangų valdymo sistemose, o mechanistiniams-empiriniams modeliams sudaryti reikalingi išsamesni kelio dangos konstrukcijas sudarančių medžiagų duomenys, kurių dažniausiai dangų valdymo sistemų duomenų bazėse nėra (Huvstig et al., 2008).

Dangos būklės rodiklių kitimas dažniausiai susijęs su kitais būklės rodikliais ir jų būklės kitimu. Iliustracijai galima panagrinėti HDM-III kelio dangos nelygumo modelį. Kelio dangos nelygumas ir jo pokytis kiekvienais metais prognozuojami tokia seka (Paterson, 1990):

- Dangos paviršiaus naudojimo trukmė ir plyšių inicijavimo modeliavimas (1 mm pločio ir platesniems) ir visų plyšių ploto prieaugis. Platesnių nei 3 mm pločio plyšių atsiradimas arba jau esamo ploto padidėjimas. Šie

plyšių modeliai yra dangos tipo, metinių ekvivalentinių ašių ir dangos stiprumo funkcija.

- Iškorėjimo (skaldos praradimas dangos paviršiuje) modeliavimas, kuris yra dangos naudojimo laikotarpio ir krovinio transporto VMPEI funkcija.
- Duobių atsiradimo ir padidėjimo modeliavimas, kuris yra jau esamų defektų ir VMPEI funkcija.
- Vėžių padidėjimo modeliavimas, kuris yra dangos stiprumo savybių, ESA, amžiaus, plyšių, kritulių, remonto statusų, asfalto sluoksnio sutankinimo funkcija.
- Kelio dangos nelygumo padidėjimo modeliavimas, kuris yra dangos stiprumo savybių, ESA, amžiaus, aplinkos veiksnių, plyšių, kelio dangos nelygumo ir vėžių pokyčio standartinio nuokrypio, duobių ir lopų funkcija.

HDM-III kelio dangos nelygumo IRI metinis prieaugis (padidėjimas) susideda iš penkių komponentų (Braga, 2005; Morosiuk & Riley, 2004):

$$\Delta IRI = k_0 \cdot (\Delta RI_s + \Delta RI_c + \Delta IRI_r + \Delta RI_t) + \Delta RI_e, \quad (1.2)$$

čia ΔIRI – bendras asfalto dangos nelygumo padidėjimas (pokytis) per nagrinėjamą laikotarpį (1 metus), m/km; k_0 – bendras modelio kalibravimo koeficientas.

ΔRI_s – dangos nelygumo padidėjimo struktūrinis komponentas – dangos nelygumo padidėjimas dėl eismo apkrovų sukkelto konstrukcijos susilpnėjimo, m/km:

$$\Delta RI_s = 134 \cdot e^{m \cdot AGE} \cdot (1 + SNPK)^{-5} \cdot YE4, \quad (1.3)$$

čia m – aplinkos poveikio faktorius; AGE – viršutinio dangos sluoksnio naudojimo trukmė nagrinėjamo periodo pabaigoje, metai; $YE4$ – vidutinės metinės automobilių eismo apkrovos, mln. ESA/metus; $SNPK$ – dangos stiprumo rodiklis – modifikuotas struktūrinis skaičius, įvertinus jo sumažėjimą dėl plyšių įtakos.

ΔRI_c – dangos nelygumo padidėjimo struktūrinis komponentas – dangos nelygumo padidėjimas dėl eismo apkrovų sukkelto konstrukcijos susilpnėjimo, m/km:

$$\Delta RI_c = 0,0066 \cdot \Delta ACA, \quad (1.4)$$

čia ΔACA – bendro plyšių ploto metinis padidėjimas, %.

ΔRI_r – dangos nelygumo padidėjimo provėžų komponentas, m/km:

$$\Delta RI_r = 0,088 \cdot \Delta RDS, \quad (1.5)$$

čia ΔRDS – provėžų gylis standartinio nuokrypio pokytis per metus, mm.

ΔRI_t – dangos nelygumo padidėjimo duobių komponentas, m/km:

$$\Delta RI_t = 6,0 \cdot V_{pot}, \quad (1.6)$$

V_{pot} – duobių tūris, m³/km.

ΔRI_e – aplinkos poveikio lygumo pablogėjimui komponentas, m/km:

$$\Delta RI_e = Kgm \cdot m \cdot RIa, \quad (1.7)$$

Kgm – aplinkos poveikio komponento kalibravimo koeficientas; RIa – dangos nelygumas analizuojamų metų pradžioje, m/km; m – HDM metodikos nustatytas aplinkos poveikio faktorius, priklausantis nuo geografinės padėties.

Pateiktas vieno kelio dangos būklės rodiklio sudėtingas sudėtinis degradacijos modelis iliustruoja degradacijos modeliavimo proceso sudėtingumą ir problemškumą, kai reikia daugybės rodiklių ir koeficientų vieno rodiklio degradacijai sumodeliuoti.

Taikomos ir kitos šio modelio versijos, kai jis papildomas kitais irties komponentais – lukštenimosi, sluoksnių lupimosi ir lopų būklės komponentais (Braga, 2005; Braga & Čygas, 2002).

Mechanistinis empirinis dangų konstrukcijų projektavimo gidas (angl. *Mechanistic Empirical Pavement Design Guide*, MEPDG) pateikia metodus inžinieriams, padedančius priimti naujos dangos ar remonto projektavimo sprendimus. Šis gidas pateikia kelio dangos nelygumo būklės kitimo modelius. Kelio dangos nelygumas prognozuojamas kaip pradinio dangos nelygumo, plyšių vystymosi, objekto vietos (gruntų susitraukimas ar brinkimas), aplinkos veiksnių (užšalimo ciklų skaičius) ir provėžų gylio funkcija. Toliau pateikiamas modelis (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008):

$$IRI = IRI_0 + 0,0150 \cdot SF + 0,400 \cdot FC_{Total} + 0,0080 \cdot TC + 40,0 \cdot RD, \quad (1.8)$$

čia IRI – prognozuojamas IRI, in/mi; IRI_0 – pradinis IRI, in/mi; SF – vietovės faktorius:

$$SF = AGE[0,02003 \cdot (PI + 1) + 0,007947 \cdot (PRECIP + 1) + 0,000636 \cdot (FI + 1)], \quad (1.9)$$

čia AGE – dangos naudojimo trukmė, metai; PI – dirvožemio plastiškumo procentas; $PRECIP$ – vidutinis metinis kritulių kiekis, in.; FI – vidutinis metinis užšalimo indeksas, °F dienos; FC_{Total} – nuovargio plyšiai (kombinuoti tinkliniai plyšiai, išilginiai ir atspindžio plyšiai ratų trajektorijoje), %; TC – skersinių plyšių ilgis (įskaitant ir atspindžio plyšius), ft/mi; RD – vidutinis provėžų gylis.

Informacija apie kelio parametrus, eismo intensyvumą, būklės rodiklius, remontų istoriją kaupiama kelių turto valdymo informacinėje sistemoje KTVIS. Informacija apie projektinę dangos konstrukcijos klasę, geologiją ir gruntus, dangos konstrukciją sudarančius dangos ir pagrindo sluoksnius, jiems įrengti taikytas medžiagas nėra kaupiama informacinėse sistemose. Informacija pateikiama ne apie

visų kelio ruožų paskutinį remontą. 1.5 lentelėje pateikti susisteminti KTVIS duomenys. Matyti, kad 16,2 % (2701,345 km) kelių su asfalto danga neturi informacijos apie paskutinį kartą atliktą kelio remontą ir jo rūšį (tikrinta 2023-10-31).

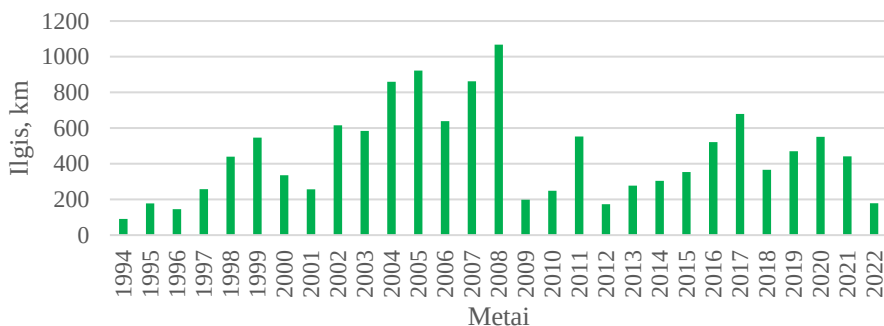
1.5. lentelė. Informacija apie paskutinį taikytą kelio remontą (KTVIS, tikrinta: 2023-10-31)

Table 1.5. Information about the last applied road repair (KTVIS, checked: 31-10-2023)

Kelio tipas	Kelių ilgis su asfalto danga, turintis žinomą remonto datą, įvertinus dvi važiuojamąsias dalis, km (L_1)	Kelių ilgis su asfalto danga, įvertinus dvi važiuojamąsias dalis (visas kelių ilgis), km (L_2)	Kelių su asfalto danga, turinčių žinomą remonto datą, procentinė dalis, % ($\frac{L_1}{L_2} \cdot 100$)
Magistraliniai keliai	1856,997	2375,714	78,17
Krašto keliai	4184,756	4954,802	84,46
Rajoniniai keliai	7338,153	8750,735	83,86
Iš viso, km	13 379,906	16 081,251	83,2

1.18 pav. stulpelinėje diagramoje pateikta informacija rodo, koks valstybinės reikšmės kelių ilgis buvo tvarkomas kiekvienais metais iki 2022 m.

Nauja LAKD remonto duomenų teikimo forma reglamentuos informacijos teikimą į KTVIS sistemą po atliktų remonto darbų (prievolė rangovui), kuri reikalaus dangos konstrukcijos sluoksnių storį ir pločių, sluoksnio rūšies, projekcinės apkrovos, dangos konstrukcijos klasės teikimą.



1.18 pav. Remontuotų valstybinės reikšmės kelių, turinčių nurodytą paskutinio remonto datą ir tipą, ilgis (KTVIS, tikrinta 2023-10-31)

Fig. 1.18. Length of repaired state roads with the date and type of the last repair (KTVIS, checked: 31-10-2023)

Taikyti sudėtingų degradacijos modelių neįmanoma neturint svarbių duomenų ne tik apie dangos naudojimo amžių ir konstrukcijos storį, dangos stiprumo ir konstrukcijos savybes, naudotas medžiagas.

Rengiant disertaciją atliktu eksperimentiniu tyrimu siekiama nustatyti kelio dangos degradacijos priklausomybę nuo įvairių rodiklių ir parametrų, kurie yra matuojami arba nustatyti Lietuvos automobilių kelių tinkle, ir turi įtakos dangos degradacijos procesams, sudaryti DBI degradacijos modelį. Tyrimo metu nagrinėjami šie rodikliai ir parametrai:

- eismo apkrovos;
- įšalo gylis;
- šalčio poveikio zonos;
- taikyto remonto būdas;
- kelio ruožo dangos konstrukcijos klasės;
- kelio dangos nelygumas IRI.

Analizės metu bus patikrinti visų šių rodiklių ir parametrų reikšmingumai DBI rodikliui ir sudaryti regresiniai dangos būklės indekso degradacijos modeliai.

1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Kelių infrastruktūros valdymas – vienas svarbiausių turto savininko uždavinių, kurio tinkami sprendimai padeda laiku atnaujinti kelius. Pasitelkiant racionalaus planavimo priemones planavimas padeda racionaliai paskirstyti lėšas administravimui, priežiūrai ir plėtrai. Išsivysčiusios šalys kelių transporto infrastruktūrai valdyti taiko modernius sprendimus – turto valdymo sistemas su integruotomis atskirais statinių grupių valdymo posistemiais. TVS leidžia įvertinti viso kelių tinklo paslaugos lygį (angl. *level of service*) ir prognozuoti šio lygio pokytį, priklausomai nuo pasirinktų finansavimo scenarijų. Trijų lygių valdymo sistemos (strateginis, taktinis ir veikimo) taikymas padeda užtikrinti reikiamą kelių kokybės lygį už kelio naudotojams mažiausią statinio gyvavimo ciklo kainą.
2. Uždarojo tipo DVS susiduria su analizės tikslumo iššūkiais atliekant tinklo lygio analizę, kai tose sistemose esantiems įdiegtiems sudėtingiems pablogėjimo modeliams trūksta įvesties duomenų apie sluoksnių storius, naudotas medžiagas, istorinius remonto duomenis ir kt. Šią problemą sprendžia atvirojo tipo DVS, kurių pranašumas – galimybė įdiegti ne tokius sudėtingus pablogėjimo modelius, pritaikytus pagal technines naudotojo galimybes turėti ir kaupti reikiamus duomenis.

3. Kelio dangos būklės kitimo prognozavimą galima suskirstyti į tris lygmenis: strateginį, tinklo ir objekto. Jo tikslumas nulemia visos kelių turto valdymo sistemos efektyvumą. Prognozuoti taikomi empiriniai, mechanistiniai, mechanistiniai-empiriniai ir subjektyvūs matematiniai dangų būklės kitimo prognozavimo modeliai. Tinklo ir objekto lygmenys išskirtini pagrindiniais. Tinklo lygmeniu nustatomas ir numatomas bendras kelių tinklo asfalto dangos būklės lygis ir jo kitimas, o objekto lygmeniu, naudojant detalesnius tyrimus ir sudėtingesnius modelius, pasiekiamas didesnis modeliavimo rezultatų tikslumas.
4. Dangų būklės rodiklių stebėsena gali būti vykdoma objekto arba kelių tinklo lygmeniu. Objekto lygmeniu vykdomi tyrimai yra detalūs ir tikslūs (pvz., krintančio svorio deflektometro, rato sukibimo su danga, medžiagų savybių tyrimai ir pan.). Tačiau jie yra brangūs ir per lėti taikyti tinklo mastu. Todėl kelių tinklo dangų valdymo procesams atlikti taikomi automatizuoti dangų būklės tyrimai, plačiai paplitę visame pasaulyje (pvz., transporto srauto greičio deflektometrai, automatizuotos pažaidų nustatymo sistemos). Kokius rodiklius stebėti, priklauso nuo dangų valdymo sistemoje įdiegtų degradacijos modelių, dangos vertinimo metodo ir analizės lygio. Dangų būklės rodiklių tyrimai skirstomi į pažaidų, laikomosios gebos, važiavimo kokybės ir rato sukibimo su danga. Šių keturių dangos būklės rodiklių grupių pakanka norint išsamiai įvertinti kelio dangos būklės lygį. Kasmė atliekami dangų būklės rodiklių matavimai leidžia stebėti ir įvertinti ne tik dangos būklę matavimo metu, bet ir patį dangos būklės kitimo (pablogėjimo) procesą.
5. Lauko matavimų duomenys apie dangų būklę, gauti iš eksploatuojamų kelių ruožų (arba specialiai įrengtų dangų bandymo poligonų su realiomis eksploatacinėmis sąlygomis) kartu su eismo apkrovų ir aplinkos sąlygų veiksniais, labiausiai atspindi tikrąjį pablogėjimo procesą. Empirinius modelius galima sudaryti ir taikyti naudojant duomenis, surinktus ir saugomus dangų valdymo sistemose, o mechanistiniams-empiriniams modeliams sudaryti reikalingi išsamesni kelio dangos konstrukcijas sudarančių medžiagų duomenys, kurių dažniausiai dangų valdymo sistemų duomenų bazėse nėra.
6. Egzistuojantys ir visuotinai pripažinti dangų degradacijos modeliai yra sudėtingi ir reikalaujantys didelės imties duomenų bei informacijos, kurios, taikant modelius tinklo lygmeniu, dažnai neįmanoma turėti. Tačiau analizuojant objekto lygmeniu, šiuos duomenis įmanoma surinkti atliekant papildomą objektų analizę ar atliekant trūkstantis tyrimus.

7. Lietuvoje dangų būklei vertinti matuojamos tokios pačios charakteristikos kaip ir kitose šalyse. Tačiau kitose šalyse, kuriose naudojami panašūs dangų būklės vertinimo modeliai, dangų būklei vertinti taikoma daugiau dangos charakteristikų, pavyzdžiui, atsparumas slydimui ar laikomoji geba. Lietuvoje šios charakteristikos matuojamos objekto lygmeniu, todėl į dangų būklės indeksą nėra įtraukiamos.
8. Nors dabartinė taikoma praktika atrenkant remontuojamus ruožus vertina ne tik kelio dangos būklę, bet ir kitus elementus, tačiau laikytina reaktyvia, nes remontuojami ruožai jau pasiekė kritinį lygį. Siekiant pakeisti remontuojamų ruožų praktiką iš reaktyvios į proaktyvią, būtina prognozuoti dangų būklę ir siekti remontuoti objektus ankstyvoje degradacijos stadijoje, o ne degradacijai pasiekus savo piką.
9. Yra įvairių degradacijos modelių, kuriems reikia daug įvesties duomenų – įvairių dangos parametrų (stiprumo, būklės ir pan.), medžiagų savybių, klimato sąlygų. Tokių modelių taikymas neįmanomas neturint šios informacijos.

Atsižvelgiant į mokslinės literatūros analizės išvadas, siekiant sukurti valstybinės reikšmės kelių asfalto dangos blogėjimo spartos įvertinimo modelį, būtina išspręsti šiuos uždavinius:

1. Išanalizuoti ir įvertinti valstybinės reikšmės kelių tinklo suskirstymą, būklę ir jos pokyčio vertinimo principus bei skiriamą finansavimą kelių priežiūrai ir plėtrai.
2. Išanalizuoti kelio dangos būklės degradacijos modelius ir įvertinti jų tinkamumą Lietuvos sąlygoms.
3. Sukurti teorinį modelį valstybinės reikšmės kelių degradacijos spartai įvertinti.
4. Atlikti eksperimentinį tyrimą Lietuvos valstybinės reikšmės kelių būklei įvertinti ir degradacijos kitimui nustatyti naudojant 3D dangos skenerį.
5. Išanalizuoti ir įvertinti ryšius tarp kelio dangos degradacijos ir kelio dangos konstrukcijos dangų degradacijos modeliuose, remiantis eksperimentinio tyrimo metu surinktais duomenimis.
6. Sudaryti asfalto dangos būklės indekso DBI degradacijos modelį remiantis eksperimentinio tyrimo duomenimis.
7. Įvertinti sudarytą regresinį asfalto dangos degradacijos modelį.

Asfalto dangos eksperimentiniai tyrimai

Šiame skyriuje analizuojami dangos būklę apibūdinantys ir ją veikiantys rodikliai. Siekiant nustatyti tiriamų kelių ruožų būklės lygį ir vėliau nustatyti degradacijos modelius, atliktas eksperimentinis tyrimas, kurio metu atlikti matavimai Lietuvos kelių tinkle naudojant mobiliąją kelių tyrimų įrangą RST63. Analizuoti ir istoriniai kelio dangos nelygumo matavimo rezultatai (duomenys), kurių matavimai buvo atlikti iškart po remonto darbų. Pateiktas eksperimentinio tyrimo planas ir metodika bei tyrimo metu gauti rezultatai.

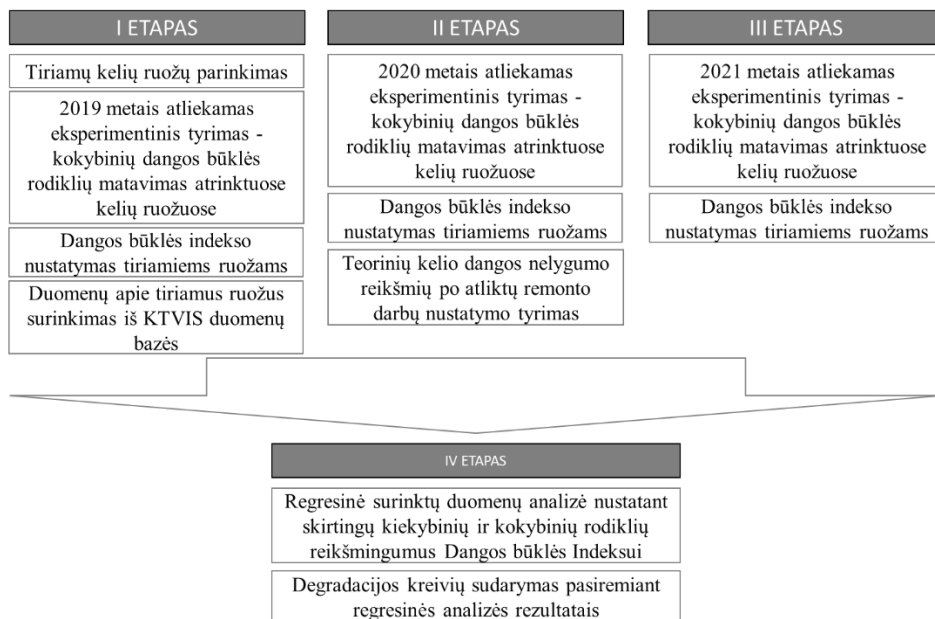
Skyriaus tematika paskelbti trys autoriaus straipsniai (Paplauskas et al., 2019; Paplauskas et al., 2023; Paplauskas & Vaitkus, 2022).

2.1. Eksperimentinio tyrimo planas ir vietos parinkimas

Šiame skirsnyje aprašoma tyrimo metodika, daugiausia dėmesio skiriant vietos parinkimui ir tyrimo planui. Skirsniuose paaiškinami tyrimo plano, duomenų rinkimo ir analizės žingsniai. Taip pat pristatoma, kaip buvo pasirinktos konkrečios tyrimų vietos.

2.1.1. Tyrimo planas

Šiame darbe analizuojami su kelių dangų būklės valdymu susiję elementai – teorinių kelio dangos rodiklių reikšmių nustatymas po simuliuojamo dangos remonto dangų valdymo sistemoje, kelio dangos būklės degradacijos prognozavimas. Tyrimo tikslui pasiekti buvo atliekamas eksperimentinis tyrimas iš anksto pasirinktose valstybinės reikšmės kelių ruožuose su mobiliąja kelių tyrimų įranga RST 63. Taip pat surinkta papildoma informacija apie tiriamų kelių ruožų dangos nelygumą po statybos darbų, eismo apkrovų duomenys.



2.1 pav. Tyrimo planas

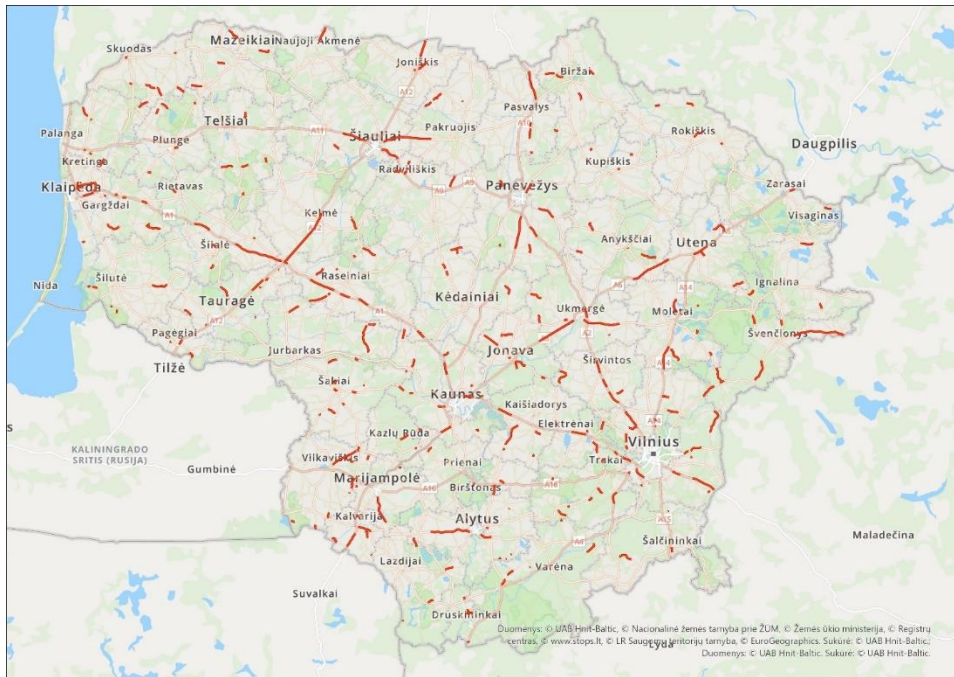
Fig. 2.1. Research plan

Nustatytos klimato rajonavimo zonos kiekvienam nagrinėjamam kelio ruožui ir kt. Tyrimo planas pateiktas 2.1 pav.

2.1.2. Tyrimo vietų parinkimo pagrindimas

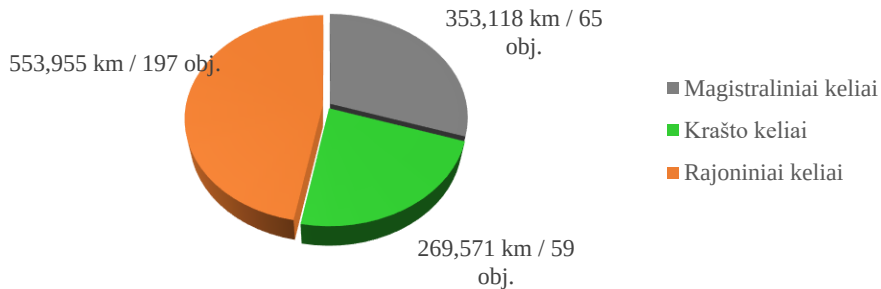
Remiantis Turto banko 2021 metų ataskaita „Valstybės turto valdymas, naudojimas ir disponavimas 2021 metais“ (Turto bankas, 2022), valstybinės reikšmės kelių, neatitinkančių keliamų dangos būklės reikalavimų pagal KVER reikalavimus (1.5 skyrius), yra: magistralinių – 20,20 %, krašto – 43,76 %, rajoninės

reikšmės kelių – 42,77 %. Todėl aktualu prognozuoti kelių tinklo būklei palaikyti skirtą finansavimą, remontuojamų kelių skaičių. Šiuos tikslus pasiekti galima taikant DVS, kuri pritaikyta kelių dangų būklės kitimui modeliuoti įvertinant lokalias sąlygas, transporto apkrovas, įvertinant statybos lygį ir kt.



2.2 pav. Objektų išsidėstymas Lietuvos teritorijoje
Fig. 2.2. Location of objects in the territory of Lithuania

Pasinaudojus LAKD sukauptais kelio dangos nelygumo matavimų protokolais, kurie yra privalomi po statybos rangos darbų perduodant objektą naudoti, atrinkti objektai eksperimentiniam tyrimui. Atrinkti tirti kelių ruožai, kurie buvo remontuoti 2008–2016 m., turi statybos užbaigimo metu atliktus kelio dangos nelygumo patikrinimo aktus ir KTVIS sistemoje yra informacija apie atlikto remonto rūšį. Šio statybos laikotarpio pradžios pasirinkimą lėmė tai, kad 2007 ir 2008 m. Lietuvoje buvo pradėtas eksploatuoti lazerinis profilometras RST 28 (RST 63 tyrimų įrangos pirmtakas su tokia pačia kelio dangos nelygumo matavimo technologija), su kuriuo buvo atliekami kelio dangos nelygumo matavimai po statybos darbų. Viršutine analizuojamo laikotarpio riba pasirinkta 2016 metų riba, siekiant turėti ne mažesnę negu 5 metų amžiaus laikotarpį iki pirmųjų eksperimentinio tyrimo matavimų rengiant šią disertaciją, kurie atlikti 2021 m.



2.3 pav. Tiriamų ruožų pasiskirstymas tarp skirtingų kelio tipų

Fig. 2.3. Distribution of studied sections among different road types

Iš viso tyrimui atrinktas 321 kelių ruožas. Išanalizavus atrinktus ruožus tyrimui nustatyta, kad objektai išsidėstę visoje šalies teritorijoje (2.2 pav.). Objektų yra visuose keliuose: magistraliniuose keliuose – 65 objektai, krašto keliuose – 59 objektai, rajoninės reikšmės keliuose – 197 objektai (2.3 pav.). Didelė tirti atrinktų ruožų imtis leidžia analizuoti visų tipų kelius, esančius įvairiose šalies geografinėse vietovėse, turinčius skirtingą eismo intensyvumą ar konstrukcijos klasę.

2.2. Eksperimentinio tyrimo metodika

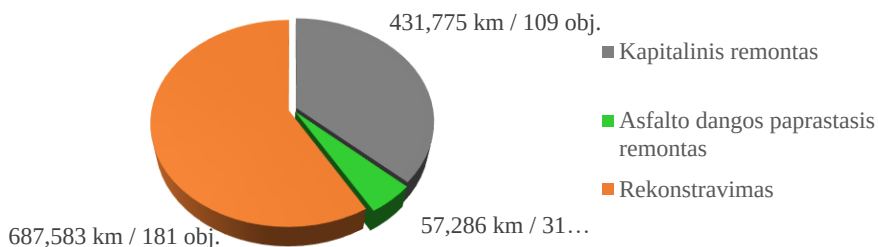
Siekiant sudaryti degradacijos kreives, buvo atliktas eksperimentinis tyrimas fiksuojant dangų būklę tiriamuose ruožuose. Eksperimentinis tyrimas tiriamuose ruožuose buvo atliktas pirmą kartą 2019 m. ir pakartotas papildomai dar du kartus:

1. 2019 m. atlikti kokybinių dangos būklės rodiklių matavimai su RST tyrimų įranga atrinktuose kelių ruožuose valstybinės reikšmės kelių tinkle nustatant kelio dangos nelygumą, vėžių gylį, vidutinį profilio gylį, plyšius ir paviršiaus defektus.
2. 2020 m. atlikti tokie patys kokybinių dangos būklės rodiklių matavimai su RST tyrimų įranga tuose pačiuose atrinktuose kelių ruožuose valstybinės reikšmės kelių tinkle, kurių metu buvo nustatomos šios charakteristikos: kelio dangos nelygumas, vėžių gylis, vidutinis profilio gylis, plyšiai ir paviršiaus defektai.
3. 2021 m. dar kartą pakartoti kokybinių dangos būklės rodiklių matavimai su RST tyrimų įranga tuose pačiuose atrinktuose kelių ruožuose valstybinės reikšmės kelių tinkle, kurių metu buvo nustatomos šios charakteristikos: kelio dangos nelygumas, vėžių gylis, vidutinis profilio gylis, plyšiai ir paviršiaus defektai.

2.2.1. Tiriamų objektų apžvalga

Kiekvienam analizuojamam kelio ruožui buvo surinkti inventoriniai ir istoriniai duomenys apie kelio tipą, ilgį, remonto rūšį, remonto laiką (metai), istorinius eismo intensyvumo duomenis, konstrukcijos klasę, kelio dangos nelygumą (kontroliniai matavimai po rangos darbų), priskirtą klimato zoną pagal kiekvieno ruožo geografinę padėtį lyginant su šalies teritorijos klimatinio suskaidymu (šalčio poveikio zona, išalo gylio zona, temperatūros poveikio zona).

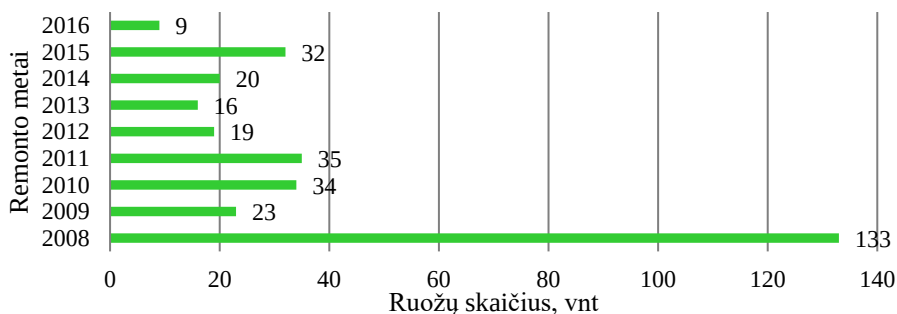
Nustatyta, kad tiriami kelių ruožai buvo remontuoti vienu iš trijų būdų: asfalto dangos paprastojo remonto būdu buvo remontuotas 31 objektas, kapitalinio remonto būdu suremontuoti 109 objektai ir rekonstruotas 181 objektas (2.4 pav.).



2.4 pav. Tiriamų ruožų remontų pasiskirstymas

Fig. 2.4. Distribution of road work type

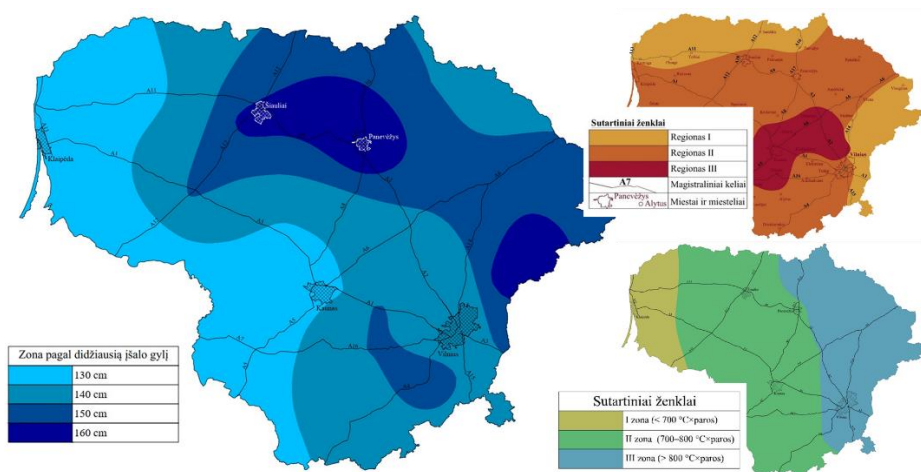
Daugiausia ruožų – 133 objektai (41 % visų analizuojamų kelių ruožų) – buvo remontuoti 2008 m. Visais kitais metais kelių ruožų buvo remontuota kelis kartus mažiau (2.5 pav.).



2.5 pav. Tiriamų ruožų pasiskirstymas pagal remontų metus

Fig. 2.5. Distribution of the investigated sections according to the year of repairs

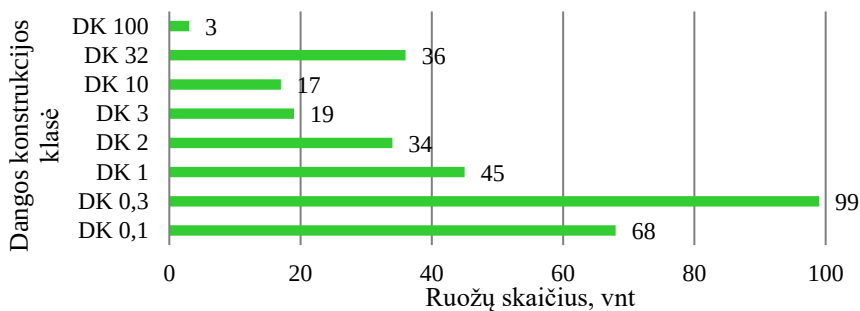
Projektuojant būtina atsižvelgti į klimato veiksnius, nes aplinkos veiksnių sukeliamos apkrovos yra neišvengiamos ir kartais lemiamos. Aplinkos veiksniai, ypač temperatūra ir drėgmė, turi įtakos nestandžių dangų veikimui. Šie veiksniai jau seniai buvo vertinami projektuojant dangas ir praktikoje, nes jie gali paveikti dangos medžiagų degradaciją bei standumą, taip pat dangos eksploatacines savybes. Išskiriami du pagrindiniai aspektai: pakankama laikomoji galia ir pakankamas atsparumas šalčiui. Pastarasis yra kur kas svarbesnis šalto klimato regionuose, kur daug užšalimo ir atšilimo ciklų ir yra gilus įšalas (arba užšalimas).



2.6 pav. Lietuvos teritorijos kartografavimas pagal klimato reiškinius (kairėje – pagal didžiausią įšalo gylį; dešinėje viršuje – pagal didžiausią užšalimo rodiklį, dešinėje apačioje – pagal dangos temperatūros intervalų dažnius) (Vaitkus et al., 2016)

Fig. 2.6. Mapping of the territory of Lithuania according to climate phenomena (on the left – according to the maximum depth of frost; on the top right – according to the maximum freezing index, and on the bottom right – according to the frequencies of the surface temperature intervals) (Vaitkus et al., 2016)

VILNIUS TECH mokslininkai (Vaitkus et al., 2016) atliko Lietuvos automobilių kelių tinkle esančių Kelių oro stotelių (RWS) sukauptų duomenų analizę ir sudarė Lietuvos teritorijos kartografavimą (zonavimą) pagal didžiausią įšalo gylį (2.6 pav. kairėje) ir pagal didžiausią užšalimo rodiklį (2.6 pav. dešinėje viršuje). Kitose publikacijose VILNIUS TECH mokslininkai (Kleizienė et al., 2017; Vaitkus et al., 2021) Lietuvos teritorijos suskaido į tris temperatūros zonas pagal dangos temperatūros intervalų dažnius (2.6 pav. dešinėje apačioje). Šio tyrimo metu užfiksuota tendencija, kad pradinis šalčiui atsparios dangos konstrukcijos storis didėja didėjant ESA skaičiui ir didėjant grunto jautrumui šalčiui.



2.7 pav. Skirtingų dangos konstrukcijos klasių ruožų skaičius

Fig. 2.7. Number of sections of different pavement construction classes

Daugiausia tiriamų ruožų yra pritaikyti mažesnėms transporto apkrovoms – 66 % ruožų yra su DK0,1, DK0,3 ar DK1 dangos konstrukcijos klase (2.7 pav.). Taip susiklostė, nes 2008 m. daug žvyrkelių buvo rekonstruota į kelius su asfalto danga. Tokie keliai dažniausiai būna su mažesnėmis eismo apkrovomis.

2.2.2. Dangos būklės degradaciją įvertinančių rodiklių analizė

Lietuvoje naudojama mobilioji kelių tyrimo įranga – lazerinis profilometras RST63. Tai daugiakomponentė kelių dangų tyrimų įranga, kurios du pagrindiniai komponentai pažymėti 3.4 pav. Kelio dangos tyrimams skirti du LCMS-2 lazeriai (2.8 pav., A), galintys skenuoti 2 m pločio juostą kiekvienas (iš viso 4 m), per sekundę užfiksuojuantys apie 112 mln. taškų, fiksuojant kelio dangos paviršiaus padėtį dažniau nei 1 mm skersine kryptimi.



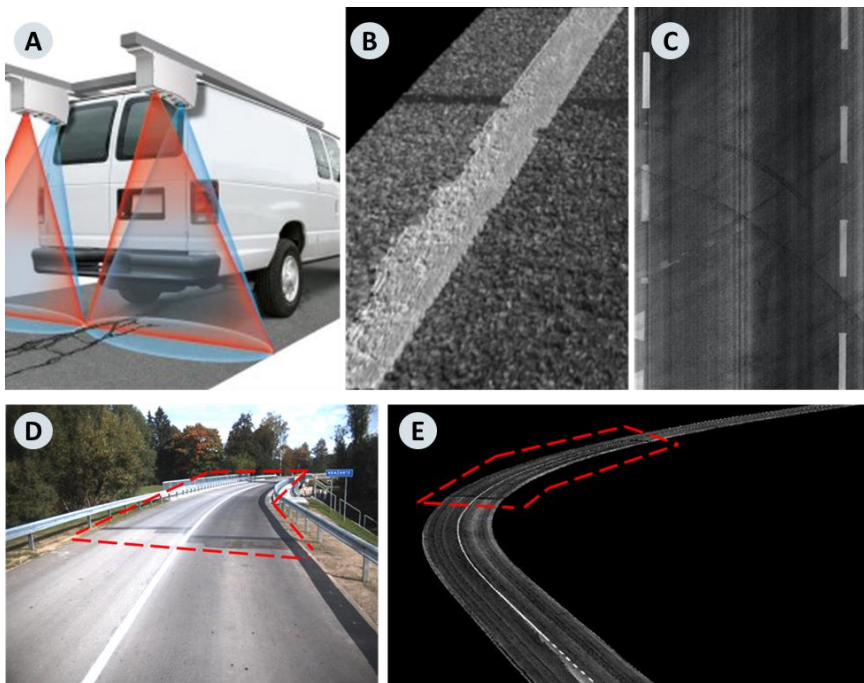
2.8 pav. Mobilioji kelių tyrimų įranga RST63:

A – LCMS-2 lazeriai; B – taškinio tipo lazeriai

Fig. 2.8. Mobile road research equipment RST63: A – LCMS-2 lasers; B – point lasers

Išilgine kryptimi matavimo dažnis priklauso nuo taikomų nustatymų (galimi dažniai: 1 mm, 5 mm ir pan.), tačiau, taikant matavimo dažnį 1 mm ir išilgine kryptimi, gaunamas itin detalus kelio paviršiaus atvaizdas (2.9 pav.). Šie lazeriai pasižymi ypač tikslia gylio geometrija ir sukuria labai detalų kelio dangos paviršiaus skaitmeninį atvaizdą trimatėje erdvėje (paskui galima padaryti nuotrauką).

Analizuojant surinktus duomenis, padaromos dvi nuotraukos: gylio (angl. *range*) ir intensyvumo (angl. *intensity*). Sujungiant jas abi, sudaroma 3D nuotrauka (3.9 pav.), kurioje, naudojant matematinius algoritmus, įmanoma identifikuoti kelio dangos paviršiaus pažaidas: įvairių tipų plyšius, dangos lopus, iškorėjimą, bitumo išplaukimą ir kitus defektus.

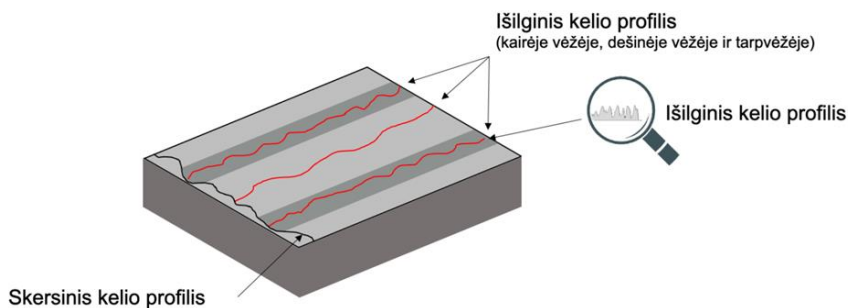


2.9 pav. LCMS-2 tyrimo įranga: A – LCMS-2 lazerių veikimo principas; B – gautų duomenų detalumo pavyzdys; C – gautas kelio dangos paviršiaus matavimo rezultatų atvaizdas-nuotrauka; D – „Right-of-way“ priekinio vaizdo kameros nuotrauka su matomu tilto fragmentu; E – taškų debesies atvaizdavimas 3D aplinkoje su matomu tuo pačiu tilto fragmentu

Fig. 2.9. LCMS-2 research equipment: A – the principle of operation of LCMS-2 lasers; B – the detail of the obtained data; C – the obtained image-photo of the results of the road surface measurement; D – the front view of the “Right-of-way” camera photo with a visible fragment of the bridge; E – rendered point cloud in a 3D environment with the same fragment of the bridge visible

Iš skaitmeninio atvaizdo galima nustatyti kelio dangos paviršiaus skersinį profilį ir apskaičiuoti provėžų gylius, simuliuojant kelio dangos paviršiaus padėtį erdvėje – apskaičiuoti galinčio užsilaikyti vandens gylį provėžose (kitur randamas pavadinimas – fiktyvus vandens gylis). Šiuos duomenis papildomai apdorojant, galima sudaryti taškų debesį ir, sukūrus paviršiaus modelį, pritaikyti projektavimui.

Mobiliosios kelių tyrimų įrangos priekyje sumontuoti taškiniai lazeriai, skirti kelio dangos nelygumui ir vidutinį profilio gyliui matuoti (2.8 pav., B). Lazerinio profilometro dalis susideda iš trijų taškinių lazerių, sumontuotų automobilio kėbulo priekyje. Šie lazeriai nuskaito kelio dangos paviršių nepertraukiamai išilgine kelio kryptimi, sukurdami skaitmeninį kelio išilginį profilį (2.10 pav.). Analizuojant šiuos profilius, nustatomas vidutinis profilio gylis ir išskaičiuojamas kelio dangos nelygumo indeksas IRI. Kelio dangos nelygumo tyrimams atlikti naudojama įranga atitinka ASTM E950-98 ir EN 13036-6 dokumentuose keliamus reikalavimus. Kelio dangos nelygumas (IRI m/km) apskaičiuojamas remiantis ASTM E1296 standartu. Kelio dangos nelygumo matavimo tikslumas yra mažesnis nei 0,1 m/km, o vidutinio profilio gylis – 0,2 mm.



2.10 pav. Išilginis ir skersinis kelio profilis
Fig. 2.10. Longitudinal and transverse road profile

Matavimai tiriamuose ruožuose 2019 m. buvo atlikti rugsėjo–lapkričio mėnesiais, 2020 ir 2021 m. buvo atliekami birželio–lapkričio mėnesiais. Matavimai atliekami važiuojant eismo srauto greičiu, tačiau ne mažesniu nei 20 km/h ir ne didesniu nei 80 km/h greičiu, matuojant visas eismo juostas transporto eismo judėjimo kryptimi ir fiksuojant šiuos rodiklius: kelio dangos nelygumą, provėžų gylį, vidutinį profilio gylį, plyšius ir paviršiaus defektus. Apdorojus matavimo duomenis apskaičiuojami kiekvieno tiriamo kelio ruožo kelio dangos nelygumo, provėžų gylio ir vidutinio profilio gylio parametrų vidutiniai dydžiai. Apskaičiuojamos viso tiriamo kelio ruožo plyšių ir paviršiaus defektų rodiklių sumos – suminis plyšiais pažeistos dangos plotas ir suminis paviršiaus defektais pažeistos

dangos plotas. Visų šių rodiklių matavimas ir nustatymas aprašytas Valstybinės reikšmės kelių su asfalto danga pažaidų matavimo ir nustatymo tyrimų vykdymo veiklos vadove (Lietuvos automobilių kelių direkcija, 2021).

2.2.3. Dangų būklės vertinimas

Eksperimentiniai tyrimai objektuose buvo atlikti trejus metus iš eilės – 2019, 2020 ir 2021 m. Kiekvienais metais buvo išmatuojamas 321 objektas, kurių bendras ilgis siekia 1 176 644 km. Vidutinis tiriamo kelio ruožo ilgis – 3,66 km, trumpiausias objektas – 0,45 km, ilgiausias – 23 616 km. Su tyrimų įranga RST63 matavimai atlikti visose eismo juostose – keliuose su viena važiuojamąja dalimi matavimai atlikti abiem kryptimis, dviejų važiuojamųjų dalių keliuose buvo matuojamos tiriamo ruožo abi eismo juostos ta pačia kryptimi. Tyrimų įranga užfiksavo daugiau kaip 117 tūkst. 20 m ilgio matavimo taškų. Duomenų apdorojimo ir analizės metu kiekvienam tiriamam ruožui buvo apskaičiuotos dangos būklės rodiklių vidutinės reikšmės, kuriomis remiantis apskaičiuotas kiekvieno tiriamo ruožo DBI.

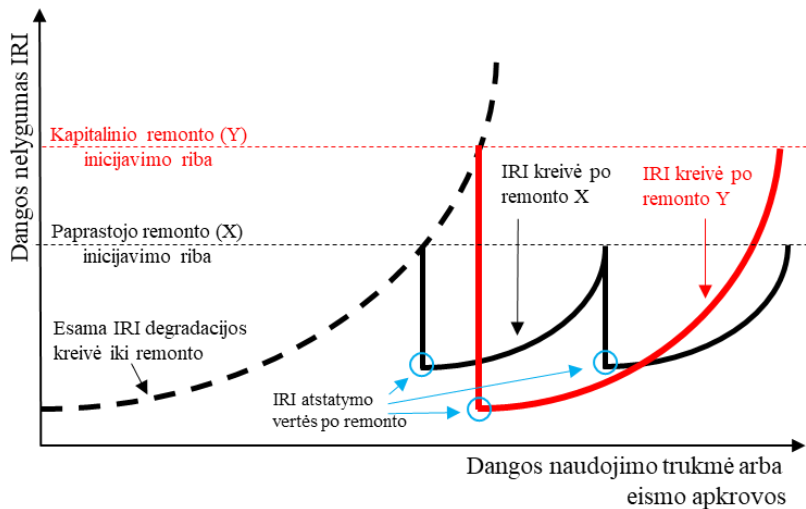
Per trejus eksperimentinio tyrimo metus buvo išmatuota 3 529 932 km valstybinės reikšmės kelių, užfiksuota kiek daugiau nei 352 900 vnt. 20 metrų ilgio matavimo taškų.

Remiantis eksperimentinio tyrimo metu surinktais duomenimis apie dangos būklę buvo apskaičiuotas dangos būklės indeksas DBI. Šis indeksas vertinti dangų būklę Lietuvoje naudojamas nuo 2019 m. ir buvo sudaromas atsižvelgiant į tarptautinę patirtį – *COST Action 354. Performance Indicators for Road Pavements* (Litzka et al., 2008) rekomendacijas, sujungiant atskirus dangų būklės rodiklius į vieną globalų.

2.2.4. Kelio dangos nelygumo reikšmių po atlikto remonto tyrimas

Dangų valdymo sistemose simuliuojant įvairius remonto scenarijus, taikomos dangos būklės rodiklių atkūrimo reikšmės (angl. *resets*) po remonto. Sistema priima, kad atlikus remontą, eliminuojamos visos pažaidos – nebelieka plyšių, pažaidų, vėžių. Šios dangos būklės rodiklių reikšmės nustatomos lygios 0, o kelio dangos nelygumo vertė būna skirtinga priklausomai nuo remonto tipo ir kelio kategorijos. Šio tyrimo rezultatai svarbūs dangų valdymo procese, kai dangų valdymo sistemoje pritaikius remonto parinkimo algoritmą, sistema modeliuoja atnaujintos dangos būklės lygį. Šiuo atveju nagrinėjamas kelio dangos nelygumas, nes visų kitų rodiklių reikšmės po atlikto kelio dangos remonto atkuriamos į be-defektį lygį („nulinama“), tačiau kelio dangos nelygumo vertė niekada nepasiekiamą 0 m/km (2.11 pav.). Po atlikto kelio dangos remonto kelio dangos nelygumo rodikliai pagerinami priklausomai nuo parinkto remonto tipo. Iki šiol

praktikoje buvo naudojamos ribinės vertės, nustatytos asfalto įrengimo taisyklėse, kai, įrengus asfalto dangą, gauta kelio dangos nelygumo vertė neturi viršyti numatytos reikalavimuose: greitkeliai – 1,0 m/km; magistraliniai keliai – 1,5 m/km; krašto keliai – 2,0 m/km; rajoniniai keliai – 3,0 m/km. Tačiau praktikoje statybos metu pasiektas kelio dangos nelygumo lygis būna kur kas mažesnis ir nevienodas pritaikius skirtingus remonto būdus, todėl pradinis dangos būklės rodiklis suteikia skirtingą lygį degradacijos pradžioje.



2.11 pav. Tipinis kelio dangos nelygumo pagal IRI duomenis būklės kitimo scenarijai
Fig. 2.11. Typical scenarios of change in IRI condition of road pavement roughness

Tyrimas apima magistralinius, krašto ir rajoninės reikšmės kelius. Atsižvelgiant į šiuolaikinius keliamus reikalavimus magistraliniams keliams, jie tyrimo metu buvo suskirstyti į dvi grupes dėl skirtingų keliamų reikalavimų (automagistralėms ir greitkeliams nustatyti griežtesni reikalavimai kelio dangos nelygumui įrengiant asfalto dangą) – didesnio greičio kelių ruožus (automagistralės ir greitkelio ruožus, toliau – greitkeliai) ir likusius magistralinius kelius (toliau – magistraliniai keliai). Šiame remonto efektyvumo tyrime nustatoma IRI vertė, kuri DVS bus pritaikoma atlikus kelio remonto darbus.

Tyrimo metu duomenys buvo analizuojami atskirais pjūviais, sugrupuojant analizuojamus kelio ruožus į klasterius pagal kelio tipą ir remonto darbų tipą (2.1 lentelę).

Išanalizavus informaciją apie visus objektus, buvo nustatyta, kad objektuose buvo taikomi trys remonto darbų tipai: asfalto dėvimojo sluoksnio atnaujinimas, kapitalinis remontas ir rekonstrukcija.

2.1 lentelė. Duomenų apie kelius skirstymas į grupes ir objektų kiekis kiekvienoje grupėje

Table 2.1. Grouping of road data and number of objects in each group

Kelio tipas	Remonto būdas	Grupės pavadinimas	Objektų skaičius, vnt.
Greitkeliai	Asfalto dėvimojo sluoksnio atnaujinimas	G_ADSA	1
Greitkeliai	Kapitalinis remontas	G_KAP	28
Greitkeliai	Rekonstravimas	G_REK	10
Magistraliniai keliai	Asfalto dėvimojo sluoksnio atnaujinimas	M_ADSA	2
Magistraliniai keliai	Kapitalinis remontas	M_KAP	11
Magistraliniai keliai	Rekonstravimas	M_REK	14
Krašto keliai	Asfalto dėvimojo sluoksnio atnaujinimas	K_ADSA	16
Krašto keliai	Kapitalinis remontas	K_KAP	37
Krašto keliai	Rekonstravimas	K_REK	15
Rajoniniai keliai	Asfalto dėvimojo sluoksnio atnaujinimas	R_ADSA	3
Rajoniniai keliai	Kapitalinis remontas	R_KAP	5
Rajoniniai keliai	Rekonstravimas	R_REK	9

Gauti rezultatai sugrupuojami pagal analizuojamas duomenų grupes ir apskaičiuojamas svorinis (įvertinamas objekto ilgio reikšmingumas) kelio dangos neįlygumo vidurkis.

2.2.5. Eismo apkrovų tyrimas

Eksperimentinio tyrimo metu kartu su dangos būklės rodikliais analizuojami ir transporto eismo intensyvumo duomenys kiekviename tiriamame ruože, kurie matuojami iš anksto numatytu periodiškumu pagal LAKD patvirtintą metodiką (VMPEI metodika). Kelių tinklas suskirstytas ruožais, kuriuose matuojamas eismo intensyvumas pagal vieną iš kelių matavimo būdų:

- nuolatinė eismo apskaita – eismo apskaita vykdoma ištisus metus,
- periodinė eismo apskaita – eismo apskaita vykdoma po vieną savaitę kiekvieną metų ketvirtį;

- paros trukmės eismo apskaita – du kartus per metus po vieną parą darbo dienomis.

Lietuvos valstybinės reikšmės kelių transporto eismo intensyvumo matavimų apimty ir dažnumas pateikti 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Transporto eismo intensyvumo matavimo dažnumas, tikslumo klasė ir apimtys

Table 2.2. Frequency and volume of AADT measurements and accuracy class of traffic intensity measurement

Kelio tipas	Tyrimų periodiškumas	Matavimo vietų sk., vnt.	Matavimo vietos tipas	VMPEI tikslumo klasė
Magistraliniai keliai	Kasmet	135	Nuolatiniai postai (nuolatinė eismo apskaita)	A klasė (97 % patikimumas)
		42	Periodiniai postai (po vieną savaitę kiekvieną metų ketvirtį)	B klasė (90 % patikimumas)
Krašto keliai	Kasmet	124	Nuolatiniai postai (nuolatinė eismo apskaita)	A klasė (97 % patikimumas)
		328	Periodiniai postai (po vieną savaitę kiekvieną metų ketvirtį)	B klasė (90 % patikimumas)
Rajoniniai keliai	Kasmet	104	Nuolatiniai postai (nuolatinė eismo apskaita)	A klasė (97 % patikimumas)
	Kas 5 metus	220	Periodiniai postai (po vieną savaitę kiekvieną metų ketvirtį)	B klasė (90 % patikimumas)
	Kas 5 metus	350	Pariniai postai (du kartus per metus po vieną parą darbo dienomis: vieną kartą – balandžio, gegužės, rugsėjo arba spalio mėnesiais, antrą kartą – liepos–rugspjūčio mėnesiais)	D klasė (75 % patikimumas)

Įrangos, skirtos transporto eismo intensyvumui matuoti, yra įvairių tipų, grįstų skirtingomis technologijomis:

- skaitikliai su induktyvinių kontūrų jutikliais;
- radarinio tipo skaitikliai klasifikatoriai;

- skaitikliai su pneumatinių vamzdelių jutikliais;
- kt.

Stacionariuose eismo apskaitos postuose naudojami skaitikliai su induktyvinių kontūrų jutikliais, kurie įrengiami kelio dangoje 3–5 cm gylyje. Šie skaitikliai nustato automobilio greitį, kryptį ir klasę. Šio tipo skaitikliai yra A tikslumo klasės. Jų tikslumas yra 97 %.

Radarinio tipo skaitiklių veikimo principas pagrįstas Doplerio efektu, kai atspindėjęs nuo transporto priemonės radaro spindulys grįžta su šiek tiek pakitusiu dažniu, proporcingu transporto priemonės judėjimo greičiui. Šio tipo skaitikliais transporto priemonės klasifikuojamos pagal transporto priemonės ilgį ir nustatomas jų greitis. Įrenginiai yra mobilūs ir montuojami ant šalikelėje esančių kelio ženklų stovų. Jie yra B tikslumo klasės, jų tikslumas siekia 90 %.

Pneumatinių vamzdelių jutiklių technologiją naudojantys klasifikatoriai yra mobilieji autonominiai prietaisai, kurių darbo režimai yra keičiami. Prie skaitiklių prijungiami du minkštos gumos vamzdeliai, kurie darbo vietoje paklojami ant kelio važiuojamosios dalies paviršiaus statmenai jo išilginei ašiai 1 m atstumu vienas nuo kito. Automobilų ratams užvažiavus ant šių vamzdelių, juose padidėjęs oro slėgis užfiksuojamas pneumatiniiais skaitiklio jutikliais. Skaitiklis, analizuodamas signalus, transporto priemones suskaičiuoja ir suklasifikuoja. Šie įrenginiai gali būti įrengiami bet kur kelyje, skirtingai nei radarinio tipo skaitikliai. Jie yra D tikslumo klasės, jų tikslumas yra 75%.

Transporto eismo intensyvumas gali būti matuojamas ir kitokio tipo priemonėmis: magnetometriniais, svėrimo, numerio atpažinimo sistemos-kameros ir kitomis technologijomis.

2.3 lentelė. VMPEI EUR-7 klasės

Table 2.3. AADT EUR-7 classes

Klasės Nr.	Transporto sudėtis	Žymėjimas
1	Lengvieji automobiliai	LA
2	Lengvieji krovininiai automobiliai, mini autobusai	LS+ MINI
3	Krovininiai automobiliai be priekabų	KROV
4	Krovininiai automobiliai su priekabomis	KROV+ PRIEK
5	Krovininiai automobiliai su puspriekabėmis	KROV+ PUSPR
6	Autobusai	BUS
7	Motociklai	Kitos

Nepriklausomai nuo naudojamos įrangos, transporto priemonės yra klasifikuojamos pagal EUR-7 klasifikavimo lentelę (2.3 lentelė).

Transporto apkrovų poveikis dangai vertinamas apskaičiuojant standartinių ašių ekvivalentą. Praktikoje laikoma, kad standartinė ašies apkrova yra lygi 100 kN ir jos poveikis dangai prilyginamas vienetui. Vienos ašies daromas poveikis kelio dangos nusidėvėjimui vadinamas standartinių ašių ekvivalentu ir apskaičiuojamas pagal formulę:

$$ESA_{100A} = \left(\frac{A}{100}\right)^4, \quad (2.1)$$

čia ESA_{100A} – vienos ašies standartinių ašių ekvivalentas, vnt.; A – automobilio ašies apkrova, kN; 100 – standartinė ašies apkrova, kN.

Norint nustatyti vienos transporto priemonės ESA_{100} , reikia susumuoti jos ašių ekvivalentus:

$$ESA_{100TP} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i}{100}\right)^4, \quad (2.2)$$

čia ESA_{100TP} – bendras transporto priemonės standartinių ašių ekvivalentas, vnt.; n – transporto priemonės ašių skaičius; A_i – i -tosios automobilio ašies apkrova, kN; 100 – standartinė ašies apkrova, kN.

Vidutinis metinis vienos paros transporto srauto ESA_{100} ekvivalentas apskaičiuojamas taip:

$$ESA_{100P} = \sum_{j=1}^m N_j \cdot ESA_{100j}, \quad (2.3)$$

čia ESA_{100P} – vidutinis metinis vienos paros transporto srauto poveikis dangų nusidėvėjimui kelio ruože, vnt.; j – transporto priemonių klasių skaičius pagal naudojamą klasifikavimo lentelę; N_j – j -osios transporto priemonių klasės vidutinis metinis paros eismo intensyvumas, aut./p.

Tiriamajame darbe nagrinėjami per visus kalendorinius metus pravažiavusių nagrinėjamu ruožu transporto priemonių ESA_{100} , todėl būtina vienos paros ESA_{100} padauginti iš 365:

$$ESA_{100M} = ESA_{100P} \cdot 365, \quad (2.4)$$

čia ESA_{100M} – metinis transporto srauto poveikis dangų nusidėvėjimui kelio ruože, vnt.; ESA_{100P} – vidutinis metinis vienos paros transporto srauto poveikis dangų nusidėvėjimui kelio ruože, vnt.; 365 – kalendorinių dienų skaičius per metus.

2.3. Dangos būklės degradaciją įvertinančių rodiklių tyrimai pasirinktose tyrimų vietose Lietuvos automobilių kelių tinkle

Šiame skyriuje pateikiame valstybinės reikšmės asfalto dangų transporto priemonių eismo apkrovų tyrimų ir kelių kokybės rodiklių matavimų rezultatai. Pateikta aprašomąji imties statistika ir atlikta kiekybinių rodiklių koreliacinę analizę, siekiant suprasti jų ryšį. Taip pat tirtas ryšys tarp kelio asfalto dangos būklės indekso ir nelygumo, nustatant jų tarpusavio priklausomybę.

2.3.1. Transporto priemonių eismo apkrovų tyrimų rezultatai

2021 m. VMPEI ir krovininio transporto VMPEI valstybinės reikšmės magistraliniuose, krašto ir rajoninės reikšmės keliuose pateiktas 2.4 lentelėje.

2.4 lentelė. 2021 m. bendro transporto VMPEI ir krovininio transporto VMPEI pagal kelio tipus (šaltinis: www.lakd.lt)

Table 2.4. 2021 AADT of transport and AADT of heavy transport by road types (source: www.lakd.lt)

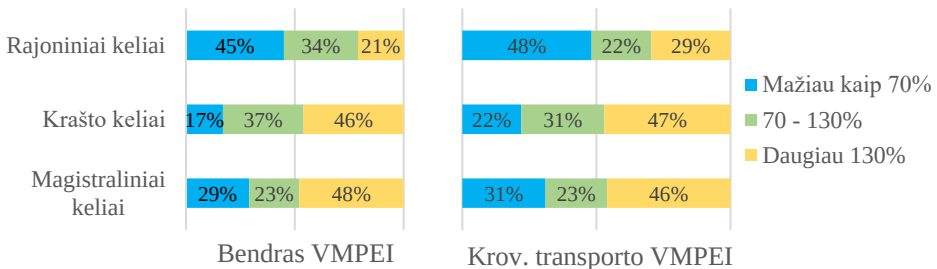
Kelio tipas	2021 m. VMPEI, aut./parą	2021 m. krovininio transporto VMPEI, aut./parą
Magistraliniai keliai	9492	1753
Krašto keliai	2330	214
Rajoniniai keliai	432	39

Išanalizavus 2021 m. kiekvieno tiriamų ruožų bendro ir krovininio transporto VMPEI, nustatyta tų ruožų apkrova, lyginant su VMPEI vidurkiu pagal kelio tipą. Tyrimų objektai suskirstyti į tris grupes:

- objekte VMPEI yra mažesnis negu 70 % vidutinio VMPEI pagal kelio tipą;
- objekte VMPEI yra 70–130 % vidutinio VMPEI pagal kelio tipą;
- objekte VMPEI yra didesnis negu 130 % vidutinio VMPEI pagal kelio tipą.

Objektų pasiskirstymas pateiktas 2.12 pav.

Tiriamų objektų yra visose grupėse, tačiau jų pasiskirstymas grupėse nėra tolygus (2.12 pav.).



2.12 pav. Valstybinės reikšmės kelių tiriamuosiuose ruožuose eismo intensyvumo pasiskirstymas ir jo palyginimas su vidutiniu kelių tinklo VMPEI pagal kelių tipus
Fig. 2.12. Traffic intensity in the research sections of roads of national significance and its comparison with the average road network AADT by road type

Magistraliniai keliai:

- Bendrojo transporto VMPEI 48 % objektų turi daugiau kaip 30 % (grupė „Daugiau kaip 130 %“) didesnę už vidurkį VMPEI, 23 % yra iki ± 30 % nuo vidutinio magistralinių kelių tinklo VMPEI ir 29 % ruožų nustatytas mažesnis negu 30 % (grupė „Mažiau kaip 70 %“) nuo vidutinio magistralinių kelių tinklo VMPEI.
- Krovininio transporto VMPEI magistraliniuose keliuose 46 % objektų turi daugiau kaip 30 % (grupė „Daugiau kaip 130 %“) didesnę už vidurkį VMPEI, 23 % yra iki ± 30 % nuo vidutinio magistralinių kelių tinklo VMPEI ir 31 % ruožų nustatytas mažesnis negu 30 % (grupė „Mažiau kaip 70 %“) nuo vidutinio magistralinių kelių tinklo VMPEI.

Krašto keliai:

- Bendro transporto VMPEI 46 % tiriamų objektų nustatytas daugiau kaip 30 % (grupė „Daugiau kaip 130 %“) didesnis už vidutinį VMPEI, 37 % yra iki ± 30 % nuo vidutinio krašto kelių tinklo VMPEI ir 17 % ruožų nustatytas mažesnis negu 30 % (grupė „Mažiau kaip 70 %“) nuo vidutinio magistralinių kelių tinklo VMPEI.
- Krovininio transporto VMPEI 47 % tiriamų objektų nustatytas daugiau kaip 30 % (grupė „Daugiau kaip 130 %“) didesnis už vidutinį VMPEI, 31 % yra iki ± 30 % nuo vidutinio krašto kelių tinklo VMPEI ir 22 % ruožų nustatytas mažesnis negu 30 % (grupė „Mažiau kaip 70 %“) nuo vidutinio magistralinių kelių tinklo VMPEI.

Rajoniniai keliai:

- Bendro transporto VMPEI 21 % objektų nustatytas daugiau kaip 30 % (grupė „Daugiau kaip 130 %“) didesnis už vidutinį VMPEI, 34 % yra iki ± 30 % nuo vidutinio krašto kelių tinklo VMPEI ir 45 % ruožų nustatytas

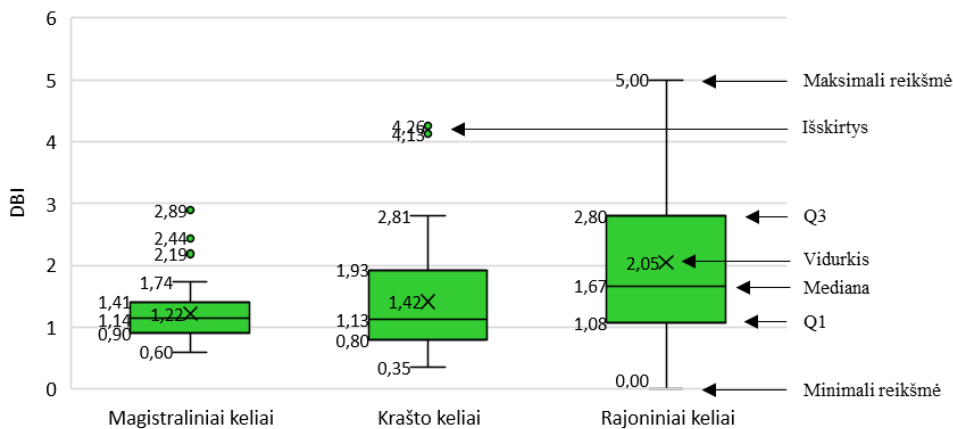
mažesnis negu 30 % (grupė „Mažiau kaip 70 %“) nuo vidutinio magistralinių kelių tinklo VMPEI.

- Krovinio transporto VMPEI 30 % objektų nustatytas daugiau kaip 30 % (grupė „Daugiau kaip 130 %“) didesnis už vidutinį VMPEI, 22 % yra iki ± 30 % nuo vidutinio krašto kelių tinklo VMPEI ir 48 % ruožų nustatytas mažesnis negu 30 % (grupė „Mažiau kaip 70 %“) nuo vidutinio magistralinių kelių tinklo VMPEI.

2.3.2. Valstybinės reikšmės kelių asfalto dangos kokybės rodiklių matavimo rezultatai

Siekiant nustatyti tiriamų kelio ruožų dangos būklės lygį, matuojant buvo fiksuojamos šios dangos būklės charakteristikos: kelio dangos nelygumas, provėžų gylis, įvairių tipų plyšiai (skersiniai, išilginiai, plyšių tinklai), duobių ir lopų plotai.

Tyrimų įrangos RST63 programinė įranga, apdorojusi matavimo duomenis, pateikia charakteristikas: kelio dangos nelygumas IRI (m/km), provėžų gylis (mm), vidutinis provėžų gylis (mm), plyšiai (%) ir paviršiaus defektai (%). Šios charakteristikos, vadovaujantis 2.2.3 poskyryje aprašytu algoritmu (2.1 formulė), perskaičiuojamos į homogeninio ruožo DBI.



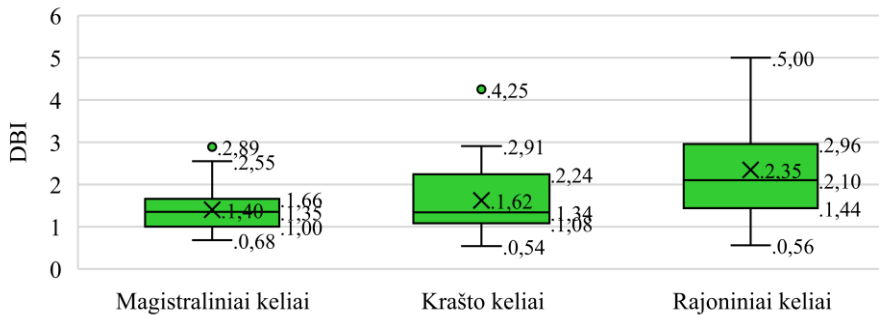
2.13 pav. 2019 m. nustatytos kelių asfalto dangos DBI

Fig. 2.13. Determined DBI of road asphalt pavements in 2019

2019 m. atlikus matavimus ir apskaičiavus DBI, nustatyta, kad DBI vertės svyruoja (2.13 pav.):

- magistraliniuose keliuose intervale nuo $DBI_{\min} = 0,6$ iki $DBI_{\max} = 2,96$, vidutinis DBI – 1,22 ir mediana – 1,14;

- krašto keliuose intervale nuo $DBI_{\min} = 0,35$ iki $DBI_{\max} = 4,26$, vidutinis DBI – 1,42 ir mediana – 1,13;
- rajoniniuose keliuose intervale $DBI_{\min} = 0$ iki $DBI_{\max} = 5$, vidutinis DBI – 2,05 ir mediana 1,67.

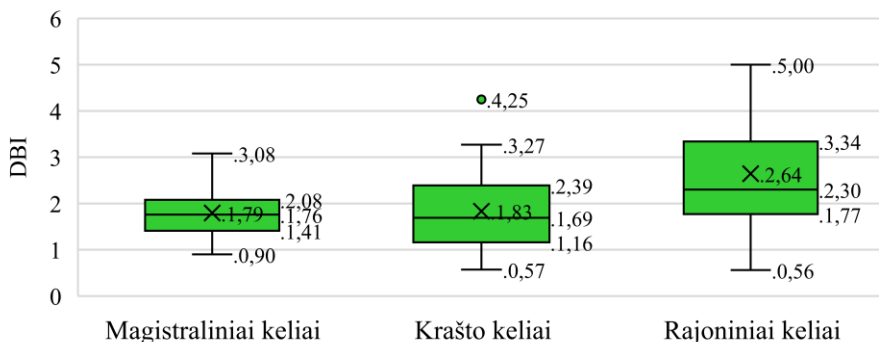


2.14 pav. 2020 m. nustatytos kelių asfalto dangos DBI

Fig. 2.14. Determined DBI of road asphalt pavements in 2020

2020 m. atlikus matavimus ir apskaičiavus DBI, nustatyta, kad DBI vertės svyruoja (2.14 pav.):

- magistraliniuose keliuose intervale nuo $DBI_{\min} = 0,68$ iki $DBI_{\max} = 2,97$, vidutinis DBI – 1,39 ir mediana – 1,35;
- krašto keliuose intervale nuo $DBI_{\min} = 0,54$ iki $DBI_{\max} = 4,26$, vidutinis DBI – 1,62 ir mediana – 1,34;
- rajoniniuose keliuose intervale nuo $DBI_{\min} = 0,56$ iki $DBI_{\max} = 5$, vidutinis DBI – 2,35 ir mediana 2,1.



2.15 pav. 2021 m. nustatytos kelių asfalto dangos DBI

Fig. 2.15. Determined DBI of road asphalt pavements in 2021

2021 m. atlikus matavimus ir apskaičiavus DBI, nustatyta, kad DBI vertės svyruoja (2.15 pav.):

- magistraliniuose keliuose intervale nuo $DBI_{\min} = 0,9$ iki $DBI_{\max} = 3,08$, vidutinis DBI – 1,79 ir mediana – 1,76;
- krašto keliuose intervale nuo $DBI_{\min} = 0,57$ iki $DBI_{\max} = 4,39$, vidutinis DBI – 1,83 ir mediana – 1,69;
- rajoniniuose keliuose intervale nuo $DBI_{\min} = 0,56$ iki $DBI_{\max} = 5$, vidutinis DBI – 2,64 ir mediana 2,3.

2.3.3. Aprašomoji imties statistika ir koreliacinė kiekybinių rodiklių analizė

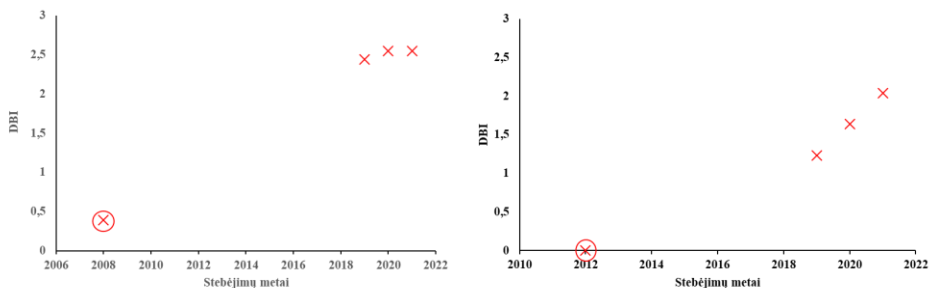
Tyrimu siekiama nustatyti kelio dangos degradacijos spartos (dinamikos) priklausomybę nuo eismo apkrovos, įšalo gylio, šalčio poveikio zonos, kelio ruože pasukutinį kartą taikyto remonto būdo, kelio ruožo dangos konstrukcijos klasės, kelio dangos nelygumo:

$$P = f(T, L, M, K, I, N, P, R), \quad (2.5)$$

čia T – eismo apkrova ESA; L – dangos konstrukcijos klasė; M – įšalo poveikio zona; K – statybos rūšis (remonto būdas); I – kelio naudojimo trukmė (metai); N – šalčio poveikio zona; P – temperatūros poveikio zona; R – kelio dangos nelygumas, IRI m/km.

Skirtingų parametrų reikšmingumui nustatyti buvo taikyta aprašomoji statistika, koreliacinė analizė ir regresinė duomenų analizė. Degradacijos kreivėms sudaryti pasirinktas fiksuotų efektų regresijos modelis.

Paneliniais duomenimis vadinami duomenys, kurių objektai stebimi laikui einant. Paneliniai duomenys gali būti subalansuoti, kai kiekvienas objektas stebimas visais laiko momentais (intervalais), ir nesubalansuoti, kai stebėjimai atliekami ne visais laiko momentais. Šių objektų reikšmės gali būti koreliuotos, tačiau atskiri objektai yra nepriklausomi (Čepaitytė, 2016). Yra trijų tipų panelinių duomenų modeliai – jungieji, fiksuotų efektų ir atsitiktinių veiksnių modeliai. Šioje analizėje taikytas panelių duomenų fiksuotų efektų modelis, nes stebimi duomenys (vertinant atskirus objektus – kelių ruožus) yra heterogeniški: analizuojamų duomenų vidurkio pasikliautiniai intervalai svyruoja – vienos duomenų grupės jis siauresnis, kitose platesnis tiek lyginant pagal matavimų metus, tiek analizuojant kiekvieną objektą atskirai. Kadangi atskirų kelio ruožų regresoriai labai skirtingi, analizė atlikta duomenis suskirstant į klasterius pagal dangos konstrukcijos klasių grupes (DKKG) kaip ir regresinės duomenų analizės, nustatant reikšmingumo faktorius, atveju.

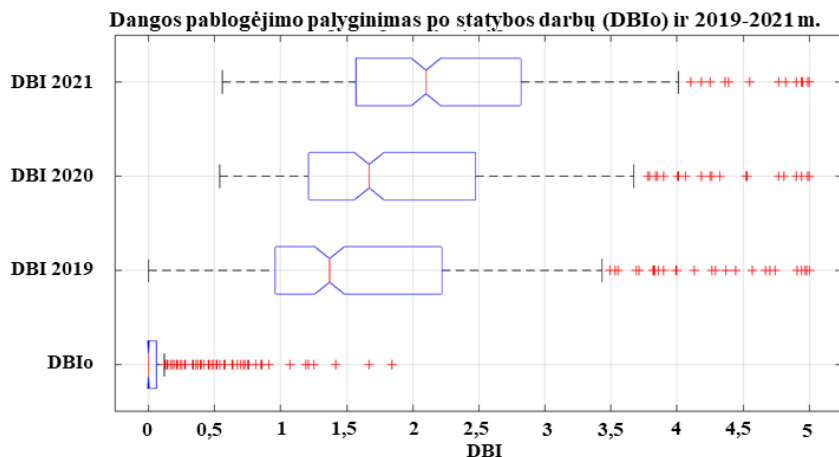


2.16 pav. Vieno objekto būklės stebėjimo periodiškumo pavyzdys – statybos metai: kairėje – 2008 m., dešinėje – 2012 m.

Fig. 2.16. Example of the periodicity of object condition monitoring – year of construction: on the left – 2008, on the right – 2012

Vieno objekto DBI stebėjimai (matavimai) parodyti 2.16 pav. Kiekvieno objekto pirmasis stebėjimas (matavimas) atliktas iš karto po statybos darbų (visi objektai remontuoti 2008–2016 m.). Kiti trys stebėjimai atlikti doktorantūros studijų metų: 2019, 2020 ir 2021 m.

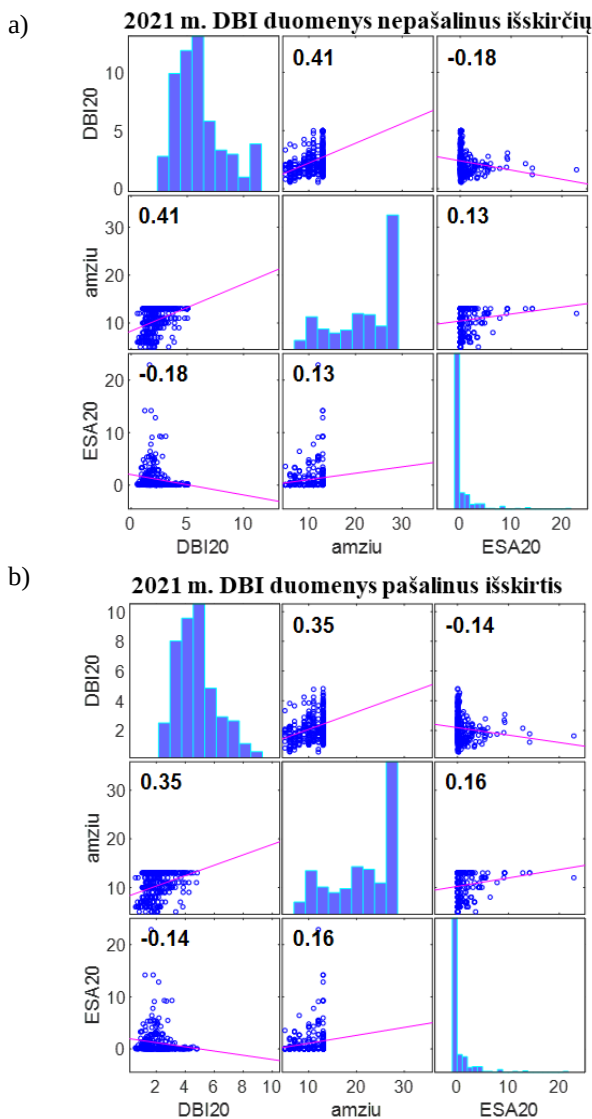
Įvertinus dangos būklės įverčių reikšmes atskirais metais (DBIo – dangos būklės indekso DBI vertė iš karto po atlikto remonto; 2019; 2020 ir 2021 m.), matyti, kad kiekvienais metais kelio dangos degradacijos įverčių duomenyse yra vis mažiau išskirčių. Daugiausia išskirčių yra duomenyse iki 2019 m., mažiausiai – 2021 m. duomenyse (2.17 pav.). Taip pat matyti, kad kelio dangos degradacijos mediana kiekvienais metais vis didėja.



2.17 pav. Dangos būklės skaitinių charakteristikų palyginimas

Fig. 2.17. Comparison of numerical characteristics of pavement condition

Koreliacinė analizė buvo atlikta siekiant sužinoti, ar yra tiesinė priklausomybė tarp kiekybinių kintamųjų: DBI, eismo apkrovos ir kelio amžiaus. Koreliacinė analizė buvo atliekama pagal atskirų analizuojamų metų duomenis – 2019, 2020 ir 2021 m.



2.18pav. 2021 metų duomenų koreliacija: a) nepašalinus DBI išskirčių;
b) pašalinus DBI išskirtis

Fig. 2.18. Correlation of 2021 data: (a) before removing outliers and
(b) after removing outliers

Atlikus koreliacinę analizę (2.18 pav., a) ir prieš tai pašalinus išskirtis (2.18 pav., b), nustatyta, kad šis išskirčių pašalinimas mažina koreliacijos reikšmes, todėl tolesniuose tyrimuose nuspręsta išskirčių nešalinti.

2.3.4. Kelio asfalto dangos būklės indekso ir nelygumo ryšys

Išanalizuoti dangos būklės indekso DBI ir kelio dangos nelygumo IRI tarpusavio ryšiai. Išanalizuota IRI vertės dydžio priklausomybė nuo DBI vertinimo, t. y. nustatytas vidutinis IRI dydis, minimalus ir maksimalus IRI dydžiai kiekvienoje DBI grupėje. Analizuojami ruožai suskirstyti į atskiras grupes pagal du požymius – kelio tipą ir DBI lygį (reikšmę). DBI skirstymas į penkias grupes (Labai gerai, Gerai, Patenkinamai, Blogai ir Labai blogai). Pagal DBI dydį skirstymas pateiktas valstybinės reikšmės kelių dangos būklės vertinimo tvarkos aprašo 13 lentelėje (Lietuvos automobilių kelių direkcija, 2018). Iš viso sudaryta 15 grupių, kuriomis siekiama nustatyti, ar IRI vertės didėja didėjant DBI vertėms. Analizės rezultatai pateikti 2.5 lentelėje ir 2.19 pav. vaizduojamose stačiakampėse diagramose.

2.5 lentelė. IRI dydžio priklausomybė nuo DBI

Table 2.5. Dependence of IRI size on the relation with DBI

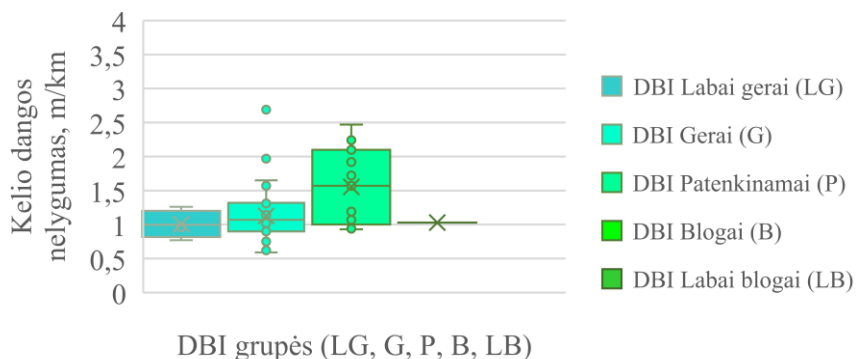
Kelio tipas	Vertinimo lygiai (ribos)	Suminis ruožų ilgis, km	Minimalus IRI	Maksimalus IRI	Vidurkis IRI	Stand. nuokrypis IRI	Ruožų kiekis
1	2	3	4	5	6	7	8
Magistraliniai keliai	DBI Labai gerai (DBI < 1)	35,259	0,77	1,26	1,01	0,20	4
	DBI Gerai ($1 \leq \text{DBI} < 2$)	231,745	0,59	2,69	1,13	0,38	41
	DBI Patenkinamai ($2 \leq \text{DBI} < 3$)	79,374	0,93	2,47	1,55	0,53	19
	DBI Blogai ($3 \leq \text{DBI} < 4$)	6,74	1,03	1,03	1,03	–	1
	DBI Labai blogai (DBI > 4)	0	–	–	–	–	0

2.5 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6	7	8
Krašto keliai	DBI Labai gerai (DBI < 1)	44,625	0,76	1,86	1,10	0,42	7
	DBI Gerai ($1 \leq \text{DBI} < 2$)	127,428	0,79	2,56	1,38	0,49	29
	DBI Patenkinamai ($2 \leq \text{DBI} < 3$)	70,352	0,76	3,47	1,83	0,83	19
	DBI Blogai ($3 \leq \text{DBI} < 4$)	2,65	1,78	2,31	2,05	0,37	2
	DBI Labai blogai (DBI > 4)	24,516	1,49	2,79	2,14	0,92	2
Rajoniniai keliai	DBI Labai gerai (DBI < 1)	18,83	0,98	3,21	1,78	0,42	55
	DBI Gerai ($1 \leq \text{DBI} < 2$)	121,378	1,13	3,87	1,97	0,55	71
	DBI Patenkinamai ($2 \leq \text{DBI} < 3$)	193,261	1,57	5,97	2,31	0,92	37
	DBI Blogai ($3 \leq \text{DBI} < 4$)	121,529	1,58	5,39	2,28	0,77	28
	DBI Labai blogai (DBI > 4)	98,957	0,98	3,21	1,78	0,42	55

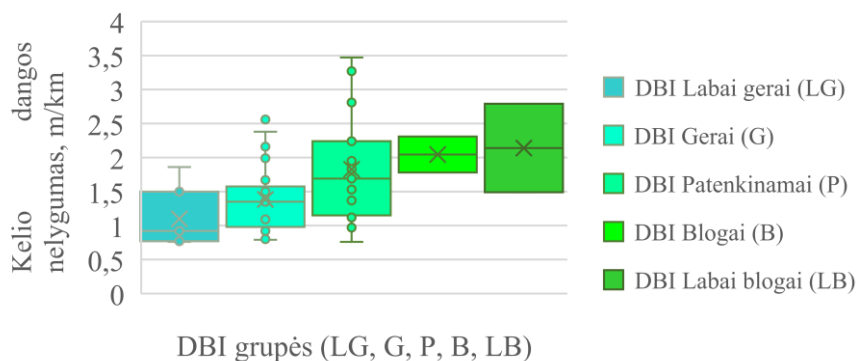
Nevertinant grupių, kuriose yra tik po 1 ar 2 ruožus, matome, kad „blogėjant“ DBI vertinimui, t. y. DBI balui didėjant, didėja ir kelio dangos nelygumo IRI vidutinis dydis.

a)

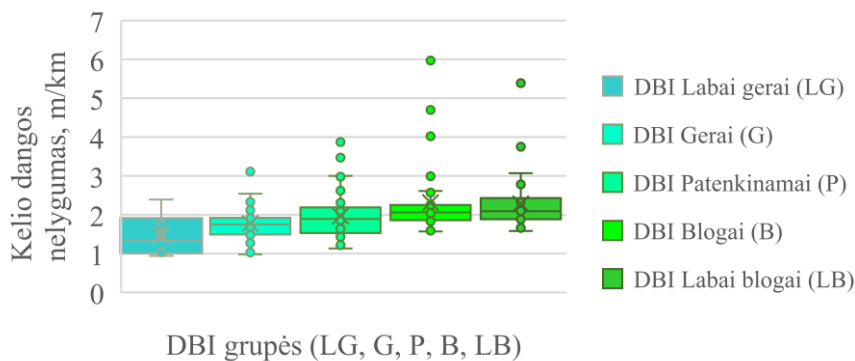


2.19 pav. Pabaiga kitame puslapyje

b)



c)



2.19 pav. Valstybinės reikšmės kelių IRI priklausomybė nuo DBI:

a) magistraliniai keliai; b) krašto keliai ir c) rajoniniai keliai

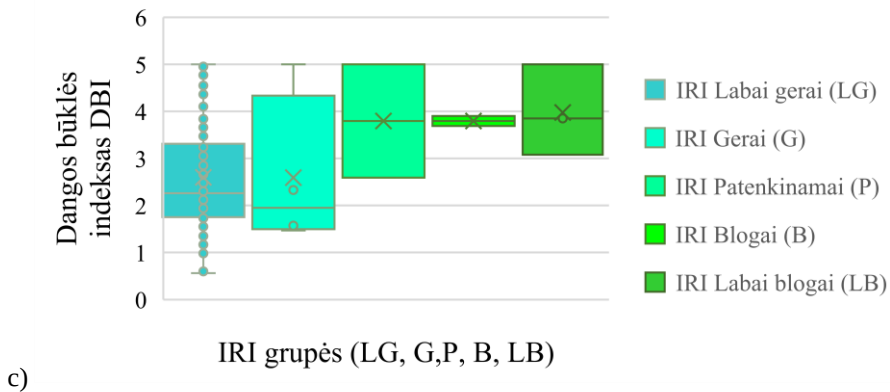
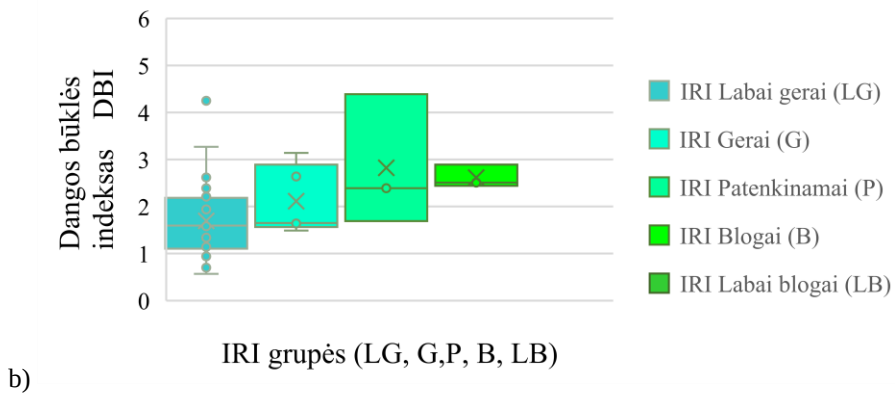
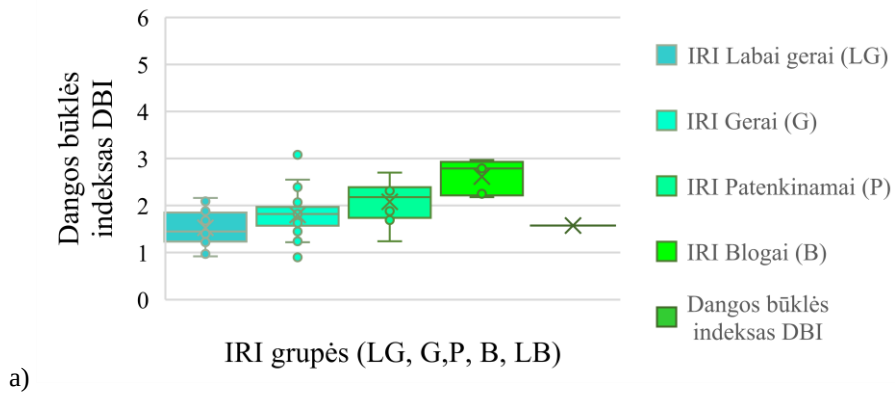
Fig. 2.19. Dependence of IRI on the relation with DBI on State significance roads: (a) main roads, (b) national roads, and (c) regional roads

Atliktas atvirkštinis DBI vertės dydžio priklausomybės nuo IRI vertinimas. Analizuojami ruožai suskirstyti į atskiras grupes pagal du kriterijus – kelio tipą ir IRI grupę (vertinimą). IRI skaidymas į penkias grupes (Labai gerai, Gerai, Patenkinamai, Blogai ir Labai blogai) pagal IRI vertės dydį pateiktas valstybinės reikšmės kelių dangos būklės vertinimo tvarkos aprašo 1 lentelėje (Lietuvos automobilių kelių direkcija, 2018). Iš viso sudaryta 15 grupių. Analizės rezultatai pateikti 2.6 lentelėje ir 2.20 pav. vaizduojamose stačiakampėse diagramose.

2.6 lentelė. DBI pokytis priklausomai nuo IRI

Table 2.6. Dependence of a PCI size on the relation with IRI

Kelto tipas	Vertinimo lygiai (ribos)	Suminis ruožų ilgis, km	Minimalus DBI	Maksimalus DBI	Vidurkis DBI $\bar{X}_{DBI}$	Stand. nuokrypis DBI S_{DBI}	Ruožų kiekis
1	2	3	4	5	6	7	8
Magistraliniai keliai	IRI Labai gerai ($IRI \leq 1$)	151,049	0,92	2,16	1,53	0,38	24
	IRI Gerai ($1 < IRI \leq 1,5$)	156,738	0,90	3,08	1,80	0,47	27
	IRI Patenkinamai ($1,5 < IRI \leq 2$)	25,262	1,24	2,70	2,08	0,47	8
	IRI Blogai ($2 < IRI \leq 2,5$)	11,02	2,18	2,97	2,62	0,37	5
	IRI Labai blogai ($IRI > 2,5$)	9,049	1,58	1,58	1,58	–	1
Krašto keliai	IRI Labai gerai ($IRI \leq 2$)	255,393	0,57	4,25	1,69	0,75	48
	IRI Gerai ($2 < IRI \leq 2,5$)	6,978	1,49	3,14	2,11	0,73	5
	IRI Patenkinamai ($2,5 < IRI \leq 3$)	2,91	1,69	4,39	2,82	1,40	3
	IRI Blogai ($3 < IRI \leq 3,5$)	4,29	2,44	2,89	2,61	0,24	3
	IRI Labai blogai ($IRI > 3,5$)	0	–	–	–	–	–
Rajoniniai keliai	IRI Labai gerai ($IRI \leq 3$)	541,866	0,56	5,00	2,60	1,16	186
	IRI Gerai ($3 < IRI \leq 3,5$)	4,781	1,47	5,00	2,59	1,65	4
	IRI Patenkinamai ($3,5 < IRI \leq 4$)	2,653	2,59	5,00	3,80	1,70	2
	IRI Blogai ($4 < IRI \leq 4,5$)	2,528	3,69	3,90	3,80	0,15	2
	IRI Labai blogai ($IRI > 4,5$)	2,127	3,08	5,00	3,98	0,97	3



2.20 pav. Valstybinės reikšmės kelių DBI priklausomybė nuo IRI

a) magistraliniai keliai; b) krašto keliai; c) rajoniniai keliai

Fig. 2.20. Dependence of a PCI on relation with IRI on State significance roads: (a) main roads, (b) national roads, and (c) regional roads

Atmetus grupes, kuriose yra tik po 1, 2 ar 3 ruožus, matome, kad „blogėjant“ IRI vertinimui, t. y. IRI vertei didėjant, didėja ir kelio dangos būklės indekso DBI vidutinis dydis.

2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Palyginus tiriamų ruožų eismo intensyvumą su LAKD nustatytu vidutiniu metiniu magistraliniams, krašto ir rajoninės reikšmės keliams 2022 m., nustatyta, kad tiriamuose ruožuose eismo intensyvumas išsiskaido – yra ruožų su daugiau kaip 30 % mažesniu VMPEI nuo vidurkio, daugiau kaip 30 % didesniu VMPEI nuo vidurkio ir yra intervale ± 30 % nuo VMPEI vidurkio.
2. Atlikus kelio ruožų dangos būklės matavimus tiriamuose ruožuose 2019, 2020 ir 2021 m., nustatyta, kad magistralinių kelių ruožai buvo geriausios būklės (tirtų ruožų bendras DBI vidurkis atitinkamais metais siekė 1,22, 1,39 ir 1,79). Ištirtų krašto kelių bendras DBI vidurkis atitinkamais metais siekė 1,42; 1,62 ir 1,83. Rajoninės reikšmės kelių ruožai buvo blogiausios būklės (jų bendras DBI vidurkis atitinkamais metais siekė 2,05, 2,35 ir 2,64).
3. Po atliktų eksperimentinio tyrimo matavimų ir apskaičiuotų DBI verčių buvo palygintos nustatytos DBI vertės. Nustatyta, kad DBI pokytis magistraliniuose, krašto ir rajoninės reikšmės keliuose tarp 2019 ir 2020 metų atitinkamai buvo 0,17, 0,20 ir 0,30. DBI pokytis magistraliniuose, krašto ir rajoninės reikšmės keliuose tarp 2020 ir 2021 metų atitinkamai buvo 0,40, 0,21 ir 0,29.
4. Atlikus statistinę dangos būklės indekso verčių analizę ir palyginus dangos būklės indeksų įverčių reikšmes atskirais metais (DBIo, 2019, 2020 ir 2021), matyti, jog kiekvienais metais kelio dangos degradacijos įverčių duomenyse yra vis mažiau išskirčių: DBIo – 47, 2019 m. – 24, 2020 m. – 20, 2021 m. – 13 išskirčių.
5. DBI yra suminis dangos būklės indeksas, kuris įvertina keletą dangos būklės charakteristikų. Išanalizavus visų tiriamų ruožų IRI ir DBI vertes, nustatyta, kad, blogėjant DBI (penkios DBI vertinimo grupės: Labai gerai, Gerai, Patenkinamai, Blogai ir Labai blogai), blogėja ir vidutinis IRI dydis. Lygiai taip pat, blogėjant IRI (penios IRI vertinimo grupės: Labai gerai, Gerai, Patenkinamai, Blogai ir Labai blogai), didėja ir vidutinis DBI dydis.

Asfalto blogėjimo kreivių sudarymas ir jų taikymas Lietuvos dangų valdymo sistemoje

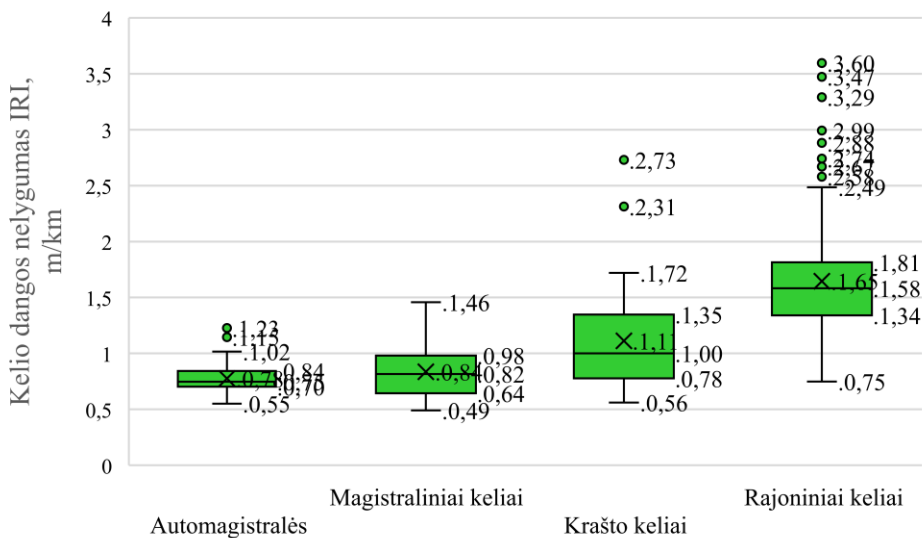
Šiame skyriuje analizuojami kelio dangos nelygumo IRI duomenys, fiksuoti atlikus remonto darbus, ir nustatomi teoriniai dydžiai, naudotini dangų valdymo sistemoje pritaikius remonto scenarijų. Taip pat tyrinėjami ryšiai tarp dangos būklės indekso ir kitų kiekybinių bei kokybinių kintamųjų, nustatomas reikšmingumas ir sudaromas dangos būklės indekso degradacijos modelis. Patikrinamas užsienio mokslininkų sudarytas modelis kelio dangos būklės indeksui modeliuoti.

Tiriama pasekmė – viršutinio asfalto sluoksnio paviršiaus geometrinių parametrų pokytis, neanalizuojant šių pokyčių priežasties ar paties asfalto struktūros, jo komponentų sąveikos bei savybių kaitos dangos naudojimo laikotarpiu.

Skyriaus tematika paskelbti du autoriaus straipsniai (Paplauskas & Vaitkus, 2022; Paplauskas et al., 2023).

3.1. Kelio dangos nelygumo teorinių reikšmių nustatymas

Analizuojant kelio asfalto dangos nelygumo rodiklius, kurie buvo matuoti po remonto darbų atliekant kontrolinius patikrinimus, ruožai buvo suskirstyti į klasterius pagal kelio tipą. Apskaičiuotos vidutinės kelio ruožo dangos nelygumo reikšmės pateiktos stačiakampėse diagramose 3.1 pav.



3.1 pav. Vidutinės kelio dangos nelygumo (IRI) reikšmės po remonto darbų

Fig. 3.1. Average values of road surface roughness (IRI) after repair works

Automagistralės ar greitkelio ruožų klasteryje po atliktų remonto darbų buvo apskaičiuota minimali 0,55 m/km, maksimali 1,22 m/km ir vidutinė 0,77 m/km nelygumų vertės. Kitų magistralinių kelių grupėje po atliktų remonto darbų buvo pasiekta minimali 0,49 m/km, maksimali 1,46 m/km ir vidutinė 0,84 m/km nelygumų vertės. Krašto kelių grupėje po atliktų remonto darbų buvo pasiekta minimali 0,56 m/km, maksimali 2,73 m/km ir vidutinė 1,11 m/km nelygumo vertės. Rajoninių kelių grupėje po atliktų remonto darbų buvo pasiekta minimali 0,74 m/km, maksimali 3,59 m/km ir vidutinė 1,65 m/km nelygumo vertės.

Dėl taikomų skirtingų remonto technologijų (paprastasis remontas, kapitalinis, rekonstrukcija), duomenų grupavimas į klasterius praplėstas įtraukiant remonto tipą ir taip sudarant 12 klasterių, atsižvelgiant į kelio tipą ir remonto tipą

(žr. 2.1 lentelę). Gauti analizės rezultatai pateikti 3.1 lentelėje. Nustatyta, kad vidutinis pasiekiamas IRI po kelio remonto darbų greitkeluose yra mažiausias ir toliau didėja žemėjant kelio tipui.

3.1 lentelė. Valstybinės reikšmės kelių klasteriai ir nustatytos jų asfalto dangos nelygumo reikšmės

Table 3.1. Clusters of national significance roads and their determined asphalt surface roughness values

Grupė	Kelio tipas	Remonto būdas	Klasterio pavadinimas	Nustatyta vidutinė vertė, m/km
1	Greitkeliai	Asfalto dėvimojo sluoksnio atnaujinimas	G_ADSA	0,73
2	Greitkeliai	Kapitalinis remontas	G_KAP	0,74
3	Greitkeliai	Rekonstravimas	G_REK	0,8
4	Magistraliniai keliai	Asfalto dėvimojo sluoksnio atnaujinimas	M_ADSA	0,82
5	Magistraliniai keliai	Kapitalinis remontas	M_KAP	0,72
6	Magistraliniai keliai	Rekonstravimas	M_REK	0,86
7	Krašto keliai	Asfalto dėvimojo sluoksnio atnaujinimas	K_ADSA	1,42
8	Krašto keliai	Kapitalinis remontas	K_KAP	0,89
9	Krašto keliai	Rekonstravimas	K_REK	0,87
10	Rajoniniai keliai	Asfalto dėvimojo sluoksnio atnaujinimas	R_ADSA	1,83
11	Rajoniniai keliai	Kapitalinis remontas	R_KAP	1,43
12	Rajoniniai keliai	Rekonstravimas	R_REK	1,55

Nustatyta, kad, atlikus asfalto dėvimojo sluoksnio greitkeluose ir magistraliniuose keliuose remontą, kelio dangos nelygumas po kelio remonto darbų būtų atitinkamai lygus 0,73 ir 0,82 m/km, o tai yra 27 ir 45 % mažesni dydžiai nei

keliams reikalavimuose. Krašto ir rajoniniuose keliuose atlikus tokį remontą, kelio dangos nelygumas būtų atitinkamai lygus 1,42 ir 1,83 m/km, o tai yra 29 ir 39 % mažesni už reikalaujamą ribą. Atlikus kapitalinį remontą galima prognozuoti, kad bus pasiektos šios kelio dangos nelygumo vertės: greitkeluose – 0,74 m/km, magistraliniuose – 0,72 m/km, krašto – 0,89 m/km; rajoniniuose – 1,43 m/km. Tai yra atitinkamai 26, 52, 56 ir 52 % mažesnės vertės už ribines reglamentuojamas. Rekonstravus kelio ruožą, kelio dangos nelygumas greitkeluose bus 0,8 m/km, magistraliniuose keliuose – 0,86 m/km, krašto keliuose – 0,87 m/km, rajoniniuose keliuose – 1,55 m/km. Tai atitinkamai 20, 43, 57 ir 48 % mažesnės vertės už reglamentuojamas.

3.2. Regresinė duomenų analizė

Tyrime atlikta regresinė analizė trimis etapais:

- buvo analizuotas funkcinis ryšys tarp IRI ir PCI, taikant (Elhadidy et al., 2019) aprašytą regresijos modelį su kelio dangos nelygumo IRI duomenimis, siekiant nustatyti ryšį tarp DBI ir kelio dangos nelygumo;
- atlikta duomenų regresinė analizė tarp DBI verčių ir kitų žinomų rodiklių (kiekybinių ir kokybinių kintamųjų), siekiant nustatyti rodiklius, kurie gali turėti reikšmingą įtaką DBI kitimui;
- atlikta regresinė panelinių duomenų analizė nustatant DBI priklausomybės modelius.

3.2.1. Dangos būklės indekso priklausomybė nuo kelio dangos nelygumo

Pasirinktas užsienio tyrėjų regresinis modelis, kurį sudarė K. Park, N. Thomas ir K. Lee ir nustatė ryšį (laipsnio funkciją) tarp PCI ir IRI, naudodamiesi duomenimis iš devynių Šiaurės Amerikos Valstijų (Park et al., 2007). Šis modelis aptartas ir Elhadidy et al. (2019) straipsnyje. Aprašytas regresinis modelis (empirinė formulė), kuriame PCI priklauso nuo kelio dangos nelygumo IRI vertės. Šioje dalyje naudojamas dangos būklės indekso žymėjimas PCI, nes taip pateikiamas užsienio autorių literatūroje.

$$\log(PCI) = 2 - 0,436 \cdot \log\left(\frac{IRI}{0,727}\right), \quad (3.1)$$

čia *IRI* – kelio dangos nelygumas IRI, m/km; *PCI* – dangos būklės indekso vertė.

Pritaikant tyrėjų pasiūlytą modelį (3.1 formulė) turimiems duomenims, atlikta analizė su skirtingų metų duomenimis. Modelio lygtys atitinkamiems analizuojamiems duomenims pagal atskirus metus pateiktos 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Dangos būklės indekso tiesinės priklausomybės nuo kelio dangos nelygumo analizės rezultatai

Table 3.2. Results of the analysis of the PCI linear dependence on the roughness of pavement

Metai	Modelio lygtis	x_1	Koreguotas determinacijos koeficientas R^2
2019	$y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1$	$\ln \left(\frac{IRI_{2019}}{0,727} \right)$	0,295
2020	$y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1$	$\ln \left(\frac{IRI_{2020}}{0,727} \right)$	0,361
2021	$y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1$	$\ln \left(\frac{IRI_{2021}}{0,727} \right)$	0,266

Atlikus regresinę analizę gauti koreguoti determinacijos koeficientai pateikti 3.4 lentelėje.

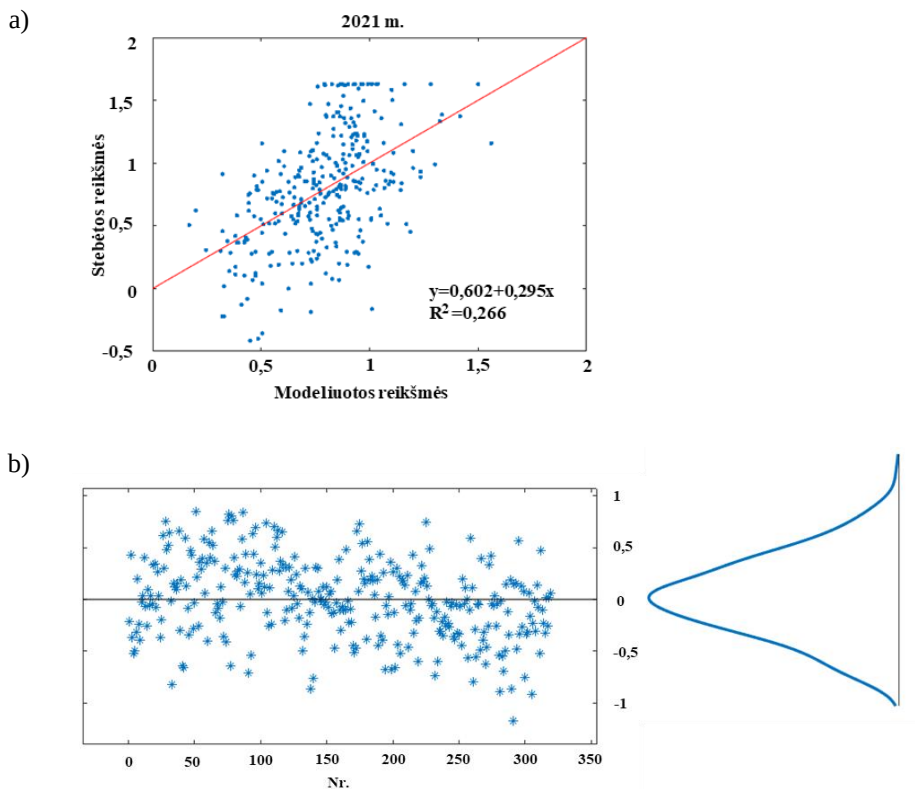
2021 m. matuotų (stebėtų) duomenų atitiktis su modeliuotomis pagal pateiktą 2021 m. modelį (3.2 lentelė) reikšmėmis grafiškai pavaizduota 3.2 pav., a. 3.2 pav., b, dalyje pateikta modelio paklaidų sklaidos diagrama, šalia iš dešinės pusės atvaizduojant ir paklaidų pasiskirstymą.

3.2 pav., a, matome nemažą verčių sklaidą, o b dalyje modelio paklaidų sklaidos diagramą šalia vaizduojant paklaidų pasiskirstymą pagal 3.2 lentelėje pateiktą modelio lygtį 2021 metams. 3.2 lentelėje pateiktiems modeliams palyginti buvo nustatyti šių modelių koeficientų prie nežinomųjų pasikliautinieji intervalai, kurie pateikti 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. Koeficientų prie nežinomųjų (modeliams iš 3.2 lentelės) pasikliautinieji intervalai

Table 3.3. Confidence intervals of coefficients for unknowns (for models from Table 3.2)

Modelis	Laisvojo nario β_0		Regresijos koeficientas prie IRI β_1	
2019 metų	0,9451	1,0545	0,3174	0,4474
2020 metų	0,2784	0,4362	0,5351	0,7187
2021 metų	0,1958	0,3934	0,4919	0,7114



3.2 pav. Modelio $\ln(DBI_{2021} + 0,1) = \ln\left(\frac{IRI_{2021}}{0,727}\right)$, skirto 2021 m., atitiktis stebimiems duomenimis (a) ir modelio liekamųjų paklaidų sklaidos diagrama (b)

Fig. 3.2. Compliance of the model $\ln(DBI_{2021} + 0,1) = \ln\left(\frac{IRI_{2021}}{0,727}\right)$ for 2021 with the observed data (a) and a scatterplot of model residual errors (b)

Iš gautų rezultatų (3.3 lentelė) matome, kad kasmet laisvojo nario įtaka DBI rezultatams mažėja, o kelio dangos nelygumo IRI rodiklio reikšmė didėja. Šio jau nustatyto užsienio tyrėjų modelio taikymas būtų nepakankamas turimiems duomenims.

3.2.2. Regresinė veiksmų analizė dangos būklės indekso reikšmingumui nustatyti

Atliekant sukaupytų tyrimų duomenų daugybinę (ne porinę) regresinę analizę, pradžioje buvo sudarytas tiesinės regresijos modelis, apimantis 18 nagrinėjamų rodiklių nuo X_1 iki X_{18} (su pseudokintamaisiais): kelio naudojimo trukmė (X_1), eismo apkrovos (X_2), dangos konstrukcijos klasės ($X_3, X_4, \dots, X_9$), įšalo zonos (X_{10}, X_{11}, X_{12}), temperatūros poveikio zonos (X_{13}, X_{14}), šalčio poveikio zonos (X_{15}, X_{16}) ir statybos rūšies (X_{17}, X_{18}). Sudarytas modelis kelio dangos degradacijos (Y) priklausomybei nuo šių rodiklių kiekvieniems metams nustatyti:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{18} \beta_i \cdot X_i + \varepsilon, \quad (3.2)$$

čia β_0 – laisvasis narys; ε – modelio paklaidos; β_i – koeficientai prie kintamųjų (regresorių); X_i – kintamasis (regresorius).

Gauti koreguoti 2019, 2020 ir 2021 metų duomenų determinacijos koeficientai 2019 m. duomenų regresinė analizė parodė, kad tiesinės regresijos modelis paaiškina 27 % ($R^2 = 0,27$) duomenų sklaidos ir statistiškai reikšmingą įtaką turi kelio naudojimo trukmė bei dangos konstrukcijos klasė DK 1. 2020 m. duomenų regresinė analizė parodė, kad tiesinės regresijos modelis paaiškina 28,3 % ($R^2 = 0,283$) duomenų sklaidos ir statistiškai reikšmingą įtaką turi dangos konstrukcijos klasės DK 0,1, DK 0,3 bei DK 1 ir pirmą temperatūros poveikio zoną. 2021 m. duomenų regresinė analizė parodė, kad tiesinės regresijos modelis paaiškina 27,4 % ($R^2 = 0,274$) duomenų sklaidos ir statistiškai reikšmingą įtaką turi dangos konstrukcijos klasės DK 0,1, DK 0,3 bei DK 1 ir pirmą temperatūros poveikio zoną. Čia tolesniuose šio skyriaus skaičiavimuose rodiklių reikšmingumas nustatomas įvertinant statistinį reikšmingumą p (angl. p value). Koreliacijos statistiniam reikšmingumui įvertinti gauta p reikšmė palyginama su reikšmingumo lygmeniu, kuris lygus $\alpha = 0,05$. Koreliacija yra statistiškai reikšminga, jei apskaičiuota p reikšmė yra mažesnė už 0,05 reikšmingumo lygmenį.

Atsižvelgiant į gautus tiesinės regresijos rezultatus ir siekiant rasti geriausią variantą, kuris parodytų didžiausią reikšmingumą, buvo sudaryti tiesinės regresijos modeliai logaritmuojant tas rodiklių reikšmes. Tokiu būdu buvo tikrinama 2019 metų duomenų tiesinė regresija logaritmuojant šiuos rodiklius: kelio amžiaus (X_1), eismo apkrovos (X_2), dangos konstrukcijų DK 0,1, DK 0,3 ir DK 1 (X_3, X_4, X_5), 3-ia įšalo zona (X_6). Buvo analizuojamas šis tiesinės regresijos modelis:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{1i} + \beta_2 \cdot x_{2i} + \beta_3 \cdot x_{3i} + \beta_4 \cdot x_{4i} + \beta_5 \cdot x_{5i} + \beta_6 \cdot x_{6i} + \varepsilon_i \quad (i = \overline{1, n}). \quad (3.3)$$

Buvo tikrinama 2020 m. duomenų tiesinė regresija, logaritmuojant šiuos rodiklius: kelio amžiaus (X_1), eismo apkrovos (X_2), dangos konstrukcijų klasės DK

0,1, DK 0,3 ir DK 1 (X_3, X_4, X_5), 3-ia įšalo zona (X_6) ir 1-a temperatūros poveikio zona (X_7). Buvo tikrinama 2021 m. duomenų tiesinė regresija logaritmuojant šiuos rodiklius: kelio amžiaus (X_1), eismo apkrovos (X_2), dangos konstrukcijų DK 0,1, DK 0,3 ir DK 1 (X_3, X_4, X_5), 3-ia įšalo zona (X_6).

2020 ir 2021 metų duomenims taikoma linijinės regresijos lygtis:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{1i} + \beta_2 \cdot x_{2i} + \beta_3 \cdot x_{3i} + \beta_4 \cdot x_{4i} + \beta_5 \cdot x_{5i} + \beta_6 \cdot x_{6i} + \beta_7 \cdot x_{7i} + \varepsilon_i, (i = \overline{1, n}). \quad (3.4)$$

Pagal koreguoto determinacijos koeficiento reikšmę galime sakyti, kad regresijos modelio funkcijos y_i kitimas nulemtas jame vertintų veiksnių kitimo, paaiškina 28,9 %, 31,3 % ir 29,4 % (atitinkamai 2019, 2020 ir 2021 metų duomenims) DBI reikšmių kitimą pasirinktais nepriklausomais kintamaisiais.

Sudaryti regresiniai modeliai parodė, jog kelio dangos degradacijos įvertį statistiškai reikšmingai veikia kelio naudojimo laikotarpis, eismo apkrova, dangos konstrukcijos DK 0,1, DK 0,3 ir DK 1 bei 3-ias įšalo lygis.

Tęsiant regresinę analizę, buvo įtrauktas kelio tipo kokybinis parametras (krašto kelias, magistralinis kelias ir rajoninis kelias). Modelio kintamieji yra šie: kelio amžiaus (X_1), eismo apkrovos (X_2), 3-ia įšalo zona (X_3), magistralinis kelias (X_4) ir krašto kelias (X_5). Modelio lygtys, įtraukiant atitinkamus analizuojamus duomenis, pagal atskirus metus pateiktos 3.4 lentelėje.

3.4 lentelė. Regresijos modeliai, vertinantys kelio tipą
Table 3.4. Regression models evaluating road type

Metai	Modelio lygtis	Koreguotas determinacijos koeficientas R^2	Koreliacijos koeficientas r
2019	$\ln(\text{DBI}_{2019} + 2,0) = 0,858 + 0,044 \cdot x_1 - 0,014 \cdot x_2 + 0,1 \cdot x_3 - 0,112 \cdot x_4 - 0,14 \cdot x_5$	0,283	0,532
2020	$\ln(\text{DBI}_{2020} + 0,5) = 0,058 + 0,068 \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + 0,157 \cdot x_3 - 0,27 \cdot x_4 - 0,379 \cdot x_5$	0,314	0,560
2021	$\ln(\text{DBI}_{2021} + 3,0) = 1,379 + 0,03 \cdot x_1 - 0,005 \cdot x_2 + 0,048 \cdot x_3 - 0,125 \cdot x_4 - 0,116 \cdot x_5$	0,294	0,560

Gauti koreguoti determinacijos koeficientai pateikti 3.4 lentelėje. Jie rodo, kiek duomenų apima sklaidos aprašo tiesinės regresijos modelis. Esant tiesinei

regresijai, galima modelio tinkamumą duomenims nustatyti palyginus gautus koreliacijos rezultatus su $r_{\min} = 0,1098$. Gautos koreliacijos r reikšmės tenkina $r \geq r_{\min}$ sąlygą ir yra statistiškai reikšmingos. Šios mažiausios koreliacijos koeficiento reikšmės $r_{\min}$ apskaičiavimo algoritmas aprašytas Sivilevičiaus ir Vansausko (2013) bei Podvezko ir Siviliavičiaus (2013) publikacijose.

Siekiant įvertinti dangos konstrukcijų įtaką dangos degradacijai, į regresinį modelį įtraukiami dangos konstrukcijos klasės pseudokintamieji. Remiantis inžinerine patirtimi, 8 kelio dangos konstrukcijų klasės buvo suskirstytos į tris apibendrintas grupes pagal jas veikiančias projektines apkrovas (A), kurios pateiktos 3.5 lentelėje.

3.5 lentelė. Dangos konstrukcijų klasių sujungimas į grupes

Table 3.5. Grouping of pavement structure classes into groups

Dangų konstrukcijų klasė	Projektinė apkrova A (ESAs), mln	Pavadinimas	Žymėjimas
DK 100	>32	Didelei apkrovai pritaikytos (projektuotos) dangos	I DKKG
DK 32	>10–32		
DK 10	>3,0–10		
DK 3	>2,0–3,0	Vidutinei apkrovai pritaikytos (projektuotos) dangos	II DKKG
DK 2	>1,0–2,0		
DK 1	>0,3–1,0	Mažai apkrovai pritaikytos (projektuotos) dangos	III DKKG
DK 0,3	>0,1–0,3		
DK 0,1	≤0,1		

Kelio ruožai suskirstyti į kelius su didelei, vidutinei ir mažai apkrovai projektuotomis dangos konstrukcijomis. Šis suskirstymas grįstas įvertinus šiuos dalykus (KPT SDK 19):

- DK0,1 – DK1 skirtos normaliajai apkrovai;
- DK2 – DK100 skirtos kelių ruožams, veikiamiems sunkiosios apkrovos;
- DK2 – DK3 apima nedidelį projektinės apkrovos rėžį ir iki patvirtinant KPT SDK19 buvo viena bendra grupė;
- KPT SDK 19 38 punktas išskiria DK10, DK32 ir DK100 konstrukcijų klases ir rekomenduoja joms taikyti papildomai mechanistinius-empirinius metodus konstrukcijos storiui patikrinti.

Analizuojant tik kelių ruožus, kurių dangos konstrukcija priskiriama I DKKG, sudaromos regresinės analizės modelių lygtys kiekvieniems analizuojamų duomenų metams ir yra pateiktos 3.6 lentelėje. Šio regresinio modelio kintamieji: kelio naudojimo trukmė (X_1), eismo apkrovos (X_2), kelio tipas (X_4 , X_5).

3.6 lentelė. Regresijos modeliai I DKKG įtraukiant kelio konstrukcijos klasių grupavimą
Table 3.6. Regression models for I RCCG, including clustering of road construction classes

Metai	Modelio lygtis	Koreguotas determinacijos koeficientas R^2	Koreliacijos koeficientas r
2019	$\ln(\text{DBI}_{2019} + 1) = 0,084 \cdot x_1 - 0,016 \cdot x_2 - 0,673 \cdot x_3 - 0,639 \cdot x_4$	0,355	0,596
2020	$\ln(\text{DBI}_{2020} + 1) = 0,368 + 0,048 \cdot x_1 + 0,002 \cdot x_2 - 0,032 \cdot x_4$	0,430	0,656
2021	$\ln(\text{DBI}_{2021} + 1) = 0,481 + 0,048 \cdot x_1 + 0,002 \cdot x_2 - 0,032 \cdot x_4$	0,470	0,686

Gauti koreguoti determinacijos koeficientai pateikti 3.6 lentelėje. Jie rodo, kiek duomenų sklaidos aprašo tiesinės regresijos modelis. Patikrinus modelio tinkamumą duomenims, palyginus gautus koreliacijos rezultatus su $r_{\min} = 0,263$. Gautos koreliacijos r reikšmės atitinka $r \geq r_{\min}$ sąlygą ir yra statistiškai reikšmingos.

Analizuojant tik kelių ruožus, kurių dangos konstrukcija priskiriama III DKKG, sudarytos regresinės analizės modelių lygtys kiekvieniems analizuojamų duomenų metams (3.7 lentelė). Regresinio modelio kintamieji: kelio amžiaus (X_1), eismo apkrovos (X_2), įšalo zona (X_3), kelio tipas (X_4 , X_5).

3.7 lentelėje pateikti gauti koreguoti kiekvienų metų duomenų determinacijos koeficientai. Duomenys rodo, kiek duomenų sklaidos aprašo tiesinės regresijos modelis. Patikrinus modelio tinkamumą duomenims, gauti koreliacijos rezultatai palyginti su $r_{\min} = 0,135$. Gautos koreliacijos r reikšmės atitinka $r \geq r_{\min}$ sąlygą ir yra statistiškai reikšmingos.

Analizuojant tik kelių ruožus, kurių dangos konstrukcija II DKKG, sudarytos regresinės analizės modelių lygtys pagal kiekvienus analizuojamų duomenų metus pateikė analogiškus rezultatus. Rezultatus statistiškai veikia tik dangos naudojimo trukmė, o gauti modelių koreguoti determinacijos koeficientai parodė koreliacijos nebuvimą (pagal gautą 2019 m. koreguoto determinacijos koeficiento reikšmę galime sakyti, kad regresijos modelis apibrėžia tik 9,91 % reikšmių kitimą per pasirinktus nepriklausomus kintamuosius). Sudarytos modelių lygtys pagal kiekvienus analizuojamų duomenų metus vertino šiuos kintamuosius: kelio amžių (X_1), eismo apkrovą (X_2), įšalo zona (X_3), kelio tipą (X_4 , X_5).

3.7 lentelė. Regresijos modeliai III DKKG įtraukiant kelio konstrukcijos klasių grupavimą

Table 3.7. Regression models for III RCCG, including clustering of road structure classes

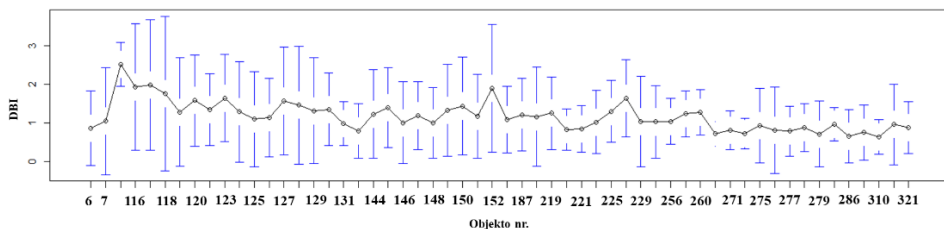
Metai	Modelio lygtis	Koreguotas determinacijos koeficientas R^2	Koreliacijos koeficientas r
2019	$\ln(\text{DBI}2019 + 1) = 0,277 + 0,068 \cdot x_1 - 0,256 \cdot x_2 + 0,159 \cdot x_3$	0,233	0,483
2020	$\ln(\text{DBI}2020+1) = 0,553 + 0,055 \cdot x_1 - 0,232 \cdot x_2 + 0,121 \cdot x_3 - 0,084 \cdot x_4 + 0,05 \cdot x_5$	0,223	0,472
2021	$\ln(\text{DBI}2021+1) = 0,684 + 0,051 \cdot x_1 - 0,063 \cdot x_2 + 0,083 \cdot x_3 - 0,15 \cdot x_4 - 0,093 \cdot x_5$	0,228	0,477

Atlikus regresinę sukaupytų duomenų analizę įvairiais pjūviais, matyti, kad reikšmingi rodikliai skiriasi skirtingais analizės metais. Tolesniame tyrime atsižvelgsime į kelio konstrukcijos stiprumo grupavimą, kuris parodė didžiausią įtaką regresinės analizės metu ir ryšį su kelio dangos nelygumu IRI.

3.2.3. Regresinė panelinių duomenų analizė

Tyrimui sudarytas duomenų masyvas apima 319 individualių tiriamų objektų – kelio ruožų, kurių kiekvienas turi keturis laiko taškus (matavimus). Tokio tipo duomenims tinka panelinių duomenų (angl. *panel data*) analizė.

Kelių ruožų, priskiriamų I dangos konstrukcijos klasių grupei (DKKG), heterogeniškumą pagal DBI rodiklį galima stebėti pagal kiekvieną objektą atskirai (3.3 pav.).



3.3 pav. I DKKG ruožų heterogeniškumas (kiekvienas objektas turi po ketverius matavimo metus)

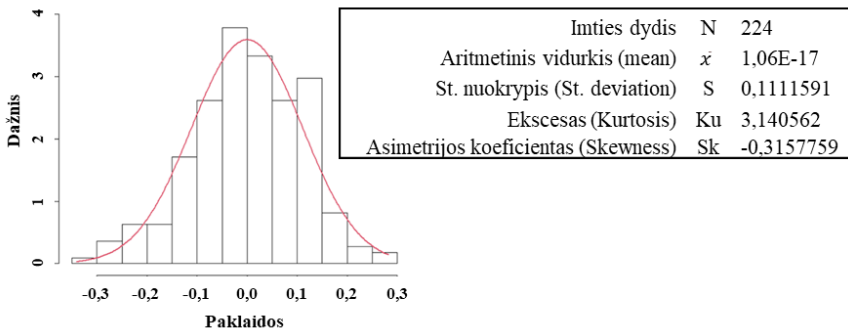
Fig. 3.3. Heterogeneity for I road construction class group sections (each object has four years of measurement)

I DKKG ruožų panelinių duomenų fiksuotų efektų regresijos modelio sudarymas

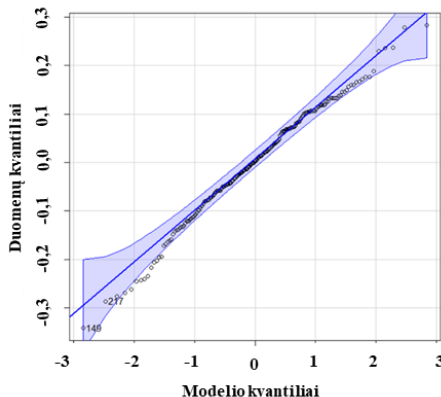
Ankstesnė tyrimo dalis parodė, jog regresiniam modeliui naudojant DBI logaritmuotas reikšmes, gautas modelis geriau aprašo stebimus duomenis, t. y. gaunamas didesnis koreguotas determinacijos koeficientas (angl. *Adj. R-Squared*) ir mažesnė liekamųjų paklaidų kvadratų suma (angl. *Residual Sum of Squares*). Analizės metu į modelį įtraukiamos transporto apkrovos, naudojimo laikas ir kelio dangos nelygumas IRI. Sudarant regresijos modelį, nustatyta, jog 9 ir 145 stebiniai yra išskirtys, turinčios įtakos regresijos modelio kokybei. Dėl šios priežasties stebiniai nebuvo naudojami regresijos modeliui sudaryti, todėl galutinis stebimų duomenų (objektų) skaičius – 56. Laiko atskaitos – 4. Sudaromas regresijos modelis:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{1i} + \beta_2 \cdot x_{2i} + \beta_3 \cdot x_{3i} + \varepsilon_i, (i = \overline{1, \dots, n}). \quad (3.5)$$

a)



b)



3.4 pav. Modelio (3.6 formulė) paklaidų histograma (a) ir kvantilių palyginimo diagrama (b)

Fig. 3.4. Model (Equation 3.6) histogram of errors (a) and the quantile comparison chart (b)

Sudaryto modelio tinkamumui vertinti atliekama liekamųjų paklaidų analizė tikrinant liekamųjų paklaidų normalumą ir nepriklausomumą (autokoreliaciją). Atliekant liekamųjų paklaidų ε_i , ($i = \overline{1, \dots, n}$) pasiskirstymo vertinimą, nubraižyta liekamųjų paklaidų histograma ir kvantilių palyginimo diagrama (QQ) (3.4 pav.).

Gauta histograma nėra simetriška, tačiau kvantilių reikšmės išsidėsčiusios arti tiesės, o „uodegėlės“ nėra taip stipriai nutolusios nuo šios linijos.

Atliekant skaičiavimus statistinės analizės paketu „R project“ duomenų skirstinio normališkumui tikrinti pasirinktas pakete jau esantis Andersono–Darlingo testas.

Atlikus Andersono–Darlingo testą normalumui tikrinti, nustatyta, kad modelio paklaidos atitinka (gauta $p = 0,1471$) normalumo sąlygas ($p > 0,05$). Taip pat papildomai buvo apskaičiuotos eksceso (angl. *kurtosis*) ir asimetrijos koeficiento (angl. *skewness*) reikšmės, kurios atitinkamai lygios 3,14 ir $-0,32$ (3.4 pav., a).

Taip pat nebuvo nustatyta modelio paklaidų autokoreliacija ($p = 0,9676$, kuri atliekama taikant Durbino–Vatsonio testą (ribinė $p \geq 0,05$). Galima sakyti, kad pagal koreguoto determinacijos koeficiento reikšmę regresijos modelis paaiškina (apibrėžia) 79,56 % DBI reikšmių kitimą pasirinkus nepriklausomus kintamuosius. Tai rodo stiprų gautų modeliuotų reikšmių ryšį su tikraisiais duomenimis.

$$\widehat{DBI}_{it} = e^{0,209 \cdot \ln(ESA_{it}+1) + 0,103 \cdot Amzius_{it} + 0,126 \cdot IRI_{it}} - 1, (i = \overline{1, 2, \dots, 56}, t = \overline{1, \dots, 4}, R^2 = 0,7956, r = 0,8919). \quad (3.6)$$

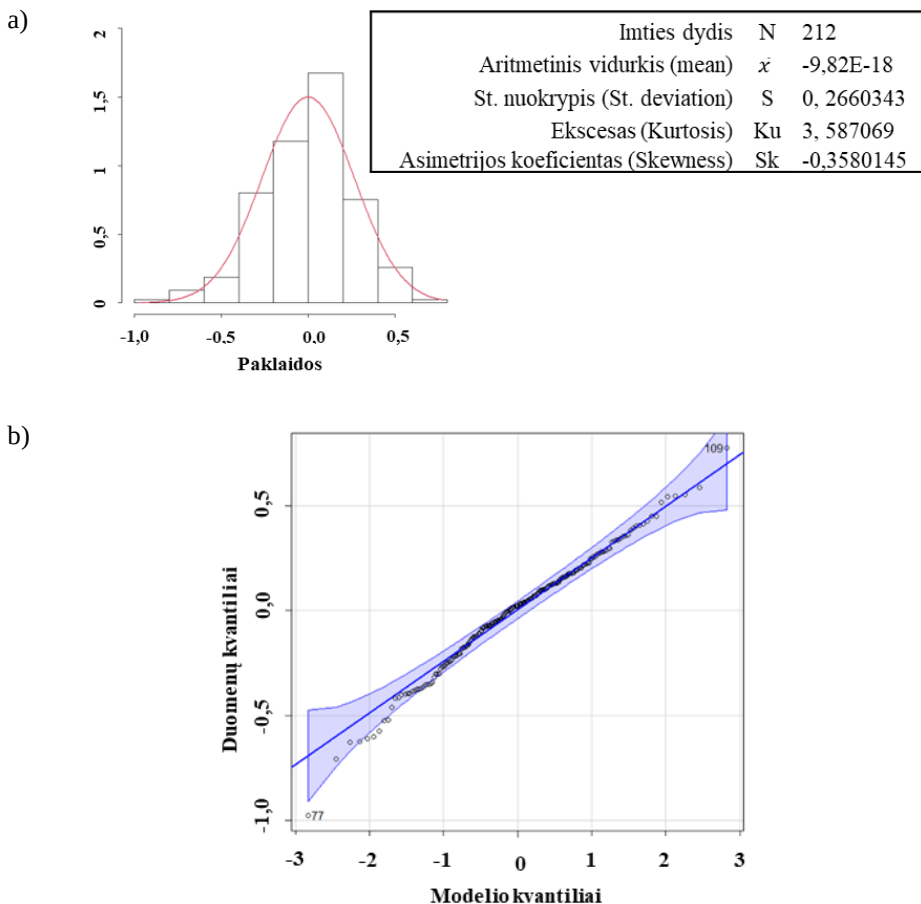
Nustatyta, kad koreliacija yra reikšminga, palyginus apskaičiuotą $r_{\min}$ vertę ir gautą analizės metu koreliaciją r ($r_{\min} = 0,2632 < r = 0,8919$).

Remiantis atlikta analize sudarytas dangos būklės indekso DBI prognozės modelis I DKKG priskiriamiems kelių ruožams pateiktas (3.6) formulėje.

II DKKG ruožų panelinių duomenų fiksuotų efektų regresijos modelio sudarymas

Nagrinėjant II DKKG grupei priskiriamus duomenis buvo stebima, kaip eismo apkrova, naudojimo trukmė ir kelio dangos nelygumas IRI veikia dangos būklės indeksą DBI. Atlikus duomenų analizę autokoreliacijos pagal Durbino–Vatsonio testą nebuvo nustatyta ($p = 0,9806$).

Atliekant liekamųjų paklaidų pasiskirstymo vertinimą, nubraižyta liekamųjų paklaidų histograma ir kvantilių palyginimo diagrama (QQ) (3.5 pav.). Modelio paklaidos atitinka normalumo sąlygas ($p = 0,05335$) taikant Anderseno–Darlingo testą. Apskaičiuotos eksceso ir asimetrijos koeficiento reikšmės, kurios atitinkamai lygios 3,59 ir $-0,36$ (3.5 pav., a). Iš koreguoto determinacijos koeficiento reikšmės matyti, kad regresijos modelis paaiškina 69,13 % DBI reikšmių kitimą pasirinkus nepriklausomus kintamuosius. Tai rodo gan stiprų modeliuotų reikšmių ryšį su tikraisiais duomenimis.



3.5 pav. Modelio (3.7 formulė) paklaidų histograma (a) ir kvantilių palyginimo diagrama (b)

Fig. 3.5. Model (Equation 3.7) histogram of errors (a) and the quantile comparison chart (b)

$$\widehat{DBI}_{it} = e^{0,770 \cdot \ln(ESA_{it} + 1) + 0,149 \cdot Amzius_{it} + 0,560 \cdot IRI_{it}} - 0,5, (i = \overline{1, 2, \dots, 53}, t = \overline{1, \dots, 4}, R^2 = 0,6913, r = 0,8314). \quad (3.7)$$

Nustatyta, kad koreliacija yra reikšminga, palyginus apskaičiuotą $r_{\min}$ vertę ir gautą analizės metu koreliaciją r ($r_{\min} = 0,2707 < r = 0,8314$).

Remiantis atlikta analize sudarytas dangos būklės indekso DBI prognozės modelis II DKKG priskiriamiems kelių ruožams pateiktas (3.7) formulėje.

III DKKG ruožų panelinių duomenų fiksuotų efektų regresijos modelio sudarymas

Nagrinėjant III DKKG priskiriamus ruožų būklės duomenis, buvo stebima, kaip eismo apkrova, naudojimo trukmė ir kelio dangos nelygumas IRI veikia dangos būklės indekso DBI kitimą.

Iš tyrimo metu gauto modelio koreguoto determinacijos koeficiento matyti, kad regresijos modelis apibrėžia 65,69 % DBI reikšmių kitimą pasirinktus nepriklausomus kintamuosius. Tai rodo gana stiprų modeliuotų reikšmių ryšį su stebimais duomenimis. Atlikus duomenų analizę autokoreliacijos pagal Durbino–Watsono testą nebuvo nustatyta ($p = 1$), tačiau nustatytos modelio paklaidos neatitinka ($p = 0,005907$) normalumo sąlygos (ribinė $p \geq 0,05$) taikant Anderseno–Darlingo testą. Dėl didelės tiriamų objektų imties normalumo sąlyga nėra labai reikšminga, tačiau nutarta silpnos dangos konstrukcijos atveju tyrimą atlikti mažesnėse grupėse skaidant pagal kelio tipus: magistraliniai, krašto ir rajoninės reikšmės keliai. Kadangi magistralinių kelių ruožų su III DKKG yra tik du, šios dvi išskirtys buvo prijungtos prie rajoninės reikšmės kelių grupės.

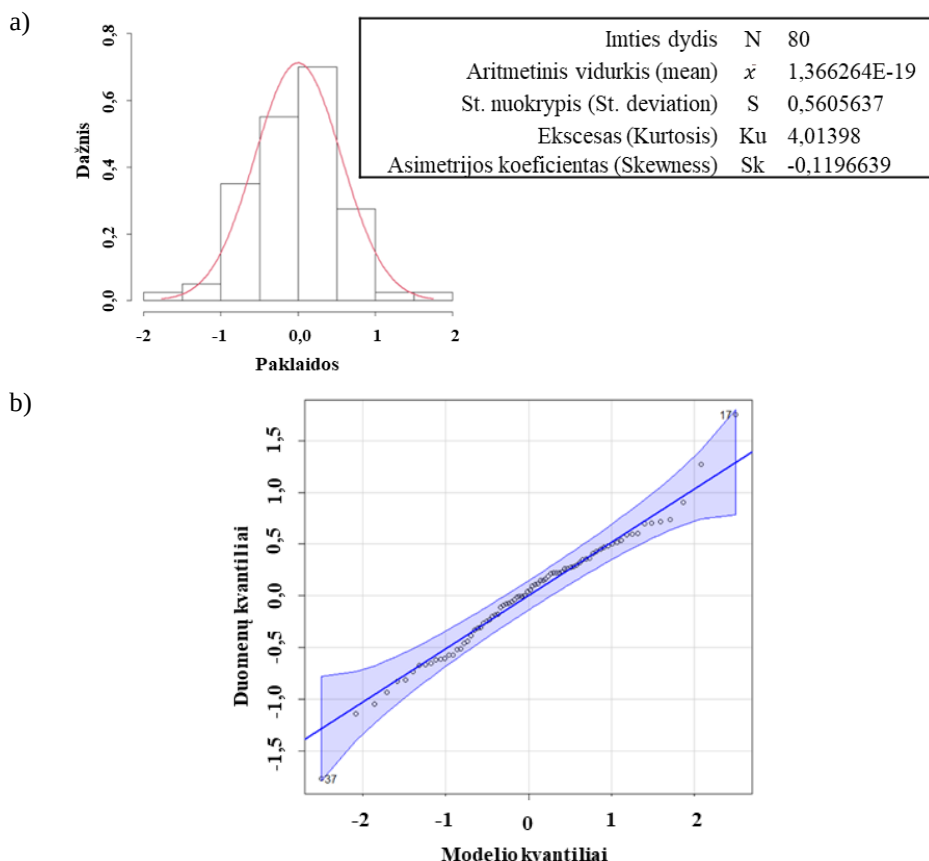
III DKKG krašto kelių ruožų panelinių duomenų fiksuotų efektų regresijos modelio sudarymas

Nagrinėjant III DKKG grupei priskiriamus krašto kelių duomenis buvo stebima, kaip eismo apkrova, naudojimo trukmė ir kelio dangos nelygumas IRI turi įtakos dangos būklės indeksą DBI. Atliekant liekamųjų paklaidų pasiskirstymo vertinimą, nubraižyta liekamųjų paklaidų histograma ir kvantilių palyginimo diagrama (QQ) 3.6 pav. Gauta histograma nėra simetriška, tačiau kvantilių reikšmės išsidėsčiusios arti linijos, o „uodegėlės“ nėra taip stipriai nutolusios nuo šios linijos. Modelio paklaidos atitinka normalumo sąlygas ($p = 0,3027$) taikant Anderseno–Darlingo testą.

Apskaičiuotos eksceso ir asimetrijos koeficiento reikšmės, kurios atitinkamai lygios 4,01 ir $-0,12$ (3.6 pav., a). Atlikus Durbino–Watsono testą, autokoreliacija taip pat nenustatyta ($p = 0,9762$). Atsižvelgiant į gautą koreguoto determinacijos koeficiento reikšmę, galima sakyti, kad regresijos modelis paaiškina (apibrėžia) 60,56 % DBI reikšmių kitimą pasirinkus nepriklausomus kintamuosius. Tai rodo gana stiprų modeliuotų reikšmių ryšį su tikraisiais duomenimis.

$$\widehat{DBI}_{it} = e^{2,081 \cdot ESA_{it} + 0,302 \cdot Amzius_{it} + 1,701 \cdot IRI_{it}} - 0,1, (i = \overline{1, 2, \dots, 20}, t = \overline{1, \dots, 4}, R^2 = 0,6056, r = 0,7782). \quad (3.8)$$

Nustatyta, kad koreliacija yra reikšminga, palyginus apskaičiuotą $r_{\min}$ vertę ir gautą analizės metu koreliaciją r ($r_{\min} = 0,4438 < r = 0,7782$).



3.6 pav. Modelio (3.8 formulė) paklaidų histograma (a) ir kvantilių palyginimo diagrama (b)

Fig. 3.6. Model (Equation 3.8) histogram of errors (a) and the quantile comparison char (b)

Sudarytas dangos būklės indekso DBI prognozės modelis III DKKG krašto keliams priskiriamiems kelių ruožams pateiktas (3.8) formulėje.

III DKKG rajoninių ir magistralinių kelių ruožų panelinių duomenų fiksuotų efektų regresijos modelio sudarymas

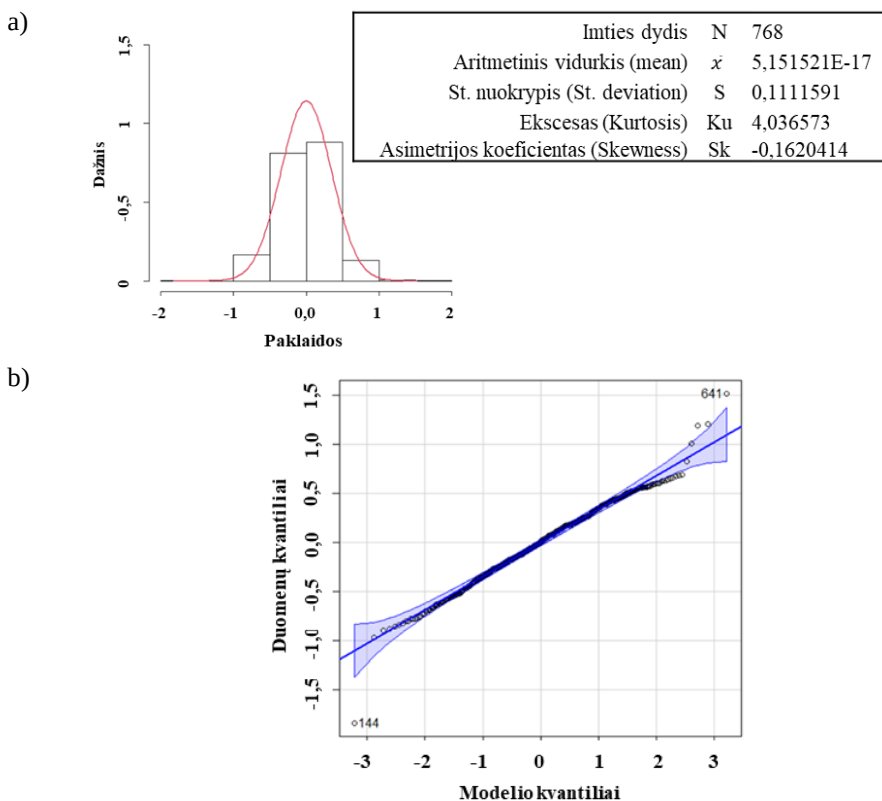
Atlikus III DKKG priskiriamų rajoninių ir magistralinių kelių ruožų būklės duomenų analizę autokoreliacijos pagal Durbino–Vatsonio testą nenustatyta ($p = 1,0$). Gauto modelio paklaidos atitinka ($p = 0,05146$) normalumo sąlygas taikant Anderseno–Darlingo testą. Apskaičiuotos eksceso ir asimetrijos koeficiento reikšmės, kurios atitinkamai lygios 4,04 ir $-0,16$ (3.7 pav., a). Gauta histograma nėra

simetriška, tačiau kvantilių reikšmės išsidėsčiusios arti linijos, o „uodegėlės“ nėra taip stipriai nutolusios nuo šios linijos.

Atliekant liekamųjų paklaidų pasiskirstymo vertinimą, nubraižyta liekamųjų paklaidų histograma ir kvantilių palyginimo diagrama (QQ) (3.7 pav.).

Vertinant koreguoto determinacijos koeficiento reikšmę galima sakyti, kad regresijos modelis paaiškina 67,36 % DBI reikšmių kitimą pasirinkus nepriklausomus kintamuosius. Tai rodo gan stiprų modeliuotų reikšmių ryšį su tikraisiais duomenimis.

$$\widehat{DBI}_{it} = e^{0,762 \cdot \ln(ESA_{it} + 0,35) + 0,342 \cdot Amzius_{it} + 0,889 \cdot IRI_{it}} - 0,55, (i = \overline{1, 2, \dots, 192}, t = \overline{1, \dots, 4}, R^2 = 0,6736, r = 0,8207). \quad (3.9)$$



3.7 pav. Modelio (3.9 formulė) paklaidų histograma (a) ir kvantilių palyginimo diagrama (b)

Fig. 3.7. Model (Equation 3.9) histogram of errors (a) and the quantile comparison chart (b)

Nustatyta, kad koreliacija yra reikšminga, palyginus apskaičiuotą $r_{\min}$ vertę ir gautą analizės metu koreliaciją r ($r_{\min} = 0,1417 < r = 0,8207$).

Sudarytas dangos būklės indekso DBI prognozės modelis silpnos dangos konstrukcijos klasės rajoninės reikšmės keliams priskiriamiems kelių ruožams pateiktas (3.9) formulėje.

3.3. Trečiojo skyriaus išvados

1. Išanalizavus kelio dangos nelygumo rodiklius, matuotus iškart po remonto darbų atliekant kontrolinius patikrinimus, nustatyta, kad statybos darbų metu pasiekiamos daug geresnės kelio dangos nelygumo vertės, negu keliams reikalavimai norminiuose dokumentuose. Automagistralėse ir greitkeluose pasiekiami rezultatai yra vidutiniškai 23 % mažesni, lyginant su leidžiamaisiais maksimaliais dydžiais. Pasiekiamos ir kito tipo kelių mažesnės kelio dangos nelygumo reikšmės: magistralinių – 44 %, krašto ir rajoninės reikšmės kelių – 45 %.
2. Tiriamus ruožus suskirsčius į klasterius pagal kelio tipą ir pritaikytą remonto rūšį, buvo nustatyti vidutiniai dydžiai, kurių būtų galima tikėtis atlikus asfalto dėvimojo sluoksnio atnaujinimą, kapitalinį remontą ar rekonstravimą. Nustatyta, kad, atlikus asfalto dėvėjimo sluoksnio atnaujinimą automagistralės ir greitkelio kelių ruožuose, kelio dangos nelygumas po kelio remonto darbų būtų lygus 0,73 m/km, magistralinių kelių – 0,82 m/km, krašto kelių – 1,42 m/km, rajoninių kelių dangos nelygumas būtų lygus 1,83 m/km. Atlikus kapitalinį remontą kelio dangos nelygumo vertės po kelio remonto darbų būtų tokios: automagistralių ir greitkelių – 0,74 m/km; magistralinių kelių – 0,72 m/km; krašto kelių – 1,42 m/km ir rajoninių kelių – 1,83 m/km. Rekonstravus kelio ruožą, automagistralių ir greitkelių kelio dangos nelygumas būtų 0,8 m/km; magistralinių kelių – 0,86 m/km; krašto kelių – 0,87 m/km; rajoninių kelių – 1,55 m/km.
3. Kelio dangų degradacijos kitimui vertinti ir jos kreivėms sudaryti pasirinkta panelinių duomenų analizė, taikant fiksuotų efektų regresijos modelį, nes tiriami objektai yra heterogeniški ir stebimas tų pačių būklės duomenų kitimas laike. Dėl labai skirtingų kelių ruožų regresorių analizė atlikta objektus suskirstant į klasterius pagal dangos konstrukcijos klasių grupes. Nustatyti reikšmingi ryšiai tarp DBI verčių ir dangos konstrukcijos klasių, pritaikytų ir didelėms transporto apkrovoms (apima DK10–DK100 konstrukcijų klases), ir mažoms (apima DK0.1–DK1 konstrukcijų klases). Nustatyta mažesnė koreliacija ruožuose su DK2 ir DK3 konstrukcijų klases atitinkančiomis konstrukcijomis.

4. Regresinės analizės metu nustatyta, kad tik ketvirtoji įšalo gylio zona yra statistiškai reikšminga. Ši ketvirtoji zona pradėta vertinti projektuojant kelio statinius nuo 2019 m. Galima kelti prielaidą, kad iki 2019 m. taikytas šalčiui atsparios kelių statybos konstrukcijos storis galėjo būti nepakankamas.
5. Išanalizavus užsienio mokslininkų siūlomą regresinį dangos būklės indekso kitimo modelį, kuris priklauso tik nuo kelio dangos nelygumo, nustatyta, kad šio degradacijos modelio taikymas būtų nepakankamas.
6. Sudaryti keturi dangos būklės indekso prognozavimo pablogėjimo modeliai, kelius suskirstant į tris grupes pagal dangos konstrukcijos klasę – didelio eismo apkrovoms pritaikytos dangos (vienas modelis), vidutinio eismo apkrovoms (du modeliai) ir mažo eismo apkrovos (vienas modelis). Šie modeliai yra dangos būklės indekso priklausomybė nuo eismo apkrovų ESA, dangos naudojimo laikotarpio ir kelio dangos nelygumo.

Bendrosios išvados

1. Aukšto išsivystymo lygio šalių kelių tinklo gerai dangos būklei užtikrinti naudojamos turto valdymo sistemos, kurių sudėtinė dalis yra dangų būklės vertinimo sistema. Dangų būklės vertinimo sistemos grindžiamos dangos būklės degradacijos modeliais, kurie tiksliai nusakoma dangos konstrukcijos degradacijos spartą priklausomai nuo aplinkybių (faktinės transporto apkrovos apimtis ir pokytis kelio eksploatacijos metu, kelio kategorija, dangos konstrukcijos klasė ir kiti veiksniai). Šie taikomi modeliai leidžia apskaičiuoti faktinį reikalingą lėšų poreikį pasirinktam paslaugų lygiui bei racionaliai paskirstyti kelių valdytojo lėšas kelių priežiūrai ir atnaujinimui, remiantis kelių tinklo apimties ir būklės duomenimis bei nustatant prioritetą. Be to, esant ribotam finansavimui, galima apskaičiuoti viso kelių tinklo degradavimo spartą priklausomai nuo finansavimo scenarijaus.
2. Analizuojant kelių tinklo dangų būklę, susiduriama su patikimų įvesties duomenų trūkumu. Sudėtingi uždavimų sistemų degradacijos modeliai sudaryti taip, kad jų skaičiavimo algoritmų negali keisti DVS naudotojai. DVS įdiegti degradacijos modeliai yra sudėtingi taikyti tinklo lygmeniu, nes turto valdytojas stokoja duomenų apie savo kelių tinklą. Dažniausiai nežinoma istorinė informacija apie dangos naudojimo lai-

- kotarpį, apie taikytus projektinius sprendinius kelio ir dangos konstrukcijai, nežinomos naudotos medžiagos ar jų mišiniai bei sluoksnių medžiagų nuovargio lygis konkrečiu analizuojamu laikotarpiu. Tokiais atvejais smarkiai nukenčia rezultatų patikimumas.
3. Empirinių, mechanistinių, mechanistinių-empirinių dangos degradacijos modelių nepriklausomi kintamieji išreikšti techninėmis ir eksploatacinėmis charakteristikomis apibrėžia sluoksnių ir medžiagų nuovargio būvius, susietus su transporto eismo intensyvumu, dangos amžiumi ir kitais parametrais. Dangos būklei prognozuoti išskiriami absoliutūs ar padidėjimo, diskretiniai ar tolydūs modeliai. Degradacijos modelių tikslumas didėja, analizės lygiui keičiantis iš tinklo lygmens į objekto lygmenį, nes turimas sukauptas informacijos apie kelio ruožus kiekis yra natūraliai didesnis. Tai leidžia detaliau analizuoti ir tiksliau prognozuoti konkretaus kelio ar jo ruožo dangos būklės kitimą.
 4. Siekiant nustatyti eismo apkrovų, įšalo gylio, šalčio poveikio zonų, taikyto ruožo remonto būdo, dangos konstrukcijos klasės ir kelio dangos nelygumo IRI įtaką DBI kitimui, sudarytas teorinis kelių su asfalto danga būklės prognozavimo modelis. Atlikus regresinę sukaupėtų duomenų analizę nustatyta, kad išanalizuotų rodiklių grupavimas pagal dangos konstrukcijos klasę, kelio dangos nelygumas IRI, dangos amžius ir eismo apkrovos parodė reikšmingus ryšius su DBI vertėmis.
 5. Atliktas valstybinės reikšmės automobilių kelių tinkle esančių ruožų eksperimentinis tyrimas. Iš viso ištirtas 321 objektas, išsidėstęs visoje Lietuvos teritorijoje magistraliniuose, krašto ir rajoninės reikšmės keliuose. Tyrimai atlikti kasmet nuo 2019 iki 2021 m., kurių metu fiksuoti dangos nelygumas, provėžų gylis, vidutinis profilio gylis, plyšiai ir paviršiaus defektai. Remiantis matavimų duomenimi apskaičiuotos DBI vertės ir palygintos tarpusavyje. Nustatyta, kad DBI magistraliniuose, krašto ir rajoniniuose keliuose nuo 2019 iki 2020 m. atitinkamai padidėjo 0,17, 0,20 ir 0,30 balo, o nuo 2020 iki 2021 m. – 0,40, 0,21 ir 0,29 balo.
 6. Eksperimentiniu tyrimu nustatyta, kad statybos darbų metu pasiekiamos daug geresnės kelio dangos nelygumo vertės, negu keliama reikalavimai norminiuose dokumentuose kiekvienam kelio tipui. Automagistralėse ir greitkeliuose pasiekiami IRI rezultatai yra vidutiniškai 23 % mažesni, lyginant su leidžiamaisiais maksimaliais dydžiais. Taip pat pasiekiamos mažesnės kelio dangos nelygumo IRI reikšmės ir kito tipo kelių: magistralinių – 44 %, krašto ir rajoninės reikšmės kelių – 45 %.

7. Analizuojant kelių dangų būklę ir ryšius tarp skirtingų dangos konstrukcijos klasių dangų degradacijos spartos, išskirtos trys pagrindinės grupės. Kiekvienai iš šių grupių priskiriant konkrečias dangos konstrukcijų klasių kategorijas – kelius, pritaikytus didelėms transporto apkrovoms (apima DK10–DK100 konstrukcijų klases), vidutinėms transporto apkrovoms (apima DK2 ir DK3) ir mažoms transporto apkrovoms (apima DK0.1–DK1 konstrukcijų klases) – sudaryti dangos degradacijos modeliai. Pritaikyti mažoms transporto apkrovoms objektai atskirai dar skirstomi į dvi grupes: krašto kelių grupė ir bendra rajoninės reikšmės bei magistralinių kelių grupė.
8. Matematiniais statistikos modeliais sudarytos keturios asfalto dangos degradacijos lygtys, kurios modeliuojant įvertina kelio ruožo naudojimo laikotarpį (amžių), transporto apkrovas ESA ir kelio dangos nelygumą IRI. Šių gautų modelių determinacijos koeficientai: I DKKG – 89,19 %, II DKKG – 69,13 %, III DKKG (krašto kelių) – 60,56 % ir III DKKG (magistralinių ir rajoninių kelių) – 67,36 %. Gauti rezultatai patikrinti dėl autokoreliacijos taikant Durbino–Watsono testą, modelio paklaidos įvertintos taikant Anderso–Darlingo testą, koreliacijos reikšmingumas įvertintas gautus koreliacijos koeficientus palyginus su $r_{\min}$.

Rekomendacijos

1. Lietuvos kelių dangų valdymo sistemoje taikant remonto scenarijus, rekomenduojama naudoti disertacijoje nustatytas teorines kelio dangos nelygumo IRI vertes priklausomai nuo kelio tipo ir taikomo remonto būdo.
2. Atliekant sąnaudų ir naudos analizę arba rengiant investicinius projektus kelių remonto projektams pagrįsti, rekomenduojama naudoti disertacijoje pateiktas kelio dangos nelygumo IRI vertes, priklausančias nuo kelio tipo ir taikomo remonto būdo.
3. Lietuvos kelių dangų valdymo sistemoje įdiegti ir naudoti kelių tinklo lygmeniu disertacijoje sudarytus dangos būklės indekso kitimo modelius.

Literatūra ir šaltiniai

AASHTO (1990). *AASHTO guidelines for pavement management systems*. American Association of State Highways and Transportation Officials.

AASHTO (2008). *Mechanistic-empirical pavement design guide: a manual of practice*. American Association of State Highway and Transportation Officials.

Barauskas, A. (2019). *Miesto aplinkelių poveikio transporto srautų pasiskirstymui gatvių tinkle vertinimas ir modeliavimas* [Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas]. <https://doi.org/10.20334/2019-036-M>

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.

Braga, A. (2005). *Dangų degradacijos modeliai ir jų taikymas Lietuvos automobilių keliams* [Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas]. <https://vb.vgtu.lt/object/elaba:2028088/>

Braga, A., & Čygas, D. (2002). Adaptation of pavement deterioration models to Lithuanian automobile roads. *Journal of Civil Engineering and Management*, 8(3), 214–220. <https://doi.org/10.3846/13923730.2002.10531279>

Busch, C., Skar, A., Holst, M. & Baltzer, S. (2010). *NordFoU PPM – Identification and Selection of Pavement Performance Models*. Report.

Choummanivong, L., & Martin, T. (2019). *Long-Term Pavement Performance Study: Final Report*. Austroads Ltd.

COST Action 325 (1997). *New Road Monitoring Equipment and Methods*.

- Čepaitytė, E. (2016). *Migracijos dinamikos statistinis tyrimas*. Vilniaus universitetas.
- Dabous, S. A., Al-Khayyat, G., & Feroz, S. (2020). Utility-based road maintenance prioritization method using pavement overall condition rating. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 15(1), 126–146. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2020-15.464>
- de Carvalho, R. L. E. (2006). *Mechanistic-empirical design of flexible pavements: a sensitivity study* [Master of Science Thesis. University of Maryland, College Park].
- Deighton Associates Limited. (2014). *dTIMS9. Getting started workbook*. Version 1.0.
- Deix, S., Alten, K., & Weninger-Vycudil, A. (2012). Procedures for cross asset management optimisation. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 48, 2022–2028. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.1175>
- Donev, V., Hoffmann, M., & Blab, R. (2022). Benefit maximisation based on aggregated condition indices: drawbacks for selection of pavement treatments. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(1), 21–38, DOI: 10.1080/10298436.2020.1728533
- Elhadidy, A. A., El-Badawy, S. M., & Elbeltagi, E. E. (2021). A simplified pavement condition index regression model for pavement evaluation. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(5), 643–652. <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1633579>
- Elkins, G. E., Thompson, T. M., Groeges, J. L., Visintine, B., & Rada, G. R. (2013). *Re-formulated pavement remaining service life framework*. FHWA-HRT-13-038. November, 84. <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/13038/13038.pdf>
- Farwick zum Hagen, F., & Lau, F. (2023). Road condition monitoring and assessment in Germany - how to use the data for pavement analysis. In *Roads and Airports Pavement Surface Characteristics* (pp. 254–264). CRC Press.
- Fatokun, A., A. Akintoye, & C. Liyanage. 2015. Renegotiation of public private partnership road contracts: Issues and outcomes. In *Proc., 31st Annual Association of Researchers in Construction Management Conference (ARCOM) Conf.*, edited by A. B. Raiden, and E. Aboagye-Nimo, 1249–1258. Reading, UK: Association of Researchers in Construction Management.
- Gordon, M., Sharp, K., & Martin, T. (2018a). *Guide to asset management-overview part 1: Introduction*. Publication. www.austroads.com.au
- Gordon, M., Sharp, K., & Martin, T. (2018b). *Guide to asset management-processes part 3: Scope of asset management*. Publication. www.austroads.com.au
- Haas, R. (2011). Life cycle management of road assets with emphasis on long life asphalt pavements. In *Proceedings of the Fifty-Ninth Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association (CTAA): Winnipeg, Manitoba* (pp. 61–90).
- Haas, R., Tighe, S., Yeaman, J., & Falls, L. C. (2008). Long term warranty provisions for sustained preservation of pavement networks. In *TAC/ATC 2008 – 2008 Annual Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada: Transportation – A Key to a Sustainable Future*.
- Hall, K. T., Dawood, D., Vanikar, S., Tally Jr, R., Cackler, T., Correa, A., ..., & Voigt, G. (2007). *Long-life concrete pavements in Europe and Canada*. Report No. FHWA-PL-07-027.

- Hudson, W. R., & Flanagan, P. R. (1987). Examination of environmental versus load effects on pavements. *Transportation Research Record*, 34–39.
- Huvstig, A., Erlingsson, S., Hoff, I., & Saba, R. G. (2008). Nord-FoU–Pavement performance models. Part 2: Project level, unbound material. *Advances in Transportation Geotechnics. Proceedings of the International Conference held in Nottingham, UK, 25-27 August 2008* (pp. 173–183). <https://doi.org/10.1201/9780203885949>
- International Organization for Standardization. (2014). *Asset management — Overview, principles, and terminology*. (ISO 55000).
- International Organization for Standardization. (2014). *55001: Asset Management—Management Systems—Requirements* (ISO 55001).
- Jakulytė, S., Laurinavičius, A., & Puodžiukas, V. (2019). Kelio skersinio profilio parinkimo pagal projekcinį vidutinį paros eismo intensyvumą ir sudėtį metodikos analizė. *Mokslas – Lietuvos Ateitis*, 11(0), 1–5. <https://doi.org/10.3846/mla.2019.10589>
- Jansen, D. (2016). ERPUG / DaRTS6-2016 Evaluation and application of TSD devices in Germany. *ERPUG 2016 Conference*. Prague.
- Karballaezadeh, N., Mohammadzadeh S, D., Shamshirband, S., Hajikhodaverdikhan, P., Mosavi, A., & Chau, K. Wing. (2019). Prediction of remaining service life of pavement using an optimized support vector machine (case study of Semnan–Firuzkuh road). *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 13(1), 188–198. <https://doi.org/10.1080/19942060.2018.1563829>
- Kleizienė, R., Vaitkus, A., Židanavičiūtė, J., & Marcinkevičius, E. (2017). Classification of surface temperature for the flexible pavement design. In *10th International Conference “Environmental Engineering”, 27-28 April 2017, Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania* (p. 1–7). VGTU Press.
- Kulkarni, R. B., & Miller, R. W. (2003). Pavement management systems: Past, present, and future. *Transportation Research Record*, 1853, 65–71. <https://doi.org/10.3141/1853-08>
- Lietuvos automobilių kelių direkcija (2015). *Automobilių kelių investicijų vadovas*.
- Lietuvos automobilių kelių direkcija (2018a). *Automobilių kelių eksperimentinių dangų bandomojo ruožo eksploatacinių charakteristikų tyrimai ir stebėsena*. Mokslo tiriamojo darbo ataskaita tarpinio atsiskaitymo 2018-01-02 – 2018-06-30..
- Lietuvos automobilių kelių direkcija (2018b). *Valstybinės reikšmės kelių dangos būklės vertinimo tvarkos aprašas*..
- Lietuvos automobilių kelių direkcija (2019). *Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės KPT SDK 19*.
- Lietuvos automobilių kelių direkcija (2021a). *Valstybinės reikšmės kelių su asfalto danga pažaidų matavimas ir nustatymas. Tyrimų vykdymo veiklos vadovas*.
- Lietuvos automobilių kelių direkcija (2021b). *Valstybinės reikšmės kelių su asfalto danga pažaidų matavimas ir nustatymas. Tyrimų vykdymo veiklos vadovas*.
- Lietuvos Respublikos Seimas. (2000). *Lietuvos Respublikos kelių priežiūros ir plėtros programos finansavimo įstatymas* (2000, spalio 12, Nr. VIII-2032).

Lietuvos Respublikos Vyriausybė. (2013). *Nacionalinė susisiekimo plėtros 2014–2022 metų programa* (2013, gruodžio 18, Nr. 1253).

Lietuvos Respublikos Vyriausybė (2023). *Nutarimas dėl kelių priežiūros ir plėtros programos finansavimo lėšų Naudojimo 2023–2025 metų sąmatos patvirtinimo* (2023, vasario 8, Nr. 75).

Lin, D. J., & Madanat, S. (2002). Development of pavement deterioration models by combining experimental and field data sets. *Applications of Advanced Technologies in Transportation*, 529–536. [https://doi.org/10.1061/40632\(245\)67](https://doi.org/10.1061/40632(245)67)

Lingaitis, V. (2009). *Investicijų efektyvumas plėtojant automobilių kelių infrastruktūrą*. [Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas]. <https://etalpykla.vilnius-tech.lt/handle/123456789/108565>

Litzka, J., & Weninger-Vycudil, A. (2012). Maintenance requirements for state roads in Austria. In *EPAM 2012: Malmö. 4th European Pavement and Asset Management Conference*. Malmö

Litzka, J., Leben, B., Torre, F., La, Weninger-Vycudil, A., Lurdes Antunes, M., de Kokot, D., Mladenovic, G., Brittain, S., & Viner H. (2008). *COST Action 354 – Performance Indicators for Road Pavements, The way forward for pavement performance indicators across Europe*, Final Report. <http://cost354.zag.si/index.php?id=102>

Madanat, S. (1993). Optimal infrastructure management decisions under uncertainty. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 1(1), 77–88. [https://doi.org/10.1016/0968-090X\(93\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0968-090X(93)90021-7)

Malinovski, J. (2011). *Kelių asfalto dangos plyšių didėjimo dinamika ir įtaka automobilių eismo parametrams* [Magistro baigiamasis darbas. Vilniaus Gedimino technikos universitetas].

McPherson, K., & Bennett, C. R. (2005). Success factors for road management systems. In *Infrastructure Reporting and Asset Management. American Society of Civil Engineers*. <https://doi.org/10.1061/9780784409589.ch11>

Morosiuk, G., & Riley, M. (2004). *Modelling road deterioration and works effects in HDM-4 (No. HDM4-volume 6)*. Asian Development Bank.

OECD (2001). *Asset management for the roads sector, road transport and intermodal linkages research programme*, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264193208-en>

Okine, A., & Adarkwa, O. (2013). Pavement condition surveys – overview of current practices. In *Delaware Center for Transportation*, 19716(302). University of Delaware

Paliukaitė, M. (2010). *Klimato įtakos automobilių kelių asfalto dangos konstrukcijos stipriui tyrimai ir vertinimas* [Magistro baigiamasis darbas. Vilniaus Gedimino technikos universitetas].

Park, K., Thomas, N. E., & Lee, K. W. (2007). Applicability of the international roughness index as a predictor of asphalt pavement condition. *Journal of Transportation Engineering*, 133(12), 706–709. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2007\)133:12\(706\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2007)133:12(706))

- Paterson, W. D. O. (1990). Road deterioration and maintenance effects. Models for planning and management. In *Transportation Research Part A: General*, 24(2). [https://doi.org/10.1016/0191-2607\(90\)90027-4](https://doi.org/10.1016/0191-2607(90)90027-4)
- Peraka, N. S. P., & Biligiri, K. P. (2020). Pavement asset management systems and technologies: A review. *Automation in Construction*, 119, 103336. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103336>
- Petkevičius, K., Maskeliūnaitė, L., & Sivilevičius, H. (2019). Determining travel conditions on motorways for automobile transport based on the case study for Lithuanian highways. *Transport*, 34(1), 89–102. <https://doi.org/10.3846/transport.2019.7842>
- Pierce, L. M., & Weitzel, N. D. (2019). *NCHRP synthesis 531: Automated pavement condition surveys. A synthesis of highway practice*. The National Academies Press, Washington, D.C. 10.17226/25513
- Podvezko, V., & Sivilevičius, H. (2013). The use of AHP and rank correlation methods for determining the significance of the interaction between the elements of a transport system having a strong influence on traffic safety. *Transport*, 28(4), 389–403. <https://doi.org/10.3846/16484142.2013.866980>
- Qiao, Y., Flintsch, G., Dawson, A., & Parry, T. (2013). Examining effects of climatic factors on flexible pavement performance and service life. *Transportation Research Record*, i(2349), 100–107. <https://doi.org/10.3141/2349-12>
- Raffaniello A., Bauer M., Safiuddin M., El-Hakim M. (2022). Traffic and climate impacts on rutting and thermal cracking in flexible and composite pavements. *Infrastructures*, 7(8), 100. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7080100>
- Road and Transportation Research Association (2018). *Additional technical terms of contract and guidelines for road monitoring and assessment (ZTV-ZEB-StB)*, FGSV 489. Köln.
- Rusu, L., Taut, D. A. S., & Jecan, S. (2015). An integrated solution for pavement management and monitoring systems. In *Procedia Economics and Finance*, 27(May 2016), 14–21. [https://doi.org/10.1016/s2212-5671\(15\)00966-1](https://doi.org/10.1016/s2212-5671(15)00966-1)
- Salini, R., Xu, B., & Paplauskas, P. (2017). Pavement distress detection with picucha methodology for area-scan cameras and dark images. *Stavební Obzor – Civil Engineering Journal*, 26(1), 34–45. <https://doi.org/10.14311/cej.2017.01.0004>
- Schneider, J., Gaul, A. J., Neumann, C., Hogräfer, J., Wellßow, W., Schwan, M., & Schnettler, A. (2006). Asset management techniques. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 28(9 SPEC. ISS.), 643–654. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2006.03.007>
- Seedahmed, G., & Zumrawi, M. (2020). *Pavement management system study pavement evaluation view project*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26898.40649>
- 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
- Sjögren, L. (2015). History of road profile measurements and current standards in road surface characteristics. In *ERPUG 2015 Conference*. Budapest.

Svensson, M. (2013). *Modeling pavement performance based on data from the Swedish LTPP database: Predicting cracking and rutting* [Coctoral dissertation. KTH Royal Institute of Technology]. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-119863>

The Institute of Asset Management. (2015). *An anatomy of asset management. Version 3.* December, 1–84. www.theIAM.org/AMA

Turto bankas (2022). *Valstybės turto valdymas, naudojimas ir disponavimas 2021 metais. Ataskaita.*

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), 1328. <https://doi.org/10.3390/su8121328>

Vaitkus, A., Kleizienė, R., & Karbočius, M. (2021). Viastructura – A New way of pavement structure design. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 1202(1), 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1202/1/01201>

Vaitkus, A., Vorobjovas, V., Jagniatinskis, A., Andriejauskas, T., & Fiks, B. (2014). Peculiarity of low noise pavement design under Lithuanian conditions. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 9(3), 155–163. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2014.20>

van der Velde, J., Klatter, L., & Bakker, J. (2013). A holistic approach to asset management in the Netherlands. *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(4), 340–348. <https://doi.org/10.1080/15732479.2012.65765>

Vanier, D. J. (2000). Advanced asset management: tools and techniques. In *Innovations in Urban Infrastructure Seminar of the APWA International Public Works Congress* (pp. 39–56). Canada.

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

Vorobjovas, V. (2010). *Mažo eismo intensyvumo kelių funkcinės paskirties užtikrinimas važiavimo sąlygoms gerinti* [Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas]. <https://etalpykla.vilniustech.lt/handle/123456789/109236>

Wadalkar, S. S., Lad, R. K., & Jain, R. K. (2018). Study of pavement performance indicators: RII approach. *Indian Journal of Science and Technology*, 11(22), 1–4. <https://doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i22/121101>

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Paplauskas, P., & Vaitkus, A. (2022). Dependency of pavement roughness level on the type of road works. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 17(1), 74–97. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2022-17.552>

Paplauskas, P.; Vaitkus, A., & Simanavičienė, R. (2023). Road pavement condition index deterioration model for network-level analysis of national road network based on pavement condition scanning data. *The Baltic journal of road and bridge engineering*, 18(3), 70–101. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2023-18.609>

Straipsniai kituose leidiniuose

Paplauskas, P., Vaitkus, A., & Kleizienė, R. (2019). Analysis of flexible pavement performance prediction models based on structural behaviour = Analiza modeli prognozowania stanu technicznego nawierzchni podatnych na podstawie oceny parametrów pracy konstrukcji. *Roads and bridges – Drogi i mosty*, 18(4), 255–265. <https://doi.org/10.7409/rabdim.019.017>

Salini, R., Xu, B., & Paplauskas, P. (2017). Pavement distress detection with picucha methodology for area-scan cameras and dark images. *Stavební Obzor – Civil Engineering Journal*, 26(1), 34–45. <https://doi.org/10.14311/cej.2017.01.0004>

Paplauskas, P., & Vaitkus, A. (2020). Evaluation of the main roads network pavement condition index with a 3D laser scanner system. In *Transport means 2020. Sustainability: research and solutions: Proceedings of the 24th international scientific conference, September 30 – October 02, 2020, online conference* (pp. 475–480). Kaunas University of Technology. ISSN 1822-296X. eISSN 2351-7034.

Summary in English

Introduction

Formulation of problem

In its 2019–2021 strategic action plan, the Conference of the European Directors of Roads (CEDR) prioritized the operational functionality of the road network, focusing on traffic flow capacity and maintaining good road conditions, particularly on high and medium-traffic roads. European economic growth relies on the EU's transport policy, enhancing safety and speed through modern infrastructure. Road infrastructure managers bear immense responsibilities for maintaining public sector assets, including roads and associated structures. Their task involves objectively determining priorities for network maintenance, meeting user expectations, and ensuring a return on investment. Effective management of road infrastructure, fueled by significant funding, prioritizes high-quality roads for safe and efficient travel. Continuous maintenance and timely repairs are essential. Key factors for efficient asset management include evaluating pavement deterioration rates, prioritizing road sections for repair economically, and employing deterioration models to slow network degradation and reduce funding requirements. Implementing a pavement management system allows rational fund distribution, enabling budget planning for future analysis periods.

Relevance of the dissertation

Asset management systems (AMS) or pavement management systems (PMS) are used to plan the repair of the road network and ensure the quality of roads using modern methods. AMS and PMS are tools of organizations that manage and maintain roads, providing objective information and analysis, allowing consistent, cost-effective decisions to be made regarding the maintenance and improvement of the condition of the road network. PMS is a clear and transparent road network planning and maintenance process aimed at minimizing budget costs and environmental impact, maximizing pavement life and user safety. PMS needs to have reliable input data and models of pavement condition changes, action selection algorithms, etc., determined by methods based on long-term observations and research.

The dissertation examines the elements applied in road pavement management systems: pavement condition research, pavement condition assessment, pavement condition modelling, and priority selection for repair.

Research object

The object of the research is the national road network intended for transport traffic in the country, its pavement condition, and deterioration.

Aim of the dissertation

The dissertation aims to create a model for assessing the rate of deterioration of the asphalt pavement of national roads based on the scenarios of the deterioration of the surface condition determined by the analysis of empirical data, as well as the cumulative indicator of the condition of the asphalt surface and its change forecast.

Tasks of the dissertation

To achieve the research goal, the following tasks must be solved:

1. To analyze and evaluate the structure of the national road network its condition and the principles of evaluating its change, as well as the allocated financing for road maintenance and development..
2. To analyze road pavement condition deterioration models and assess their suitability for Lithuanian conditions.
3. To create a theoretical model for assessing the rate of national roads deterioration.
4. To carry out experimental research to assess the state road network in Lithuania and to determine the change in deterioration using a 3D pavement scanner.
5. To analyze and evaluate the relationships between road surface deterioration and road construction class in pavement deterioration models based on the data collected during the experimental study.
6. To compile the PCI deterioration model of the asphalt pavement condition index based on experimental research data.

7. To evaluate the constructed regression model of asphalt pavement deterioration.

Research methodology

To fulfil the aim and objectives of the dissertation, road network pavement condition studies were carried out with mobile road survey equipment RST63, historical data of pavement condition indicators were collected and analyzed, applying statistical regression analysis methods to the road pavement condition index of the determined pavement deterioration curve.

Scientific novelty of the dissertation

During the preparation of the dissertation, the following new and significant results for the science of civil engineering were obtained:

1. Existing road asphalt deterioration models are complex, requiring a large amount of data input about the analyzed road sections. The proposed pavement condition index prediction model in an open pavement management system requires a smaller data sample compared to complex existing models. The simplified new model is suitable for analyzing and evaluating the change in the condition of individual road sections at the level of the road network.
2. In pavement management systems, to model the repair selection scenarios and determine the improvement of the condition indicators, fixed values of the road pavement indicators are assigned after the repair (so-called resets). When analyzing the condition, the sizes of rut depth, cracks, and damage are set to 0 because it is assumed that all these damages to the road pavement are removed after the repair. Up to now, in Lithuania, permissible limit values of unevenness of the road pavement have been determined according to the valid pavement installation rules. The allowable limit values of road pavement unevenness determined and proposed in the work are lower (better) than the PMS applied so far, so a more accurate result of modelling the change in aggregate pavement deterioration is obtained.

Practical value of the research findings

The dissertation presents the IRI values of the unevenness of the road pavement determined from the research, which could be applied in practice when planning road repairs and comparing different types of repairs (different projects). The work divided the determined values of road pavement unevenness into 12 groups, classifying them according to the type of road (motorway, main road, country, and regional road) and the method of repair (renewal of the asphalt wearing layer, major repair, and reconstruction). The application of these values in the pavement management system used in Lithuania will increase the accuracy of the analysis when selecting the repair scenario.

The developed forecasting models for road network pavement condition index aim to replace complex cumulative modelling processes in open-type pavement management systems. These models streamline modelling processes, reducing the need for extensive input data.

Defended statements

1. The rate of change (dynamics) of asphalt pavement deterioration depends on its initial condition (defects) indicator, which is linked to the type of road construction and the quality of work.
2. Forecasting of aggregate deterioration of the pavement condition can be based on the general models of traffic loads ESA, duration of pavement functioning, and IRI of road pavement roughness.

Approval of research findings

Three scientific articles were published on the subject of the dissertation: two in scientific journals included in the *Clarivate Analytics Web of Science* database (Paplauskas et al., 2023; Paplauskas & Vaitkus, 2022) and one in peer-reviewed international conference proceedings (Paplauskas & Vaitkus, 2020).

The results of the research conducted in the dissertation were presented at two scientific conferences in Lithuania and abroad:

- The international conference “Transport Means”, 2020, Kaunas, Lithuania;
- The international conference “30th International Baltic Road Conference”, 2021, Riga, Latvia.

Structure of the dissertation

The dissertation consists of an introduction, three chapters, and a summary of the results.

The volume of the work is 141 pages, excluding the annexes. It contains 24 numbered formulas, 45 figures, and 18 tables. In total, 79 literature sources were used in writing the dissertation.

Acknowledgements

I extend heartfelt gratitude to everyone who has supported and encouraged me throughout the journey of completing this dissertation.

I am deeply indebted to my scientific supervisor, Prof. Dr Audrius Vaitkus, whose guidance, expertise, and invaluable insights have been instrumental in shaping the outcomes of this research. Your mentorship has been pivotal to my success.

I am also profoundly thankful to my beloved wife, Edita, whose unwavering support, patience, and understanding have served as my bedrock. To my dear children, Austėja and Dominykas, for their encouragement, enthusiasm, and occasional distractions. My sincere appreciation goes out to my family – Audronė, Gediminas, Viltė, Rita, and Raimondas – for their unwavering encouragement and support during moments of doubt and anxiety.

Lastly, I express my gratitude to all my friends, colleagues, and mentors who have contributed to my personal and academic growth in countless ways. Your support has been invaluable.

1. Analysis of scientific works on the condition of pavement, rate of deterioration, and choosing a priority for repair

Managing road infrastructure entails the complex responsibility of ensuring the balance between road quality, affordability, and the financial viability of investments made by governmental entities. Pavement management is a pivotal aspect of this endeavor, employing comprehensive data collection and analysis to optimize road maintenance practices. Central to this process are Pavement Management Systems (PMS), which offer a range of solutions tailored to the specific needs of infrastructure managers, including both single and commercial options.

Within PMS, prioritization methods vary, with the “worst first” approach commonly employed in less sophisticated systems. While effective for ranking road sections based on qualitative or economic criteria, this method lacks predictive capabilities and may not adequately consider the broader implications of repair decisions within a single project. Despite its limitations, the “worst first” method remains valuable, particularly in smaller organizations or developing countries where resources may be limited (Donev et al., 2022).

Overall, effective infrastructure management requires a nuanced understanding of various factors, including budget constraints, regulatory requirements, and the long-term goals of road maintenance. By leveraging the capabilities of PMS and incorporating strategic decision-making processes, infrastructure managers can optimize resource allocation and enhance the overall quality and sustainability of road networks.

Road pavement deterioration involves a continuous change in pavement condition due to a combination of factors:

- characteristics of the road structure (properties of materials and their ageing, quality of construction works, the service life of the pavement, design solutions, etc.);
- environmental factors (temperature level and its change, solar radiation, precipitation, frost depth, soils, etc.);
- traffic loads (light and freight transport traffic, traffic density, number of freight transport axles, etc.).

Ensuring road safety and comfort is paramount for users (Litzka et al., 2008), with smoothness and skid resistance crucial criteria. Road owners and engineers rely on performance and functional condition analyses, including defect surveys and bearing capacity measurements. Pavement performance evaluation focuses on level-of-service maintenance, defect extent, structural suitability, and skid resistance.

Accurate prediction of road pavement deterioration is essential for effective infrastructure management (Lin & Madanat, 2002). Pavement condition prediction models, integral to asset management systems, determine decision validity (Huvstig et al., 2008). Life cycle cost analysis (LCCA) relies on pavement condition prediction, with various models applicable at strategic, network, or object levels (Haas, 2011).

The literature distinguishes two modelling levels: network and object. Network-level models predict overall condition changes, while object-level models focus on individual sites with detailed material information (Busch & Asmus, 2010; Kulkarni & Miller, 2003).

These levels shape data input for deterioration models, which consider road pavement construction, traffic intensity, climate, etc. (Braga, 2005; Madanat, 1993).

Pavement condition prediction models include empirical, mechanistic-empirical, mechanistic, and subjective types. Empirical models use statistical regression, while mechanistic-empirical models combine statistical elements with fundamental principles (Braga, 2005). These models determine physical stress causes and calibrate observed condition indicators.

Road maintenance, particularly with asphalt pavement, follows prioritized lists set by the Lithuanian Road Administration, except for strategic and collaborative projects. Repair works are divided into simple asphalt wearing course repair and major repair, reconstruction, and preventive maintenance efforts. Preventive maintenance aims to prolong road lifespan by mitigating deterioration using quick and simple repair technologies like surface repair, while major repair involves restoring or strengthening road structural elements, requiring a technical work project. Simple repairs entail replacing, regenerating, or installing a new thin layer of pavement.

Prioritization of repairs considers pavement condition, traffic intensity, bridge repairs, intersection reconstruction, and proximity to settlements. Sections with the highest scores are addressed first.

Pavement condition prediction models require substantial effort and input data. While empirical models can use data from pavement management systems, mechanistic-empirical models demand detailed data on road surface construction materials, which are typically unavailable in such databases (Huvstig et al., 2008).

The change in pavement condition indicators, such as the International Roughness Index (IRI), follows a sequential process. This includes modelling crack initiation and area increment, erosion, appearance and growth of pits, rut growth, and increase in road surface roughness, factoring in various parameters like pavement properties, traffic volume, age, weather conditions, and repair status (Paterson, 1990).

Such a complex composite deterioration model of one road surface condition indicator illustrates the complexity and problems of the deterioration modelling process when many indicators and coefficients are needed to model the deterioration of one indicator.

All information about road parameters, traffic intensity, condition indicators, and repair history is stored in the KTVIS road database. Information about the design class of the pavement construction, geology and soils, the pavement and base layers that make up the pavement construction, and the materials used to make them are not stored in information systems. Not all road sections have information about the last repair work applied. The application of complex deterioration models is impossible without critical data on the service life of the pavement and the thickness of the structure, the strength properties of the pavement and the structure, and the materials used.

The experimental research for the dissertation aims to establish the relationship between road surface deterioration and various indicators and parameters within the Lithuanian road network, ultimately creating a PCI deterioration model. The study examined indicators such as traffic loads, depth of freezing, zones affected by cold, applied repair works, construction classes of the road surface, and road surface unevenness (IRI). Through analysis, the significance of these indicators for the PCI indicator was assessed, and regression models for pavement condition index deterioration were developed.

2. Asphalt pavement experimental research

The dissertation examines elements concerning road pavement condition management, including determining theoretical values of pavement indicators post-simulated repairs in the pavement management system and predicting pavement condition deterioration. To achieve this, an experimental study was conducted on pre-selected road sections of state importance using mobile road research equipment RST 63. Additional information on pavement unevenness post-construction was obtained from road section databases, along with historical traffic load data. Climatic zones were established for each road section. The study plan is outlined in Figure S.2.1.

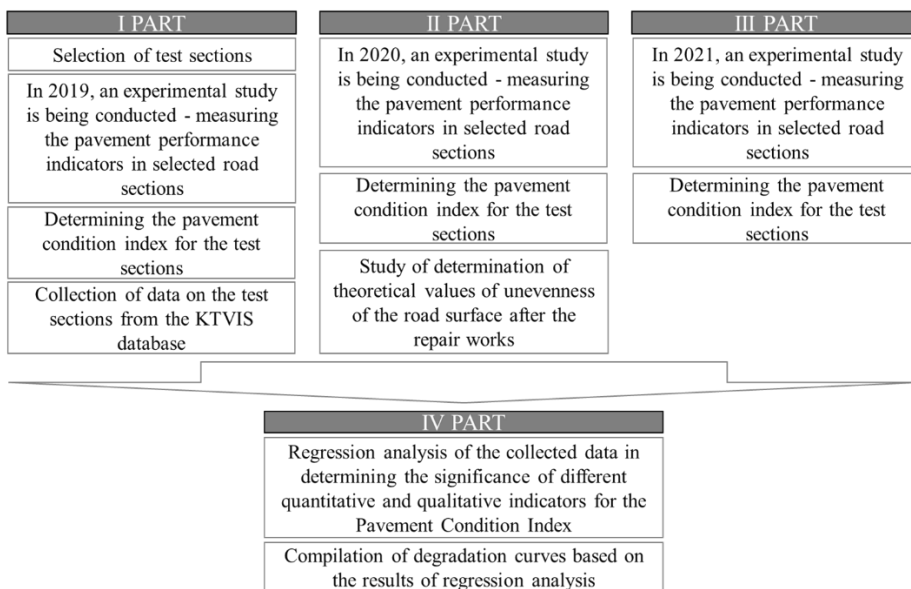


Fig. S.2.1. Research plan

Facilities were selected for experimental research based on post-road works pavement roughness measurement protocols, which are mandatory upon facility handover following construction contracts. Selected road sections, which were repaired between 2008 and 2016, underwent road pavement roughness inspections upon completion of construction. The KTVIS system records the type of repair conducted. The choice of this construction period was influenced by the introduction of the RST 28 laser profilometer in Lithuania in 2007–2008, using the same road surface roughness measurement technology.

A total of 321 road sections were included in the study, covering main roads (65 sections), national roads (59 sections), and regional roads (197 sections) across the country. This extensive sample size facilitates analysis of all road types across diverse geographic regions with varying traffic loads and construction classes.

To construct deterioration curves, an experimental study commenced in 2019 using RST 63 research equipment. This study evaluated pavement conditions in selected road sections, measuring road surface unevenness, rut depth, average profile depth, cracks, and surface defects, with repetitions in 2020 and 2021.

For each analyzed road section, inventory and historical data were gathered, including road type, length, repair type, repair year, historical traffic intensity, construction class, road surface unevenness (measured post-construction), and climatic zones assigned based on geographic location compared to the country's climatic division (frost, freezing depth, and temperature affected zones).

In total, 321 objects with a total length of 1176.644 km were measured each year during the experimental study. Research equipment RST63 was used to make measurements in all traffic lanes on roads with one carriageway. Measurements were made in both directions, on roads with two carriageways. Both lanes of the investigated section were measured in the same direction.

In pavement management systems, after implementing various repair scenarios, pavement condition indicators are reset. The system assumes that after repair, all damages are eliminated, setting indicators like cracks, defects, and rut depths to 0. Road surface roughness varies based on repair type and road category.

Previously, preset limits were used based on asphalt installation rules: highways – 1.0 m/km; main roads – 1.5 m/km; national roads – 2.0 m/km; regional roads – 3.0 m/km. However, actual surface unevenness after repairs often differs from these values, leading to varying initial condition indicators.

One area of research involves analyzing International Roughness Index (IRI) measurement protocols post-repair, determining achievable average IRI values. Data analysis groups road sections into clusters based on road type (motorways, main roads, national roads, and regional roads) and repair type (asphalt wearing layer renewal, major repair, and reconstruction).

To assess the surface condition of the investigated road sections, the following characteristics were recorded during measurements: road surface unevenness, rut depth, various types of cracks (transverse, longitudinal, and networks), and areas of potholes and patches. The RST63 software provided additional characteristics after processing the data: road surface roughness IRI (m/km), rut depth (mm), average rut depth (mm), cracks (%), and surface defects (%). These characteristics were then recalculated into the Pavement Condition Index (PCI) using the algorithm described in Subsection 3.2.3.

Descriptive sample statistics, correlational analysis, and regression data analysis were conducted to determine the significance of different parameters. The research aimed to establish the relationship between road surface deterioration and various factors, including traffic load, frost depth, frost effect zone, recent repair methods, road construction class, and surface unevenness.

A fixed-effects regression model was selected to construct the deterioration curves due to the heterogeneity of the observed data, particularly when evaluating individual road sections. Confidence intervals for the average of the analyzed data vary, with some data groups showing narrower intervals while others wider, both across different measurement years and when examining each object separately. Given the diverse nature of the regres-

sors (individual road sections), the analysis was conducted by dividing the data into clusters based on pavement construction class groups (GRCC), mirroring the approach used in regression data analysis to determine significant factors.

Each investigated object underwent four observation (measurement) times: the initial observation occurred immediately after construction works (all objects were repaired between 2008–2016 and marked as PCIo). Subsequent observations were conducted during the doctoral study years: 2019, 2020, and 2021.

The interrelationships between the Pavement Condition Index (PCI) and road surface roughness International Roughness Index (IRI) were analyzed. The dependence of IRI value on PCI assessment was examined by dividing the analyzed sections into separate groups based on two classifiers: road type and PCI group (assessment). PCI was categorized into five groups (Very Good, Good, Fair, Poor, and Very Poor), resulting in a total of 15 groups. The objective was to determine if IRI values increase with higher PCI values. It was found that as the PCI score declines, the average road surface roughness IRI increases.

An inverse evaluation of the dependence of the PCI value on the IRI was performed. The analyzed sections were divided into separate groups according to two criteria – road type and IRI group (assessment). The IRI was divided into five groups (Very Good, Good, Fair, Poor, and Very Poor) according to the magnitude of the IRI value. A total of 15 groups were formed. The study found that as the IRI assessment “deteriorates”, i.e., as the value of IRI increases, the average value of road surface condition index PCI also increases.

3. Compilation of asphalt deterioration curves and their application in Lithuanian pavement management system

The road roughness indicators of the asphalt surface, measured post-repair during control inspections, were analyzed. Road sections were grouped into clusters based on road type and type of repair, resulting in 12 groups. The analysis results are presented in Table S.3.1.

After repairing the asphalt-wearing layer on highways and main roads, the road surface unevenness post-repair was determined to be 0.73 m/km and 0.82 m/km, respectively, representing reductions of 27% and 45% compared to regulatory requirements. Similarly, on national and regional roads, the post-repair unevenness was projected to be 1.42 m/km and 1.83 m/km, respectively, reflecting reductions of 29% and 39% from regulatory limits. For major repairs, projected road surface roughness values were as follows: highways – 0.74 m/km, main roads – 0.72 m/km, national roads – 0.89 m/km, and regional roads – 1.43 m/km. These values were respectively 26%, 52%, 56%, and 52% lower than regulated thresholds. After road section reconstruction, projected unevenness values were: highways – 0.80 m/km, main roads – 0.86 m/km, national roads – 0.87 m/km, and regional roads – 1.55 m/km. These represented reductions of 20%, 43%, 57%, and 48% from regulatory values.

Table S.3.1. Clusters of national significance roads and their determined asphalt surface roughness values

Road type	Road work	Average value, m/km
Highways	Renewal of asphalt-wearing layer	0.73
Highways	Major repair	0.74
Highways	Reconstruction	0.8
Main roads	Renewal of asphalt-wearing layer	0.82
Main roads	Major repair	0.72
Main roads	Reconstruction	0.86
National roads	Renewal of asphalt-wearing layer	1.42
National roads	Major repair	0.89
National roads	Reconstruction	0.87
Regional roads	Renewal of asphalt-wearing layer	1.83
Regional roads	Major repair	1.43
Regional roads	Reconstruction	1.55

The data analysis was continued by performing a multiple (not pairwise) regression analysis of the accumulated research data. In the beginning, a linear regression model was created, including the considered indicators (with pseudo-variables): road age (X_1), traffic loads (X_2), pavement construction classes (X_3 , X_4 , ..., X_9), frost zones (X_{10} , X_{11} , X_{12}), temperature affected zones (X_{13} , X_{14}), cold affected zones (X_{15} , X_{16}) and type of construction (X_{17} , X_{18}). A model was created to determine the dependence of road surface deterioration (Y) on the following indicators for each year (Equation S.3.2):

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^{18} \beta_j \cdot X_j + \varepsilon, \quad (\text{S.3.2})$$

The built-up regression models revealed significant influences on road surface deterioration estimates from road age, traffic load, surface structures DK 0.1, DK 0.3, DK 1, and the 3rd frost zone. In this analysis, insignificant regressors were discarded, and various model variants were tested.

Continuing the regression analysis, the qualitative parameter of road type (main road, national road, and regional road) was included. The model variables consisted of road age (X_1), traffic load (X_2), 3rd frost zone (X_3), main road (X_4), and national road (X_5). The obtained adjusted coefficients of determination, presented in Table S.3.4, illustrate the extent to which the linear regression model describes the data dispersion. While the obtained values of the adjusted coefficient of determination satisfy the Rmin condition, they are relatively low.

To assess the influence of pavement structures on pavement deterioration, pseudo-variables of pavement structure class were incorporated into the regression model. Eight classes of road surface structures were grouped into three generalized categories based on design loads (Table S.3.2).

The analysis was conducted separately for different groups of pavement structure classes, with data from each year analyzed individually to create regression models incorporating road age (X_1), traffic loads (X_2), and road type (X_4 and X_5).

Regression analysis revealed varying significant indicators across different years. Further exploration focused on grouping road structure strength, which showed a significant influence on pavement deterioration. The study continued by performing a regression analysis of panel data considering the strength of the road construction grouping.

Table S.3.2. Grouping of pavement structure classes into groups

Road construction class	Design load A (ESALs), mln	Name	Marking
DK 100	> 32	Pavement adapted (designed) for high-traffic load	I GRCC
DK 32	> 10–32		
DK 10	> 3.0–10		
DK 3	> 2.0–3.0	Pavement adapted (designed) for medium-traffic loads	II GRCC
DK 2	> 1.0–2.0		
DK 1	> 0.3–1.0	Pavement adapted (designed) for low-traffic load	III GRCC
DK 0.3	> 0.1–0.3		
DK 0.1	≤ 0.1		

Panel data regression analysis was then performed, considering the strength of the grouped road construction. Utilizing logarithmic values of PCI in the regression model improved data description.

In GRCC group I, comprising 56 observed data points and four-time references, the regression model (Equation S.3.3) was formulated:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{1i} + \beta_2 \cdot x_{2i} + \beta_3 \cdot x_{3i} + \varepsilon_i, (i = \overline{1, n}) \quad (\text{S.3.3})$$

To assess the adequacy of the created model, residual error analysis is performed by checking the normality and independence (autocorrelation) of the residual errors. During the assessment of the distribution of residual errors $\varepsilon_i, (i = \overline{1, n})$, a histogram of residual errors and a quantile comparison chart (QQ) are drawn (Figure S.3.1).

The histogram shows slight asymmetry, but the quantile values closely match the line, indicating minimal tail deviation. The Anderson–Darling test suggests the model errors adhere to normality ($p = 0.1471$). Kurtosis and skewness were calculated at 3.14 and -0.32, respectively. (Figure S.3.1, part a).

Autocorrelation testing yielded a non-significant result ($p=0.9676$). The regression model explains 79.56% of the variation in PCI values, indicating a strong correlation with the actual data.

Following analysis, the PCI prediction model for road sections in GRCC I was derived (Equation S.3.4).

$$\widehat{PCI}_{it} = e^{0,209 \cdot \ln(AADT_{it+1}) + 0,103 \cdot Age_{it} + 0,126 \cdot IRI_{it}} - 1, (i = \overline{1, 2, \dots, 56}, t = \overline{1, \dots, 4}, R^2 = 0,7956, r = 0,8919) \quad (\text{S.3.4})$$

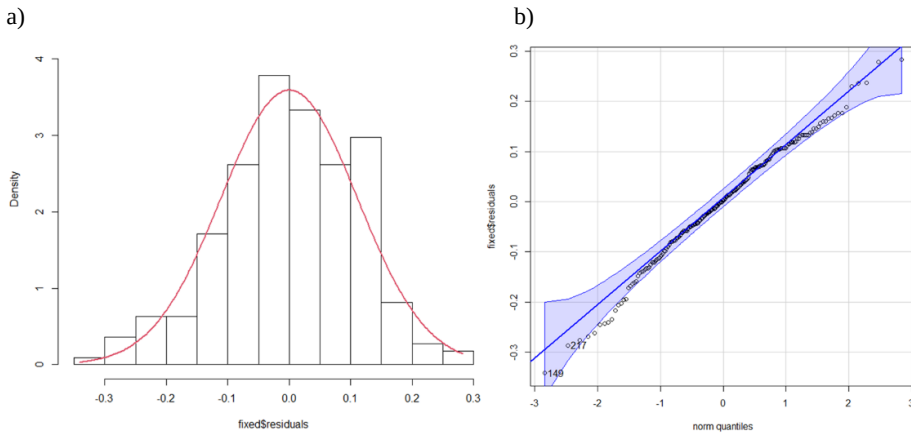


Fig. S.3.1. Model (Equation S.3.4) histogram of errors and the quantile comparison chart

Upon examining data from the II GRCC group, it was observed that traffic load, road age, and road surface roughness (IRI) influence the Pavement Condition Index (PCI). Autocorrelation testing using the Durbin–Watson test did not detect any significant autocorrelation ($p = 0.9806$).

The model errors satisfy normality conditions ($p = 0.05335$) based on the Anderson–Darling test. The coefficient of kurtosis and asymmetry were calculated as 3.59 and -0.36, respectively. The adjusted coefficient of determination indicates that the regression model explains 69.13% of the variation in PCI values using the selected independent variables, demonstrating a reasonably strong relationship between simulated and real data.

Based on the analysis, a PCI prediction model for the pavement condition index was compiled for road sections classified as II GRCC (Equation S.3.5).

$$\widehat{PCI}_{it} = e^{0,770 \cdot \ln(AADT_{it}+1) + 0,149 \cdot Age_{it} + 0,560 \cdot IRI_{it}} - 0,5, (i = \overline{1,2,\dots,53}, t = \overline{1,\dots,4}, R^2 = 0,6913, r = 0,8314) \quad (S.3.5)$$

Upon analyzing the data for sections categorized under III GRCC, it was noted that traffic load, duration of use, and road surface unevenness (IRI) influence changes in the Pavement Condition Index (PCI).

The adjusted coefficient of determination from the study indicates that the regression model accounts for 65.69% of the variation in PCI values using the selected independent variables, suggesting a reasonably strong correlation between modelled and observed data.

Autocorrelation testing using the Durbin–Watson test did not reveal significant autocorrelation ($p = 1$). However, the model errors did not meet the normality condition ($p = 0.005907$) according to the Anderson–Darling test, although the significance of this deviation is diminished due to the large sample size. To address this, smaller groups were investigated by dividing them based on road types: highway, national, and district roads.

Since there are only two trunk road sections with III GRCC, they were grouped with roads of district significance.

Analyzing the data from regional roads classified under the III DKKG group, it was observed that traffic load, road age, and IRI influence the PCI.

The histogram revealed asymmetry, but quantile values closely align with the line, and the tails are not significantly distant from it. Model errors met normality conditions ($p = 0.3027$) according to the Anderson–Darling test. The coefficient of kurtosis and asymmetry were calculated as 4.01 and -0.12, respectively. Additionally, the Durbin–Watson test showed no autocorrelation ($p = 0.9762$). The adjusted coefficient of determination indicates that the regression model explains 60.56% of the variation in PCI values using the selected independent variables, indicating a sufficiently strong relationship between simulated and real data.

The PCI prediction model of the pavement condition index was created for road sections classified as III GRCC regional roads (Equation S.3.6).

$$\widehat{PCI}_{it} = e^{2,081 \cdot AADT_{it} + 0,302 \cdot Age_{it} + 1,701 \cdot IRI_{it}} - 0,1, (i = \overline{1, 2, \dots, 20}, t = \overline{1, \dots, 4}, R^2 = 0,6056, r = 0,7782) \quad (S.3.6)$$

After analyzing the data of regional and main road sections classified as III DKKG, no autocorrelation was detected according to the Durbin–Watson test ($p = 1.0$). The errors of the obtained model met the conditions of normality ($p = 0.05146$) as per the Andersen–Darling test. The coefficient of kurtosis and asymmetry were calculated as 4.04 and -0.16, respectively.

Based on the obtained value of the adjusted coefficient of determination, the regression model explains 67.36% of the variation in PCI values through the selected independent variables. This shows a reasonably strong relationship between the simulated values and the real data.

$$\widehat{PCI}_{it} = e^{0,762 \cdot \ln(AADT_{it} + 0,35) + 0,342 \cdot Age_{it} + 0,889 \cdot IRI_{it}} - 0,55, (i = \overline{1, 2, \dots, 192}, t = \overline{1, \dots, 4}, R^2 = 0,6736, r = 0,8207) \quad (S.3.7)$$

A prediction model of the pavement condition index PCI was created for road sections classified as roads of the regional value of weak pavement construction class (Equation S.3.7).

General conclusions

1. Asset management systems are used to ensure the good pavement condition of the road network in developed countries, the component of which is the pavement condition assessment system. Pavement condition assessment systems are based on pavement condition deterioration models, which accurately determine the rate of pavement structure deterioration depending on the circumstances (volume of actual traffic load and change during road operation, road category, pavement construction class and other factors). These applied models allow calculating the actual required funds for the selected service level and rationally

allocating the road manager's funds for road maintenance and renewal, based on data on the extent and condition of the road network and determining priority. In addition, with limited funding, it is possible to calculate the rate of deterioration of the entire road network depending on the funding scenario.

2. Road network analysis often suffers from inadequate input data, impacting the reliability of closed-system deterioration models. These models, integrated into Pavement Management Systems (PMS), lack flexibility as users cannot modify their calculation algorithms. Additionally, the absence of historical data regarding pavement age, design specifications, material compositions, and layer fatigue levels hampers result reliability.
3. Independent variables in empirical, mechanistic, and mechanistic-empirical pavement deterioration models, based on technical and operational characteristics, assess layer and material fatigue linked to traffic intensity, pavement age, and other factors. These models, whether absolute or incremental, discrete or continuous, vary in accuracy depending on the level of analysis, from network to object level. Higher granularity allows for more comprehensive data, enabling a more precise prediction of road or section conditions.
4. A theoretical model for predicting the road condition with asphalt pavement was developed to assess the impact of various factors such as traffic loads, frost depth, frost effect zones, repair methods, pavement construction class, and road surface roughness (IRI) on PCI. Regression analysis of accumulated data revealed significant correlations between PCI values and indicators grouped by pavement construction class, road surface roughness (IRI), pavement age, and traffic loads.
5. An experimental study was conducted on 321 sections across Lithuania's state road network, including main, national, and regional roads, from 2019 to 2021. Annual measurements of pavement unevenness, rut depth, average profile depth, cracks, and surface defects were recorded to calculate PCI values. Results showed that PCI increased by 0.17, 0.20, and 0.30 points, respectively, on main, national, and regional roads from 2019 to 2020 and by 0.40, 0.21, and 0.29 points, from 2020 to 2021.
6. Experimental research revealed that road construction achieved significantly better surface unevenness values than regulatory requirements for each road type. On highways and freeways, average IRI values were 23% lower than permitted maximums, while on other roads, such as main roads IRI values were 44% lower, national, and regional roads – 45% lower.
7. Analysis of road pavement conditions and deterioration rates categorized pavement construction classes into three main groups: high-traffic load roads (DK10–DK100), medium-traffic load roads (DK2 and DK3), and low-traffic load roads (DK0.1–DK1). Pavement deterioration models were created accordingly. Low-traffic load roads were further subdivided into two groups: national roads and a general group comprising regional and main roads.
8. Four asphalt pavement deterioration models were developed through mathematical statistical modelling. These models assess pavement age, traffic loads

(ESALs), and road pavement unevenness (IRI) during simulation. The coefficients of determination for these models are: I RCCG – 89.19%; II RCCG – 69.13%; III RCCG (for national roads) – 60.56%; and III RCCG (for main and regional roads) – 67.36%. Autocorrelation was checked using the Durbin–Watson test, model errors were evaluated with the Anderson–Darling test, and correlation significance was determined by comparing the obtained coefficients with $r_{\min}$.

Recommendations

1. In the context of implementing repair strategies within the Lithuanian road pavement management system, it is advisable to incorporate the theoretical IRI values of road roughness delineated in the dissertation. These values should be tailored according to the specific road type and the corresponding repair method employed.
2. For the computation of cost-benefit analyses and the formulation of investment initiatives aimed at supporting road repair endeavors, it is prudent to leverage the IRI values indicative of road surface roughness as outlined in the dissertation. These values should be customized based on the classification of the road and the nature of the implemented repair technique.
3. In the Lithuanian road pavement management system, implement and use the pavement condition index models compiled in the dissertation at the level of the road network.

Priedai

A priedas. Dangos būklės indekso skaičiavimo pavyzdys

A priedas. Dangos būklės indekso skaičiavimo pavyzdys

1. Pradiniai duomenys

Automatizuotų matavimų metu nustatyti kelio ruožo dangos būklės rodikliai (kelio dangos nelygumas, provėžų gylis, vidutinis profilio gylis, plyšiai ir paviršiaus defektai), kurie pateikti A.1 lentelėje.

A.1 lentelė. Išmatuoti kelio ruožo dangos būklės rodikliai

Table A.1. Measured measured pavement performance parameters

Parametras	Žymėjimas	Vertė	Matavimo vnt.
Nelygumas	IRI	2,42	m/km
Provėžų gylis	RUT	4,71	mm
Vidutinis profilio gylis	MPD	1,15	mm
Plyšiai	TP_PL	2,92	%
Paviršiaus defektai	TP_PD	26,14	%
Paviršiaus defektai (bitumo išplaukimas)	TP_PD*	0,00	%

2. Atskirų kelio dangos būklės rodiklių vertinimas

Vadovaujantis Valstybinės reikšmės kelių dangos būklės vertinimo tvarkos aprašu, apskaičiuojami kelio dangos nelygumo, provėžų ir tekstūros būklės indeksai. Apskaičiuoti būklės indeksams naudojamos transponavimo formulės pateiktos A.2 lentelėje. Toje pačioje lentelėje pateikti ir gauti rezultatai.

3. Kombinuotų kelio dangos būklės indeksų vertinimas

Pirmiausia perskaičiuojami būklės indeksai, i įvertinant juos svoriniais koeficientais kiekvienam kombinuotam indeksui atskirai, pagal kiekvieno būklės indekso įtaką. Apskaičiuoti komforto būklės indeksui skaičiuoti naudojami svoriniais koeficientais išreikšti (įvertinti) būklės indeksai. Jie pateikti A.3 lentelėje ir indeksuojami mažėjančia tvarka nuo I_1 iki I_5 (A.3 lentelė).

A.2 lentelė. Būklės indeksų apskaičiavimas**Table A.2.** Calculation of condition indices

Para- metras	BI žymė- jimas	Transponavimo funkcija	Re- zul- tatas
Nely- gumas	BI_N	$MAX(0; MIN(5; (2 \cdot IRI - 1,02)))$	1,81
Provė- žos	BI_P	$MAX(0; MIN(5; (0,2 \cdot RUT)))$	0,94
Viduti- nis pro- filio gy- lis	BI_T	$MAX(0; MIN(5; (7,0 - 6,9 \cdot MPD)))$	0,00
Plyšiai	BI_PL	$\begin{cases} \text{Jei } TP_{CR} \geq 4,96 \%, \text{ tai } BI_Pl = 5; \\ \text{Jei } TP_{CR} < 4,96 \%, \text{ } MAX(0; -0,0669 \cdot TP_{CR}^2 + 1,1379 \cdot TP_{CR}). \end{cases}$	2,75
Pavir- šiaus defektai	BI_PD	$\begin{cases} \text{Jei } TP_{SD} \geq 6,9 \%, \text{ tai } BI_Pd = 5; \\ \text{Jei } TP_{SD} < 6,9 \%, \text{ } MAX(0; -0,0942 \cdot TP_{SD}^2 + 1,3413 \cdot TP_{SD}). \end{cases}$	5,00
Pavir- šiaus defektai (bitumo išplau- kimas)	BI_PD*	$\begin{cases} \text{Jei } TP_{SD} \geq 4,96 \%, \text{ tai } BI_Pd = 5; \\ \text{Jei } TP_{SD} < 4,96 \%, \text{ } MAX(0; -0,0669 \cdot TP_{SD}^2 + 1,1379 \cdot TP_{SD}). \end{cases}$	0,00

A.3 lentelė. Apskaičiuotų būklės indeksų įvertinimas svoriniais koeficientais ir eilės nustatymas komforto indeksui skaičiuoti**Table A.3 lentelė.** Evaluation of the calculated condition indices by weighting factors and determining the order for the calculation of the comfort index

BI žymė- jimas	BI vertė	Svorinis koefi- cientas	Išreikšta BI vertė	Eilės tvarka (žymė- jimas)*
BI_N	1,81	1	1,81	2 (I₂)
BI_P	0,94	0,7	0,66	4 (I₄)
BI_T	0,00	0,4	0,00	5 (I₅)
BI_PL	2,75	0,5	1,38	3 (I₃)
BI_Pd	5,00	0,6	3,00	1 (I₁)

* Eilės tvarka nustatoma nuo didžiausios išreikštos BI reikšmės iki mažiausios.

Apskaičiuoti saugumo būklės indeksui skaičiuoti naudojami svoriniais koeficientais išreikšti (įvertinti) būklės indeksai. Jie pateikti A.4 lentelėje ir indeksuojami mažėjančia tvarka nuo I_1 iki I_5 (A.3 lentelė).

A.4 lentelė. Apskaičiuotų būklės indeksų įvertinimas svoriniais koeficientais ir eilės nustatymas saugumo indeksui skaičiuoti

Table A.4. Evaluation of the calculated condition indices by weighting factors and determining the sequence for the calculation of the safety index

BI žymėjimas	BI vertė	Svorinis koeficientas	Išreikšta BI vertė	Eilės tvarka (žymėjimas)*
BI_P	0,94	1,0	0,94	1 (I_1)
BI_T	0,00	0,667	0,00	2 (I_2)
BI_Pd (bitumo išplaukimas)	0,00	0,667	0,00	3 (I_3)

* Eilės tvarka nustatoma nuo didžiausios BI reikšmės iki mažiausios.

Apskaičiuoti struktūrinio būklės indeksui skaičiuoti naudojami svoriniais koeficientais išreikšti (įvertinti) būklės indeksai. Jie pateikti A.5 lentelėje ir indeksuojami mažėjančia tvarka nuo I_1 iki I_5 (A.3 lentelė).

A.5 lentelė. Apskaičiuotų būklės indeksų įvertinimas svoriniais koeficientais ir eilės nustatymas struktūriniam indeksui skaičiuoti

Table A.5. Evaluation of the calculated condition indices by weighting factors and determination of order for the calculation of the structural index

BI žymėjimas	BI vertė	Svorinis koeficientas	Išreikšta BI vertė	Eilės tvarka (žymėjimas)*
BI_PL	2,75	1,0	2,75	1 (I_1)
BI_N	1,81	0,667	1,21	2 (I_2)
BI_P	0,94	0,556	0,52	3 (I_3)

* Eilės tvarka nustatoma nuo didžiausios BI reikšmės iki mažiausios.

Apskaičiuojami kombinuoti komforto, saugumo ir struktūrinis būklės indeksai. Jų apskaičiavimo formulės ir gauti rezultatai pateikti A.6 lentelėje.

A.6 lentelė. Kombinuotų būklės indeksų apskaičiavimas**Table A.6.** Calculation of combined condition indices

Kombinuotas būklės indeksas KBI	Būklės indekso žymėjimas	Skaičiavimo formulė	Rezultatas
Komforto	KBI_komf	$\min \left[5; I_1 + \frac{p}{100} \cdot (I_2, I_3, \dots, I_n) \right]$	3,19
Saugumo	KBI_saug	$\min \left[5; I_1 + \frac{p}{100} \cdot (I_2, I_3, \dots, I_n) \right]$	0,94
Struktūrinis	KBI_strukt	$\min \left[5; I_1 + \frac{p}{100} \cdot (I_2, I_3, \dots, I_n) \right]$	2,93

4. Suminio kelio dangos būklės indekso vertinimas

Pirmiausia perskaičiuojami kombinuoti būklės indeksai, įvertinant juos svoriniais koeficientais pagal kiekvieno KBI įtaką suminiam būklės indeksui. Svoriniai koeficientai pateikti A.7 lentelėje. Gauti rezultatai indeksuojami mažėjančia tvarka nuo I_1 iki I_3 (A.3 lentelė).

A.7 lentelė. Apskaičiuotų kombinuotų būklės indeksų įvertinimas svoriniais koeficientais ir eilės nustatymas suminiam būklės indeksui skaičiuoti**Table A.7.** Evaluation of the calculated combined condition indices by weighting factors and determination of order for the calculation of the total condition index

Kombinuotas būklės indeksas KBI	Žymėjimas	KBI vertė	Svorinis koeficientas	Išreikšta KBI vertė	Eilės tvarka (žymėjimas)*
Komforto	KBI_komf	3,19	0,7	2,233	2 (I_2)
Saugumo	KBI_saug	0,94	1,0	0,94	3 (I_3)
Struktūrinis	KBI_strukt	2,93	0,8	2,344	1 (I_1)

* Eilės tvarka nustatoma nuo didžiausios BI reikšmės iki mažiausios.

Apskaičiuojamas suminis būklės indeksas pagal A.8 lentelėje pateiktą formulę.

A.8 lentelė. Suminio būklės indekso apskaičiavimas

Table A.8. Calculation of the pavement condition index

	Būklės indekso žymėjimas	Skaiciavimo formulė	Rezultatas
Suminis būklės indeksas	DBI	$\min \left[5; I_1 + \frac{p}{100} \cdot \overline{(I_2, I_3)} \right]$	2,66

Rezultatas: Nagrinėjama kelio ruožo danga yra **Patenkinamos** ($DBI = 2,66$) būklės.

Paulius PAPLAUSKAS

VALSTYBINĖS REIKŠMĖS KELIŲ ASFALTO DANGOS
BŪKLĖS BLOGĖJIMO SPARTOS VERTINIMO MODELIS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
statybos inžinerija (T 002)

A MODEL FOR ASSESSING THE RATE OF DETERIORATION
OF ASPHALT PAVEMENT CONDITION OF NATIONAL ROADS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Civil Engineering (T 002)

Lietuvių kalbos redaktorė Rita Malikėnienė
Anglų kalbos redaktorė Jūratė Griškėnaitė

2024 05 06. 13,3 sp. I. Tiražas 20 egz.
Leidinio el. versija <https://doi.org/10.20334/2024-027-M>
Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius
Spausdino UAB „Ciklonas“,
Žirmūnų g. 68, 09124 Vilnius