

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Darjušas MUČINIS

KARŠTAI REGENERUOTO ASFALTO
MIŠINIO KOMPONENTŲ SĄVEIKOS
MODELIAVIMAS IR JO NAUDOJIMO KELIŲ
DANGOS KONSTRUKCIJOJE TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (02T)



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2011

Disertacija rengta 2007–2011 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.
Disertacija ginama doktorantūros pabaigoje

Mokslinis vadovas

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

Konsultantas

prof. habil. dr. Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos
universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

VG TU leidyklos TECHNIKA 1959-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-039-1

© VG TU leidykla TECHNIKA, 2011

© Darjušas Mučinis, 2011

darjusas.mucinis@problematika.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Darjušas MUČINIS

MODELLING OF THE INTERACTION
COMPONENT'S OF RECYCLED HOT MIX
ASPHALT AND RESEARCH ITS USE IN THE
ROAD PAVEMENT CONSTRUCTION

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (02T)



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA2011

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2007–2011.

(The dissertation is defended as an external work.) – *įrašoma, jeigu reikia*

Scientific Supervisor

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

Consultant

Prof Dr Habil Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

Reziumė

Disertacijos tikslas – pateikti mokslškai pagrįstą komponentų sąveikos dinamikos modelį ir jos rezultatus, leidžiančius projektuoti bei gaminti kokybiškus karštai maišytus asfalto mišinius su Lietuvos kelių dangoms naudoto asfalto granulėmis.

Disertacijoje sprendžiami šie pagrindiniai uždaviniai:

- Atlikti paiešką, surinkti, dalykiškai susisteminti ir išanalizuoti mokslo darbus, kuriuose tirama: asfaltinės dangos irties veiksniai ir jų įtaka naudotam asfaltui; senų ir naujų medžiagų sąveika; regeneruoto asfalto mišinio savybės; regeneravimo proceso technologijos.
- Sumodeliuoti naudoto asfalto homogeniškumą lemiančius veiksniai.
- Sumodeliuoti dviejų rūšių sumaišyto bitumo ar kitos atnaujinančiosios medžiagos teorinę klampą ir seno bei naujo bitumų maišymosi dėl difuzijos dvisluoksnyje plėvelėje dinamiką.
- Pateikti susistemintus asfaltinės dangos regeneravimo principus.
- Surinkti duomenis apie Lietuvoje išgaunamo naudoto asfalto kiekių dinamiką bėgant metams.
- Ištirinėti Lietuvos keliuose ir miesto gatvėse frezuoto bei išlaužto ir sutrupinto naudoto asfalto granulių komponentines sudėtis ir savybes.
- Nustatyti pridedamo atnaujinančio bitumo rūšies ir procentinio kiekio įtaką regeneruoto karštai maišyto asfalto (KMA) mišinio fiziniams ir mechaniniams Maršalo rodikliams, taip pat regeneruoto suminio bitumo savybėms.
- Nustatyti su skirtingu kiekiu naudoto asfalto granulėmis regeneruoto KMA mišinio atsparumą vėžių susidarymui.
- Pateikti naujus deterministinio ir stochastinio modeliavimo principus ir nustatyti naudoto asfalto granulių kiekio ir savybių įtaką regeneruoto mišinio komponentinei sudėčiai ir jos vienalytiškumui.

Disertacijos tema paskelbti keturi moksliniai straipsniai: du – mokslo žurnaluose, įrašytuose į *Thomson ISI Web of Science* duomenų bazę, vienas – recenzuojamame tarptautinės konferencijos leidinyje, įtrauktame į *Thomson ISI Proceedings* duomenų bazę, vienas – užsienio tarptautinės konferencijos pranešimų medžiagos recenzuojamame leidinyje.

Abstract

The purpose of this dissertation is to provide a science-based assessment methodology for the interaction among the components and the results of this interaction. The methodology shall help to design and to produce high quality hot-mix asphalt mixtures with granules of recycled asphalt pavement of Lithuanian roads.

The main objectives include the following:

The research was conducted; scientific works were collected, systemized and analyzed in order to study: the factors of asphalt pavement distresses and their influence on the performance of recycled asphalt, the interaction between old and new materials, the properties of recycled asphalt pavement mixture, and on the recycling process technologies.

Factors determining the homogeneity of recycled asphalt pavement were modeled.

The theoretical viscosity was modeled for two types of blended bitumen or for another rejuvenator. The dynamics of old and new bitumen mixing due to the diffusion process occurring in the two-layer film was also modeled.

Systemized principles of asphalt pavement recycling are provided.

The data was collected to show the dynamics of the amount of recycled asphalt pavement used in Lithuanian over the years.

The component composition and properties of granules of milled, broken and crushed recycled asphalt taken from Lithuanian roads and city streets were studied.

The influence of rejuvenating bitumen type and its percentage amount on physical and mechanical Marshall Parameters of recycled hot-mix asphalt mixture and on the properties of total recycled bitumen was determined.

The rutting resistance of recycled hot-mix asphalt mixture was determined by taking different amounts of granules of recycled asphalt pavement.

New deterministic and stochastic modeling principles are presented and the influence of the amount and properties of asphalt granules on the component composition and homogeneity of recycled mixture was determined.

The theme of the dissertation is published in four scientific articles: two in scientific journals, included in *Thomson ISI Web of Science* database, one in the edition of the international conference (under review), included in *Thomson ISI Proceedings* database, and one in the international conference proceedings (under review).

Sąvokos

Asfaltas – mineralinių medžiagų ir bituminio rišiklio mišinys. Prireikus gali būti dedama priedų. Bituminis rišiklis gali būti iš bitumo pagamintas polimerais modifikuotas bitumas, minkštintasis, skiestasis bitumas ar bituminė emulsija. Tam tikros sudėties natūralaus asfalto randama ir gamtoje.

Naudotas asfaltas – frezuotas arba išlaužtas asfaltas.

Frezuotas asfaltas – naudotas asfaltas, gautas frezuojant kelio dangos konstrukcijos asfalto sluoksnius.

Išlaužtas asfaltas – naudotas asfaltas, gautas išlaužus ar išėmus plokščius asfalto luitus arba plokščių asfalto luitų gabalus.

Asfalto granulės – naudotas asfaltas, gautas frezuojant kelio asfalto sluoksnius (prireikus vėliau papildomai smulkinant) arba gautas išlaužus ar išėmus plokščius asfalto luitus arba plokščių asfalto luitų gabalus ir vėliau juos smulkinant (trupinant). Naudotas asfaltas (granulės) turi būti žymimas santrumpa RA (*Reclaimed Asphalt*), prieš kurią pateikiamas asfalto dalelės (smulkinio) dydžio žymėjimas U , o po jos – mineralinės medžiagos dydžio žymėjimas d/D mm (U RA d/D). Pavyzdys: 40 RA 0/8: naudotas asfaltas, kurio mineralinės medžiagos viršutinio sieto akučių dydis yra 8 mm, asfalto smulkininių didžiausių dalelių dydis – 40 mm.

Mineralinių medžiagų stambumas – naudotame asfalte esančios mineralinės medžiagos dydžio žymėjimas apatinio (d) ir viršutinio (D) sietų akučių dydžiais, išreikštas d/D . Naudoto asfalto d beveik visada bus lygus 0.

Naudoto asfalto dalelės stambumas – naudotame asfalte esančio didžiausio asfalto smulkinio (grūdėlio) dydis, išreikštas sieto akučių dydžiu (U).

Naudoto asfalto dalelės dydis U – mažiausias sieto akučių, pro kurias persijojama 100 % asfalto dalelių, dydis mm.

Asfalto mišinys – bituminis mišinys, susidedantis iš mikro užpildo (mineralinių milteilių), smulkiosios (smėlio) bei stambiosios (skaldos) mineralinės medžiagos ir bituminio rišiklio (bitumo). Prireikus gali būti dedama priedų (ir naudoto asfalto granulių).

Mišinio sudėtis – mišinio sudėties išraiška sudedamųjų medžiagų (komponentų) santykiniu kiekiu, granulimetrinės sudėties kreive, bitumo kiekiu ir reikiamų priedų kiekiu, procentais, mišinyje.

Konglomeratas – sukauptas, surinktas, mechaniškas, įvairiarūšis ko nors junginys; netvarkingas rinkinys, sanokaupa, mišinys.

Smulkinių granulimetrinė sudėtis – asfalto granulių išskirstymas, išreikštas masės, pereinančios per nustatytą skaičių sietų, procentais, į frakcijas pagal dalelių dydžius. Smulkinių granulimetrinė sudėtis neapibrėžia mineralinių medžiagų, kurios yra asfalto granulių sudėtinė dalis, granulimetrinės sudėties.

Adhezija – prikibimas. Kietųjų kūnų, kietojo kūno ar skysčio, nesimaišančių skystųjų susiliejančių paviršių sukibimas dėl kūnų dalelių sąveikos.

Kohezija – sankiba. Medžiagos dalelių (molekulių, atomų ar jonų) sukibimas dėl molekulių sąveikos ar cheminio ryšio jėgų.

Difuzija – sklidimas, išsiliesimas: 1) sklidimas, plitimas, sklaidymasis, skverbimasis; 2) medžiagos sklidimas dėl atomų, molekulių, jonų ir kitų dalelių judėjimo toje pačioje medžiagoje arba susiliejančiose medžiagose.

Regeneracija – atgavimas, atnaujinimas, pakitusio objekto atkūrimas: 1) *chemijoje* – medžiagos, pakitusios dėl cheminių arba fizinių veiksnių, pradinės būsenos atkūrimas, pvz., naudoto asfalto; 2) *technikoje* – pradinių produktų išgavimas iš panaudotų gamybos produktų, pvz., iš naudoto asfalto regeneruojamas (sukiuoju garintuvu atskiriamas) pasenęs bitumas.

Asfaltenai – didelės molekulinės masės organiniai junginiai, esantys naftoje ar iš jos pagamintame bitume.

Regeneruoti – atkurti prarastas naudotos medžiagos savybes; padaryti vėl tinkamą naudoti.

Granulės – smulkūs, tankūs grūdo pavidalo kurios nors medžiagos trupiniai, pvz., naudoto asfalto granulės.

Bitumas – gamtinis arba dirbtinis sočiųjų angliavandenilių mišinys, dažniausia kietas, plastiškas arba klampus.

Maišinys – vienu maišymu pagaminto karštai maišyto asfalto (KMA) mišinio dalis.

Žymėjimai

Simboliai

d – apatinio sieto akučių dydis;

D – viršutinio sieto akučių dydis;

U – naudoto asfalto dalelės dydis;

$\bar{p}_i$ – pilnutinės išbiros per i -tąjį sietą vidurkis;

s_p – pilnutinės išbiros per sietą standartinis nuokrypis;

R^2 – determinacijos koeficientas;

Pen_{25} – birumo penetracija 25 °C temperatūroje 0,1 mm adatos įsmigimo gyliu;

T_{SP} – bitumo minkštėjimo temperatūra, °C;

I_p – bitumo penetracijos indeksas (skaičiuojamas iš Pen_{25} ir T_{SP} verčių);

T_{FBT} – bitumo trapumo temperatūra pagal Frasą, °C;

S – asfalto bandinio pastovumas pagal Maršalą, kN;

F – asfalto bandinio takumas pagal Maršalą, mm;

S/F – asfalto bandinio pastovumo ir takumo santykis (Maršalo koeficientas);

V_m – asfalto bandinio liekamasis akytumas (tuštymėtumas, % pagal tūrį);

n – ėminių skaičius imtyje (imties didumas);

B – Bartleto kriterijaus statistika.

Santrumpos

AB – asfaltbetonis (angl. *Asphalt Concrete* – AC);

B – bitumas kaip komponentas;

IRI – kelio dangos lygumo tarptautinis rodiklis (angl. *International Roughness Index*);

KDK – kelio dangos konstrukcija (angl. *Pavement*);

KMA – karštai maišytas asfaltas (angl. *Hot Mix Asphalt*);

MM – regeneruotame ar kitame asfalte ar mineralinėje medžiagoje esantis mineralinių miltelių komponentas (mažesni už 0,063 mm grūdeliai);

NAG – naudoto asfalto granulės (norminių dokumentų tekste šis trumpinys beveik nevartojamas, išskyrus TRA ASFALTAS 08 aštuntąjį puslapį);

RA (*Reclaimed Asphalt*) – naudotas asfaltas;

RAD (*Reclaimed Asphalt Pavement*) – regeneruoto asfalto danga;

SK – regeneruotame ar kitame asfalte ar mineralinėje medžiagoje esantis skaldos komponentas (didesnis už 2 mm grūdeliai);

SM – regeneruotame ar kitame asfalte ar mineralinėje medžiagoje esantis smėlio komponentas (0,063–2 mm grūdeliai);

STP – sunkioji transporto priemonė;

TKTI – VĮ Transporto ir kelių tyrimo institutas;

VMPEI – transporto priemonių vidutinis metinis paros eismo intensyvumas.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	3
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	4
Darbo mokslinis naujumas ir jo reikšmė	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	5
Ginamieji teiginiai	6
Darbo rezultatų aprobavimas.....	6
Disertacijos struktūra.....	7
1. AUTOMOBILIŲ KELIŲ ASFALTINĖS DANGOS REGENERAVIMO TYRIMŲ APŽVALGA	9
1.1. Eksploatuojamos asfaltinės dangos irties priežastys, veiksniai, dinamika ir įtaka regeneravimui	9
1.2. Senos asfalto dangos ir naujų medžiagų sąveikos procesai	11
1.3. Regeneruoto asfalto mišinio ir iš jo įrengtos kelio dangos savybės	16
1.4. Asfalto dangos regeneravimo technologijų analizė	18
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	20

2. NAUDOTO ASFALTO KOKYBĖS IR REGENERAVIMO PROCESŲ TEORINIS MODELIAVIMAS	23
2.1. Naudoto asfalto homogeniškumą lemiantys veiksniai.....	23
2.2. Dviejų rūšių sumaišyto bitumo ar kitos atnaujinančiosios medžiagos teorinė klampa	28
2.3. Seno ir naujo bitumų sluoksnių maišymasis regeneruotoje plėvelėje	33
2.4. Susistemintieji asfalto dangos regeneravimo moksliniai principai.....	40
2.5. Antrojo skyriaus išvados	44
3. NAUDOTO ASFALTO GRANULIŲ IR REGENERUOTO MIŠINIO EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI	47
3.1. Naudoto asfalto panaudojimas užsienio šalyse ir Lietuvoje.....	47
3.2. Lietuvoje išfrezuoto naudoto asfalto komponentinio homogeniškumo tyrimas ...	50
3.2.1. Tyrimų metodika.....	50
3.2.2. Frezuoto ir išlaužto asfalto granulių didumas, jose esančio vandens ir bitumo kiekis	52
3.2.3. Frezuoto RA ir jo granulių granulimetrinė sudėtis.....	55
3.3. Nauju bitumu atnaujinto naudoto asfalto fizinių ir mechaninių savybių bei bitumo tyrimas.....	59
3.3.1. Tyrimo metodika.....	59
3.3.2. Su skirtingos rūšies ir kiekio atnaujinančiu bitumu regeneruoto naudoto asfalto granulių mišinio savybės	62
3.3.3. Regeneruoto suminio bitumo savybių tyrimas.....	64
3.4. Regeneruoto asfalto atsparumo vėžių susidarymui tyrimas	66
3.4.1. Laboratoriniai tyrimai nustatant pagal Maršalą mišinių sudėtį ir savybes.....	66
3.4.2. Asfalto mišinio atsparumo vėžių susidarymui tyrimas	69
3.5. Trečiojo skyriaus išvados	74
4. KARŠTAI REGENERUOJAMO ASFALTO KOMPONENTINĖS SUDĖTIES OPTIMIZAVIMAS	77
4.1. Maksimalus leidžiamas naudoto asfalto kiekis regeneruotame KMA mišinyje	77
4.2. Regeneruojamos asfalto dangos mineralinių medžiagų variacijos įtakos regeneruoto KMA mišinio homogeniškumui stochastinis modeliavimas.....	80
4.2.1. Regeneruoto asfalto komponentinės sudėties variacijai įtakos turintys veiksniai.....	80
4.2.2. Regeneruojamo karštai maišyto asfalto mišinio sudėties projektas	82
4.2.3. Medžiagų granulimetrinės sudėties variacija	82
4.2.4. Normaliojo skirstinio verčių stochastinio modeliavimo algortimas.....	83
4.2.5. Naudoto asfalto granulių homogeniškumo ir procentinio kiekio įtakos regeneruoto karštai maišyto asfalto mišinio granulimetrinės sudėties stabilumui modeliavimo pavyzdys	84
4.3. Ketvirtojo skyriaus išvados	91

BENDROSIOS IŠVADOS	93
LITERATŪROS ŠALTINIAI.....	95
AUTORIAUS PUBLIKACIJOS DISERTACIJOS TEMA	105

Contents

INTRODUCTION	1
The problem under study.....	1
The relevance of dissertation topic.....	2
The subject under study.....	3
The aim of the study.....	3
The objectives of the study.....	3
Research methods.....	4
The scientific novelty and importance of the dissertation	4
The practical significance of the dissertation results	5
Scientific positions for the defense.....	6
The approbation of dissertation research results	6
The structure of the dissertation	7
1. REVIEW ON THE RESEARCH STUDY OF ASPHALT PAVEMENT RECYCLING	9
1.1. Causes, factors and dynamics of in-service asphalt pavement distresses and their influence on the recycling	9
1.2. Interaction processes between old asphalt pavement and new materials.....	11
1.3. Properties of recycled asphalt mixture and of recycled asphalt pavement	16
1.4. The analysis of asphalt pavement recycling technologies	18
1.5. Conclusions of the first section	20

2. THEORETICAL MODELING OF THE QUALITY OF RECYCLED ASPHALT AND OF RECYCLING PROCESSES.....	23
2.1. Factors determining the homogeneity of recycled asphalt	23
2.2. Theoretical viscosity of two types of blended bitumen or rejuvenating material	28
2.3. Mixing of old and new bitumen layers in the regenerated film.....	33
2.4. Systemized principles of asphalt pavement recycling	40
2.5. Conclusions of the second section.....	44
3. EXPERIMENTAL ANALYSIS OF GRANULES OF RECYCLED ASPHALT AND OF RECYCLED MIXTURE	47
3.1. The use of recycled asphalt in foreign countries and in Lithuania	47
3.2. The component analysis of the homogeneity of recycled asphalt milled in Lithuania	50
3.2.1. Research methods.....	50
3.2.2. The size of granules of milled or broken asphalt, water and bitumen content	52
3.2.3. The granulometric composition of milled RA and its granules	55
3.3. The analysis of physical and mechanical properties of recycled asphalt rejuvenated with new bitumen and the analysis of bitumen	59
3.3.1. Research methods.....	59
3.3.2. The properties of RA mixture recovered with different types and amounts of rejuvenating bitumen.....	62
3.3.3. The analysis of properties of recycled total bitumen	64
3.4. The analysis of the rutting resistance of recycled asphalt	66
3.4.1. Laboratory tests to determine the composition and properties of mixtures using Marshall method.....	66
3.4.2. The analysis of the rutting resistance of asphalt mixture	69
3.5. Conclusions of the third section	74
4. OPTIMIZATION OF COMPONENT COMPOSITION OF RECYCLED HOT-MIX ASPHALT	77
4.1. The maximum allowable amount of recycled asphalt in hot-mix asphalt mixture.....	77
4.2. The stochastic modeling of the influence of variation of mineral materials of recycled asphalt pavement on the homogeneity of recycled hot-mix asphalt mixture.....	80
4.2.1. Factors affecting the variance of component composition of recycled asphalt	80
4.2.2. Composition design of recycled hot-mix asphalt mixture.....	82
4.2.3. Variation of the granulometric composition of materials	82
4.2.4. Stochastic modeling algorithm of the normal distribution of values.....	83
4.2.5. Simulation model of the influence of the homogeneity and percentage of granules of recycled asphalt on the stability of the granulometric composition of recycled hot-mix asphalt mixture.....	84

4.3. Conclusions of the fourth section	91
GENERAL CONCLUSIONS	93
BIBLIOGRAPHY	95
LIST OF AUTHOR'S PUBLICATIONS ON THE SUBJECT OF THE DISSERTATION	105

Išvadas

Problemos formulavimas

Judėjimo laisvė yra viena iš pagrindinių žmonijos vertybių. Jai reikšti ir plėtoti naudojamos įvairios transporto rūšys, iš kurių svarbiausia ir tinkama individualiam bei visuomeniniam keleivių ir krovinių vežimui yra kelių transportas. Automobilių keliai yra svarbiausias ir brangiausias šalies transporto sistemos elementas, nes jų tinklo tankis, techniniai parametrai ir būklė tiesiogiai veikia ekonominę, socialinę ir kultūrinę vystymąsi, aktyvina tarptautinius mainus, turizmą ir prekybą. Patikimai gyvuojantis, racionalus ir saugus kelių tinklas, pritaikytas naudotojų reikmėms, sudaro pagrindines sąlygas vystyti gamybos ir negamybinės veiklos sritis (sektorius), kurti rinkos santykius, plėtoti šalies ekonomiką bei nacionalinius išteklius.

Šiems tikslams tenkinti reikia tiesti aukštesnės kokybės ir ilgaamžės kelių dangas, veikiamas ne tik besikeičiančio klimato bei oro sąlygų veiksnių, bet ir nuolat intensyvėjančio ypač sunkiųjų transporto priemonių eismo ir didėjančių ašių apkrovų. Lietuvoje kaip ir daugelyje kitų šalių automobilių kelių danga rengiama iš asfalto mišinių, gaminamų iš mineralinių medžiagų, surištų organiniu rišikliu – bitumu. Dėl jo senėjimo asfaltinės dangos eksploatacijos laikotarpiu vyksta negrįžtami procesai, bloginantys asfaltinės dangos savybes ir spartinantys jos irtį iki visiško netinkamumo važiuoti transporto priemonėms.

Įprastas asfaltinės dangos vienacikliškumas neatitinka dabarties ir ateities visuomenės bei kelių tiesėjų poreikių. Brangstant ir senkant naftos ištekliams, iš naftos išskiriant vis daugiau komponentų degalams ir cheminėms medžiagoms gaminti, saugant aplinką nuo naudotų medžiagų taršos, siekiant ekonominės naudos, ieškoma būdų kartotinai naudoti eksploatuotą asfaltinių dangų medžiagą, t. y. regeneruoti. Daugiaciklis asfaltinės dangos medžiagų naudojimas gali būti efektyvus tik išmanant jų irties priežastis ir procesus, komponentų savybių pokyčių mastą, jų struktūros atkūrimo būdus bei technologijas, senų ir naujų (atnaujinančiųjų) medžiagų sąveikos dinamiką ir šiuos dalykus mokslškai pagrindus.

Asfaltinės dangos regeneravimo procesai yra sudėtingesni už asfalto mišinių gamybos iš naujų medžiagų procesus, nes, regeneruojant naudotą asfaltą, sąveikauja naujos ir senos medžiagos. Pastarųjų savybės būna pakitusios iki skirtingo lygmens, nulemta įvairių dar nepakankamai ištirtinėtų stochastinio pobūdžio veiksnių. Didelė senos asfaltinės dangos struktūros ir savybių variacija riboja jo leidžiamąjį procentinį kiekį, pridedamą gaminant karštai maišyto asfalto (KMA) mišinį.

Darbo aktualumas

Sprendžiama aktuali statybos inžinerijos mokslo problema. Disertaciniame darbe pirmą kartą Lietuvoje atlikti asfaltinės dangos regeneravimo tyrimai. Regeneravimo procesų ir technologijų kūrimo mokslo darbai buvo pradėti išvystytos ekonomikos šalyse ir tęsiami iki dabar. Šių šalių mokslininkai ir tyrėjai paskelbė mokslo darbų, kurių bendrosios teorinės nuostatos yra universalios ir visuotinai tinkamos. Tačiau kiekviena šalis turi specifinių, tik jai arba mažai šalių grupei būdingų aplinkybių, kurios nulemia asfaltinės dangos regeneravimo procesų dinamiką ir efektyvumą. Tiesiant naują asfaltinę dangą laikomasi nacionalinių standartų, medžiagų savybės ir kilmė skiriasi, mišinių gamybos ir tankinimo technologijos, nulemtos netobulų įrenginių ir nepakankamos darbo kultūros, taip pat būna skirtingos. Gamybos srityje dirbantys kelininkai iš praktinės patirties žino, kad frezuotas naudotas automagistralės asfaltas yra aukštesnės kokybės nei žemos techninės kategorijos kelių ar miesto gatvių asfaltas. Lietuvos klimato ir oro sąlygos bei jų kaita per metus turi savitumų, darančių įtaką ypatingai asfaltinės dangos degradacijai. Todėl regeneracijai skirta asfalto danga negali būti aprašoma vien teoriniais modeliais – ją reikia laboratorijoje visapusiškai ištirti ir įvertinti. Tiriant iš pakankamo dydžio imčių naudotą asfaltą, modeliuojant seno bei naujo rišiklio sąveiką ir regeneravimo procesus, skirtingais metodais bei technologiniais režimais bandant regeneruotus asfalto mišinius, pasiekiamas geriausias rezultatas, leidžiantis mokslo tyrimų duomenis pagrįstai taikyti praktikoje ir gilinti ūkiui svarbios šakos pažinimą.

Tyrimų objektas

Eksploatuoti netinkančios asfaltinės dangos granulių vienalytiškumas; jų sąveika su atstatančiosiomis medžiagomis; regeneruoto karštai maišyto asfalto mišinio fizinės-mechaninės savybės; regeneruoto KMA mišinio atsparumas vėžėms; minimalus leidžiamas dozuoti RA granulių kiekis gaminant KMA mišinį.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – pateikti moksliskai pagrįstą komponentų sąveikos dinamikos modelį ir jos rezultatus, leidžiančius projektuoti ir gaminti kokybiškus karštai maišyto asfalto (KMA) mišinius su Lietuvos kelių dangos naudoto asfalto granulėmis.

Darbo uždaviniai

Siekiant užsibrėžto tikslo, buvo sprendžiami šie uždaviniai:

1. Atlikti paiešką, surinkti, dalykiškai susisteminti ir išanalizuoti mokslo darbus, skirtus tirti: asfalto dangos irties veiksniams ir jų įtakai naudotam asfaltui; senų ir naujų medžiagų sąveikai; regeneruoto asfalto mišinio savybėms; regeneravimo proceso technologijoms.
2. Sumodeliuoti naudoto asfalto RA homogeniškumą lemiančius veiksnius.
3. Sumodeliuoti dviejų rūšių sumaišyto bitumo ar kitos atnaujinančios medžiagos teorinę klampą ir seno bei naujo bitumų maišymosi dėl difuzijos dvisluoksnyje plėvelėje dinamiką.
4. Pateikti susistemintus asfaltinės dangos regeneravimo mokslinius principus.
5. Surinkti duomenis apie Lietuvoje išgaunamo naudoto asfalto kiekių dinamiką bėgant metams.
6. Ištirinėti Lietuvos keliuose ir miesto gatvėse frezuoto bei išlaužto ir sutrupinto RA granulių komponentinę sudėtį ir savybes.
7. Nustatyti pridedamo atnaujinančio bitumo rūšies ir procentinio kiekio įtaką KMA mišinio fiziniams ir mechaniniams Maršalo rodikliams, taip pat regeneruoto suminio bitumo savybes.

8. Nustatyti su skirtingu RA granulių kiekiu regeneruoto KMA mišinio atsparumą vėžių susidarymui.
9. Pateikti naujus deterministinio ir stochastinio modeliavimo principus ir nustatyti RA granulių kiekio bei savybių įtaką regeneruoto mišinio komponentinei sudėčiai ir jos vienalytiškumui.

Tyrimų metodika

Darbe taikyti šie tyrimų metodai: matematiniai analiziniai, grafinio ir matematinio modeliavimo, matematinės statistikos; eksperimentiniai laboratoriniai, stochastinio modeliavimo; eksperimentiniai natūriniai (naudoto asfalto savybių kelių dangoje).

Darbo mokslinis naujumas ir jo reikšmė

Darbo mokslinį naujumą ir jo reikšmę rodo šie svarbūs rezultatai:

1. Iškelta hipotezė, kad eksploatuoti netinkamos kelio ar kito transporto infrastruktūros elemento (aerodromo riedėjimo tako, automobilių stovėjimo aikštelės) asfaltinės dangos pasenusią medžiagą galima naudoti daugeliu ciklų (kartotinai), jei atkuriamos pakitusios jos savybės iki artimų KMA mišinio, pagaminto vien iš naujų medžiagų, savybėms, reglamentuotoms šalies norminiuose dokumentuose.
2. Pirmą kartą susisteminti ir sumodeliuoti veiksniai, lemiantys RA granulių nevienalytiškumą, nustatytas stochastinis jų pobūdis ir įtakos vienalytiškumui išankstinis nuspėjamas.
3. Sumodeliuotas naudotame asfalte esančio seno bitumo ir jį atnaujinančio naujo rišiklio mechaninio bei difuzinio maišymosi ir suminio bitumo klampos mineralinius grūdėlius gaubiančiose dvisluoksnėse plėvelėse procesas.
4. Susisteminti asfaltinės dangos regeneravimo moksliniai principai, leidžiantys, taikant teorines nuostatas, praktikoje gauti geriausios struktūros ir savybių regeneruotus karštai maišyto asfalto mišinius.
5. Anketinės apklausos būdu pirmą kartą nustatytas naudoto asfalto gavybos ir naudojimo Lietuvos kelių tiesybos įmonėse būdas, leidžiantis manyti, kad šios medžiagos kiekiai kaip ir kitose šalyse gana dideli ir kiekvienais metais turi tendenciją didėti.

6. Eksperimentais iš reprezentatyvių imčių nustatytas ir statistiškai įvertintas RA granulių komponentinis vienalytiškumas, pateikta originali granulimetrinės sudėties dispersijų lyginimo metodika.
7. Ištirtinėta skirtingos rūšies ir kintančio kiekio atnaujinančio naujo bitumo įtaka regeneruoto KMA mišinio fiziniams ir mechaniniams rodikliams, nustatomiems pagal Maršalo metodiką.
8. Nustatyta nauju atnaujinančiu bitumu atkurtų seno bitumo, esančio RA, savybių standartinių rodiklių priklausomybė nuo atnaujintojo procentinio kiekio ir rūšies, leidusi įvertinti regeneravimo proceso veiksmingumą.
9. Su skirtingu naudoto asfalto kiekiu pagaminus vienodos granulimetrinės sudėties ir optimaliu suminio bitumo kiekiu plokščiuosius bandinius ir juos išbandžius įvažinėjimo ratu, nustatyta RA įtaka regeneruoto KMA mišinio atsparumui vėžėms.
10. Pateikta RA granulių maksimalaus leidžiamojo kiekio nustatymo regeneruojamame KMA mišinyje metodika, pagrįsta deterministiniu ir stochastinio modeliavimo metodais, juos taikant gautos praktiškai rekomenduojamos RA kiekio atskirų komponentų pagal mišinių rūšis bei paskirtį diferencijuotos skaitinės vertės.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Darbe pasiūlytos šios moksliai pagrįstos priemonės Lietuvoje gaminamų KMA mišinių su RA granulėmis ir kelyje mobiliuoju regeneratoriumi sutaisytos kelio dangos kokybei gerinti:

1. RA granulės turi būti taip frezuojamos, kraunamos, vežamos ir sandėliuojamos, kad dėl netinkamai atliktų šių technologinių operacijų regeneruoti paruošta medžiaga būtų maksimaliai homogeniška, į ją nepatektų kritulių vandens ir kaitinant saulės spinduliams nesuliptų į sunkiai išardomus luitus. Skirtingų kelių išfrezuotas RA granules sandėliuoti atskiromis krūvomis, o tai padaryti neturint galimybės – jas homogenizuoti specialiu įrenginiu ar maišant krautuvu.
2. Iš atlikto tyrimo nustačius seno ir naujo regeneruojančio bitumo plėvelių ilgalaikio maišymosi dėl difuzijos dinamiką, rekomenduojama mobiliuoju regeneratoriumi sutaisyta asfaltine kelio danga neleisti tuoj pat važiuoti transporto priemonėmis, kol suminio bitumo dvisluoksnė plėvelių struktūra priartės prie stabilios sumaišytos būsenos, neleidžiančios atsirasti vėžėms.

3. Komponentinės sudėties optimizavimo deterministiniu ir stochastiniu metodais nustatytos regeneruota KMA mišinio komponentų kiekio leidžiamosios vertės gali būti naudojtos tobulinant norminius dokumentus, skirtus techniniams reikalavimams, reglamentuojantiems didžiausią leidžiamąjį RA granulių kiekį.

Ginamieji teiginiai

1. Netinkamos eksploatuoti asfaltinės dangos medžiaga gali būti kartotinai panaudota gaminant KMA mišinius, jei iki reikiamo lygmens yra atkuriamos jos savybės.
2. Transporto priemonių ir aplinkos veiksnių paveiktos asfaltinės dangos labiau blogėja ne granuliometrinė sudėtis, bet organinis rišiklis – bitumas, kurį galima atkurti naudojant papildomus minkštiklius ar atnaujinančiąsias medžiagas, tarp jų ir skystesnę naują bitumą.
3. Nufrezuoto arba sulaužyto ir sutrupinto asfalto dangos sluoksnio granulių didelis komponentinis nevienalytiškumas riboja maksimalaus jų kiekio naudojimo galimybes.
4. Technologiniame regeneravimo procese sąveikauja seno ir naujo bitumų plėvelės, kurių maišymosi dėl difuzijos trukmė yra ilgalaikis procesas, nulemiantis regeneruoto KMA mišinio savybes ir struktūrą bei jų stabilizavimosi baigties laiką.
5. Regeneruoto KMA mišinio Maršalo bandinių ir įvažinėjimo ratu nustatytos stiprumo savybės gali būti ne blogesnės kaip vien tik iš naujų medžiagų pagaminto KMA mišinio.
6. Didinant nehomogeniško RA granulių procentinį kiekį regeneruojamame KMA mišinyje, jo sudėties skaidos parametrai, nustatyti stochastiškai modeliuojant granuliometrinę sudėtį, proporcingai didėja.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema paskelbti keturi moksliniai straipsniai: du – mokslo žurnaluose, įrašytuose į *Thomson ISI Web of Science* duomenų bazę ir turinčiuose citavimo indeksą (tarptautiniuose leidiniuose) (Mučinis *et al.* 2009; Čygas *et al.* 2011), vienas – recenzuojamame tarptautinės konferencijos leidinyje, įtrauktame į *Thomson ISI Proceedings* duomenų bazę (Mučinis *et al.* 2008), vienas – užsie-

nio (Lenkija) tarptautinės konferencijos pranešimų recenzuojamame leidinyje (Oginskas *et al.* 2009).

Disertacijos tema skaityti pranešimai dviejose mokslinėse konferencijose:

7-ojoje tarptautinėje konferencijoje „*Environmental Engineering*“, 2008 m.Vilniuje;

2-ojoje tarptautinėje konferencijoje „*Environmentally Friendly Roads*“ („enviroad 2009“) 2009 m.Warszawa (Lenkija).

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai ir rezultatų apibendrinimas.

Darbo apimtis 105 puslapiai, 37 numeruotos formulės, 31 paveikslas ir 9 lentelės. Rašant disertaciją panaudoti 133 literatūros šaltiniai.

Automobilių kelių asfaltinės dangos regeneravimo tyrimų apžvalga

Skyriuje pateikta mokslo darbų, skirtų senos asfaltinės dangos medžiagų, dedamų į gamykloje ar kelyje karštai regeneruojamus asfalto mišinius, kartotinio naudojimo tyrimams Lietuvoje ir kitose šalyse, analizė.

1.1. Eksploatuojamos asfaltinės dangos irties priežastys, veiksniai, dinamika ir įtaka regeneravimui

Laikui bėgant kelio dangos būklė blogėja dėl eismo ir aplinkos veiksnių poveikio (Zaghloul, Holland 2008; Sivilevičius, Šukevičius 2007; Chatti, El Mah-tar 2004; Sivilevičius 2011b; Котлярский 2008; Xu *et al.* 2010; Mo *et al.* 2010; Королев *et al.* 1984; Кашевская 2003).

Automobilių kelių asfaltbetoninės dangos ir jos konstrukcijos būklė, kurią lemia dangos suirties mastas D , labai priklauso nuo funkcionavimo sąlygų. Pateikti siūlymai asfalto dangos, kai suirties mastas $D \leq 8\%$, reikiamai eksploatacinei būklei užtikrinti ir funkcionavimo trukmei prailginti (Petkevičius *et al.* 2010).

Asfaltinės dangos nuovargio charakteristikos yra svarbios ne tik naujiems projektams, bet ir rekonstrukcijai ar esamų struktūrų techninės priežiūros alternatyvoms (Daniel, Kim 2001). Nuovargis atsiranda dėl pasikartojančių eismo apkrovų, kurioms tęsiantis išilginiai plyšiai pradžioje atsiveria dangos paviršiuje ir toliau plinta į skaldos pagrindo sluoksnį. Paviršiaus įtrūkių gali susidaryti dėl šlyties jėgų dangos paviršiuje arba dėl tempimo jėgų, veikiančių apatinėje asfalto dalyje. Svarbiausias Daniel ir Kim (2001) tyrimo indėlis yra ne tik tas, kad jis patvirtina kitų autorių tyrimų rezultatus, bet ir tas, kad jis gali būti tolesnių asfalto mišinių nuovargio ir atsikūrimo (plyšių užsivėrimo) tyrimų pagrindas. Tyrimai galiausiai leis sukurti geresnes medžiagas ir atsparesnę kintančių apkrovų poveikiui dangos konstrukciją.

Ekspluatuotoje asfalto dangoje nedaug pasikeičia asfaltbetonio mineralinių medžiagų savybės dėl galimo grūdelių trupėjimo. Laikui bėgant asfalto rišikliai sukieta ir pradeda trūkinėti, lūžinėti. Bituminio rišiklio savybės keičiasi dėl negrįžtamų oksidacijos procesų, lemiančių jo senėjimą, ir cheminės sudėties pokyčių. Senėjančiam bitumui kietėjimui lėtinti Apeagei (2011) siūlo naudoti laboratorijoje ištyrinėtus antioksidantus. Kadangi senėjimo procesas yra neišmatuojama savybė, siekiami nustatyti senėjimo laipsnį, tyrinėtojai naudoja bendrus cheminių ir fizinių savybių pasikeitimus, sukeltus senėjimo procesų. Senėjimo indeksas (Apeagei 2011) apibūdinamas kaip tam tikros rišiklio savybės santykis po tam tikro senėjimo lygio ir prieš senėjimą.

Per savo naudojimo laikotarpį sena rišamoji medžiaga suseno ir suiro (degradavo) užpildas. Tolesnis regeneravimo procesas gali taip pat prisidėti prie regeneruotos kelio dangos medžiagos nevienalytiškumo. Išfrezuotas medžiagas, paruoštas naudoti, galima naudoti, kai jos yra švarios ir palyginti vienodos. Dėl šių priežasčių asfalto regeneravimas reikalauja daugiau pastangų ir kvalifikuoto darbo, papildomų žinių ir patirties nei naujosasfaltinės dangos klojimas (Karls-son, Isacsson 2006).

Buvo atliktas laboratorinis tyrimas (Apeagei 2011) siekiant išsiaiškinti, ar asfalto rišikliams gali būti naudojami antioksidantai, mažinantys kietėjimą senėjimo procese. Trumpalaikis oksidacinis rišiklių senėjimas buvo modeliuojamas naudojant judančios plonos plėvelės krosnį (RTFO bandymas 163 °C temperatūroje), o ilgalaikis senėjimas nustatytas naudojant slėginį sendinimo indą 100 °C temperatūroje. Nustatyta, kad rišikliai, apdoroti antioksidantais Irganox 1010 ir Irganox E201 (vitaminas E), pasižymi geresnėmis eksploatacinėmis savybėmis aukštoje ar žemoje dangos temperatūrose. Tyrėjas siūlo naudoti senėjimo indeksą, kuris apibūdinamas kaip tam tikras rišiklio fizinės savybės santykis po tam tikro senėjimo lygio ir prieš senėjimą, t. y. pirminio rišiklio. Dėl apdorojimo antioksidantais – dilauril-tiodipropionatuir furfurolu, trumpalaikis rišiklių kietėjimas senėjimo metu sumažėjo maždaug 40 %, palyginti su kontroliniu rišikliu. Modifikuotų rišiklių standumo modulis ir lenkiamojo standumo modulis buvo

kur kas mažesni už nemodifikuotų rišiklių. Tad galima teigti, kad modifikuoti rišikliai bus atsparesni pleišėjimui.

Eksperimentiniais tyrimais (Widyatmoto 2008) iš keturių RA dangos ėminių, paimtų iš 9, 7, 6,5 ir 3 metus eksploatuotos asfaltinės dangos, nustatytos regeneruojamoje asfalto dangoje esančio seno bitumo savybės. Apskaičiuotosios penetracijos Pen_{25} ir minkštėjimo temperatūros T_{sp} vertės svyravo atitinkamai nuo 7 iki $16 \times 0,1$ mm ir nuo 70 iki $87,2$ °C. Jos rodė, kad bituminis rišiklis dėl senėjimo smarkiai sukietėjęs. Iš šių rezultatų matyti, kad rišiklio jautrumas temperatūrai taip pat skirtingas, nes penetracijos indeksas I_p svyruoja nuo +0,5 iki +1,7. Keliamis tiesti naudojamo naujo bituminio rišiklio penetracijos indeksas I_p paprastai būna nuo -1,5 iki +0,7, dažniausia artimas 0, o kuo didesnis yra šios rūšies medžiagos teigiamas I_p , tuo bitumas yra mažiau jautrus temperatūrai. Taip pat žinoma, kad bitumo jautrumas temperatūrai mažėja, kai jis kietėja (pavyzdžiui, senėjant). Taigi kuo didesnis regeneruoto (atgauto) bitumo teigiamas I_p , tuo didesnis jo sukietėjimo laipsnis. 9 metų senumo RA dangos 1–5 bitumo penetracijos vertė buvo didesnė ($Pen_{25}=15 \times 0,1$ mm) nei 7 metų senumo RA 6–10 ($Pen_{25}=8 \times 0,1$ mm), nors iš tiesų turėtų būti atvirkščiai. Šios išvados priežastis nežinoma: tai galėjo būti dėl RA dangos variacijos ar galimo priedų naudojimo. Pagal Jungtinės Karalystės regeneruoto KMA mišinio instrukciją iš RA dangos išgauto seno bituminio rišiklio penetracijos vertė turi būti ne mažesnė kaip $Pen_{25}=15 \times 0,1$ mm.

Senėjimas iš esmės padidina bitumo standumą, taip pat keičia tokias jo fizines ir chemines savybes, kaip tįsumą ir adheziją. Dažniausia senėjimas paveikia rišiklio charakteristiką, todėl ir asfalto mišinio savybes. Svarbiausias mechanizmas, susijęs su bitumo senėjimu, yra oksidacija, garavimas, sunkimasis ir fizinis kietėjimas (Karlsson, Isacsson 2006).

Tyrimai (Cheng *et al.* 2002) rodo, kaip sendinimas veikia tos pačios asfalto rūšies paviršiaus energiją. Sendinimas gali labai paveikti asfalto paviršiaus energijos savybes.

1.2. Senos asfalto dangos ir naujų medžiagų sąveikos procesai

Regeneruojant asfaltbetonio dangas pagrindinis ir esminis dalykas yra išsiaiškinti kaip sąveikauja arba sąveikaus senos asfaltbetonio medžiagos su naujomis tarpusavyje, regeneravimo procese (Karlsson, Isacsson 2002; Al-Hadidy, Yi-qiu 2009; Collop *et al.* 2006; Firoozifar, Foroutan 2011; Sengoz, Topal 2007; Carpenter, Wolosick 1980).

Li *et al.* (2009) tyrimo tikslas – nustatyti vidutinį bitumo plėvelės, gaubiančios asfalto mišinio grūdelius, storį ir išbandyti, ar šių plėvelių storis turi įtakos KMA mišiniui. Tam naudojami paviršiaus plotų ir indeksų metodai. Pasiūlytas skaičiavimų metodas patikslina tradicinį bitumo plėvelės storio skaičiavimo metodą, nes atsižvelgiama į visų dydžių grūdelių formą ir paviršiaus plotą. Autoriai prieina prie išvadų, kad didėjantis tyrimų skaičius rodo būtinumą ištirti ir nustatyti optimalų oro tuštymų kiekį (tūrį) mineralinėse asfalto medžiagose, kuris turi būti minimalus, o bitumo plėvelių storį imti kaip vidurkį, nes tinkamai parinktas plėvelės storis užtikrina mišinio ilgaamžiškumą. Asfalto daleles gaubiančių plėvelių storis yra fiziškai neišmatuojamas dydis, tačiau apskaičiuojamas iš mišinio tūrinių charakteristikų ir granulometrinės sudėties. Bandymų metu buvo nustatyta, kad mineralinius grūdelius gaubiančių bitumo plėvelių storis yra labai svarbus veiksnys, lemiantis provėžų susidarymą dangoje.

Mokslinio darbo (Karlsson, Isacson 2002) tikslas – pateikti naują ir universalų metodą bitumą atnaujinančios medžiagos difuzijai nustatyti, remiantis FTIR-ATR spektroskopija, kuri nereikalauja pakeisti jokių komponentų. Šio metodo taikymas demonstruojamas tiriant tokius parametrus, kaip, bitumo tipas, temperatūra ir rišiklio sluoksnio storis.

Karlsson ir Isacson (2003a) mokslinis darbas apima parametrų (temperatūra, rišiklio sluoksnio storis, bitumo tipas ir cheminės rišiklio savybės) tyrimą. Rezultatai rodo didelę temperatūros įtaką difuzijos greičiui. Taip pat šis tyrimas parodė, kad difuzijos procesas gali būti aprašytas remiantis Ficko (Fiko) dėsnio.

Karlsson ir Isacson (2003a) pažymi, kad, norint optimaliai atnaujinti seną bituminį rišiklį, reikėtų atsižvelgti į atnaujinančiosios medžiagos klampumo sumažinimą, taip pat į cheminę sudėtį, siekiant gauti aukštos kokybės regeneruotą rišiklį. Tačiau mechanizmai, susiję su seno ir naujo rišiklių maišymo regeneruojant asfalto dangą, vis dar lieka nesuprantami. Pavyzdžiui, kai kuriais atvejais regeneruoto asfalto standumas buvo kur kas mažesnis, nei tikėtasi. Hipotetinis paaiškinimas yra toks, kad pridėtas naujas rišiklis maišant veikia kaip tepalas ir padengia seną rišiklį ir mineralinės medžiagos grūdelį (Carpenter, Wolosick 1980), tai yra vadinamasis „juodosios uolienos“ (*black rock*) modelis. Jei pridėtas naujas rišiklis negali difunduoti per tam tikrą duotą laiką prieš klojant regeneruotą asfalto mišinį, tepimo poveikis išlieka.

Senas ir naujas bituminiai rišikliai susimaišo derinant mechaninio ir difuzinio maišymo būdus. Be to, reikalingas fazės stabilumas, kad po maišymo liktų homogeninis regeneruotas rišiklis.

Rišiklių sumaišymas taikant difuziją asfalto regeneravimo metu – sudėtingas dalykas ir gali geriausiu atveju būti analizuojamas tik netiesiogiai (Karlsson, Isacson 2003b). Netgi jeigu sistema sudaryta vien tik iš rišiklių (be mineralinių medžiagų), atnaujinančiosios medžiagos difuzija bitume yra labai sunkiai kontroliuojamas procesas. Pagrindinė priežastis ta, kad bituminiai rišikliai yra miši-

niai, kuriuos sudaro daug molekulinų rūgščių, kurios labai skiriasi poliškumu ir molekuline mase. Karlsson ir Isacsson (2003b) darbe aprašytas metodas, kuris gali būti taikomas norint gauti daugiau žinių apie atnaujinančiosios medžiagos difuziją bitume, nekeičiant dviejų ištirtų komponentų. Remiantis šio tyrimo rezultatais, buvo padarytos šios pagrindinės išvados:

- Furjė transformacijos infraraudonųjų spindulių spektroskopijos ATR metodas (FTIR-ATR) tinka kontroliuoti difuzijos procesą, susijusį su bituminio rišiklio maišymu, jeigu yra infraraudonųjų spindulių sugertis tarp dviejų komponentų;
- seno bitumo ir atnaujinančiosios medžiagos difuzijos procesas gali būti aprašytas Fiko dėsnio (*Ficks law*), tačiau tam tikromis sąlygomis nustatytas difuzijos koeficientas gali būti tik apytikris vidurkis dėl difuzorių poveikio difuzinei aplinkai (priklausomybė nuo konstrukcijos) ir difuzorių difuzijos savybių individualios variacijos (difuzijos koeficiento pasiskirstymas).

Huang *et al.* (2005) teigia, kad literatūroje publikuota daugybė tyrimų, susijusių su RA granulių naudojimu ir regeneravimo KMA mišinio, kuriame yra RA granulės, funkcionavimu. Tačiau vienas esminis klausimas vis dar lieka neatsakytas: kiek būtent senas bitumas susilieja su atnaujinančiąja medžiaga ar nauju bitumu maišymo proceso metu. Paprastai teigiama, kad RA granulės regeneruotame KMA mišinyje atlieka tik „juodosios uolienos“ vaidmenį. Autoriai daro prielaidą, kad jeigu sena asfalto rišamoji medžiaga (senas bitumas) nėra iki galo sumaišoma su nauju bitumu arba atnaujinančiąja medžiaga, tuomet ji formuoja sluoksnį, dengiantį RA granulių mineralinę medžiagą (užpildą). Dėl ilgalaikio senėjimo šis sluoksnis yra daug standesnis nei nauja rišamoji medžiaga. Vadinasi, RA granulės ir naujos medžiagos mišinyje yra sudėtinė sluoksninė rišamosios medžiagos sistema, dengianti kiekvieną dalelę.

Huang *et al.* (2005) sumaišė RA granules su nauju užpildu be jokio naujo asfalto rišiklio. Mišinys buvo mechanškai maišomas (sausai sumaišytas). Tikslas – išsiaiškinti seno bitumo iš RA granulių ir naujo užpildo grūdelių susimaišymo laipsnį. Tyrėjai bandė nustatyti RA granulių klampumą, kai RA sumaišytas su nauju rišikliu, atliekant ekstrahavimą etapais. Sumaišius RA granulės su nauju rišikliu, RA danga buvo įmerkta į trichloretileną ir išskirtas tirpalas. Buvo aišku, kad bitumo klampumas padidėjo, kai jis perėjo iš išorinių sluoksnių (plėvelių) į vidinius. Remiantis aprašytu regeneruoto rišiklio ekstrahavimu, kuris buvo atliktas keturiais etapais, pastebėta, kad apie 60 % rišiklio vidinė dalis (arčiau RA užpildo grūdelių) turi bitumo savybių, kurios panašios į tikrą RA dangos pasenusį rišiklį, o apie 40 % rišiklio išorinė dalis susimaišė su nauju rišikliu.

RA dangos esančio pasenusio bitumo savybės atkuriamos naudojant atnaujinančiąsias medžiagas (*rejuvenators*). Atnaujinančiųjų medžiagų procentinis kiekis daro didelę įtaką perdirbtų mišinių iš pasenusio rišiklio ir atnaujinančio-

sios medžiagos savybėms (Shen *et al.* 2007a; Shen *et al.* 2007b). Priešinimosi vėžių susidarymui parametrai sumažėja, kai priešinimosi nuovargiui parametrai pagerėjo didėjant atnaujinančiosios medžiagos procentui.

Atnaujinančioji medžiaga yra viena iš regeneravimo reagentų, tinkamų bet kuriam didelės oksidacijos mišiniui arba turinčiam didelį procentinį kiekį RA mišiniui (Shen *et al.* 2007b). Tačiau atnaujinančiosios medžiagos naudoti nėra skatinama arba net neleidžiama kai kuriose JAV valstijose dėl regeneruotų mišinių, kurių sudėtyje yra atnaujinančiosios medžiagos, neaiškių vėžetumo savybių.

Tyrimai (Shen *et al.* 2007b) parodė, kad atnaujinančioji medžiaga po regeneravimo labai paveikė atnaujintų senų bituminių rišiklių ir mišinių, turinčių atnaujintų senų rišiklių, savybes. Tapo įmanoma gauti optimalias atnaujinančiosios medžiagos koncentracijas, naudojant mišinių santykius taip, kad atnaujinti rišikliai pasiektų norimą PG laipsnį. Kelio dangos asfalto mišinių su atjauninančiu rišikliu savybės buvo netgi geresnės arba buvo tokio pat lygio kaip naujų mišinių savybės. Atsparumo vėžėms parametrai sumažėjo, o atsparumo nuovargio parametrai ir susitraukimo parametrai pagerėjo padidinus atnaujinančiosios medžiagos procentinį kiekį.

Carpenter ir Wolosick (1980) nustatė, kad tokiu atveju, kai maišant RA naudojama bitumą atnaujinančioji medžiaga, tik dalis senos rišamosios medžiagos (pasenusio bitumo) yra paveikiama iš karto po maišymo procedūros. Laikui bėgant atnaujinančioji priemonė (naujas bitumas) galiausiai išsisklaido į pasenusio bitumo sluoksnį (plėvelę), dengiantį RA mineralinį grūdėlį. Laikas, kurio reikia išsisklaidyti (difuzijai), priklauso nuo medžiagos savybių ir esamų sąlygų (temperatūros).

McDaniel, Anderson (2001) rekomenduoja naudoti trijų pakopų sistemą, kuri remiasi visiško susimaišymo tarp naujo (pirminio) ir RA granulių seno rišiklio prielaida. Nauja trijų pakopų sistema leidžia didžiausią iki 20 % RA granulių kiekį, nekeičiant pasirinkto rišiklio, ir iki 30 % RA granulių, žeminant vieną rūšimi minkštiklį. Asfalto mišiniams, kuriuose yra daugiau kaip 30 % RA granulių, rekomenduojama naudoti susimaišymo lentelę, norint tinkamai suderinti rišiklio rūšį.

Shirodkar *et al.* (2011) mokslinio darbo tikslas – pateikti rišiklių dalinio susimaišymo laipsnio regeneruojamos asfalto dangos mišinyje nustatymo metodiką. Kai RA granules sumaišoma su naujais užpildais ir nauju rišikliu, karštai maišytame asfalte (KMA) įvyksta dalinis RA seno rišiklio susimaišymas. Institucijos riboja RA granulių kiekį, nes nėra žinomas susimaišymo laipsnis tarp RA granulių ir naujų medžiagų. Darbe pateikiama sisteminga metodika, leidžianti nustatyti dalinio susimaišymo laipsnį RA dangos mišinyje. Šios procedūros koncepcija: jeigu yra 100 % susimaišymas, tai sumaišyto rišiklio, dengiančio naujų užpildų ir RA grūdelių, savybės bus panašios. Jei yra 0 % susimaišymas, tai sumaišyto rišiklio savybės apie RA granulės bus tokios kaip RA grūdelius den-

giančio seno ir dalies su juo sumaišyto naujo bitumo mišinio, kuris padengs RA užpildus. Esant nuliniam susimaišymui rišiklio, dengiančio naujų užpildų grūdėlius, savybės bus tokios kaip ir naujo rišiklio savybės. Kaip teigia autoriai, galimybė tiksliai nustatyti dalinio susimaišymo laipsnį padės nustatyti dedamo į regeneruojamą asfalto mišinį naujo bituminio rišiklio reikiamą kiekį. Nustatytas dalinio susimaišymo laipsnis, kai buvo pridedama 25 % RA granulių skaičiuojant pagal užpildų masę su PG 70-28 markės nauju rišikliu ir 35 % RA granulių su PG 58-28 markės nauju rišikliu, kuris atitinkamai sudarė 70 % ir 96 %. Tačiau šie rezultatai priklauso nuo įvairių veiksnių, tokių kaip RA granulių rišiklio savybės, granulimetrinė sudėtis, maišymo temperatūra ir naujo rišiklio savybės. Todėl tyrimo rezultatai neturi būti apibendrinami.

Al-Qadi *et al.* (2008) paruošė tris mišinius, kurių sudėtyje buvo 0 %, 20 % ir 40 % RA dangos trupinių. Visais atvejais bendra granulimetrinė sudėtis buvo palikta panaši. Šių mišinių superdangos projektavimo metodas parodė, kad rišiklio kiekis juose yra vienodas. Visų trijų mišinių užpildų paviršiaus plotas buvo taip pat panašus, nes beveik nesiskyrė jų granulimetrinė sudėtis. Kadangi visų trijų mišinių grūdėlių paviršiaus plotai ir rišiklio kiekiai buvo panašūs, Al-Qadi *et al.* (2009) padarė išvadą, kad 100 % RA granulių rišiklio buvo mobilizuotas visais trimis atvejais. Tačiau šio tyrimo autoriai tiki, kad vienodas rišiklio kiekis nebūtinai gali reikšti, kad įvyksta 100 % susimaišymas.

Masad *et al.* (2008) straipsnyje pateikiama nepasendintų ir pasendintų asfalto rišiklių netiesinės viskoelastinės elgsenos analizė, kuri buvo atlikta naudojant dinaminės šlyties reometrą (DŠR), taikant kelias temperatūras ir kelis dažnius. Autoriai priėjo prie išvados, kad rišiklio ilgalaikė charakteristika gali būti gauta, atlikus trumpalaikius bandymus esant skirtingiems įtempimo lygiams.

Bennert, Dongré (2010) atliko tyrimus, norėdami įvertinti naujo ir RA dangos seno rišiklių sąveiką, ir parengė analitinę procedūrą, kurioje taikomas atvirkštinio skaičiavimo metodas kartu su analitiniais metodais, sukurtais Bonaquist, Christensen (2005). Buvo siekiama nustatyti KMA, kuriame yra RA granulių, „efektyvias“ bituminio rišiklio savybes. Terminas „*efektyvios*“ *rišiklio savybės* vartojamas norint apibūdinti sąveiką tarp naujo rišiklio ir RA granulių rišiklio KMA su RA granulėmis mišinyje. Šios procedūros koncepcija – jeigu RA KMA atvirkštiniu būdu apskaičiuotos bituminio rišiklio savybės skiriasi nuo ekstrahuoto ir atkurto (regeneruoto) rišiklio, kuris visiškai susimaišo ekstrahavimo ir atkūrimo procese, tuomet susimaišymo laipsnis yra mažesnis kaip 100 %. Gauti rezultatai rodo, kad rišiklių susimaišymo laipsnis, naudojant su 15 % ir 20 % RA KMA mišinyje, nebuvo toks nuodugnus, kaip imant 25 % RA KMA mišinyje.

1.3. Regeneruoto asfalto mišinio ir iš jo įrengtos kelio dangos savybės

Regeneruojamo asfalto granulės gali būti naudojamos asfalto ir cementbetonio mišiniuose. Į KMA mišinį vietoje naujų mineralinių medžiagų gali būti dedama regeneruojamo cementbetonio užpildų (Mills-Beale, You 2010; Jung 2006). Taip pat į gaminamą cementbetonio mišinį vietoje užpildo gali būti pridodamas tam tikras procentinis RA granulių (smulkinio) kiekis (Hossain *et al.* 2010a, 2010b). Laboratorijoje atliktų tyrimų rezultatai parodė, kad betono su 0 %, 10 %, 20 % ir 40 % RA granulių stiprumas gniuždant, perskėlimo stiprumas tempiant, stiprumas įlinkiui ir tamprumo modulis mažėja didinant RA granulių kiekį. Temperatūriniam plėtimosi koeficientui RA granulių kiekis įtakos nedaro. Buvo nustatyta, kad maksimalūs įtempiai tipiškoje Floridos betono dangoje su RA granulėmis mažėja, kai RA granulių kiekis didėja, taip pat mažėja ir tampraus stiprumo santykis. Tai rodo, kad naudojant RA granules gali būti pagerinamos betono dangos savybės.

Buvo atliktas tyrimas (Zaghloul, Holland 2008) siekiant įvertinti ilgalaikės skirtingų kelio dangos medžiagų savybes Kalifornijoje (JAV). Įvertintos gumos asfalto mišinio, regeneruoto asfalto mišinio ir dangų stiprinamųjų medžiagų faktinės eksploatacinės savybės, o ne savybės, nustatytos laboratoriniais tyrimais. Šiam tyrimui atrinkti 5 metų senumo ruožai ir ištirti kelių ruožai (131 ruožas), esantys šiaurės pakrantėje, dykumoje ir kalnuose. Krintančio svorio deflektometru išmatuoti įlinkiai, nustatytas tarptautinis lygumo indeksas, pažaidų plotas, taip pat išgręžti kernai (gręžtiniai bandiniai) savitajam sunkiui, bitumo kiekiui, granulimetrinei sudėčiai nustatyti. Taikant kiekvieno objekto būklei įvertinti taikytus skirtingus septynis apdorojimo metodus apskaičiuota tikėtinoji kelio dangos konstrukcijos, pažaidų ir nelygumų eksploatacinė trukmė.

Kalifornijos transporto departamentas leidžia naudoti iki 15 % RA granulių kaip naujų mineralinių medžiagų pakaitalą KMA mišinyje. Analizės rezultatai (Zaghloul, Holland 2008) parodė, kad palyginus regeneruotos asfalto dangos (RAD) ruožų ir asfaltbetoninės dangos ruožų iš naujų medžiagų tikėtiną eksploataavimo trukmę (imant kelio ruožus šiaurės pakrantėje) matyti, jog RAD ilgalaikės eksploatacinės savybės yra panašios į asfaltbetonio dangos savybes, o yra gal net geresnės. Gauti rezultatai ir atlikta analizė taip pat parodė, kad visose trijose aplinkos zonose RAD ilgalaikės eksploatacinės savybės gali būti palygintos su kitais kelio dangos apdorojimo metodais ruožuose, kurie išsidėstę viename kelyje priimtinu atstumu.

Taikant mechaninį-empirinį priartėjimo metodą (Widyatmoko 2008) buvo įvertintas šešių asfalto mišinių, kuriuose yra RA granulės, sudėties projektavimas. Bandymų metodologija apėmė dėvimojo sluoksnio ir pagrindo sluoksnio medžiagų (mišinių), kuriose yra trijų skirtingų lygių (10 %, 30 % ir 50 %) RA

granulių kiekis, pagamintų pagal pateiktą specifikaciją, pagrindinių mechaninių savybių ir ilgalaikiškumo nustatymą ir šiose medžiagose naudoto bei regeneruoto (atskirto) rišiklio reologinių savybių tyrimą. Siekiant optimizuoti atsparumą vėžių susidarymui ir nuovargiui, regeneruoti asfalto mišiniai buvo pagaminti iš 80/100 penetracijos naujo bitumo (kuris yra vienu laipsniu minkštesnis kaip 60/100 penetracijos bitumas, įprastai naudojamas atitinkamuose pirminiuose asfalto mišiniuose) su atsinaujinančiąja alyva ar be jos. Įrodyta, kad asfalto mišinių, kuriuose yra RA, savybės yra mažiausiai analogiškos standartinių asfalto medžiagų (mišinių) savybėms arba už jas geresnės.

Laboratorijoje pagaminti mišiniai su RA yra kiek mažesnio standžio nei kontroliniai asfalto mišiniai be RA (Widyatmoko 2008), išskyrus pagrindo sluoksnio asfaltbetonį (ACBC) su mažais RA kiekiais, kurių standis buvo didesnis, nei gautas naudojant ACBC ėminį be RA. Nepaisant to, remiantis provėžų ir daugkartinės ašinės apkrovos bandymų RLAT (*Repeated Load Axial Test*, RLAT) duomenimis, minėtų regeneruotų asfalto mišinių atsparumas liekamajai deformacijai yra priimtino lygio ir visi jie, išskyrus vieną, atitinka Jungtinės Karalystės įvažinėjančio rato reikalavimus, kurie taikomi intensyvaus eismo statybvietėms, kai reikalingas didelis atsparumas vėžių susidarymui. Regeneruotų asfalto mišinių atsparumas nuovargiui yra mažiausiai analogiškas arba didesnis nei kontrolinių mišinių be RA. Atsparumo nuovargiui savybės gerėja didinant atnaujinančiojo rišiklio santykį mišinyje (taigi, kai sudėtyje yra didesnis RA kiekis). Mišiniai su RA buvo visiškai nejautrūs drėgmės sukeliams pažeidimams (žalai).

Daniel, Lachance (2005) tyrinėjime pristatytas ir aptartas naujų medžiagų (kontrolinio) mišinio ir mišinių, turinčių 15 %, 25 % bei 40 % RA granulių, dinaminis modulis tempiant ir gniuždant bei slankiojo valkšnumo pagrindinis įlankis gniuždant. Mišinys su 15 % RA granulių padidino pradinio mišinio standumą ir, kaip buvo tikėtasi, sumažino jos slankumą. Tai įrodo, kad mišiniai, turintys RA, yra daug atsparesni liekamajai deformacijai bei mažiau atsparūs nuovargiui ir temperatūriniam trūkinėjimui lauko sąlygomis. Mišiniai su 25 % ir 40 % RA granulėmis nepateisino prognozių.

Atliekant daugelį tyrimų buvo remtasi laboratoriniais bandymais, lauko eksploatacinėmis savybėmis ir dangos projektavimu su nauju asfalto mišiniu (t. y. mišiniais su nauju rišikliu ir naujais užpildais) (Al-Qadi *et al.* 2009; Attia, Abdelrahman 2010; Cohen *et al.* 1989; Carter, Stroup-Gardiner 2007; Behnia *et al.* 2010; Stroup-Gardiner *et al.* 1989; Stroup-Gardiner, Wagner 1999; Xiao, Amirkhanian 2009). Tačiau tyrimų apie kelių dangų iš regeneruoto karštai maišyto asfalto inžinerines charakteristikas yra nedaug (Aravind, Das 2007a). Kai kuriuose tyrimuose nurodoma, kad RA kiekis, naudojamas regeneruotame mišinyje, paveikia mišinio savybes. Kituose tyrimuose pažymima, kad asfalto mišinio savybės nėra stipriai veikiamos, juose naudojant RA. Kai kurie tyrėjai sura-

do regeneruoto mišinio standumo modulį geresnį nei mišinio, pagaminto iš naujų medžiagų. Kiti tyrėjai (Noureldin, Wood 1989, 1990) aptiko regeneruoto asfalto mišinio standumą panašų arba mažesnį už naujo mišinio. Panašiai ir regeneruoto mišinio tempiamasis stipris yra patenkinamas ar geresnis.

Apskritai regeneruotas mišinys yra atsparesnis provėžoms nei naujas mišinys. Remiantis lauko tyrimais, regeneruoto mišinio atsparumas provėžoms buvo geresnis nei naujo mišinio (Aravind, Das 2007a).

Naudoto asfalto procentas, esantis superdangos mišiniuose, priklauso ne tik nuo RA granulių seno rišiklio savybių, RA granulių užpildo (pvz.: kritinė temperatūra, pasenusio rišiklio ir pridėtos atnaujinamosios medžiagos sumaišymo schema, RA granulių granulimetrinė sudėtis ir kt.), bet ir nuo superdangos mišinių reikalavimų (pvz.: tūrio savybių, mechaninių ir darbo gebos savybių ir kt.). Įdėto RA granulių frakcijų (pvz., nuo # 4 iki # 8 mm šiame tyrime) pokyčiai gali efektyviai paveikti galimą RA granulių procentą (Shen *et al.* 2007a).

1.4. Asfalto dangos regeneravimo technologijų analizė

Pasaulio praktikoje yra daug mokslininkų kurie tyrinėjo įvairės asfalto dangų įrengimo technologijas jų efektyvumą ir sąnaudas (Lee *et al.* 1983; Liu *et al.* 2010; Shoenberger, Demoss 2005; Tao *et al.* 2008; Sholar *et al.* 2002; Gopalakrishnan *et al.* 2010; Xiao, Amirkhanian 2009).

Lietuvoje kaip ir kitose šalyse senos asfalto dangos medžiaga, būdama karšto būvio, kartotinau naudojama (regeneruojama) toje pačioje vietoje, kur ji buvo, t. y. kelyje (*hot recycling in place*), arba asfaltbetonio gamykloje (*in-plant asphalt recycling*) (Karlsson, Isacsson 2006; Mučinis *et al.* 2009; Sivilevičius 2011a).

Regeneruojant gamykloje viršutinis kartotinau naudojamos asfalto dangos sluoksnis nufrezuojamas, o gautos granulės maišomos su naujomis medžiagomis. Tam asfaltbetonio maišytuve turi būti sumontuoti papildomi technologiniai įrenginiai, skirti RA dangą priimti, transportuoti ir dozuoti, kurie didina AMP technologinį universalumą ir kompleksinį kokybės rodiklį *K* (Sivilevičius 2011a). Naujų mineralinių medžiagų ir bituminio rišiklio arba tik rišiklio į RA dangą dedama tiek, kad ją regeneravus būtų gaunamas karštai maišyto asfalto (KMA) mišinys, kurio savybės būtų panašios vien iš naujų medžiagų pagaminto mišinio savybes. KMA mišinių su RA granulėmis optimalios sudėties projektavimo metodai (Mix design methods...1993; McDaniel, Anderson 2001; Vislavičius, Sivilevičius 2010; Sivilevičius, Vislavičius 2008) leidžia parinkti tokį didžiausią leidžiamą RA granulių kiekį, kuris užtikrina gana geras regeneruoto KMA mišinio savybes.

Į gaminamą KMA mišinį pridedant naudoto asfalto granulių, sutaupoma brangių naujų mineralinių medžiagų ir bituminio rišiklio, gerinama aplinkosauga, mažėja energijos sąnaudos (Alkins *et al.* 2008). Tačiau dažniausia regeneruoto KMA mišinio projektavimo ir gamybos technologijos procesai būna sudėtingesni už įprastinių KMA mišinių projektavimo ir gamybos procesus (Sivilevičius, Šukevičius 2009; Aravind, Das 2007a; Sivilevičius *et al.* 2011; Bražiūnas, Sivilevičius 2010).

Laboratoriniai tyrimai (Tabakovič *et al.* 2010) parodė, kad RA granulių įterpimas į apatinio sluoksnio mišinį pagerino visas mechanines savybes. Buvo nustatyta, kad mišinys, kuriame yra iki 30 % RA granulių, parodė pagerintą atsparumą nuovargiui, lyginant su kontroliniu mišiniu, pagamintu iš pirminių (ne-naudotų) medžiagų.

Karštai maišyto asfalto regeneravimas centrinėje gamykloje, t. y. asfaltbetonio maišytuve (*central plant hot mix recycling*), yra viena populiariausių praktikoje taikomų technologijų, kai kartotinais perdirbamos eksploatuotos asfalto dangos medžiagos (Aravind, Das 2007a). Asfaltbetonio gamykloje regeneruojant karštą asfalto mišinį pridedama RA granulių, kurios sumaišomos su naujomis karštomis (perkaitintomis) mineralinėmis medžiagomis ir įkaitinančiomis RA granulėmis. Po to įpilamas reikiamas karšto bituminio rišiklio kiekis (Sivilevičius, Šukevičius 2009). Naudoto asfalto granulės gali būti džiovinamos ir kaitinamos iki darbinės apie 100 °C temperatūros atskirame tik joms skirtame džiovinimo būgne ir dozuotai įpilamos į maišyklę ant karštų mineralinių medžiagų sudozuotų frakcijų (Tamaliūnas, Sivilevičius 2010).

Asfaltbetonio gamykloje regeneruotas asfalto mišinys transportuojamas į kelio dangos įrengimo vietą, paklojamas, sutankinamas iki reikiamo sutankinimo laipsnio.

Labai svarbus regeneruoto ar vien tik iš naujų medžiagų pagaminto KMA mišinio transportavimo iš gamyklos į naudojimo vietą atstumas: jis neturi būti pernelyg didelis, kad mišinys neatšaltų, nesegreguotų ir neblogėtų bitumo savybės. Nustatyta (Mundt *et al.* 2009), kad JAV vidutinis mišinio transportavimo atstumas kinta nuo 16 km iki 32 km, o didžiausias – nuo 48 km iki 161 km.

Pasiūlytas (Aravind, Das 2007b) tiesinio programavimo priartėjimo metodas, kurį taikydamas mišinio projektuotojas gali pasiekti tikslą minimizuodamas bendrą medžiagų kainą arba maksimizuodamas bendrą RA granulių kiekį, naudojamą regeneruojamame mišinyje. Šis požiūris leidžia tirti sudedamųjų dalių proporcingumo (dozavimo) problemą ir todėl nėra priklausomas nuo mišinio sudėties parinkimo eiliškumo.

Asfaltinė danga gali būti regeneruojama toje pačioje vietoje, kur ji buvo.

Karštai frezuojant seną asfalto dangą, dėl jos asfalto papildomo kaitinimo keičiasi bitumo penetracija ir minkštėjimo temperatūra. Stock (1985) iš dešimties ėminių įrodė, kad daugiausia (32 %) penetracija sumažėjo pirmojo ėminio

nuo 50 °P iki 34 °P (skirtumas –16 °P). Kaip įprasta, minkštesni bitumai (didesnės penetracijos) daugiau praranda lakiųjų frakcijų (alyvų ir dervų) už kietus bitumus, dėl to labiau pakinta jų klampa. Minkštėjimo temperatūra padidėjo nuo 0 iki 6 % ir sutapo su penetracijos pokyčiais. Vidutiniškai bitumo penetracija sumažėjo 6 °P, o minkštėjimo temperatūra padidėjo 2,1 °C.

Variacija yra didžiausia problema atsargiai vežant medžiagas. Vienas iš būdų riboti regeneruojamų medžiagų kintamumą – atsižvelgti į nepageidaujamas seno kelio priemaišas (pvz., kelio ženklinių, anglies dervą ir gruntą) ir nevienalytiškumo priežastis, kaip plyšių tarpiklius ir lopus. Kitas būdas mažinti variaciją – kruopščiai maišyti kartotinai naudojamas (regeneruojamas) medžiagas. Jei variacija būtų maža, būtų galima tiksliai pašalinti trūkumus, pvz., užpildyti granulimetrinę sudėtį, rišiklio kiekį ir standumą, jei bus pridėti naujų medžiagų kiekiai (Karlsson, Isacsson 2006).

Kelių statybos objektus kuriems priskirtinos regeneruoto asfalto dangos, kokybę galime vertinti naudojant daugiakriterinius metodus (Zavadskas *et al.* 2010; Zavadskas *et al.* 2008; Zavadskas *et al.* 2008).

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Išanalizavus kitų šalių patirtį, pateiktą mokslo darbuose, prieita prie išvados, kad kelio eksploatacijos laikotarpiu asfalto dangos sluoksniai, paveikti klimato bei oro sąlygų veiksnių ir transporto priemonių apkrovų, neatitinka jiems keliamų reikalavimų ir turi būti stiprinami, rekonstruojami arba regeneruojami. Regeneruojamos asfalto dangos (RAD) netinkamumą toliau eksploatuoti labiausia lemia negrįžtamieji bitumo savybių pokyčiai dėl jo senėjimo.
2. Naudoto asfalto (RA) granules maišant su naujomis karštomis mineralinėmis medžiagomis ar ir atnaujinančiuoju rišikliu susidaro dvisluoksnė seno ir naujo bitumų sistema, kuri plėvelėse, gaubiančiose mineralinius grūdelius, mechanškai ir dėl difuzijos maišosi. Seno ir naujo bitumų maišymosi skirtingo dydžio grūdelius gaubiančiose plėvelėse procesai dar mažai ištirtini. Neskiriami bitumo plėvelių maišymosi dėl sluoksnių difuzijos ypatumai grūdelių kontakte ir oro tuštymų srityse. Seno ir naujo bitumų plėvelių dalinio susimaišymo procesai gana sudėtingi, o jų dinamika nenusėpama ir yra pradiniam tyrimų etape.
3. Dauguma tyrėjų įrodė, kad su tam tikru kiekiu RA granuliu pagamintas karštai maišyto asfalto (KMA) mišinys dažniausia atitinka normų reikalavimus, ne tik yra tokių pačių savybių kaip vien iš naujų medžiagų pa-

gamintas KMA mišinys, bet kartais už jį net geresnis. Regeneruoto KMA mišinio struktūrai ir savybėms įtakos turi RA granulių kiekis bei savybės, kurios iš anksto nenuspėjamos ir turi būti nustatomos iš reprezentatyvių imčių, ištirtų laboratorijoje.

4. RA granulių ir naujų medžiagų sąveikos procesai priklauso nuo pasirinktos regeneravimo technologijos, atskirų jos operacijų parametrų ir gali būti iš dalies valdomi. RA granulių regeneravimo procesai ekonomiškai išvystytose šalyse įgavo masinį pobūdį, nes kiekvienais metais vis daugiau pagaminama regeneruoto KMA mišinio, plečiamos jo naudojimo sritys, galima didesnę procentinę kiekį RA granulių dozuoti. Lietuvoje KMA mišinio gamybos su RA granulėmis technologiniai procesai pradėti išsigijus naujos kartos tobulesnius asfaltbetonio maišytuvus su regeneruoti skirtais papildomais įrenginiais. Mokslo principais paremtų šios srities darbų iki šiol beveik nebuvo.

Uždaviniai

- Sumodeliuoti naudoto asfalto RA homogeniškumą lemiančius veiksniai.
- Sumodeliuoti dviejų rūšių sumaišyto bitumo ar kitos atnaujinančiosios medžiagos teorinę klampą ir seno bei naujo bitumų maišymosi dėl difuzijos dvisluksnėje plėvelėje dinamiką.
- Pateikti susistemintus asfaltinės dangos regeneravimo mokslinius principus.
- Surinkti duomenis apie Lietuvoje išgaunamo naudoto asfalto kiekių dinamiką bėgant metams.
- Ištirinėti Lietuvos keliuose ir miesto gatvėse frezuoto bei išlaužto ir sutrupinto RA granulių komponentinę sudėtį ir savybes.
- Nustatyti pridedamo atnaujinančio bitumo rūšies ir procentinio kiekio įtaką KMA mišinio fiziniams ir mechaniniams Maršalo rodikliams, taip pat regeneruoto suminio bitumo savybes.
- Nustatyti su skirtingu RA granulių kiekiu regeneruoto KMA mišinio atsparumą vėžių susidarymui.
- Pateikti naujus deterministinio ir stochastinio modeliavimo principus ir nustatyti RA granulių kiekio bei savybių įtaką regeneruoto mišinio komponentinei sudėčiai ir jos vienalytiškumui.

Naudoto asfalto kokybės ir regeneravimo procesų teorinis modeliavimas

2.1. Naudoto asfalto homogeniškumą lemiantys veiksniai

Regeneruoti skirtos asfalto dangos homogeniškumą lemia trijų jos gyvavimo laikotarpių veiksniai, susisteminti 2.1 lentelėje.

Pradinis nehomogeniškumas pasireiškia naujai įrengtoje asfalto dangoje, kai atskiruose jos ploteliuose skiriasi procentinis bitumo kiekis ir granulimetrinė sudėtis. Šis nehomogeniškumas atsiranda dėl KMA mišinio gamybos asfaltbetonio maišytuve technologinio proceso sistemingųjų ir atsitiktinių paklaidų (Petkevičius, Sivilevičius 2008). Pagaminto KMA mišinio homogeniškumas dažniausia dar sumažėja jį laikant kaupiamajame bunkeryje, kraunant į automobilių sunkvežimį ir iš jo į asfalto klotuvo priėmimo bunkerį, taip pat asfalto klotuvu skleidžiant KMA mišinį ir jį pritankinant (Karalevičius, Sivilevičius 2005). Stiprinant asfalto dangą dažnai dedamas geotinklo tarp sluoksnius (Laurinavičius, Oginskas 2006; Vaitkus *et al.* 2007), kuris ištiesai arba atskirose vietose nufrezuojamas ir patenka į RA granules, keisdamas jo homogeniškumą.

2.1 lentelė. Frezuoto ar išlaužo naudoto asfalto (RA) granulių nehomogeniškumą lemiantys veiksniai

Table 2.1. Factors underlying the homogeneity of granules of milled or broken recycled/reclaimed asphalt (RA)

Gyvavimo ciklo laikotarpis	Veiksnyys (priežastis)
1	2
Asfaltinės dangos įrengimas (statyba)	Pagaminto karštai maišyto asfalto (KMA) mišinio nehomogeniškumas dėl panaudotų mineralinių medžiagų granulimetrinės sudėties variacijos, jų ir bitumo dozavimo sistemingųjų ir atsitiktinių paklaidų bei visų komponentų nepakankamo sumaišymo. Naudoto kelio dangos sluoksniui rengti KMA mišinio nehomogeniškumas dėl jo savybių kaitos laikant, kraunant, transportuojant ir klojant. Pakloto kelio dangos sluoksnyje KMA mišinio nehomogeniškumas dėl jo savybių kitimo sutankinimo procese. Geotinklo ar geotekstilės naudojimas tarp viršutinio ir apatinio asfaltinės dangos sluoksnių, kurį nufrezavus pateks į naudoto asfalto (RA) granules.
Asfaltinės dangos sluoksniu eksploatacija ir taisymas	Netolygi senėjančio bitumo savybių kaita dėl oksidacijos, saulės spinduliuotės, temperatūros, transporto priemonių apkrovų, degalų, tepalų, aušinimo skysčių ir druskų poveikio. Asfalto sluoksniu granulimetrinės sudėties kitimas dėl grūdelių irimo ir jų dilimo dangos paviršiuje. Deformacijų pažeistose asfaltinės dangos taisymo papildomų medžiagų lokalinis naudojimas plyšiuose (bitumas, mastika, bitumo emulsija) ir išdaužose (gruntuotė, karštasis, šiltasis ar šaltasis asfalto mišinys). Deformacijų pažeistos asfalto dangos taisymo papildomų medžiagų ištisinis naudojimas atliekant paviršiaus apdarą (šlamai, viengubas ar dvigubas paviršiaus apdaras, plonas asfalto sluoksnis) ir užtaisant provėžas. Išdaužtų, atsiradusių kelio dangoje (dažniausia miesto gatvėse) žiemą, laikinas užtaisyimas ne bituminėmis medžiagomis (betono plytelių, keraminių ir molio plytų nuolaužomis), kurios frezuojant ar laužant dangą patenka į RA granules. Kelio dangos horizontaliojo ženklavimo medžiagų, patenkančių į RA, netolygus pasiskirstymas paviršiaus plote.

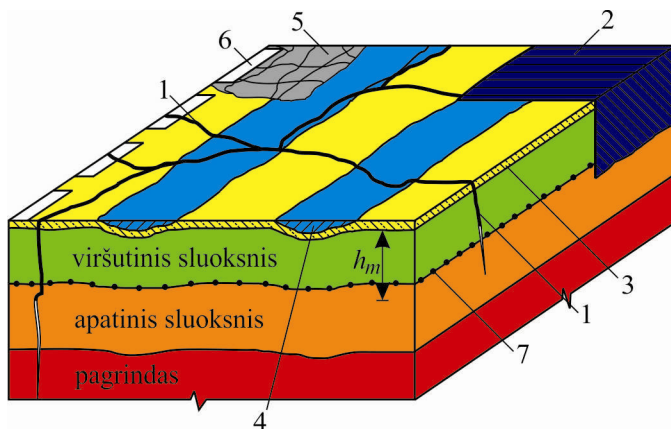
2.1 lentelės pabaiga

1	2
Asfaltinės dangos sluoksnio šaltasis frezavimas ar nuolaužų trupinimas	Frezuojamos dangos kintamojo storio sluoksnio nuėmimas dėl jos nelygumų ir netinkamo skersinio nuolydžio, leidžiantis į RA patekti gilesnių asfalto sluoksnių ir pagrindo sluoksnių medžiagoms, kurių procentinė masė dėl to varijuoja. Netolygus grūdelių trupėjimas asfalto konglomeratui yrant ne per matricą, bet per intarpus, priklausantis nuo frezavimo, nuolaužų trupinimo ir sijojimo technologijos ir asfaltinės dangos sluoksnio savybių bei temperatūros. Skirtingose kelio dangos ploto vietose nufrezuotų RA granulių krovimo, transportavimo ir sandėliavimo technologija, leidžianti nevienodai jas homogenizuoti prie kelio sudaromoje laikinoje rietuvėje (krūvoje). Tiesiai iš frezos transporterio ar iš RA granulių krūvos, sudarytos prie kelio, kaušiniu krautuvu pakrautų RA vežimo, iškrovimo ir homogenizavimo asfaltbetonio gamyklos atviro ar dengto sandėlio krūvoje technologija ir laikymo sąlygos, lemiantys jų segregacinį vienalytiškumą.

Pradėjus eksploatuoti asfalto dangą, ją veikia klimato bei oro sąlygų veiksniai ir transporto priemonių ašių apkrovos, mažinančios stiprio koeficientą, lemiantį reikiamų taisymų (remonto) tipą (Butkevičius *et al.* 2007). Dėl kintamo poveikio asfalto danga dėvisi, viršutiniame jos sluoksnyje atsiranda pažaidų (plyšių, išdaužų, provėžų, bangų, paviršiaus ištrupų) (Haryanto, Takahashi 2007). Pažaidos taisomos naudojant papildomas bitumines medžiagas (2.1 pav.). Šios bituminės medžiagos naudojamos nustatyto storio sluoksniui ištiesai padengiant eksploatuojamos dangos paviršių arba įterpiant į atsitiktine tvarka išsidėčiusius plyšius ir išdaužas, taip pat į dėsingai besitęsiančias provėžas. Papildomų pažaidų taisymo medžiagų kiekis asfalto dangos vienetu varijuoja ir priklauso nuo pažaidų išsidėstymo tvarkos bei matmenų (gylio, pločio, ilgio). Pažaidoms taisyti naudotų medžiagų savybės laikui bėgant taip pat kinta. Todėl baigiant asfalto dangos eksploatavimo laikotarpį dėl skirtingo jos suirties masto ir netolygumo regeneruoti skirto sluoksnio komponentinė sudėtis iš esmės skiriasi nuo naujos asfalto dangos sudėties, o jos variacija padidėja.

Frezuoti skirtos regeneruojamos asfalto dangos viršutinis sluoksnis jau galėjo būti karštai regeneruotas toje pačioje vietoje taikant *repaving*, *remixing*, *remix plus* arba *remix compact* technologijas, kurios dar vadinamos *surface recycling* (The Asphalt Handbook 2007; Karlsson, Isacsson 2006; Asfaltbetonio regeneravimo... 1998). Anksčiau karštai regeneruotos toje pačioje vietoje RA dangos savybės pakito lyginant su nauja KMA danga ne tik dėl regeneruojant pridėtų

bituminių medžiagų ar papildomo KMA mišinio kitos sudėties ir savybių, bet ir bitumo senėjimo KMA kaitinant infraraudonaisiais spinduliais.



2.1 pav. Regeneruojamos asfaltinės dangos nevienalytiškumą didinančių papildomų paviršiaus tekstūrą gerinančių ir pažaidų taisymo medžiagų išdėstymo fragmentas:

- 1 – plyšių mastika, bitumo emulsija ar birumas; 2 – išdaužų lopų asfalto mišinys ir bitumo gruntuočių; 3 – paviršiaus apdaro bituminis riškis ir mineralinės medžiagos; 4 – vėžių užpildymo asfalto mišinys arba šlamas; 5 – plyšių tinklo užhermetinimo bitumo emulsijos ir užpildo sluoksnis; 6 – horizontalaus ženklavimo medžiagos; 7 – geotinklas ar geotekstilė su bitumo emulsija; h_m – vidutinis frezavimo gylis (nuo 40 mm iki 100 mm)

Fig. 2.1. Fragment showing the distribution of additional materials used for increasing the homogeneity of reclaimed asphalt pavement (RAP), improving its surface texture and repairing damages:

- 1 – paste, emulsified asphalt or bitumen for filling cracks; 2 – asphalt mixture and bitumen priming for filling pot-holes; 3 – bitumen binder and mineral aggregates of surface coating; 4 – asphalt mix or slime for filling ruttings; 5 – layer of emulsified asphalt and filler for sealing the net of cracks; 6 – horizontal pavement marking materials; 7 – geogrid or geotextile with emulsified asphalt; h_m – average depth of milling (normally from 40 to 100 mm)

Frezuojant ar laužant, o paskui smulkinant regeneruojamos asfaltinės dangos sluoksnį arba sluoksnius, atsižvelgiant įgylį h_m , į RA granules patenka skirtingas pažaidų taisymo medžiagų kiekis, tik viršutinio ir (arba) apatinio dangos sluoksnių asfaltas. Nuimant senos asfaltinės dangos sluoksnį dalis grūdelių suskyla ir trupa. RA granulės, nuo frezavimo mašinos juostinio krovimo transporterio byrėdamos į automobilinio sunkvežimio, kėbulą iš dalies homogenizuojasi. Čia pat atsiranda RA granulų segregacinis nehomogeniškumas.

Frezuotose RA granulėse esančio bitumo vidutinis procentinis kiekis $\bar{B}_{RA}$ dažniausia būna didesnis nei naujo karštai maišyto asfalto (KMA) dangos sluoksnyje $\bar{B}_{KMA}$, t. y. $\bar{B}_{RA} > \bar{B}_{KMA}$. Bitumo kiekio padidėjimą RA vidutiniu dydžiu $\bar{B}_{MRM}$ lemia dangos priežiūrai ir remontui naudotų bituminių medžiagų (klampaus kelių bitumo, polimerais modifikuota bitumo, bitumo emulsijos arba polimerais modifikuotos emulsijos) didesnis vidutinis kiekis kelio dangos masės vienetė:

$$\bar{B}_{RA} = \bar{B}_{KMA} + \bar{B}_{MRM}. \quad (2.1)$$

Viršutinio dėvimojo dangos sluoksnio asfaltbetonyje rišamosios medžiagos kiekis (masės procentais), viršijantis 100 % mineralinę dalį, turi būti nuo 5,2 masės % 0/16 S-V ir 0/16-V markės iki 8,0 masės % 0/5-V markės (Statybos rekomendacijos R 35–01). Paviršiaus apdarui su 1,2–1,5 % bitumo apdorota skaldele, atliekant viengubo paviršiaus apdorojimo darbus dar reikia vidutiniškai 7,4 % bitumo, t. y. iš viso 8,6–8,9 %, o atliekant dvigubą paviršiaus apdorojimą – 7,7 % bitumo, t. y. iš viso 8,9–9,2 % bitumo. Naudojant bitumu neapdorotą skaldele viengubam paviršiaus apdorojimui vidutiniškai sunaudojama 9,4 % bitumo, atliekant dvigubą paviršiaus apdorojimą reikia vidutiniškai 9,5 % bitumo. Naudojant greitai susiskaidančią katijoninę arba polimerais modifikuotą bitumo emulsiją viengubam paviršiaus apdorojimui jos vidutiniškai reikia nuo 8,6 % iki 14,5 %, dvigubam paviršiaus apdorojimui – 12,9 %.

RA dangos granulimetrinės sudėties pasikeitimą, lyginant su nauja KMA danga, lemia išdaužoms taisyti, paviršiui apdoroti ar šlamui gaminti panaudotų mineralinių medžiagų frakcijų dydis ir kiekis. Jei kurios nors vienos ar kelių gretimų siaurųjų frakcijų kiekis taisymo medžiagose yra didelis, RA granulimetrinės sudėties laužtės ruožas būna statesnis (skirtumas tarp pilnutinių išbirų per gretimus sietus padidėja).

Nuvežtas į asfaltbetonio bazės teritorinį sandėlį RA dažniausia nerūšiuojant supilamas į tą pačią krūvą iš visų kelių ir gatvių dangos. Skirtingos sudėties iš atskirų objektų atvežtas ir vienoje krūvoje laikomas RA beveik nehomogenizuojamas, todėl jo nevienalytiškumą lemia suminė visų trijų laikotarpių (2.1 lentelė) veiksmų įtaka.

RA homogeniškumas (nehomogeniškumas) vertinamas kiekvieno pasirinkto (analizuojamo) kokybės rodiklio sklaidos parametrais: dispersija σ^2 arba standartiniu nuokrypiu σ . Paruošto naudoti RA i -tojo komponento kiekio arba jo savybės rodiklio bendroji dispersija σ_{iRA}^2 skaičiuojama iš adityvinio modelio:

$$\sigma_{iRA}^2 = \sigma_{i1}^2 + \sigma_{i2}^2 + \sigma_{i3}^2, \quad (2.2)$$

čia σ_{i1}^2 – i -tojo komponento dispersija naujoje asfalto dangoje; σ_{i2}^2 – i -tojo komponento dispersija, padidėjusi asfalto dangą taisant papildomomis medžiagomis, keičiančiomis komponentinę asfalto sudėtį ir senėjant bitumui jos eksploatavimo pabaigoje; σ_{i3}^2 – i -tojo komponento dispersija, padidėjusi į vieną rietuvę (krūvą, sąvartą) pilant RA granulės iš skirtingų kelių ir gatvių ruožų ir jų nehomogenizuojant, taip pat dėl jo segregacijos.

Paruoštų naudoti RA granulių, pridėdamų gaminant regeneruotą KMA mišinį, tikrasis homogeniškumas priklauso nuo visų 2.1 lentelėje susistemintų veiksnių, kurių faktiškieji parametrai yra stochastiniai ir gali iš esmės skirtis. Todėl RA komponentų kiekio, taip pat jų savybių dispersijų σ_{iRA}^2 ir standartinių nuokrypių σ_{iRA} tikrąsias vertes galima nustatyti ne iš teorinių modelių, bet iš eksperimentinių tyrimų duomenų.

2.2. Dviejų rūšių sumaišyto bitumo ar kitos atnaujinančiosios medžiagos teorinė klampa

Tinkamos atnaujinančiosios medžiagos rūšis ir optimalus kiekis priklauso nuo regeneruojamo RA sudėties bei savybių, o ypač nuo pasenusio bitumo savybių, kurias galima nustatyti laboratorijoje atlikus eksperimentinius tyrimus. Šio darbo tikslas – nustatyti atnaujinančio naujo bitumo (atkuriančios medžiagos) markės ir procentinio kiekio įtaką regeneruoto bitumo savybėms ir iš RA su atnaujinančiąja medžiaga suformuotų Maršalo bandinių fiziniams ir mechaniniams rodikliams.

Pagrindinė bitumo paskirtis – veikti kaip adhezyvas (Read, Witheoak 2003).

RA esantis senas bitumas dėl transporto priemonių apkrovų ir aplinkos veiksnių, paspartinusių oksidacijos ir kitus cheminius bei fizinius negrįžtamuosius procesus plėvelėse, gaubiančiose grūdelius, suketėja, tampa neplastiškas ir trapus. Procesai, vykstantys bitumo molekulinio lygmeniu, keičia asfaltbetonio savybes, dėl ko padidėja mechaninis stiprumas, o vėliau jame atsiranda plyšių.

Seno bitumo adsorbciniai sluoksniai, tiesiogiai sąveikaujantys su mineralinių medžiagų grūdeliais, turi vieną pranašumą: bitumo molekulių judrumas mažesnis už laisvojo bitumo molekules. Bitume padidėja asfaltėnų kiekis (iki 37–38 %) arba net iki 44,6 % (Valdės *et al.* 2011), sumažėja dervų kiekis ir padidėja parafino – nafteninių angliavandenių.

Sendinimas padidina Lifshitz-van der Waals komponentų skaičių ir sumažina rūgšties ir bazės komponentų skaičių. Taigi rišiklio atsinaujinimo savybės turėtų sumažėti dėl rišiklio senėjimo (Cheng *et al.* 2002).

Bitumo senėjimas asfaltbetonyje vyksta pagal tą patį mechanizmą kaip ir laisvajame bitume, nors yra ir kai kurių ypatumų, nulemtų mineralinių medžiagų

įtakos asfaltbetonyje. Adsorbicinių sluoksnių bitumo molekulės mažiau judrios nei laisvojo bitumo molekulės, o tai mažina reakcinę jo gebą.

Kelio asfaltbetoninės dangos senėjimą galima apibūdinti kaip jo trapumo temperatūros padidėjimą veikiant oro ir klimato veiksniams bei nuovargiui dėl transporto priemonių apkrovų. Žinant asfaltbetonio trapumo temperatūros kaitą, kai jį veikia šie veiksniai, galima prognozuoti eksploatuojamos kelio dangos pleišėjimo kinetiką.

Vienas pagrindinių Witczak, Fonseca (1996) tyrimų tikslų – įvertinti trumpalaikio ir ilgalaikio senėjimo įtaką pradinio asfalto cemento rišiklio klampumo ir temperatūros sąryšiui. Naudodamas lauko duomenis ir atsižvelgiant į pagrindinės konsistencijos asfalto rišiklio savybes, Witczak (2005) sukūrė modelius abiem senėjimo poveikiams. Šie modeliai pagrįsti tuo, kad dauguma asfalto cementų rodo tiesinį ryšį, kai loglog klampos (η), matuojamos centipuaizais, su temperatūros logaritmu (T_R , Rankino laipsniais) nubraižoma diagrama (Bonquist, Christensen 2005):

$$\log \log \eta = A + VTS \log T_R, \quad (2.3)$$

čia A ir VTS – regresijos konstantos, atspindinčios konkretaus tipo asfalto rišiklį ir šios medžiagos senėjimo sąlygas.

Asfalto dangos konstrukcijos savybes stipriai veikia asfalto mišinio sluoksnių modulis. Apskritai modulį veikia įvairios mišinio charakteristikos, apkrovų dydis ir vietos aplinkos sąlygos (Witczak, Fonseca 1996). Įtraukiant į šiuos tyrimus įprastinį asfalto cementą dėl amžiaus klampos, buvo gautas patikslintas asfalto mišinių dinaminio modulio modelis, sukurtas naudojant faktinę bitumo klampą kaip svarbiausią numatomą kintamąjį – temperatūrą.

Galutinis dinaminio modulio modelis sudarytas iš statistinio tyrimo:

$$\begin{aligned} \log E = & -0,261 + 0,008225 p_{200} - 0,00000101(p_{200})^2 + 0,00196 p_4 - \\ & - 0,03157 V_a - 0,415 \left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) + \\ & + \frac{[1,87 + 0,002808 p_4 + 0,0000404 p_{38} - 0,0001786(p_{38})^2 + 0,0164 p_{34}]}{1 + e^{(-0,716 \log f - 0,7425 \log \eta)}}, \quad (2.4) \end{aligned}$$

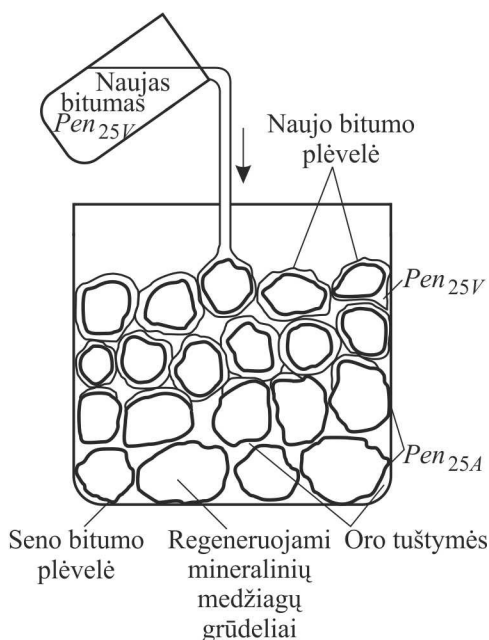
čia E – asfalto mišinio dinaminis modulis, 10^5 psi (jėgos svaras į kvadratinį colį); η – bitumo klampa, 10^6 puazo (bet kokioje temperatūroje, senėjimo laipsnis); f – apkrovos dažnis, Hz; V_a – oro tuštymių mišinyje kiekis, tūrio procentais; V_{beff} – efektyvaus bitumo kiekis, tūrio procentais; p_{34} – pilnutinė grūdelių liekana ant 3/4 colio (19,0 mm) sieto, masės procentais; p_{38} – pilnutinė grūdelių liekana

ant 3/8 colio (9,5 mm) sieto, masės procentais; p_4 – pilnutinė grūdelių liekana ant Nr. 4 (4,75 mm) sieto, masės procentais; p_{200} – pilnutinė išbira per Nr. 200 (0,075 mm) sieta, masės procentais.

Šios regresijos lygties determinacijos koeficientas $R^2 = 0,875$ rodo, kad daugiau kaip 87 % dinaminio modulio kitimas nulemtas modelį (2.4) sudarančių veiksnių (kintamųjų).

Asfalto dangos regeneravimo procese reikia atkurti seno bitumo savybes. Tam rekomenduojama naudoti naują skystesnių rūšių kelių bitumą, parenkamą pagal seno bitumo, esančio RA, penetraciją.

Kai asfalto regeneravimo procese nepridedama naujų mineralinių medžiagų, naujas bitumas ar kita atnaujinančioji medžiaga (*rejuvenating agent*) pilama į maišomą karštą RA dangos mišinį (2.2 pav.). Naujas bitumas iš tūrinio būvio dėl didesnės adhezijos už koheziją palaipsniui virsta plėvelėmis, dengiančiomis RA dangos grūdelius. Jo plėvelių vientisumas priklauso nuo maišymo trukmės, o storis – nuo įpildo naujo bitumo procentinio kiekio.



2.2 pav. Naujo bitumo virsmas iš tūrinio būvio plėvelėmis, dengiančiomis RA dangos grūdelius, maišymo proceso pradžioje

Fig. 2.2. Conversion of the virgin bitumen from bulk condition into films coating RAP particles in the beginning of the mixing process

Naujos bituminės rišamosios medžiagos (naujo bitumo) rūšis (markė) nustatoma iš penetracijos priklausomybės lygties:

$$Pen_{25R} = Pen_{25A}^a \times Pen_{25V}^b, \quad (2.5)$$

arba

$$Pen_{25R} = 10^{\frac{a \log Pen_{25A} + b \log Pen_{25V}}{100}}, \quad (2.6)$$

čia Pen_{25R} – regeneruoto (suminio, sudėtinio) bitumo penetracija 25 °C temperatūroje, adatos įsmigimo gylis – 0,1 mm; Pen_{25A} – seno (pasenusio) bitumo, esančio RA dangoje, tirpiosios dalies penetracija 25 °C temperatūroje, adatos įsmigimo gylis – 0,1 mm; Pen_{25V} – naujo bitumo penetracija 25 °C temperatūroje, adatos įsmigimo gylis – 0,1 mm; a , b – atitinkamai seno ir naujo bitumų dalis regeneruotame (sudėtiniam) bitume ($a + b = 1$).

Regeneruoto bitumo penetraciją Pen_{25R} patogų nustatyti iš nomogramos.

Naujo (atnaujinančio) bitumo reikalinga penetracija Pen_{25V} nustatoma iš lygties:

$$Pen_{25V} = \left(\frac{Pen_{25R}}{Pen_{25A}^a} \right)^{\frac{1}{b}}. \quad (2.7)$$

Jei senas (pasenęs) bitumas regeneruojamas (atnaujinamas) jį maišant su nauju klampiuoju ar skiestuoju kelių bitumu, tai seno bitumo kiekis a abiejų bitumų mišinyje (regeneruotame bitume) apskaičiuojamas iš lygties:

$$a = 1 - b = \frac{\log Pen_{25V} - \log Pen_{25R}}{\log Pen_{25V} - \log Pen_{25A}}, \quad (2.8)$$

čia a – seno bitumo kiekis regeneruotame bitume vieneto dalimis; b – naujo (atnaujinančio) bitumo kiekis regeneruotame bitume vieneto dalimis ($a + b = 1$).

Bitumo savybės, kurias lemia seno bitumo, esančio regeneruojamoje medžiagoje (naudoto asfalto mišinyje), kartu su nauju bitumu, apskaičiuojamos lygtimis (Pereira *et al.* 2004):

$$\log Pen_{25FB} = R_R \frac{P_{RB}}{P_{FB}} \log Pen_{25RB} + \left(1 - R_R \frac{P_{RB}}{P_{FB}} \right) \log Pen_{25NB}, \quad (2.9)$$

$$P_{NB} = P_{FB} - R_R P_{RB}, \quad (2.10)$$

čia R_R – regeneravimo santykis (koeficientas); P_{RB} – procentinis bitumo kiekis regeneruojamoje bituminėje medžiagoje (naudotame asfalte); P_{FB} – procentinis bitumo kiekis galutiniame (regeneruotame) mišinyje; P_{NB} – procentinis pridedamo naujo bitumo kiekis; Pen_{25FB} – sumaišyto (seno ir naujo) bitumo penetracija 25 °C temperatūroje, 0,1 mm; Pen_{25RB} – bitumo regeneruoto (išskirto) iš naudoto asfalto (seno bitumo) penetracija 25 °C temperatūroje, 0,1 mm; Pen_{25NB} – naujo bitumo (pridedamo) penetracija 25 °C temperatūroje, 0,1 mm.

Proporcinės dalys tarp naujo ir seno rišiklio gali būti apskaičiuojamos remiantis mišinio klampumo taisykle (Mix Design Methods...1993; Aravind Das 2007b), kad galutinis (regeneruotas) mišinys įgautų tikslinį klampumą pagal nurodytą temperatūrą:

$$\ln(\eta_t) = p_{ob} \ln(\eta_0) + p_{nb} \ln \eta_n, \quad (2.11)$$

čia η_t , η_0 , η_n – atitinkamai rišiklių mišinio, seno ir naujo rišiklių klampumas nustatytoje temperatūroje; p_{ob} ir p_{nb} – seno ir naujo rišiklių dalis ($p_{ob} + p_{nb} = 1$).

Atnaujinančio rišiklio, kurio reikia pridėti į bandomuosius kartotinai naudojamus mišinius, procentinis kiekis nuo bendrojo regeneruoto mišinio masės apskaičiuojamas formule (Arrhenius 1887; Mix Design Methods... 1993; Widyatmoko 2006; Kandhal, Mallic 1997):

$$p_{nb} = \frac{(100^2 - rp_{sb})p_b}{100(100 - p_{sb})} - \frac{(100 - r)p_{sb}}{100 - p_{sb}}, \quad (2.12)$$

čia p_{nb} – naujo bitumo (atnaujinančio rišiklio su kartotinai naudojamu priedu, jei jis naudojamas) procentinė dalis regeneruotame mišinyje; r – naujo užpildo (mineralinių medžiagų) kiekis, išreikštas procentais nuo viso užpildo regeneruotame asfalto mišinyje; p_{sb} – procentinis bitumo (seno) kiekis regeneruojamos dangos asfalte; p_b – procentinis bitumo kiekis galutiniame (regeneruotame) asfalto mišinyje arba bitumo poreikis, apskaičiuotas pagal (2.13) empirinę formulę:

$$p_b = 0,035 P_{CA} + 0,045 P_{FA} + K \cdot P_{MF} + F, \quad (2.13)$$

čia p_b – apytikslis suminis bitumo poreikis regeneruotame asfalto mišinyje, masė %; P_{CA} – asfalto mišinio mineralinių medžiagų pilnutinė liekana ant 2,36 mm sieto (skaldos kiekis), masė %; P_{FA} – asfalto mišinio mineralinių medžiagų, prabyrančių per 2,36 mm sieta, bet liekančių ant 0,075 mm sieto (smėlio kiekis), masė %; P_{MF} – asfalto mišinio mineralinių medžiagų dalelių mažesnių, už 0,075 mm (mineralinių miltelių kiekis), masė %; K – koeficientas, įvertinantis mineralinių miltelių kiekį asfalto mišinyje. Kai jų yra 11–15 %, tai $K=0,15$; kai

jų yra 6–10 %, tai $K=0,18$; kai jų yra 5 % ir mažiau, tai $K=0,20$; F lygus 0–2,0 %, lengvojo ir sunkiojo užpildo sugertiems (absorbcijos). Neturint kitų duomenų siūloma imti $F=0,7$ %.

Mechaniškai sumaišius RA granules su nauju rišikliu svarbu, kad senas ir naujas bitumai tolygiai pasiskirstytų ištisinėse regeneruotose plėvelėse ir visiškai susimaišytų tarp savęs.

2.3. Seno ir naujo bitumų sluoksnių maišymasis regeneruotoje plėvelėje

Regeneruojant karštą asfaltą gamykloje arba vietoje, naujas rišiklis ir užpildas maišomas su naudotu asfaltu. Naujas rišiklis turėtų būti atnaujinančioji medžiaga arba minkštas bitumas, norint gauti galutinį priimtos konsistencijos seno ir naujo rišiklio mišinį (Karlsson, Isacson 2006; Noureldin, Wood 1987; Collop *et al.* 2006; Bhasin, Little 2009; Кашевская 2003; Королев *et al.* 1984).

Kai RA granulės sumaišomos su pirminiais užpildais ir nauju rišikliu, regeneruotame karštai maišytame asfalte (KMA), RA rišiklis iš dalies susimaišo su nauju rišikliu. Institucijos riboja RA kiekį, nes nėra žinomas susimaišymo procesas tarp RA ir naujų (pirminių) medžiagų (Shirodkar *et al.* 2011).

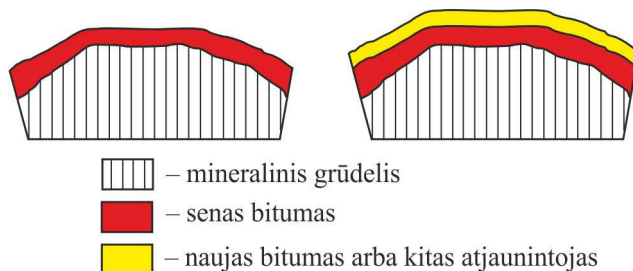
Pirmuosius atnaujinančiosios medžiagos išskaidymo po seną rišiklį laboratorinius tyrimus atliko Carpenter ir Wolosick (1980).

Senos asfalto dangos nufrezuotos granulės būna sudarytos iš kelių, keliolikos ar keliasdešimt grūdelių, sucementuotų pasenusiu bitumu. Karšto regeneravimo procese, jas kaitinant ir maišant, garuoja vanduo. Kylant temperatūrai RA grūdelių grūdėlius rišantis senas bitumas iš kieto virsta klampiu, o galiausiai ir skysčiu, kurio sumažėjusi kohezija leidžia granulėms suirti. Adhezija tarp bitumo ir užpildo yra didesnė negu kohezija rišiklyje maždaug kambario temperatūrai (Cheng *et al.* 2002).

Atskiri RA grūdeliai arba nespėjusios suirti granulės būna padengti seno bitumo sluoksniu, kurį reikia atnaujinti. Maišymo procese įpylus ar išpurškus atnaujinančiąją medžiagą (arba skystą naują bitumą), ji tam tikro storio plėvelėmis padengia RA grūdėlius. Tokiu būdu kiekvienas RA grūdelis padengiamas dvigubai: grūdelį gaubiantį vidinį sluoksnį sudaro senas klampus bitumas, o nesiliečiantį su grūdeliu išorinį sluoksnį sudaro atnaujinančioji medžiaga (naujas skystas bitumas) (2.3 pav.).

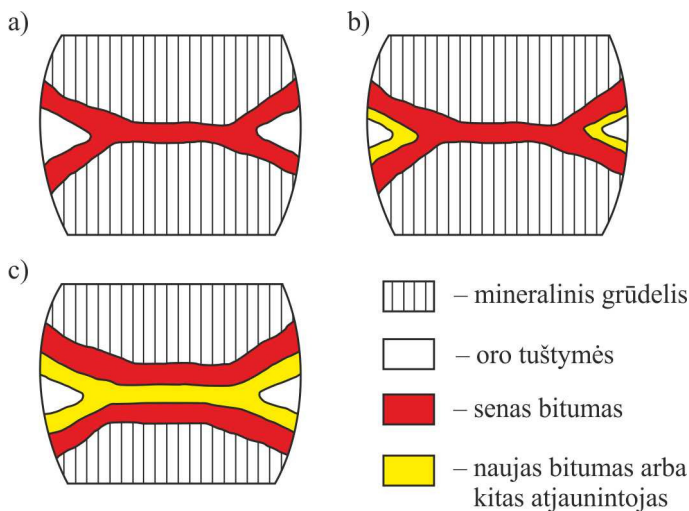
Nesutankinto regeneruojamo KMA mišinio grūdeliai liečiasi vienas su kitu ir dar nėra sucementuoti į stiprų konglomeratą. Todėl senas bitumas yra vidiniame grūdelio atžvilgiu sluoksnyje, o atnaujinančioji medžiaga – išoriniame sluoksnyje. Kai regeneruotas KMA mišinys paklojamas ir sutankinamas, RA grūdeliai sąveikauja vienas su kitu. Dviejų prispaustų vienas prie kito sutankintos asfalto dangos sluoksnio grūdelių sąlyčio vietoje gali būti tik seno bitumo plėvelė, seno bitumo

plėvelė su oro tuštymių srityje išspausta atnaujinančiąja medžiaga arba dvi seno bitumo plėvelės atskiriančios atnaujinančiosios medžiagos sluoksnis (2.4 pav.).



2.3 pav. Regeneruojamo asfalto mišinio mineralinį grūdelį gaubiančio bitumo plėvelės sandara

Fig. 2.3. Structure of a bitumen film coating a mineral particle of the reclaimed asphalt pavement mixture



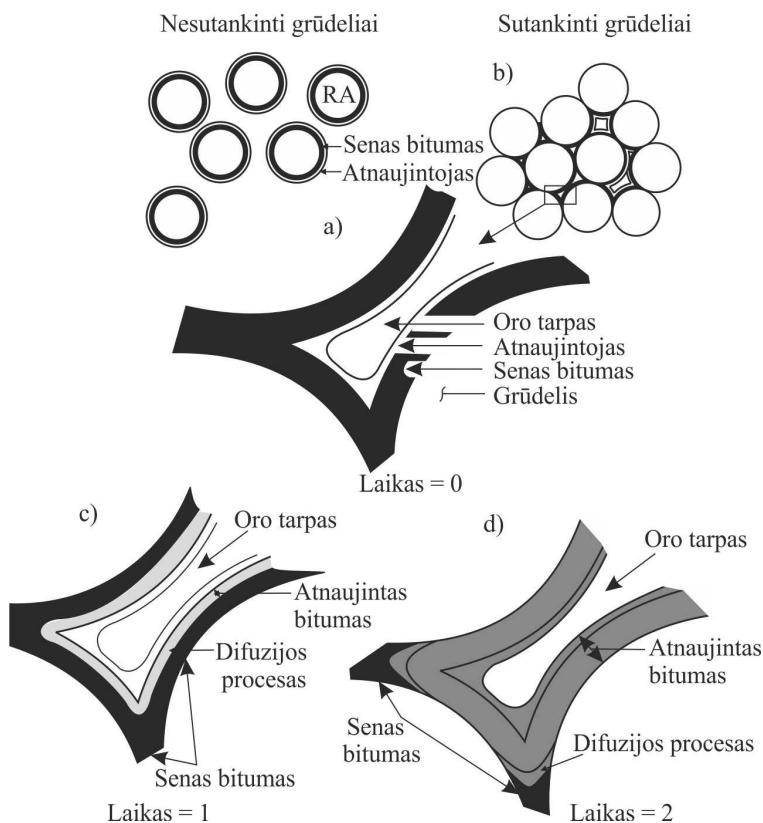
2.4 pav. Regeneruotos asfalto dangos dviejų gretimų grūdelių kontakto vietoje esančio bitumo plėvelės struktūra:

a – kai nėra atnaujinančiosios medžiagos; b – atnaujinančioji medžiaga iš sąlyčio vietos išspausta arba nepateko; c – sąlyčio vietoje tarp seno bitumo plėvelių yra atnaujinančiosios medžiagos sluoksnis

Fig. 2.4. The structure of the bitumen film in the place of the contact of two adjacent particles in the RAP:

a – when rejuvenator is absent; b – rejuvenator is extracted from the contact point or is not there; c – a rejuvenator layer is between aged bitumen films in the plane of contact

Kai tarp regeneruotos KMA dangos vienodo dydžio rutulio formos užpildo grūdelių yra oro tuštymės, tai atnaujintojo difuzijos procesą į seno bitumo plėvelės pateikė Carpenter ir Wolosick (1980). Mokslininkai įrodė, kad tarp nesiliečiančių dviejų RA grūdelių yra oro tuštymė, kurią gaubia atnaujinančiosios medžiagos (išorinio sluoksnio) ir seno bitumo (vidinio sluoksnio) plėvelės ir jos laikui bėgant dėl difuzijos iš dalies susimaišo (2.5 pav.).

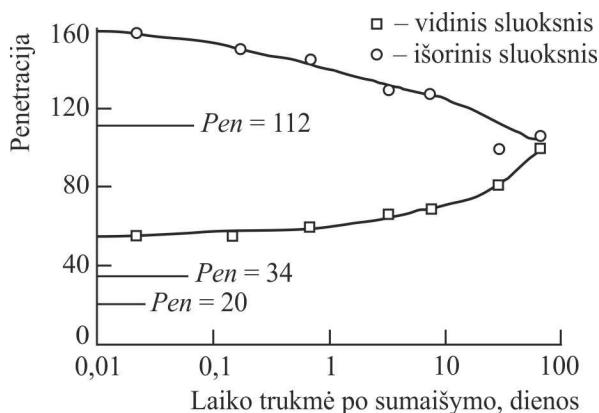


2.5 pav. Scheminis difuzijos vyksmas sutankintame asfalto bandinyje (Carpenter, Wolosick 1980)

Fig. 2.5. Schematic of diffusion in a compacted sample (by Carpenter, Wolosick 1980)

Duomenys, gauti atlikus ekstrahavimą (*extraction*) (Carpenter, Wolosick 1980), aiškiai rodo, kad išorinių ir vidinių *sluoksnių* konsistencija (*consistency*) nėra vienoda imant tam tikrą laiką po (su)maišymo. Penetracija 25 °C temperatūroje kiekvienam sluoksniui yra žymima kaip laiko funkcija po (su) maišymo

(2.6 pav.). Duomenys aiškiai rodo, kad išorinių ir vidinių sluoksnių konsistencija supanašėja. Tai rodo atnaujinto ėminio penetracijos vertė. Ilgalaike konsistencija yra standesnė/kietesnė negu atnaujinto bitumo konsistencija ir rodo, kad kietėjimas buvo sukeltas laboratorinio (su) maišymo procedūros metu.



2.6 pav. Bitumo išorinio ir vidinio sluoksnių penetracijos priklausomybė nuo laiko (Carpenter, Wolosick 1980)

Fig. 2.6. Penetration of the outer and inner layers as a function of time

Spėjama (Carpenter, Wolosick 1980), kad atnaujinančiosios medžiagos išsiskaidymas (difuzija) po pasenusį bitumą regeneruojant asfaltą gali būti aprašomas šiais etapais. Pirma, atnaujinančiosios medžiagos formuoja labai mažos klampos sluoksnius, dengiančius užpildo grūdelius. Atnaujinančiosios medžiagos pradeda skverbtis į pasenusio bitumo sluoksnį, taip sumažindamos naujos atnaujinančiosios medžiagos kiekius, dengiančius bitumu padengtus mineralinius grūdelius ir minkštinančius seną bitumą. Praėjus tam tikram laikui neapdorotos atnaujinančiosios medžiagos. Tuo pat metu vidinių sluoksnių (arčiau užpildo grūdelių) klampa mažėja, o išorinių sluoksnių didėja (Karlsson, Isacson 2006).

Huang *et al.* (2005) tyrimo tikslas – atskleisti, kiek būtent pasenęs RA bitumas susilies su nauju bitumu normaliomis maišymo sąlygomis. Ir, jeigu egzistuoja sudėtinė sluoksninė sistema, išsiaiškinti, kokią įtaką turės KMA mišinių funkcionavimui.

Labai mažai žinoma apie difuzijos procesus, kai seni ar nauji rišikliai susimaišo asfalto perdirbimo proceso metu. Jei šis procesas neužbaigtas, bus neigiamai veikiamos gaunamo regeneruoto asfalto savybės (Karlsson, Isacson 2003).

Difuzijai matematiškai aprašyti paprastai naudojamas antrasis Fiko (Fick) dėsnis, kurio išraiška pateikta (2.14) lygtimi, yra cheminio potencialo difuzijai

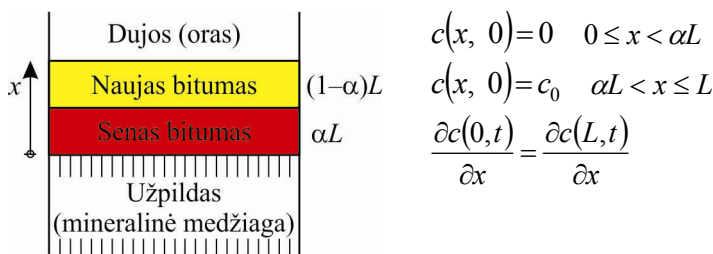
bendrosios teorijos supaprastinimas. Fiko dėsnis teigia, kad pastovus slėgis ir temperatūra per visą ėminį būna neatsižvelgiant į ilgalaikes elektrostatinės sąveikas. Norint suprasti eksperimentinius duomenis buvo panaudotas Fiko dėsnis (Karlsson, Isacson 2003) siekiant gauti matematinę (arba skaitmeninę) koncentracijos c išraišką, remiantis Kranko (Crank 1956) teorija:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (2.14)$$

čia t – laikas, x – pozicija (padėtis), D – difuzijos koeficientas.

Difuzijos koeficientas D gaunamas šią matematinę išraišką pritaikius prie eksperimentinių duomenų.

Seno bitumo ir atstatančiosios medžiagos (naujo bitumo) dvisluoksnės sistemos, dengiančios mineralinės medžiagos dalelę (2.7 pav., struktūra ir storiai aprašo eksperimentinių bandymų pradines ir kraštines (kraštines) sąlygas.



2.7 pav. Bandymo bandinio schema difuzijos pradžioje ir koncentracijos $c(x; t)$ pradinės ir kraštinės sąlygos

Fig. 2.7. Schematic of test specimen at stout of diffusion test and initial and boundary conditions for concentration, $c(x; t)$

Eksperimentas gali būti modeliuojamas vienmačiu seno bitumo sluoksnyje, atstatančiosios medžiagos naujo bitumo pradinė koncentracija yra 0, o atstatymo sluoksnyje koncentracija yra c_0 . Abu sluoksniai turi bendrą L storio sluoksnį, o kiekvieno sluoksnio storis yra atitinkamai αL ir $(1 - \alpha)L$.

Lygtis (2.14) yra antrosios eilės diferencialinė lygtis, kuri vienmačiu atveju gal būti suskirstyta į dvi paprastas diferencialines lygtis:

$$\frac{1}{T} \cdot \frac{dT}{dt} = \lambda D, \quad (2.15)$$

ir

$$\frac{D}{X} \cdot \frac{d^2 X}{dx^2} = \lambda D, \quad (2.16)$$

pakeičiant

$$c(x, t) = X(x) \cdot T(t).$$

(2.15) lygtis turi sprendinį:

$$T(t) = e^{\lambda_n D t}. \quad (2.17)$$

Jeigu λ visada yra neigiamas, tai (2.16) lygtis turi sprendinį:

$$X(x) = A_n \cos \sqrt{-\lambda_n} x. \quad (2.18)$$

$X(x)$ ir $T(t)$ sprendiniai kartu leidžia gauti galutinį atstatančiosios medžiagos (naujo bitumo) koncentracijos $c(x, t)$ sprendinį, atsižvelgiant į pradinės ir kraštinės sąlygas, pateiktas 2.7 paveiksle.

$$c(x, t) = (1 - \alpha) \cdot c_0 - \frac{2c_0}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\alpha n \pi)}{n} \cdot \cos \left[\frac{n \pi x}{L} \right] \cdot e^{-\left[\frac{n \pi}{L} \right]^2 D t}. \quad (2.19)$$

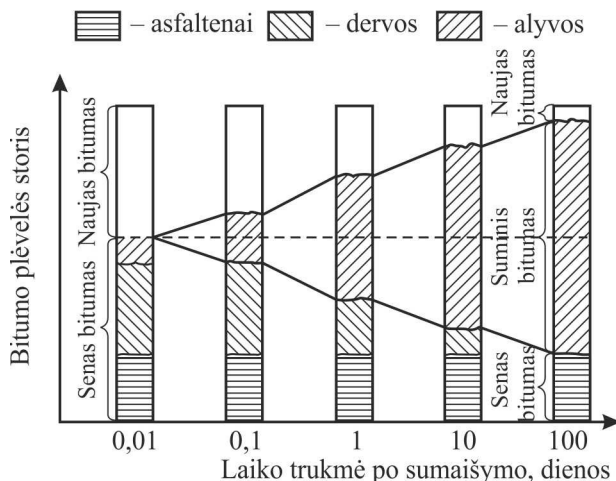
Remiantis prielaida, kad Fiko dėsnis galioja, eksponentinė funkcija (2.19) lygtyje reiškia, kad laikas t , reikalingas difuzijos procesui, yra proporcingas rišiklio sluoksnio storiui L kvadratu. Galutinė (2.19) lygtis yra faktinių sąlygų difuzijos metu supaprastinta išraiška. Difuzijos bituminiuose rišikliuose analizė yra sudėtinga dėl bitumo sudėtingų cheminių savybių. Iš tikrųjų, kiekviena bitumo molekulė difunduoja esant tam tikram greičiui, kurį nulemia molekulių struktūra ir jų kaimyninių (gretimų) molekulių struktūra tam tikrais momentais. Difuzija priklauso nuo difuzanto koncentracijos ir difuzijos koeficientų paskirstymo molekulių, kurios dalyvauja difuzijos procese, intervalu. Priklausomybė nuo koncentracijos yra ypač svarbi tuo atveju, kai difuzantas keičia difundavimo aplinkos (sąlygų) difunduojančias savybes. Taip būna, jei, pavyzdžiui, naudojamas didelis kiekis mažo klampumo medžiagos, kuri minkština seną bitumą ir taip padidina mišinio difuzijos koeficientą.

Galima daryti prielaidą, kad jeigu sena asfalto rišamoji medžiaga nėra iki galo sumaišoma su nauju bitumu arba atnaujinančiąja medžiaga, tuomet ji formuoja sluoksnį, dengiantį RA užpildą. Dėl ilgalaikio senėjimo šis sluoksnis yra daug standesnis nei nauja rišamoji medžiaga. Vadinasi, RA ir naujos medžiagos mišinys egzistuoja sudėtinė sluoksninė sistema. Tokia sudėtinė sistema būtų naudinga norint sumažinti spaudimo koncentraciją. Šiuo atveju ji potencialiai pagerintų asfalto mišinių funkcionavimą (Huang *et al.* 2005).

Pagal Koroliov (1986) teoriją bitumo plėvelė pradeda formuotis maišymo metu bitumą sujungiant su mineralinėmis medžiagomis ir baigiasi klojant ir tankinant asfalto mišinį, kai jis atšąla asfaltbetonio dangoje. Grūdelio paviršiuje bitumo plėvelė yra persotinta didelio molekulinio svorio dalies, sudarytos iš asfaltenų ir dervų.

Veikiant adsorbcijai, apimančiai bitumo pasienio sluoksnį, kinta ir bitumo struktūra dėl mineralinės medžiagos paviršiaus jėgų lauko. Patekusio į šių jėgų poveikio zoną keičiasi bitumo struktūra. Jo stambieji molekuliniai junginiai pagal estafetės veikimą sudaro grandinėles, statmenas mineralinio grūdelio paviršiui. Grandinėlės grandžių stiprumas, tolstant nuo grūdelio, mažėja ir kelių mikrometrų atstumu jis būna praktiškai lygus nuliui, bitumas įgauna tūrinių savybių. Tyrimai (Koroliov 1986) leido orientuotame bitumo sluoksnyje išskirti tris zonas, pasižyminčias būdinga struktūra ir fizinėmis bei mechaninėmis savybėmis. Prie pat grūdelio yra kietoji zona, sudaryta iš daugumos asfaltenų, už jos – struktūrizuota zona ir toliausiai nuo grūdelio paviršiaus – difuzinė zona, kuriose asfaltenų koncentracija mažėja, o aromatinių angliavandenilių ir parafino-nafteninių angliavandenilių koncentracija didėja.

Regeneruoto asfalto seno bitumo plėvelės struktūra yra sluoksninė (2.8 pav.). Bitumas gali būti suskirstytas į keturias grupes: asfaltenai, dervos, aromatiniai junginiai ir prisotintieji junginiai (Read, Whiteoak 2003). Bitumas yra asfaltenų, dervų ir tepalinių frakcijų deriniai. Asfaltenai yra daug klampesni negu dervos ir tepalinės frakcijos (Noureldin, Wood 1989).



2.8 pav. Regeneruoto seno asfalto grūdelių dengiančios seno ir naujo bitumo sluoksnių maišymosi dinamikos modelis

Fig. 2.8. The dynamic model of mixing the ages and virgin bitumen layers which coat the aged particle of the recycled asphalt

Prie grūdelio paviršiaus kietąją zoną sudaro asfaltenai, ją gaubia klampi derva ir alyva. RA sumaišius su atnaujinančiąja medžiaga (nauju skystu bitumu), dėl difuzijos atnaujinančioji medžiaga skverbiasi į seno bitumo plėvelės išorinį sluoksnį. Laikui bėgant dėl abiejų bitumų sąveikos dalis jų plėvelės regeneruojasi, dėl ko atnaujinančiosios medžiagos sluoksnis plonėja ir beveik išnyksta. Seno bitumo sluoksnis regeneruojamas iki kietos asfaltenų zonos.

RA esančio ir naujo bitumų maišymosi pabaigos laikas priklauso nuo bitumų savybių (klampos, cheminės sudėties, plėvelių storio) ir aplinkos sąlygų (temperatūros, slėgio). Seno bitumo ir atnaujinančiosios medžiagos difuzijos procesų dinamika dar nėra iki galo ištyrinėta praktikoje. Paspartinus difuzijos procesus greičiau būtų pasiektas pozityvus regeneravimo rezultatas.

2.4. Susistemintieji asfalto dangos regeneravimo moksliniai principai

Kuriant asfalto dangos regeneravimo būdus ir technologijas, reikia žinoti ir taikyti svarbiausius šio palyginti naujo ir perspektyvaus kelių dangos savybių atkūrimo, kartotinai naudojant asfaltines jos medžiagas, metodo principus. Šiuos principus mes pateikiame iš asmeninių teorinių žinių ir praktinės patirties, taip pat remdamiesi kitų tyrėjų atliktų mokslo darbų rezultatų analize.

- *Pirmasis principas* (asfalto konglomerato pirminio ardymo į granules, luitus ar luitų gabalus būtinybės). Senos regeneruojamos dangos asfaltas naudojant mechaninę, šiluminę arba hidroterminę energiją privalo būti suskaidytas į atskirus elementus sudarant galimybę pridedamomis medžiagomis papildomai pagerinti jo struktūrą ir savybes visuose tūrio vietose, o ne tik paviršiaus sluoksnyje. Į nesuardytą dangą iš viršaus įterpti pagerinančius priedus gana sudėtinga ir neefektyvu, nes taip jos supleišėjęs pasenęs asfaltas nebūtų vientisai regeneruotas visame sluoksnio storyje.
- *Antrasis principas* (asfalto konglomerato komponentų atskyrimo vienas nuo kito). Regeneruojamos dangos asfaltą būtina suardyti iki jį sudarančių pradinių biriųjų komponentų lygmens. Atskiros įvairaus dydžio mineralinių medžiagų dalelės (kietoji fazė) atskiriami suardant juos surišusio bitumo (skystosios fazės) plėveles. Kadangi adhezijos jėgos būna didesnės už kohezijos jėgas, tai termomechaniskai veikiamo naudoto asfalto granulės (smulkiny) dažniausia suyra ne bitumo ir grūdelio (dalelės) pasienio sluoksnyje, bet tūrinio bitumo ir oro tuštymių sluoksnyje. Jie atskiriami vienas nuo kito tiek, kad keičiant padėtį erdvėje per atsirusius tarpus galėtų patekti pagerinantys priedai (rišiklis ar ir minerali-

nės medžiagos), kurie tolygiai pasiskirstytų tarp gautų regeneruojamo mišinio grūdelių.

- *Trečiasis principas* (irties dėl mechaninio arba termomechaninio poveikio per matricą – bitumo plėveles ir tuštynes). Senos dangos regeneruojamas asfaltas turi būti ardomas taip, kad irtų asfalto rišamoji medžiaga (bituminio rišklio ir mineralinių miltelių junginiai) arba tūrinio bitumo plėvelės, sucementavusios kompozicinę medžiagą į konglomeratą. Jo irimo regeneravimo procese plokštumos (vietos) gali sutapti su senoje kelio dangoje atsiradusiais mikroplyšiais ir oro tuštymėmis. Pageidautina, kad asfalto irimo ardant (frezuojant, išlaužiant, trupinant) plokštumos eitų per matricą, bet ne per intarpus (skeliamus skaldos ir smėlio grūdelius). Frezos rėžiklių ir regeneruojamo asfalto sąveikos vietoje skilus skaldos ir smėlio grūdeliams atsiranda naujų riškliu nepadengtų paviršių, didinančių visų mišinio dalelių paviršiaus plotą ir regeneruoto bitumo reikiamą suminį kiekį. Šalta frezuojant asfalto dangą arba akmenskaldėje smulkinant išlaužtus jos luitus ar luitų gabalus, kai kurie skaldos ir smėlio grūdeliai skyla (lūžta). Frezuojant įkaitintą dangą regeneratoriumi, grūdelių skilimo tikimybė sumažėja. Nežinant mineralinių medžiagų dėl jų grūdelių smulkėjimo laipsnio ir neįvertinus jo dozuojuant papildomas medžiagas ar asfalto mišinį, gaunamas regeneruotas asfaltas su didesniu smulkiųjų dalelių kiekiu.
- *Ketvirtasis principas* (atskiriamų mineralinių komponentų ir bituminio rišklio nesugadinimo). Kietosios ir skystosios asfalto fazių atskyrimo viena nuokitos būdai ir technologijos turi būti tokie, kad senas bitumas ir mineralinės dalelės būtų tinkami naudoti regeneruotame asfalto mišinyje. Matricos (bitumo ar asfalto rišamosios medžiagos) terminis silpninimas prieš ardant iki mažesnio už intarpus (skaldos ir smėlio komponentų grūdelius) stiprio leidžia naudotam asfaltui dėl sumažėjusios adhezijos ir kohezijos irti ne per intarpus, bet per matricą. Mineralinių medžiagų grūdelių skilimo ir trupėjimo reikia vengti. Kaitinant naudotą asfaltą, jo senas bitumas neturėtų dėl perkaitinimo labai pablogėti. Komponentams atskirti vieną nuo kito netinka cheminiai tirpikliai, naudojami bitumui ekstrahuoti, o ne jo savybėms gerinti.
- *Penktasis principas* (atskirų komponentų laisvojo ar priverstinio judėjimo erdvėje). Visi arba dauguma seno asfalto skirtingo dydžio grūdeliai turi būti atskirti vieni nuo kitų taip, kad maišant jo mišinį galėtų keisti padėtį vienas kito atžvilgiu ir vietą mišinyje ar sraute. Regeneruojamos asfalto dangos komponentai atskiriami pirminiu ardymu šalta frezuojant kelio dangos konstrukcijos sluoksnius arba smulkinant (trupinant) plokščius asfalto luitus ar jų gabalus. Antriniu ardymu kaitinant asfalto granules mažinama seno bitumo klampa, adhezija ir kohazija, dėl ko,

veikiant mažesnėms nei frezuojant priverstinio maišymo jėgoms, granulės suyra ir mineralinės dalelės persiskirsto erdvėje, atidengdamos naujus laisvus paviršius, ant kurių gali patekti papildomi regeneruojantys priedai. Frezuojant ar laužant įkaitintą asfalto dangą, pakankamai išsilydžius suskystėjusio seno bituminio rišiklio plėvelėms, sumažinama adhezija (bitumo molekulių priekiba prie mineralinių grūdelių) bei kohezija (sankiba tarp bitumo molekulių) ir dėl to palengvinamas grūdelių atskyrimas vienas nuo kito, tam suvartojant mažiau mechaninės energijos, bet daugiau šilumos.

- *Šeštasis principas* (seno bitumo plėvelių atidengto paviršiaus didžiausio ploto laidavimo). Iš pakaitinto ir maišomo naudoto asfalto gauto biriojo mišinio grūdeliai būna padengti tam tikro storio, orientuotojo, labai klampaus, su didesniu asfaltenų kiekiu bitumo plėvelėmis, kurios dėl adsorbcijos į atviras grūdelio tuštymės bei mikroplyšius ir dėl stipresnės adhezijos beveik nesilydo ir nesuyra, bei jas gaubiančio tūrinio bitumo plėvelėmis, kurios silpnai sąveikauja su grūdelių paviršiumi, nes tiesiogiai su grūdeliais nesiliečia. Tūrinio bitumo plėvelės sudaro išorinį sluoksnį, kuriame kelio dangos eksploatacijos laikotarpyje taip pat sumažėjo skystų dervų bei alyvų kiekis. Jos žemesnėje temperatūroje nei orientuotojo sluoksnio bitumas lydos, virsta klampiu skysčiu, galinčiu tekėti atskirais lašais ir molekulių lygmenyje maišytis su seną bitumą atjauninančiais priedais ar nauju skystesniu bitumu. Tūrinio bitumo plėvelės tepa paslankių grūdelių paviršius ir palengvina regeneruojamo asfalto mišinio maišymo procesą. Maišant regeneruojamą asfalto mišinį, atidengiami vis nauji senų grūdelių paviršiai, galintys absorbuoti suduotus regeneruojančius priedus arba naują skystą bitumą. Daugiau energijos reikia smulkiausiems grūdeliams atskirti vieniems nuo kitų. Jų neatskyrus, negali patekti seną bitumą gerinantys priedai ir dalis mišinio lieka neregeneruota.
- *Septintasis principas* (atnaujinančio priedo galimybė tolygiai padengti visus grūdelius ir difunduoti į seno bitumo plėveles). Seno bitumo savybės regeneruotame asfalto mišinyje atnaujinantis priedas privalo tolygiai pasiskirstyti kiekvienos mineralinės dalelės, padengtos orientuotojo ir tūrinio bitumo plėvelėmis, paviršiuje. Atnaujinančio priedo naujai susidariusios plėvelės storis turi būti toks, kad jam visiškai difundavus į seno bitumo dvisluoksnį apvaskalą, jo savybės būtų atkurtos iki regeneruoto asfalto mišinio tinkamos struktūros ir savybių. Kuo giliau pasibaigus regeneravimo technologiniam procesui atnaujinančioji medžiaga ar naujas bitumas dėl difuzijos prasiskverbia į seno bitumo plėvelių dvisluoksnę sistemą, tuo labiau baigtas būna šis procesas ir mažiau kinta regeneruoto asfalto savybės jo naudojimo pradžioje. Ilga

atnaujinančiosios medžiagos difuzijos į seną bitumą trukmė neleidžia laikyti asfalto regeneravimo procesą baigtą. Pageidautina, kad seno ir naujo bitumų maišymosi dėl difuzijos plėvelėse trukmė būtų kuo mažesnė, nes tik šiam procesui visiškai pasibaigus, galutinai susiformuoja naujoji regeneruoto asfalto struktūra ir gaunamas reikiamas (projektinis) jos stipris.

- *Aštuntasis principas* (bitumo senėjimo dėl oksidacijos lėtinimas regeneravimo technologiniame procese). Asfalto regeneravimo procese aukštoje temperatūroje yrant senai struktūrai, laisvieji pasenusio tūrinio bitumo plėvelių paviršiai, liesdamiesi su aplinkos oro deguonimi, jo komponentai intensyviai oksiduojasi ir garuoja dar daugiau dėl senėjimo blogindami suminio bitumo savybes. Todėl regeneruojamo asfalto mišinio temperatūra ir darbų atlikimo trukmė neturi būti per didelė. Ilgai laikant regeneruotą karštai maišyto asfalto (KMA) mišinį kaupiamajame bunke-ryje, toli vežant automobilio kėbule, lėtai klojant ir tankinant pablogėja jo struktūra ir savybės.
- *Devintasis principas* (seno bitumo ir (arba) kurios nors iš mineralinių medžiagų frakcijos dalies pašalinimo iš regeneruojamo asfalto mišinio negalimumo). Asfalto mišinio kiekvieną mineralinių medžiagų granuliometrinę sudėtį atitinka tam tikras optimalus bitumo kiekis, užtikrinantis geriausias jo savybes. Regeneruojant naudotą asfaltą, seno bitumo savybės gerinamos pridėdant atnaujinančiosios medžiagos ar naujo bitumo, kurie suminio bitumo kiekį visada padidina ir jį daro ne optimalų. Norint suminio bitumo kiekį optimizuoti, būtina pridėti ir atitinkamų frakcijų mineralinių medžiagų. Iš regeneruojamo asfalto atimti seno bitumo ir (arba) kurio nors frakcijos praktiškai negalima – galima tik pridėti regeneruojančių medžiagų. Granuliometrinę sudėtį gerinančios naujos mineralinės medžiagos absorbuoja dalį seno tūrinio bitumo, „pereinančio“ iš naudoto asfalto biriųjų grūdelių paviršiaus (regeneruojant asfaltbetonio gamykloje). Regeneruojant asfalto dangą kelyje mobiliuoju regeneratoriumi (remikseriu), papildomo KMA mišinio grūdeliai, padengti nauju bitumu, jo dalį „atiduoda“ seniems grūdeliams. Masių mainų procese tikėtinas ir seno bitumo „perėjimas“ ant papildomo KMA mišinio grūdelių, sudarantis atvirkštinį dvigubą naujų grūdelių padengimą: išorinis sluoksnis – iš seno bitumo, o vidinis sluoksnis – iš naujo bitumo plėvelių. Šios dvi skirtingos karštojo regeneravimo technologijos lemia skirtingą senus ir naujus grūdelius dengiančio bitumo dvisluoksnės plėvelės sandarą, sluoksnių storį, difuzijos procesus ir regeneruoto asfalto savybes.
- *Dešimtas principas* (regeneruotos asfalto dangos sluoksnio savybių atitiktis normoms laidavimo). Regeneruoto asfalto mišinio ir iš jo įrengtos

kelio dangos paviršiaus tekstūra, konglomerato struktūra, fiziniai rodikliai, stipris bei ilgalaikiškumas (funkcionavimo trukmė) priklauso ne tik nuo automobilių ratų apkrovų, aplinkos ir oro sąlygų veiksnių, bet ir nuo regeneruoti naudotų medžiagų savybių, jų kiekio, regeneravimo technologijos, operacijų sekos, trukmės ir parametrų, poregeneracinio laikotarpio sąlygų. Pasirinkta regeneravimo technologija, įrenginių konstrukcija, darbo operacijų parametrai turi lemiamą įtaką regeneruotos kelio dangos sluoksnio patikimumui ir gyvavimo trukmei. Regeneruotos asfalto dangos sluoksnis turi būti panašių savybių kaip vien iš naujų medžiagų (KMA mišinio) paklotas to paties storio sluoksnis ir tenkinti normų reikalavimus sudėčiai, fiziniams bei mechaniniams rodikliams, geometriniais parametrams (lygumui, nuolydžiams, šiurkštumui). Regeneruoto asfalto mišinio tinkamumas naudoti turi būti tikrinamas projektavimo ir gamybos laikotarpiais ne tik Maršalo bandymais, bet ir įvažinėjimo ratu, leidžiančiu nustatyti jo atsparumą vėžių susidarymui.

2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Nufrezuotų RA granulių nevienalytiškumas priklauso nuo kelio dangos gyvavimo ciklo trijų laikotarpių veiksnių: asfalto dangos įrengimo (statybos), jos pažaidų taisymo eksploatuojant ir ardymo technologijų. Kelio dangos asfalto viršutinio sluoksnio pažaidoms taisyti panaudotos bituminės medžiagos joje kaupiasi, pasiskirstydamos atsižvelgiant į stochastinio pobūdžio pažaidų dažnio ir dydžio. Jos patenka į frezuotą RA ir didina jame esančio bitumo kiekį bei keičia savybes, veikiančios kaip minkštinančios ar atnaujinančios priemonės. Netolygus pažaidų ir joms taisyti panaudotų papildomų medžiagų išsidėstymas kelio dangos plote veikia RA granules, mažindamas jų homogeniškumą. Nufrezuotų RA granulių homogenizavimo ribotos praktinės galimybės ir jų segregacijos kraunant, vežant ir stumdant krūvoje procesai, gaminant regeneruotą KMA mišinį, RA homogeniškumo dažniausia nepadidina.
2. RA granulėse esančio seno ir jo savybes atkuriančio bitumų ar kitos atnaujinančiosios medžiagos mechaninio bei difuzinio maišymosi dvisluoksnėse plėvelėse procesai yra ilgalaikiai ir nesibaigia atlikus technologines regeneravimo operacijas. Maišant seną ir naują bitumus, jų penetracija ir minkštėjimo temperatūra bei procentinis santykis lemia suminio bitumo klampą. Žinomi suminio bitumo klampos skaičiavimo matematiniai modeliai tinka ne plėvelių būvio esančių bitumų sąveikai, kai nevertinamos adhezijos jėgos. Plėvelėse, gaubiančiose mineralinius grūdėlius, seno ir naujo bitumo sąveiką dėl difuzijos iš dalies aprašo Fi-

ko dėsnis. Dvisluoksnės bitumų sistemos difuzijos procesai grūdelių sąlyčio vietoje ir grūdelių bei oro tuštymės vietoje skiriasi ir mažai žinomi mokslui, todėl turi naujumo elementų.

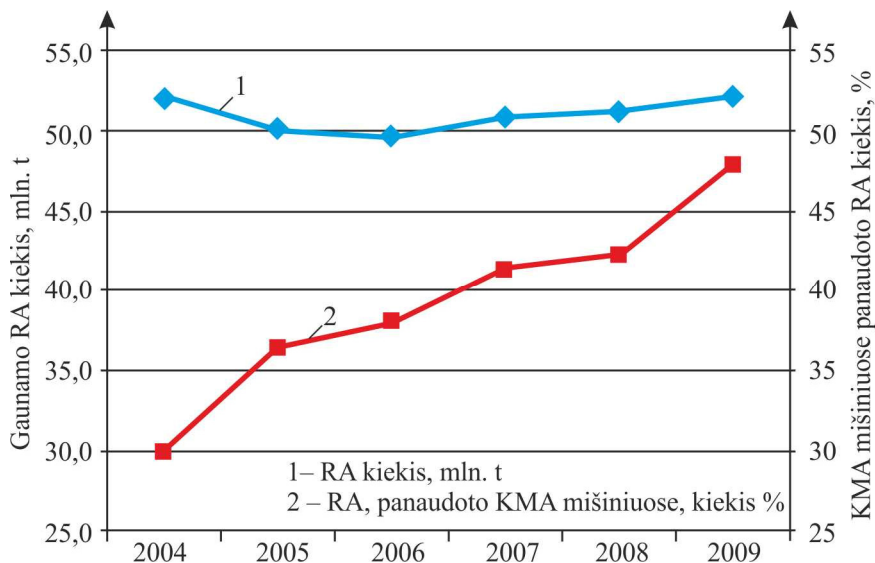
3. Susistemintieji asfalto dangos regeneravimo principai leido pirmą kartą pateikti išsamų mokslo ir praktikos žiniomis pagrįstą nuoseklų aprašą, kurio nuostatas taikant galima kurti inovatyvias technologijas bei įrenginius, gauti geriausios kokybės regeneruotus KMA mišinius, atitinkančius automobilių kelių tiesėjų ir naudotojų poreikius.

Naudoto asfalto granulių ir regeneruoto mišinio eksperimentiniai tyrimai

3.1. Naudoto asfalto panaudojimas užsienio šalyse ir Lietuvoje

Visame pasaulyje jau seniai RA granulės naudojamos naujo KMA mišinio gamyboje. Buvo tiriama ekonomiškai pažengusių Vakarų Europos valstybių praktika. Surinkti duomenys apie išfrezuotų asfaltbetonių (RA) kiekius ir jų naudojimą naujai maišomuose karštuose mišiniuose bei procentinė išraiška nuo 2004–2009 metų (Asphalt in figures. EPA... 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009). Buvo analizuojamos tokios valstybės: Vokietija, Austrija, Belgija, Čekija, Danija, Prancūzija, Vengrija, Airija, Italija, Olandija, Norvegija, Ispanija, Šveicarija, Švedija, Slovėnija, Lenkija. Susisteminti duomenys pateikti 3.1 pav. Iš grafiko galima teigti, kad Vakarų Europoje išfrezuojamo asfaltbetonio kiekis, analizuojant tas pačias valstybes, yra vienodas ir sudaro apie 50 mln. t per metus. Jo naudojimas, procentine išraiška nuo išfrezuoto kiekio, gaminant naujus karštus asfaltbetonio mišinius labai didėja bėgant metams. Tai reiškia, kad išsivysčiusios

Vakarų Europos šalys jau seniai yra įsitikinusios, kad RA granulės yra gera medžiaga projektuojant ir gaminant karštai regeneruotus asfaltbetonio mišinius.



3.1 pav. Vakarų Europos šalyse gaunamo RA ir panaudoto KMA mišinių gaminti dinamika

Fig. 3.1. The dynamics of available RAP and of usable RAP for the production of recycled HMA mixture in Western European countries

Norint iširti Lietuvos patirtį, naudojant RA karštuose asfalto mišiniuose, buvo atlikta visu galimų Lietuvos kelių įmonių apklausa. Apklausos anketoje buvo keliami tokie klausimai:

- Ar Jūsų įmonė frezuoja asfaltbetoninės dangos sluoksnius?
- Ar Jūsų įmonė apskritai naudoja nufrezuotą (naudotą) asfaltą?
- Kiek apytikriai tonų naudoto asfalto nufrezuojama (išigyjama) per metus?
- Kiek apytikriai tonų naudoto asfalto įmonė turi sukaupusi?
- Kokiems asfaltbetoninės dangos konstrukciniams sluoksniams įrengti naudojate naudotą asfaltą?
- Kokių asfaltbetonio mišinių gamybai (šaltų ar karštų) naudojate naudotą asfaltą?
- Kiek procentų naudoto asfalto naudojate gamindami mišinius?
- Jei Jūsų įmonėje kaupiamas naudotas asfaltas, ar jis yra rūšiuojamas (pagal išfrezuotus sluoksnius) prieš sandėliuojant?

- Ar tiriate naudoto asfalto savybes prieš jį naudodami, jei tiriate, tai kokias savybes?

Apklauskos metu nustatyta, kad beveik 88% įmonių frezuoja asfaltinės dangos sluoksnius. Lietuvoje kasmet nufrezuojama apie 112 tūkst. t asfalto. Taip pat nustatyta, kad įmonės stengiasi nekaupiti RA granulių. Tik trečdalis įmonių turi sukaupusios tam tikrą kiekį RA granulių. Didžiausias sukaupto RA granulių kiekis sudaro 3000 tonų.

Apklauskos metu nustatyta, kokiems konstrukciniams sluoksniams įrengti kartotinai naudojamas asfaltas. Gauti rezultatai yra tokie:

- 4,2 % RA granules naudoja viršutiniams dangos sluoksniams įrengti;
- 25 % RA granules naudoja apatiniams dangos sluoksniams įrengti;
- 45,8 % RA granules naudoja dangos pagrindo sluoksniams įrengti;
- 25 % RA granules parduoda.

Konstrukciniuose dangos sluoksniuose gali būti naudojamas ir šaltasis, ir karštasis asfalto mišiniai. Atliktais tyrimais nustatyta, kad frezuotas asfaltas daugiau naudojamas (per 75 %) karštuosiuose asfalto mišiniuose nei šaltuosiuose.

Apklauskos metu nustatyta, koks RA granulių kiekis įterpiamas į naujus karštuosius mišinius. Mažiausiai asfalto mišiniams naudojama 10 % RA granulių. Atskirais atvejais firmos karštiesiems asfalto mišiniams gaminti naudoja net iki 100 % RA. Vidutiniškai į karštuosius mišinius įterpiama apie 25 % RA granulių. Buvo nustatyta kad prieš naudojant RA granules beveik 60 % įmonių tiria RA savybes prieš įterpdamos juos į karštuosius asfalto mišinius.

Tiriamos tokios RA granulių savybės:

- Granuliometrinė RA granulių sudėtis: tiriama 100 % įmonių.
- Rišiklio kiekis: tiria 100 % įmonių.
- Bitumo penetraciją: tiria 16,7 % įmonių.
- RA maksimalų tankį: tiria 12,5 % firmų.

Naudojant RA karštuosiuose asfalto mišiniuose, svarbu tinkamai sandėliuoti prieš jį įterpiant į naujus mišinius. RA turi būti rūšiuojamas į skirtingas rietuves, priklausomai nuo to, iš kokio objekto RA buvo atgabentas. Tai užtikrintų geresnį RA homogeniškumą. Tačiau, kaip parodė tyrimai, net daugiau nei 80 % atvejų RA yra nerūšiuojamas t. y. sandėliuojamas bendroje krūvoje.

Tyrimo metu nustatyta, kad daugiau nei pusė įmonių neturi asfaltbetonio maišyklių, pritaikytų RA granulėms įterpti į karštuosius asfalto mišinius.

3.2. Lietuvoje išfrezuoto naudoto asfalto komponentinio homogeniškumo tyrimas

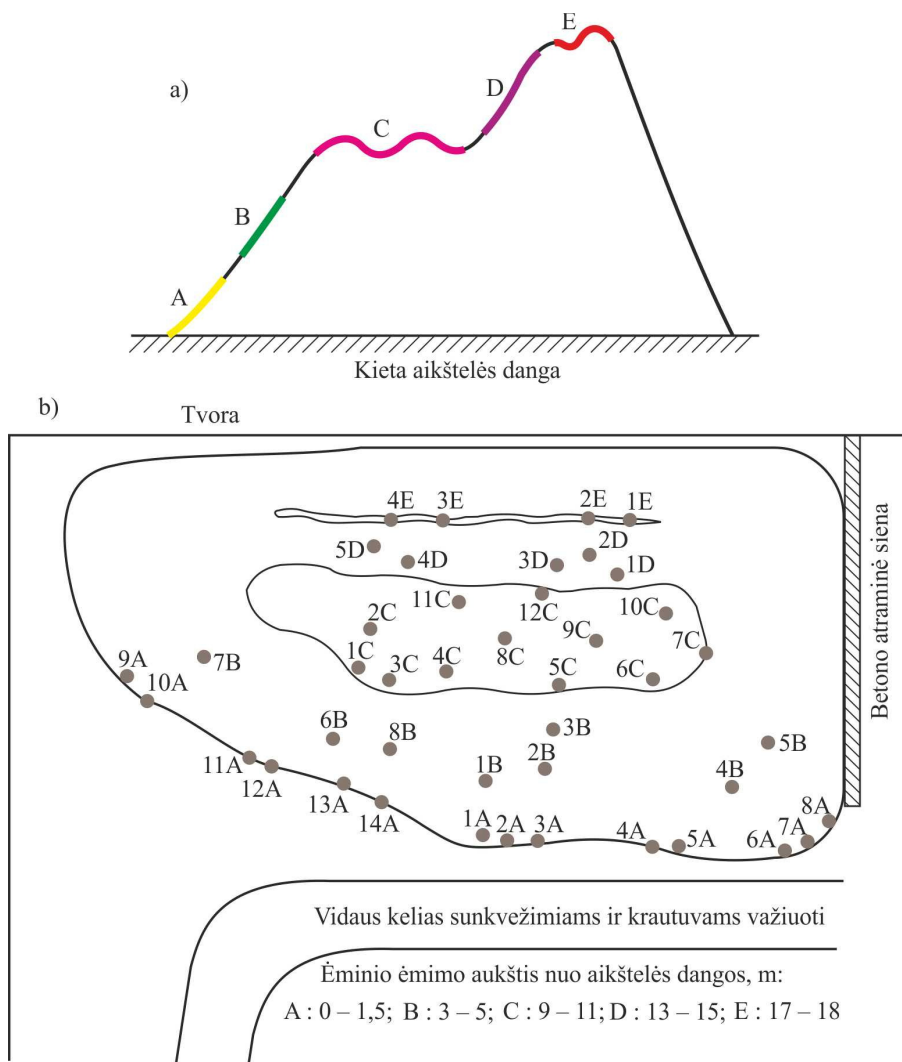
3.2.1. Tyrimų metodika

Norint nustatyti RA faktiškąjį homogeniškumą ir kaip jis keičiasi dėl segregacijos ir maišymosi procesų kraunant į transporto priemonės, vežant, išpilant iš kėbulo ir stumiant ratiniu krautuvu sudaromoje krūvoje, buvo imami trijų serijų jo ėminiai iš šių vietų:

- RA-1: kelyje, t. y. viename kelio ruože nufrezuotoms RA granulėms byrant nuo šaltosios frezos juostinio krautuvo į automobilio sunkvežimio kėbulą (imties didumas $n = 9$);
- RA-2: atskirų asfaltbetonio bazių teritorijose pradėtų sudaryti nufrezuotų RAP keturių krūvų (imties didumas $n = 21$);
- RA-3: asfaltbetonio bazės atvirame sandėlyje pripildytos RA krūvos iš atsitiktinai pasirinktų jos paviršiaus vietų (imties didumas $n = 43$) (3.2 pav.).

Ėminių masė buvo tokia, kad paimto RA kiekio pakaktų jo granuliometrinei sudėčiai nustatyti, tirpaus seno bitumo kiekį ir savybes, taip pat vėlesniam tyrimui suformuoti (pagaminti) ir ištirti Maršalo bandinius su skirtingu RA kiekiu, rodančiu jo įtaką regeneruoto KMA mišinio savybėms.

Kiekvienas ėminys buvo sumažintas iki reikiamos bitumui ekstrahuoti masės (0,5–1,0 kg). HEZ – modelio ekstrahatoriuje tirpikliu atskiras tirpus senas bitumas buvo panaudotas jo standartinėms savybėms nustatyti: penetracijai, minkštėjimo temperatūrai, trapumo temperatūrai, penetracijos indeksui ir tankiui. Mineralinė dalis išsijota per standartinių laboratorinių sietų komplektą (rinkinį). RA-1 ir RA-2 serijų ėminiai buvo imti ir ištirti 2007–2008 m., kai galiojo Statybos rekomendacijų R 35–01 reikalavimainaudoti 0,09 mm, 0,25 mm, 0,71 mm, 2 mm, 5 mm, 8 mm, 11,2 mm, 16 mm ir 22,4 mm laboratorinius sietus. Nuo 2009 m. Lietuvoje galiojo Techninių reikalavimų aprašas TRA ASFALTAS 08 (2009); Naudoto asfalto granulių Techninių reikalavimų aprašas TRA NAG 09 (2009); Naudoto asfalto granulių panaudojimo rekomendacijos R NAG 09 (2009), todėl RA-3 serijos ėminiai po bitumo ekstrahavimo buvo išsijoti per 0,063 mm, 0,125 mm, 0,25 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 5,6 mm, 8 mm, 11,2 mm, 16 mm ir 22,4 mm standartinius laboratorinius sietus. Per šį sietų komplektą taip pat buvo išsijota RA-3 serijos neekstrahuotų granulių 15 ėminių, leidusių nustatyti granulių granuliometrinę sudėtį. RA-3 serijos kiekvieno iš 43 ėminių prieš ekstrahavimą buvo nustatytas vandens kiekis (drėgnumas) procentais.



3.2 pav. RA granulių ėminių ėmimo iš krūvos vietų schema:

a – krūvos pjūvis su penkių aukščių lygiais (A, B, C, D, E); b – krūvos planas

Fig. 3.2. Scheme of sampling of RAP granules from piles:

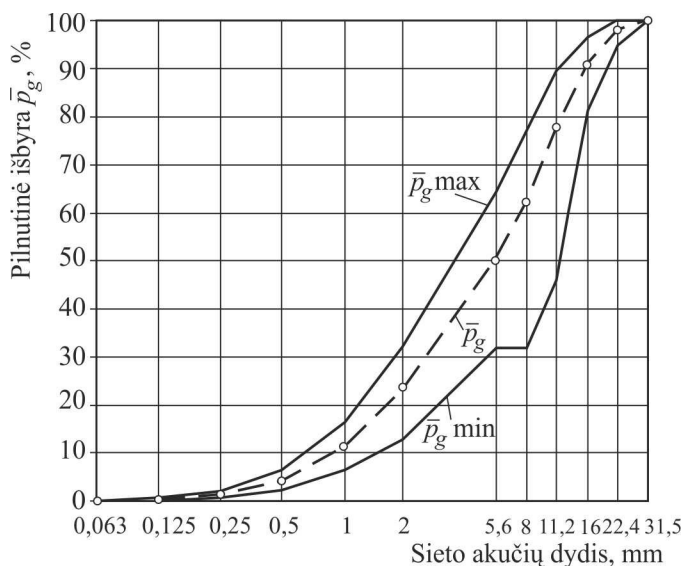
a – section of pile with five height levels (A, B, C, D, E); b – pile plan

Kiekvienos serijos (RA-1, RA-2, RA-3) ėminiams taikant SPSS programinį duomenų apdorojimo paketą, apskaičiuotos statistinės charakteristikos. Duomenų sklaidos charakteristikos (dispersija ir standartinis nuokrypis) panaudotos vertinant RA homogeniškumą pagal bitumo kiekį, granulimetrinę sudėtį, granu-

lių stambumą ir drėgnumą. SPSS programa netikrina, ar yra išskirčių, t. y. imties stebinių, kurie savo reikšme tiek skiriasi nuo likusiųjų, kad yra pagrindo manyti, kad jie priklauso kitai populiacijai arba yra matavimo klaida. Atmetę išskirtis (jei jos buvo), apskaičiavome ir pakoreguotas statistines charakteristikas.

3.2.2. Frezuoto ir išlaužto asfalto granulių didumas, jose esančio vandens ir bitumo kiekis

Naudojant RA granules KMA mišinio gamyboje, jos turi būti tokio pat dydžio, kad išsilydytų aukštoje temperatūroje, perimamoje iš perkaitintų mineralinių medžiagų arba iš dujų srautą, judančio joms džiovinti ir kaitinti skirtame papildomame džiovimo būgne. Tam svarbu riboti didžiausią RA granulių dydį, kuris priklauso nuo frezuojamos kelio dangos asfalto savybių, oro temperatūros, frezavimo mašinos techninių parametų, besisukančio būgno režiklių nudilimo laipsnio ir frezavimo technologijos (frezavimo gylio ir mašinos važiavimo greičio). Pagal R35-01 reikalavimus nufrezuoto RA granulių maksimalus dydis gali būti ne daugiau kaip 1,4 karto didesnis už būsimo regeneruoto KMA didžiausių grūdelių skersmenį.



3.3 pav. Frezuoto ir išlaužto asfalto smulkinių (RA-3) neekstrahuotų granulių granulimetrinė sudėtis (imties didumas $n = 15$)

Fig. 3.3. Gradiation of non-extracted granules of milled RAP being recycled (RA-3) (sample size $n = 15$)

Prieš bitumo ekstrahavimą RA-3 serijos iš 15 ėminių nustatyta granuliu granuliometrinė sudėtis (3.3 pav.) rodo, kad frezavimo mašina seną asfalto dangą susmulkina iki mažesnių kaip 22,4 mm arba 31,5 mm granuliu. Smulkesnių už 2 mm granuliu vidutiniškai yra apie 25 % (max 33 %, min 13 %). Po RA-3 granuliu ekstrahavimo mažesnių kaip 2 mm grūdeliu vidutiniškai buvo 51,5 %. Didžiausias standartinis nuokrypis $s_p = 10,9$ % buvo granuliu, išbyrėjusių per 8 mm sieta, kiekio, kurio vidurkis $\bar{p} = 62$ %. Dalis mineraliniu milteliu ir smėlio frakciju buvo nesuardytose frezuojant RA granulese. Asfaltbetonio maišytuve temperatūros veikiamos mažesnės RA granulės, lydantis rišikliui, greičiau suyra, sudarydamos palankias sąlygas senam bitumui atnaujinti nauju bitumu.

Į nufrezuotas RA granules transportuojant ir sandėliuojant dažniausia patenka kritulių vanduo, kuris technologiniame regeneravimo procese veikiant aukštai temperatūrai turi būti išgarinamas. Kuo didesnė RA granuliu drėgmė, tuo daugiau reikia šilumos energijos vandeniui pašalinti.

3.1 lentelė. Naudoto asfalto dangos frezuotų granuliu drėgmės ir jos grūdelius rišančio tirpaus seno bitumo kiekio statistiniai rodikliai

Table 3.1. Statistical indicators for moisture content in milled RAP granules and for content of old soluble bitumen binding RA grains

Statistinis rodiklis	Frezuotų granuliu (RA-3) drėgnis, % ($n=43$)	Tirpaus bitumo kiekis, %, viršijantis 100 %			
		RA-3, laikomo pripildytoje atviroje krūvoje ($n=43$)	RA-1, paimto frezuojant iš kelio ($n=9$)	RA-2, esančio 4 bazių atvirose pradėtose krūvose	
				$n=21$	$n=20$ be išskirties
Minimumas	0,7	3,66	4,39	4,99	4,99
Maksimumas	6,5	5,43	6,58	22,31	8,27
Skirtumas	5,8	1,77	2,22	17,32	3,28
Vidurkis	3,4	4,85	5,78	6,98	6,22
Dispersija	0,84	0,12	0,45	13,01	0,71
Standartinis nuokrypis	0,93	0,35	0,67	3,61	0,84
Asimetrija	0,09	-0,85	-1,05	4,20	0,64
Ekscesas	3,51	1,92	1,91	18,55	0,11

Iš tyrimų duomenų (3.1 lentelė) matyti, kad 43 ėminiuose, paimtuose iš RA-3 pripildytos atviros krūvos viršaus, vanduo vidutiniškai sudarė 3,4 %. Mažiau-

sia jo kiekio RA granulėse vertė buvo 0,7 %, didžiausia – 6,5 % (skirtumas 5,8 %). Drėgmės kiekio RA granulėse standartinis nuokrypis $s_{wRAP} = 0,93$ % rodo, kad ji rietuvėje pasiskirsto vienodai. Drėgmės kiekio variacija RA krūvoje priklauso nuo kritulių intensyvumo ir trukmės, vandens garavimo ir filtracijos procesų į krūvoje esančio RA gilesnius sluoksnius atvežto ir išpildo į krūvą RA drėgmės.

Baroux (1980) pateikė empirinę formulę, leidžiančią apskaičiuoti iš asfaltbetonio maišytuvo džiovinimo būgno išbyrančio mineralinių medžiagų mišinio ar dozuojamų karštų išsijotų užpildytų frakcijų, atiduodančių šilumą drėgnoms šaltoms RA granulėms (asfalto smulkinimui), reikiamą temperatūrą:

$$T_{h,a} = \frac{T_{KMA} - M_{RA} \cdot T_{RA}}{1 - M_{RA}} + W_{RA} \frac{4M_{RA}}{1 - M_{RA}} (637 - T_{RA}), \quad (3.1)$$

čia $T_{h,a}$ – karštų mineralinių medžiagų ar jų frakcijų mišinio temperatūra, °C; T_{KMA} – reikiama regeneruoto karštai maišyto asfalto (KMA) mišinio temperatūra, °C; M_{RA} – RA granulių masės santykis regeneruotame KMA mišinyje, vienetų dalimis; T_{RA} – RA granulių temperatūra, °C; W_{RA} – RA granulių drėgnis, vienetų dalimis.

Pavyzdžiui, jei naudojama 20 % RA granulių ($M_{RA} = 0,2$), kurių temperatūra $T_{RA} = 18$ °C, o drėgmė minimali – 0,7 % ($W_{RA} = 0,007$), tai dėl reikiamo išgarinti vandens mineralinių medžiagų temperatūrą $T_{h,a}$ reikia padidinti 4,3 °C, o kai jų drėgmė maksimali – 6,5 % ($W_{RA} = 0,065$), tai temperatūrą $T_{h,a}$ reikia padidinti 40,2 °C: skirtumas sudaro 35,9 °C. Kai RA granulių vidutinė drėgmė 3,4 %, tai $T_{h,a}$ reikia padidinti 21,0 °C.

RA turi būti homogeniškas. Pagal R35-01 reikalavimus RA esančio bitumo kiekio iš penkių ėminių ($n = 5$) nustatytas standartinis nuokrypis turi būti ne didesnis kaip 0,6 % naudojant ≤ 10 % RA ir ne didesnis kaip 0,5 % naudojant 11–30 % RA. Atlikti tyrimai (3.1 lentelė) rodo, kad pagal bitumo kiekio standartinio nuokrypio vertę homogeniškumas pakankamas tik RA-3 ($s = 0,35$ %). Viena iš RA-2 ėminių buvo rasta net 22,31 % bitumo, kuris buvo priskirtas prie išskirčių ir, jį atmetus, iš $n = 20$ apskaičiuotos pakoreguotos statistinės charakteristikos. RA-1 ir RA-2 homogeniškumas neatitinka normų reikalavimų ($s = 0,67$ % ir $s = 0,84$ %), todėl jį galima dozuoti gaminant regeneruotą KMA mišinį mažiau kaip 10 %.

Apskaičiuotieji (empiriniai) RA imčių drėgmės ir bitumo kiekio pasiskirstymo asimetrijos (A) ir eksceso (E) koeficientai (3.1 lentelė) mažesni (išskyrus RA-2, kai $n = 21$) už jų standartinis nuokrypius s_A ir s_E , priklausančius nuo imties didumo. Normalinio pasiskirstymo hipotezė imama, kai $|A| < 3s_A$ ir

$|E| < 5s_E$. Kai $n=9$, $3s_A = 2,15$ ir $5s_E = 7,00$, kai $n=20$, $3s_A = 1,54$ ir $5s_E = 4,96$, kai $n=43$, $3s_A = 1,08$ ir $5s_E = 3,54$. Todėl galima pagrįstai teigti, kad vandens ir bitumo kiekis RA pasiskirsto pagal normalųjį skirstinį.

3.2.3. Frezuoto RA ir jo granuliu granuliometrinė sudėtis

RA ar naujų medžiagų KMA mišinio granuliometrinę sudėtį rodo pilnutinių išbirų per laboratorinius sietus (masės %) visuma, t. y. jo granuliometrinė sudėtis neišreiškiama vienu skaičiumi. Granuliometrinės sudėties variacija, išreiškiama pilnutinių išbirų per sietus standartiniais nuokrypiais s_p , kurių vertės priklauso nuo homogeniškumo ir šių išbirų aritmetinių vidurkių $\bar{p}$.

Teoriškai didžiausias standartinis nuokrypis s_p yra tų grūdelių, kurių mineralinėje medžiagoje ar asfalto mišinyje yra 50 masės % (Evaluation...1967). Didžiausia s_p maksimali vertė (kreivės $s_p = f(\bar{p})$ viršūnė) būna paslinkta į dešiniąją pusę ir atitinka $\bar{p}$ apie 60 ar 70 % (White, Brown 1977; Sivilevičius 2003). Koreliacinė sietis $s_p = f(\bar{p})$, gauta iš atskirų ėminių granuliometrinės sudėties tyrimo, leidžia vertinti RA homogeniškumą neatsižvelgiant į naudotų laboratorinių sietų komplekto akučių dydį ir jį lyginti su kitų RA homogeniškumu. Įprastai RA ar kito KMA mišinio homogeniškumas vertinamas didžiausia standartinio nuokrypio s_p verte, gauta iš regresijos lygties. Žinant, kad pilnutinių išbirų per sietus standartinis nuokrypis $s_p = 0$ %, kai jų aritmetinis vidurkis $\bar{p} = 0$ % ir kai $\bar{p} = 100$ %, buvo taikomas regresijos modelis:

$$s_p = \sqrt{a \cdot \bar{p}^b \cdot (100 - \bar{p})^c}, \quad (3.2)$$

čia a , b , c – atitinkami nežinomieji modelio parametrai, nulemiantys kreivės formą ir asimetriją (viršūnės poslinkį).

Panaudojus RA-1, RA-2, RA-3 eksperimentinius granuliometrinės sudėties statistinius duomenis gautos jo homogeniškumo regresijos lygtys $s_p = f(\bar{p})$ ir jų determinacijos koeficientai R^2 :

- RA-1 imties, gautos frezuojant vieno kelio ruožo dangą ($n = 9$):

$$s_p = \sqrt{2,28 \cdot 10^{-5} \cdot \bar{p}^{2,385} (100 - \bar{p})^{1,219}}, \quad R^2 = 0,990; \quad (3.3)$$

- RA-2 imties, gautos iš 4 asfaltbetonio bazių teritorijose pradėtų krauti atvirų krūvų ($n = 21$):

$$s_p = \sqrt{2,32 \cdot 10^{-5} \cdot \bar{p}^{2,558} (100 - \bar{p})^{1,165}}, R^2 = 0,954; \quad (3.4)$$

- RA-3 imties, gautos iš vienos asfaltbetonio bazės atvirame pripildytame sandėlyje sukrautos regeneruoti paruoštos medžiagos krūvos ($n = 43$):

$$s_p = \sqrt{2,81 \cdot 10^{-5} \cdot \bar{p}^{2,587} (100 - \bar{p})^{1,041}}, R^2 = 0,993; \quad (3.5)$$

- RA_g-3 neekstrahuotų granulinių ėminių $n = 15$, atsitiktinai atrinktų iš $n = 43$ ėminių 3 krūvos:

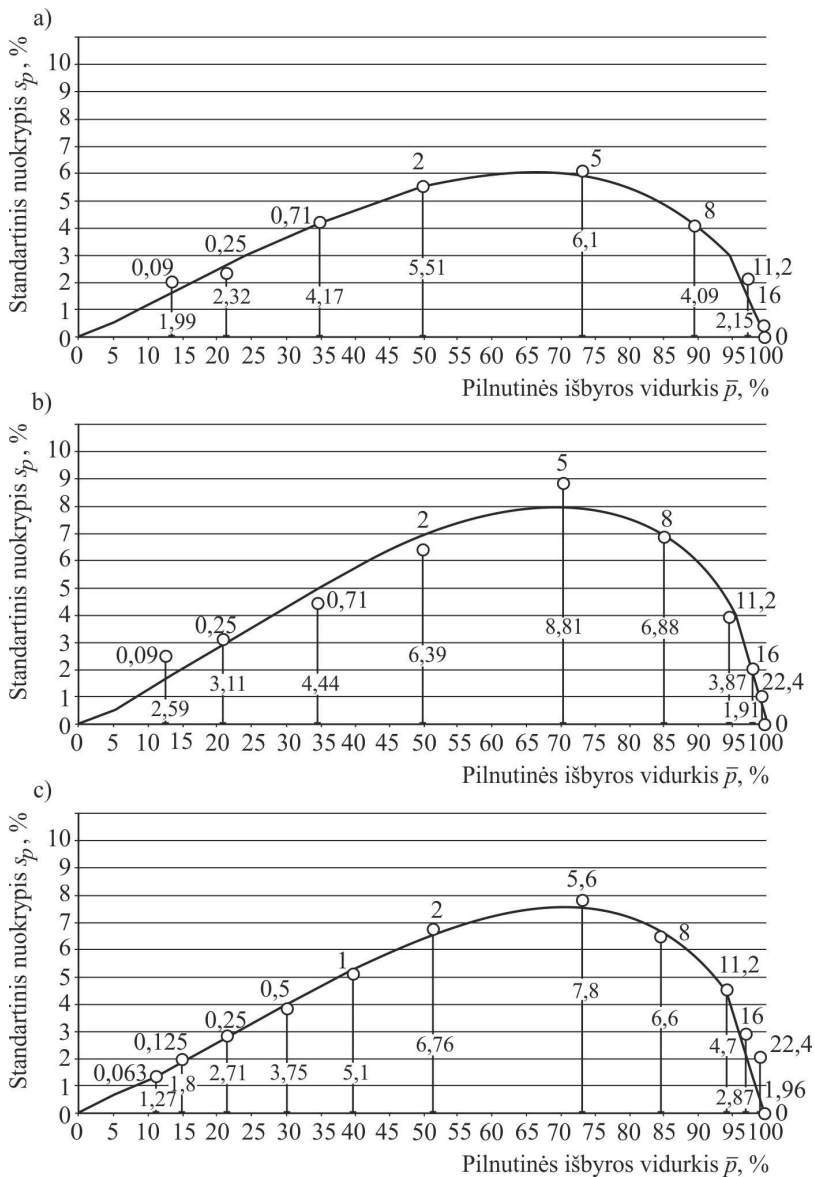
$$s_p = \sqrt{5,72 \cdot 10^{-5} \cdot \bar{p}^{2,183} (100 - \bar{p})^{1,508}}, R^2 = 0,975. \quad (3.6)$$

Artimos 1 determinacijos koeficientų R^2 vertės rodo, kad visų RA pilnutinių išbirų per sietus standartinio nuokrypio s_p kitimas daugiau kaip 95 % nulėmtas aritmetinio vidurkio $\bar{p}$ kitimo. Todėl galima pagrįstai teigti, kad regresijos lygtys (3.3)–(3.6) yra patikimos, o iš jų apskaičiuotos kreivių ordinatės (3.4 pav., 3.5 pav.) rodo koreliacinę sąsają tarp kiekvieno RA granulimetrinės sudėties charakteristikų ir gali būti naudojamos skirtingose vietose esančio RA granulinių homogeniškumui vertinti.

Didžiausio homogeniškumo (3.4 pav.) buvo RA-1 ($\max s_p = 6,1\%$, kai $\bar{p} \approx 65\%$), vidutinio homogeniškumo – RA-3 ($\max s_p = 7,6\%$, kai $\bar{p} \approx 70\%$) ir mažiausio homogeniškumo – RA-2 ($\max s_p = 8,0\%$, kai $\bar{p} \approx 70\%$). RA_g-3 neekstrahuotų granulinių (3.5 pav.) nehomogeniškumas ($\max s_p = 10,6\%$, kai $\bar{p} \approx 60\%$) priklauso ne nuo senoje asfalto dangoje esančių komponentų variacijos, bet nuo jos frezavimo technologijos ir didesnės įtakos regeneruoto KMA mišinio savybėms neturi.

Ar iš skirtingų vietų paimtų RA imčių normaliai pasiskirsčiusių išbirų per sietus standartiniai nuokrypiai s_p statistiškai skiriasi, tikrinome taikydami Bartleto kriterijų. Nulinė hipotezė apie dispersijų vienodumą buvo tikrinama pagal apskaičiuotą statistiką:

$$B = \frac{E}{C} = \frac{2,303 \left[k \cdot \lg \bar{s}_p^2 - \sum_{i=1}^l k_i \lg s_{pi}^2 \right]}{1 + \frac{1}{3(l-1)} \left[\sum_{i=1}^l \frac{1}{k_i} - \frac{1}{k} \right]}, \quad (3.7)$$



3.4 pav. Frezuoto naudoto asfalto mineralinės dalies granulimetrinės sudėties sklaidos (s_p) ir padėties ($\bar{p}$) parametrų setis, nustatyta imtis:

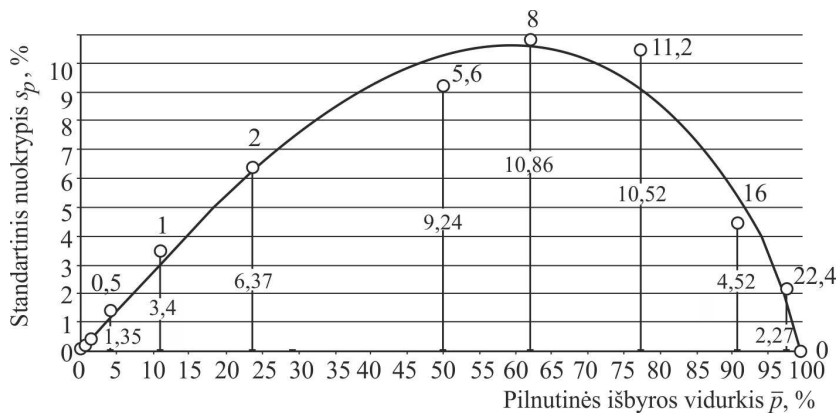
a – RA-1; b – RA-2; c – RA-3

Fig. 3.4. Correlation between the parameters of milled RA aggregate gradation variation (s_p) and position ($\bar{p}$) determined for the following samples:

a – RA-1; b – RA-2; c – RA-3

čia l – ištirtų RA imčių skaičius (tyrime $l = 3$); $k_i = n_i - 1$ – laisvės laipsnių skaičius; n_i – i -tosios imties didumas; $k = \sum_{i=1}^l k_i$; s_{pi}^2 – i -tosios RA imties iš (3.3)–(3.6) regresijos lygčių apskaičiuotos didžiausios paslinktos dispersijos vertė; $\bar{s}_p^2$ – iš visų RA imčių apskaičiuota didžiausių dispersijų vidutinė dispersija:

$$\bar{s}_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^l k_i \cdot s_{pi}^2}{k} . \quad (3.8)$$



3.5 pav. Frezuotų RA_g-3 serijos neekstrahuotų granulų granulimetrinės sudėties sklaidos (s_p) ir padėties ($\bar{p}$) parametų sietis

Fig. 3.5. Correlation between the parameters of RA_g-3 nonextracted granules gradation variation (s_p) and position ($\bar{p}$)

Atsitiktinis dydis B , kai tenkinama nulinė hipotezė, apytiksliai pasiskirstęs kaip χ^2 su $l - 1$ laisvės laipsniu, jei visi $k_i > 2$. Kai $B > \chi_{kr}^2$, tai nulinė hipotezė atmetama (dispersijos s_{pi}^2 skiriasi), o kai $B < \chi_{kr}^2$, tai dispersijos s_{pi}^2 yra lygios.

Iš RA-1, RA-2, RA-3 imčių mineralinių medžiagų dalies (užpildų) didžiausių pilnutinių išbirų per sietus standartinių nuokrypių s_{pi} verčių (atitinkamai 6,1 %, 8,0 %, 7,6 %) pagal (3.7) formulę apskaičiuota statistika $B = 0,50$ daug mažesnė už $\chi_{kr}^2(0,05; 3 - 1) = 5,99$. Todėl su reikšmingumo lygmeniu $\alpha = 0,05$ pagrįstai galima teigti, kad visų trijų imčių RA yra vienodo homogeniškumo, nepriklaus-

sančio nuo ėminių ėmimo vietos. Visų trijų imčių didžiausių s_{pi} vidurkis $\bar{s}_p = 7,56 \%$ rodo vidutinį Lietuvoje naudojamo RA homogeniškumą pagal mineralinės dalies granulimetrinę sudėtį ir gali būti taikomas prognozėje projektuojant regeneruojamo KMA mišinio sudėtį.

3.3. Nauju bitumo atnaujinto naudoto asfalto fizinių ir mechaninių savybių bei bitumo tyrimas

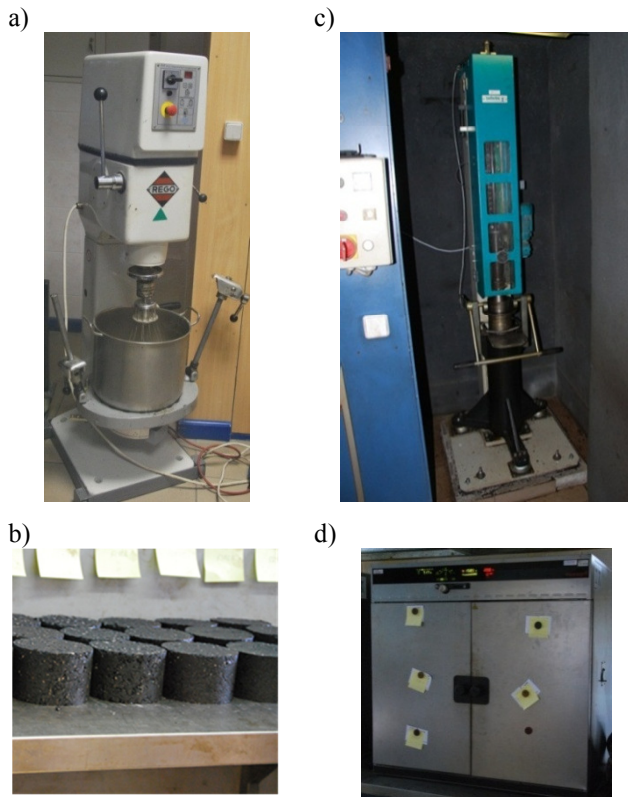
3.3.1. Tyrimo metodika

Sandėlyje per kelis mėnesius buvo kaupiamos RAP granulės, išfrezuotos iš skirtingų kelių ir miesto gatvių viršutinio dangos sluoksnio. Norint įvertinti RA komponentinę sudėtį (bitumo ir vandens kiekį, mineralinių užpildų granulimetrinę sudėtį), iš jo atsitiktinių krūvos vietų buvo paimti 43 ėminiai po 40–50 kg kiekvienas. Iš visų ėminių, supiltų į maišus, buvo imamos apylygės RA dalys, reprezentuojančios visą RA krūvą. Jas sumaišius ir suketvirčiavus, buvo paruoštos 18 vienodos sudėties sumaišytų ėminių dalių, apie 6 kg masės kiekviena. Kiekvienas RA sumaišytas ėminys buvo supilamas į padėklą ir kaitinamas iki $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros (3.6 pav., d).

Į pirmuosius šešis padėklus su išdžiovintu RA buvo įpilama karšto ($150\text{ }^{\circ}\text{C}$) kelių bitumo 50/70 0,5 %, 1,0 %, 1,5 %, 2,0 %, 4,0 % ir 6,0 % nuo RA masės. Į 7–10 padėklus buvo įpilta kelių bitumo 70/100 0,5 %, 1,0 %, 1,5 % ir 2,0 %. Į 11–14 padėklus su karštu RA buvo pilamas kelių bitumas 100/150 (taip pat 0,5 %, 1,0 %, 1,5 % ir 2,0 %). Padėklai su RA Nr. 15–18 buvo skirti RA atnaujinti kelių bitumu 160/220, jo pridedant 0,5 %, 1,0 %, 1,5 % ir 2,0 %.

Su pridėtu skirtingų markių ir procentiniu kiekiu nauju bituminiu rišikliu RAP mišiniai buvo laboratorinėje maišyklėje (3.6 pav., a) gerai sumaišyti. Iš kiekviename padėkle paruošto regeneruoto mišinio buvo suformuoti trys Maršalo bandiniai (3.6 pav., b), plūktuvu (3.6 pav., c) smūgiuojant iš abiejų pusių po 50 kartų. Apie 1200 g mišinio buvo panaudota didžiausiam tankiui nustatyti ir apie 800 g mišinio – regeneruoto (atnaujinto) tirpiojo bitumo faktiškajam kiekiui ir granulimetrinei sudėčiai nustatyti.

Iš kiekvienos serijos (padėklo) suformuotų trijų Maršalo bandinių buvo nustatytas pastovumas (S), takumas (F), tikrasis tankis ($SSD - S_{bssd}$), Maršalo koeficientas ($Q = S/F$). Apskaičiuotas oro tuštymių skaičius (V_m).



3.6 pav. Maršalo bandinių gamybos įrenginiai:

- a – kaitinamoji SM2 U maišyklė („Rego herlitzius“) KMA mišiniui maišyti;
- b – suformuoti asfaltbetonio (Maršalo) bandiniai, kurių aukštis 60,5–66,5 mm;
- c – automatinis Maršalo sutankinimo prietaisas „Infratest 20-1500“;
- d – kaitinimo krosnis „Memmert UFE-600“

Fig. 3.6. Apparatuses to produce Marshall specimens:

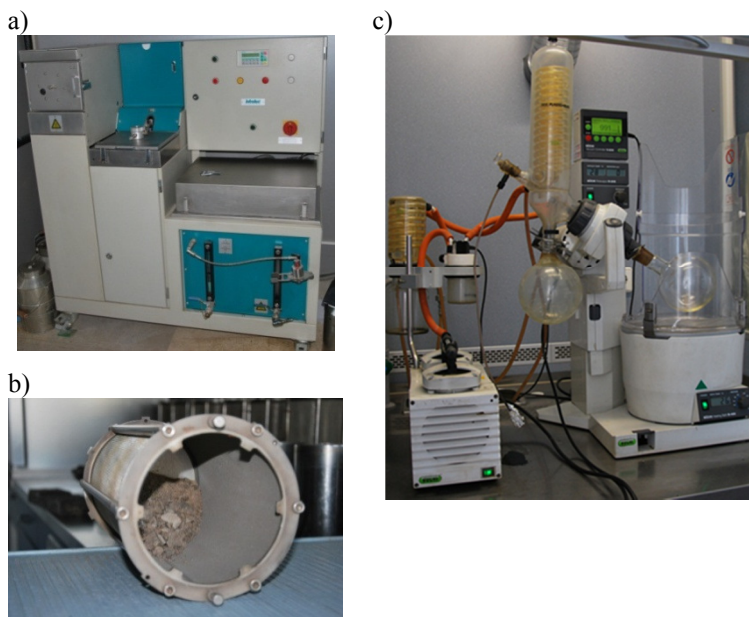
- a – Mixer („Rego herlitzius“) SM2 U with heating, used to mix hot-mix asphalt;
- b – formed asphalt concrete (Marshall) specimens (60,5–66,5 mm high);
- c – automatic Marshall compactor „Infratest 20-1500“;
- d – heating oven „Memmert UFE-600“

Atliktus regeneruoto (skirtingos markės ir kiekio atnaujinančiu bitumu) asfalto mišinio fizinių ir mechaninių savybių bandymus iš visų 18 serijų asfalto mišinio po ekstrahavimo (3.7 pav., a) išskirtas tirpusis rišiklis (bitumas su tirpikliu) sūkiuoju garintuvu (3.7 pav., c) buvo regeneruotas, t. y. atskirtas nuo tirpiklio (trichloretileno). Nustatyto regeneruoto tirpiojo bitumo savybės: penetracija

(Pen_{25} 0,1 mm) (3.8 pav., a), minkštėjimo temperatūra (T_{SP} °C) (3.8 pav., b), trapumo temperatūra pagal Frassą (T_{FBP} °C) (3.8 pav., c) ir apskaičiuotas penetracijos indeksas I_p iš formulės (Sengoz, Isikyakar 2008; Read, Whiteoak 2003; Sengoz *et al.* 2009):

$$I_p = \frac{1952 - 500 \cdot \log(Pen_{25}) - 20 \cdot T_{SP}}{50 \cdot \log(Pen_{25}) - T_{SP} - 120}, \quad (3.9)$$

čia Pen_{25} – bitumo penetracija pagal adatos įsmigimo gylį 0,1 mm 25 °C temperatūroje; T_{SP} – bitumo minkštėjimo temperatūra, nustatyta žiedo ir rutulio metodu, °C.

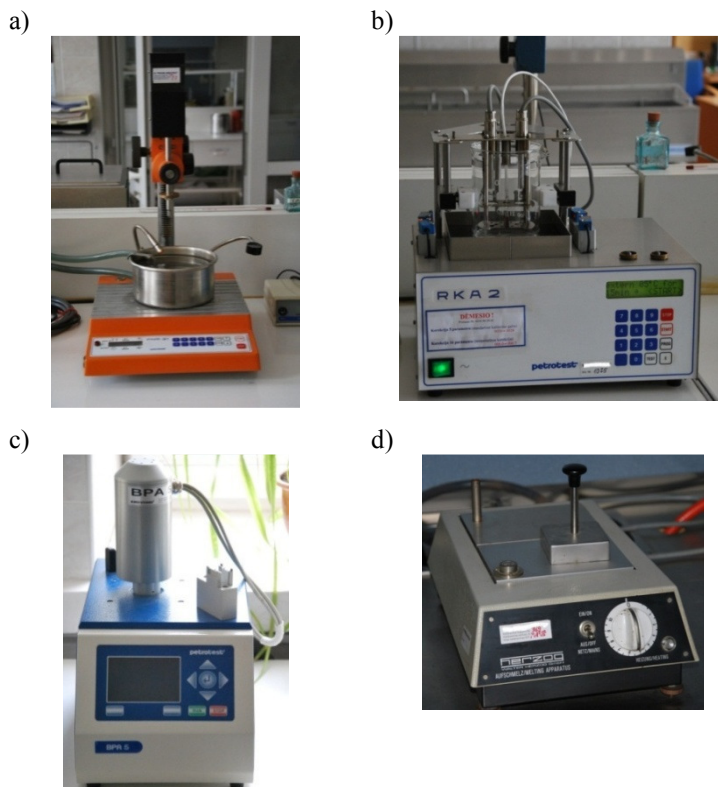


3.7 pav. Bitumo atskyrimo iš asfalto bandinio įrenginiai:

- a – asfaltoanalizatorius (ekstrahatorius) 20–1100, nustatantis bitumo kiekį ir granulometrinę sudėtį; b – asfalto medžiagų konteineris; c – rotacinis garintuvas BÜCHI R-205 ir šildymo vonelė

Fig. 3.7. Apparatuses to extract the bitumen from asphalt specimen:

- a – The Asphalt Analyzer (Extractor) 20–1100 determines the content and the granulometric composition of bitumen; b – container for asphalt materials; c – Rotary Evaporator BÜCHI R-205 + heating bath



3.8 pav. Įrenginiai bitumo fizinėms savybėms nustatyti:

a – programuojamas penetrometras „Petrotest PNR 10“; b – žiedo ir rutulio prietaisas RKA 2, automatiškai paleidžiantrutulį; c – automatinis Frasso prietaisas „Petrotest BPA-5“; d – plokštelių lydymo įrenginys „Water Herzog GmbH“

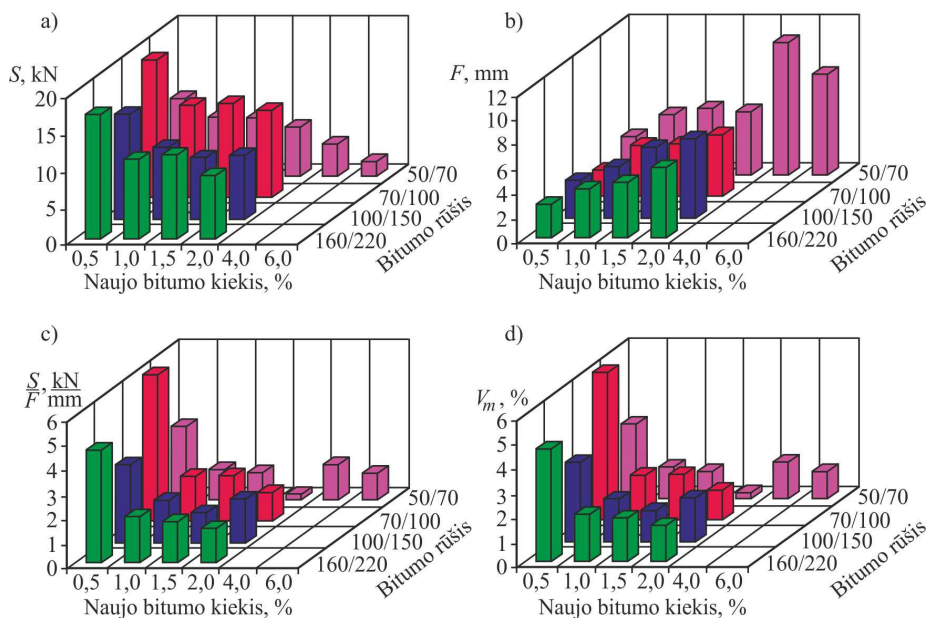
Fig. 3.8. Apparatuses to determine the physical properties of the bitumen:
a – Programmable „Petrotest PNR 10“ Penetrometer; b – Ring and Ball Apparatus RKA 2 with automatic ball release; c – Automatic „Petrotest BPA-5 Breaking-Point“ Tester; d – plate melting device „Water Herzog GmbH“

3.3.2. Su skirtingos rūšies ir kiekio atnaujinančiu bitumu regeneruoto naudoto asfalto granulių mišinio savybės

Adhezinės bitumo savybės nustatomos atliekant Maršalo bandinių gniuždomąjį bandymą.

Laboratorijoje pagal standartinę metodiką išbandžius iš RA ir atnaujinančio skirtingos rūšies ir kiekio naujo kelių bitumo pagamintus Maršalo bandinius gautos fizinių ir mechaninių rodiklių kaitos tendencijos (3.9 pav.).

Didinat naujo bitumo kiekį RA, mažėja mišinio stabilumas, Maršalo koeficientas ir oro tuštymių kiekis, didėja takumas. Esant tam pačiam naujo bitumo kiekiui RA mišinyje, bet skirtingai jo (bitumo) rūšiai stabilumas ir Maršalo koeficientas yra didesnis RA mišinio su klampesniu (didesnės penetracijos) atnaujinančiu bitumu. Takumas didėja į RA įpylus skystesnio atnaujinančio bitumo.



3.9 pav. Skirtingos rūšies atnaujinančio bitumo kiekio RA dangos mišinyje įtaka Maršalo bandinių fiziniams ir mechaniniams rodikliams:

a – pastovumas; b – takumas; c – Maršalo koeficientas; d – oro tuštymių kiekis

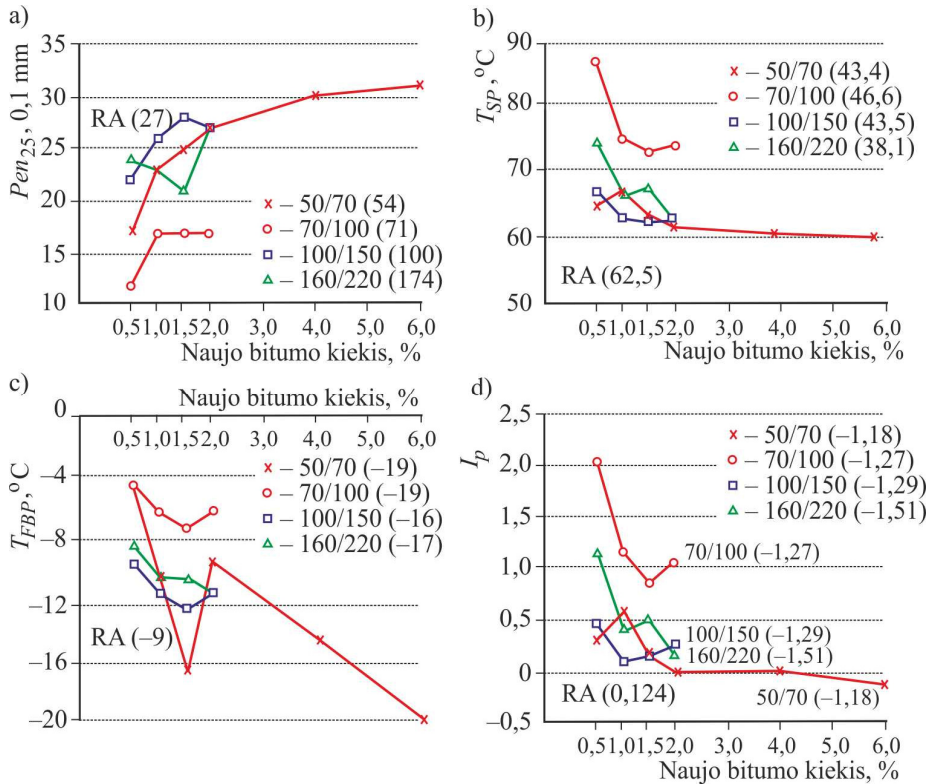
Fig. 3.9. Impact of variuosgrade rejuvenating bitumen amount in RAP mixture on the physical and mechanical properties of Marshall specimens:

a – stability; b – flow; c – Marshall quatient; d – air voids content

Didėjant bitumo penetracijai Pen_{25} nuo 30 dmm iki 55 dmm, asfalto pastovumas pagal Maršalą tiesiškai sumažėja nuo 7–8 kN iki 3,5 kN. Bitumo minkštėjimo temperatūrai T_{SP} didėjant nuo 50 °C iki 65 °C, asfalto pastovumas pagal Maršalą didėja tiesiškai nuo 3,5 kN iki 7,5 kN, o įvažinėjančio rato sukelta deformacija sumažėja nuo 5,0 mm/h iki 0,8 mm/h (Read, Whiteoak 2003). Panašias tendencijas rodo ir šiame darbe atlikto tyrimo duomenys. Laboratoriniame tyrime nebuvo siekiama nustatyti optimalų regeneruoto bitumo kiekį, dėl to nebuvo pridėdama naujų mineralinių medžiagų. Didinant atnaujinančiosios medžiagos procentinį kiekį RA granulių mišinyje, suminis bitumo kiekis dažniausia buvo didesnis už optimalų.

3.3.3. Regeneruoto suminio bitumo savybių tyrimas

Išbandžius pagamintus Maršalo bandinius ir išekstrahavus iš jų tirpų bitumą, sudarytą iš seno ir naujo bitumų, ir jį rotaciniame garintuve atskyrus nuo tirpiklio buvo nustatytos jo savybės (3.10 pav.).



3.10 pav. Regeneruoto (suminio) bitumo savybių priklausomybė nuo atnaujinančiosios medžiagos (naujo bitumo) rūšies ir procentinio kiekio RA dangos mišinyje:

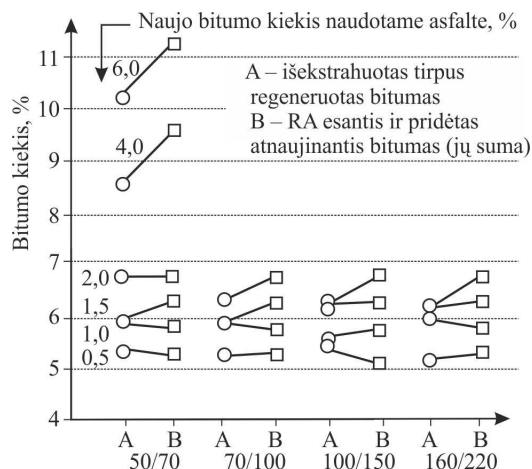
a – penetracija Pen_{25} ; b – minkštėjimo temperatūra T_{SP} ; c – trapumo temperatūra T_{FBP} ; d – penetracijos indeksas I_p . Skliaustuose pateiktos RA bitumo ir atnaujinančio bitumo savybės

Fig. 3.10. Dependence of reclaimed (total) bitumen properties on the grade and percentage amount of the rejuvenator (virgin bitumen) in RAP bitumen and rejuvenating bitumen properties are presented in brackets:

a – penetration Pen_{25} ; b – softening point T_{SP} ; c – Fraass breaking point T_{FBP} ; d – penetration index I_p . RAP bitumen and rejuvenating bitumen properties are presented in brackets

Didinant visų markių naujo bitumo procentinį kiekį RA mišinyje, didėja regeneruoto bitumo penetracija Pen_{25} (mažėja klampa), mažėja minkštėjimo temperatūra T_{SP} ir trapumo temperatūra T_{FBP} . Apskaičiuoto penetracijos indekso I_p vertės taip pat mažėja ir yra teigiamos, išskyrus bitumo, regeneruoto atnaujinančiąja medžiaga (nauju bitumu 50/70 rūšies), kai jo buvo įdėta 2,0 % ir daugiau. Visų rūšių atnaujintojo I_p yra neigiamas.

Didėjant bitumo penetracijos indeksui I_p nuo $-1,5$ iki $+1,5$ vėžės gylis mažėja pagal įgaubtą kreivę nuo 10 mm iki 5 mm, o I_p nuo $-1,0$ iki $+4,5$, reliatyvi deformacija tiesiškai sumažėja nuo 1,2 iki 0,2 (Read, Whiteoak 2003).



3.11 pav. Regeneruoto bitumo kiekis RA dangoje gautas jį išekstrahavus (A) ir aritmetiškai sudėjus seną ir atnaujinantį bitumus (B)

Fig. 3.11. Recycled bitumen amount in RAP, obtained by extraction (A) and arithmetically adding the values of aged and virgin bitumen (B)

Anksčiau atliktų tyrimų (Mučinis *et al.* 2009) duomenys parodė, kad RA yra nehomogeniškas: plačiai svyruoja ne tik jo granulometrinė sudėtis, bet ir seno bitumo kiekis. Šiame eksperimente buvo naudojamas RA iš to paties sandėlio krūvos. Maršalo bandiniams gaminti RA vienetiniai ėminiai buvo sumaišomi homogenizuojant mišinį laboratorijoje. Tačiau absoliutus kiekvienos iš 18 RA mišinio imties homogeniškumas nebuvo pasiektas, nes regeneruoto tirpaus bitumo, nustatyto ekstrahuojant mišinį, kiekis A ne visada sutapo su RA esančio seno ir pridėto atnaujinančio bitumų suma B (3.11 pav.).

Iš Maršalo bandinių išekstrahuoto bitumo kiekis A daugeliu atvejų buvo mažesnis už apskaičiuotą kontrolinį bitumo kiekį B (3.11 pav.). Skirtumas tarp

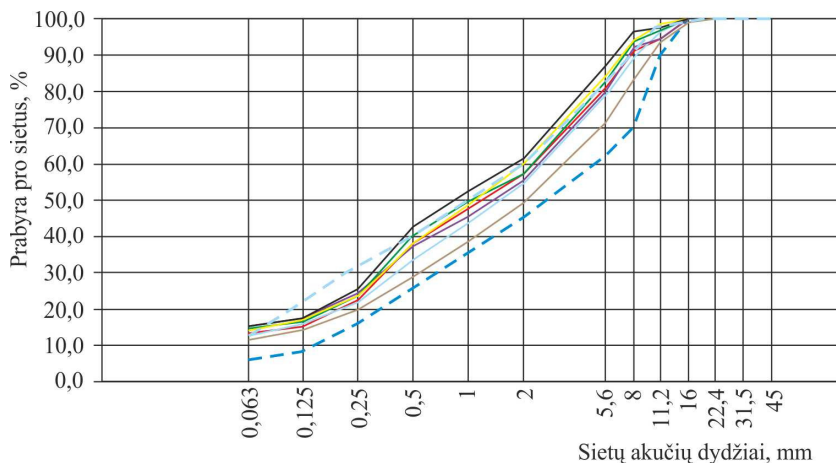
A ir B bitumo kiekių didėjo, didėjant į RA mišinį įpilto atnaujinančio bitumo kiekiui. Idealiu atveju tiesės turi būti horizontalios.

3.4. Regeneruoto asfalto atsparumo vėžių susidarymui tyrimas

3.4.1. Laboratoriniai tyrimai nustatant pagal Maršalą mišinių sudėtį ir savybes

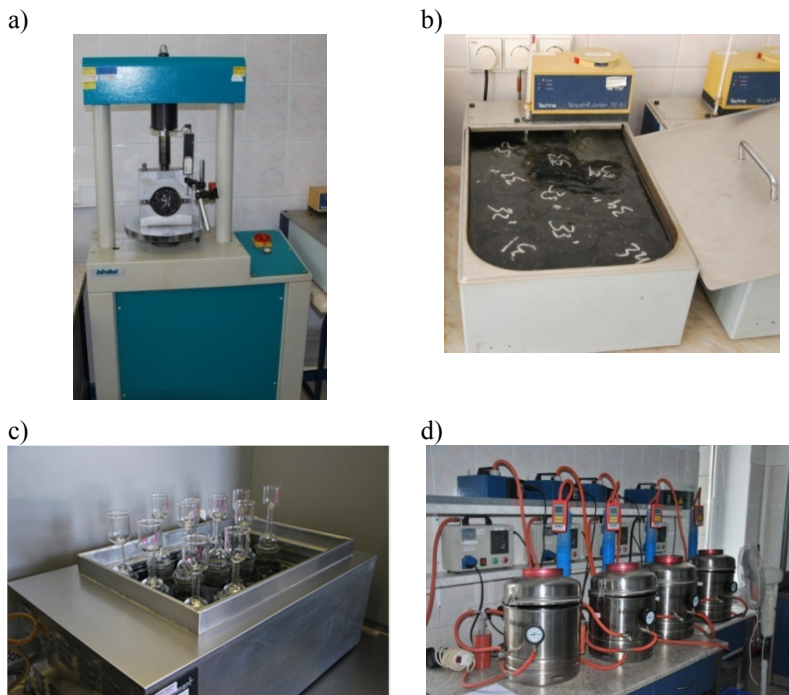
Nagrinėjant anksčiau tirtas RA mišinio granulimetrines sudėtis, buvo prieita prie išvados, kad mišinio granulimetrinė sudėtis labiausia atitinka asfaltbetonio (AC) rūšies 11 tipo (11 mm viršutinio akučių dydžio) asfalto mišinio, skirto viršutinio dangos sluoksniui (*V*), kai ją veikia lengva (*L*) apkrova, sudėtį.

Pirmame etape buvo suprojektuotas naujas AC11VL asfaltbetonio mišinys pagal granulimetrinę sudėtį, artimą RA granulimetrijai. Šiam projektui buvo naudojamos naujos medžiagos: dolomito skaldelė 8/11, dolomito skaldelė 5/8, dolomito skaldelės atsijos 0/5, granitinės skaldelės atsijos 0/2 ir gamtinis smėlis 0/2. Imtas projektinis optimalus bitumo kiekis – 5,5 % šimte procentų.



3.12 pav. Projektų RA0, RA10, RA20, RA40, RA60, RA80, RA100 granulimetrinės projektinės kreivės, įterptos į AC11VL mišinio projektinės kreivės ribas

Fig. 3.12. Granulometric design curves of RA0, RA10, RA20, RA40, RA60, RA80, RA100 embedded into the design curve limits of AC11 VL mixture



3.13 pav. Laboratoriniai įrenginiai asfaltbetonio bandiniams tirti:

a – Maršalo presas „Infratest“ (asfaltbetonio pastovumui ir takumui nustatyti);

b – termostatinė vandens vonelė, palaikanti 60 laipsnių temperatūrą

(asfaltbetonio bandinių pastoviai temperatūrai palaikyti); c – vieno litro piknometrai termostatinėje vandens vonelėje (WB 45) tikrajam asfaltbetonio tankiui nustatyti; d – vakuumetrai tikrajam asfaltbetonio tankiui nustatyti

Fig. 3.13. Laboratory apparatuses to study asphalt concrete specimens:

a – The Marshall Press Infratest (for the determination of stability and fluidity of asphalt concrete); b – thermostatic water bath, which maintains the temperature of 60 degrees (to thermostate the asphalt specimens);

c – one liter pycnometers, in a thermostatic water bath (WB 45) to determine the actual density of asphalt concrete; d – Vacuum meters to determine actual density of asphalt concrete

Septynių sudėties projektų atskiruose padėkluose maišomi po 5 kg maišiniai buvo panaudoti formuojant po tris Maršalo bandinius 150°C temperatūroje. Iš kiekvieno padėklo suformavus po tris Maršalo bandinius buvo nustatytas pastovumas (S) ir takumas (F) pagal LST EN 12697–34+A1:2007 standartą, tikrasis tankis ($SSD - S_{bssd}$) – pagal LST EN 12697–6+A1:2007 standartą, apskaičiuo-

tas Maršalo koeficientas ($Q = S/F$), taip pat apskaičiuotas oro tuštymių skaičius (V_m) pagal LST EN 12697–8:2006 standartą (3.13 pav.).

Atliktus regeneruoto (su skirtingu RA granulių kiekiu) asfalto mišinių fizinių ir mechaninių savybių bandymus iš visų septynių padėklų asfalto mišinio po ekstrahavimo išskirtas tirpusis rišiklis (bitumas) ir nustatytas jo faktinis kiekis.

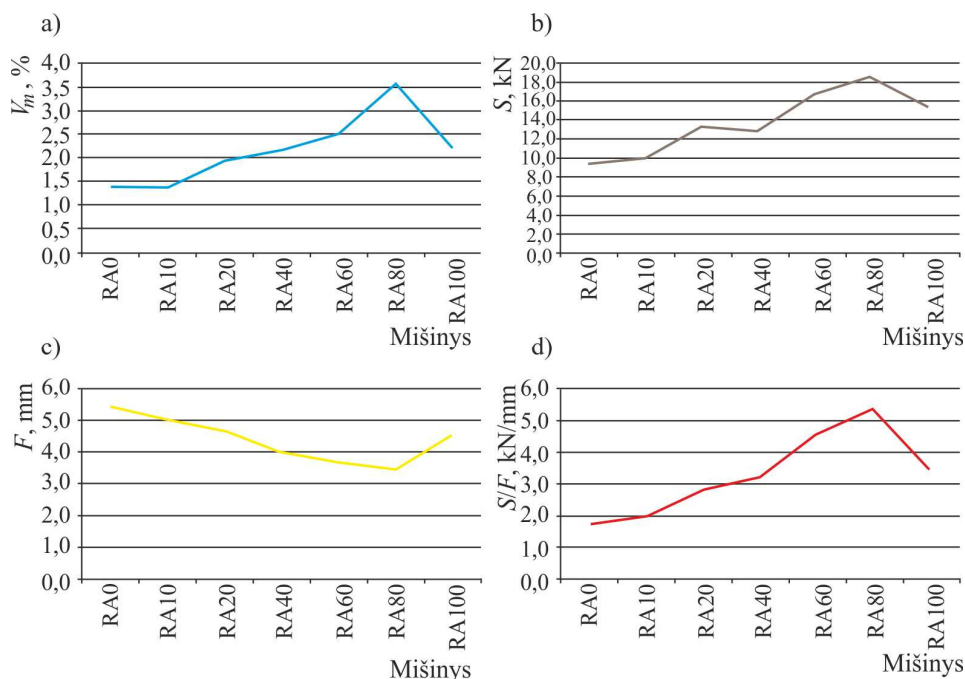
Bandymo metu buvo nustatytos kiekvieno projekto fizinės ir mechaninės savybės (3.2 lentelė).

3.2 lentelė. RA0, RA10, RA20, RA40, RA60, RA80, RA100 asfaltbetonio mišinių fizinių ir mechaninių bandymų rezultatai

Table 3.2. Results of physical and mechanical tests of a/c mixtures RA0, RA10, RA20, RA40, RA60, RA80, RA100

Pavyzdžio žymėjimas	Pastovumas, kN	Takumas, mm	Oro tuštymių kiekis, %	Asfalto bandinių tariamasis tankis, kg/m ³	Asfalto didžiausias tankis, kg/m ³	Maršalo koeficientas, kN/mm	Bitumo kiekis, %	Bitumo kiekio nuokrypis, %
RA0	9,5	5,5	1,4	2451	2,485	1,7	5,57	0,07
RA10	10,1	5,0	1,4	2440	2,474	2,0	5,79	0,29
RA20	13,4	4,7	1,9	2443	2,491	2,8	5,44	–0,06
RA40	12,9	4,0	2,2	2429	2,483	3,2	5,18	–0,32
RA60	16,7	3,7	2,5	2424	2,487	4,6	5,31	–0,19
RA80	18,6	3,5	3,6	2399	2,488	5,4	4,9	–0,60
RA100	15,5	3,5	2,2	2413	2,467	3,4	5,17	–0,33

Atlikti tyrimai parodė tai, ko ir buvo tikėtasi (3.14 pav.). Visų suprojektuotų mišinių fizinės ir mechaninės savybės atitiko šiam mišiniui (AC11VL) keliamus reikalavimus. Pastovumas didėjo į KMA mišinį dedant didesnę RA granulių procentinę kiekį nuo 9,5 kN iki 18,6 kN. Takumas, didėjant pastovumui ir procentiniam kiekiui RA granulių KMA mišinyje, proporcingai mažėjo nuo 5,5 mm iki 3,5 mm. Oro tuštymių kiekis ir Maršalo koeficientas, didėjant RA granulių procentiniam kiekiui KMA mišinyje, taip pat didėjo. Ištirtas bitumo kiekis iš kiekvieno projekto parodė, kad jis labai nedaug nukrypo nuo mūsų teoriškai projektuoto bitumo kiekio (5,5 %).



3.14 pav. Asfaltbetonio mišinių fizinių ir mechaninių rezultatų pasiskirstymas atsižvelgiant į panaudotą RA procentinį kiekį mišinyje:

a – oro tuštymių kiekis; b – pastovumas; c – takumas; d – Maršalo koeficientas

Fig. 3.14. Distribution of a/c mixture physical and mechanical test results depending on the percentage of RAP used in the mixture: a – air voids; b – stability; c – fluidity; d – Marshall's ratio

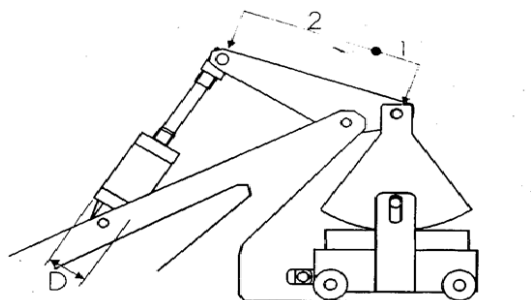
Bandymo meto suprojektuoto mišinio RA80 fizinės ir mechaninės savybės šiek tiek išsiskyrė. To priežastis galėjo būti nevisiškai atitikęs bitumo kiekis, palyginti su teoriškai suprojektuotu, kuris nukrypo $-0,60\%$ nuo projekcinio. Eilinių kartą buvo patvirtinta, kad RA granulės yra labai nehomogeniškos ir gali stipriai pakeisti KMA mišinio savybes nuo planuojamų.

3.4.2. Asfalto mišinio atsparumo vėžių susidarymui tyrimas

Vėžei bandyti buvo gaminami mišiniai po 10 kg. Mišiniai – RA0, RA20, RA60, RA100 (pagal tas pačias kreives kaip ir Maršalo bandymui), kurių skaitinė žymens dalis rodo RA procentinį kiekį asfalto mišinyje. Bandiniai buvo formuojami 40 mm aukščio formose ir sutankinti voliniu tankintuvu (3.15 pav.).

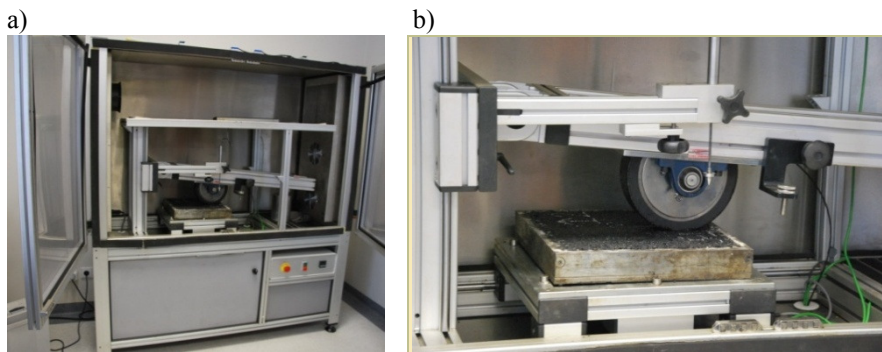
Volinis tankintuvas sutankina asfaltbetonio plokštes naudojant pneumatinę jėgą laboratorinėmis sąlygomis, kurios atitinka tikrąjį tankinimą. Keturi skirtingi

vertikaliųjų jėgų dydžiai gali būti parinkti apytikriai iki 30 kN. Kadangi volo plotis yra 305 mm, jis gali tankinti tokiu pat intensyvumu, kaip ir didžiausias volas kelyje, tankinimo temperatūra – 150 °C.



3.15 pav. Asfalto atsparumui vėžėms tirti naudojamo bandinio volinio tankintumo schema

Fig. 3.15. Roller-compaction scheme of the used specimen to study asphalt resistance to rutting



3.16 pav. Bandymo ratu įrenginys CRT-WTEN1:

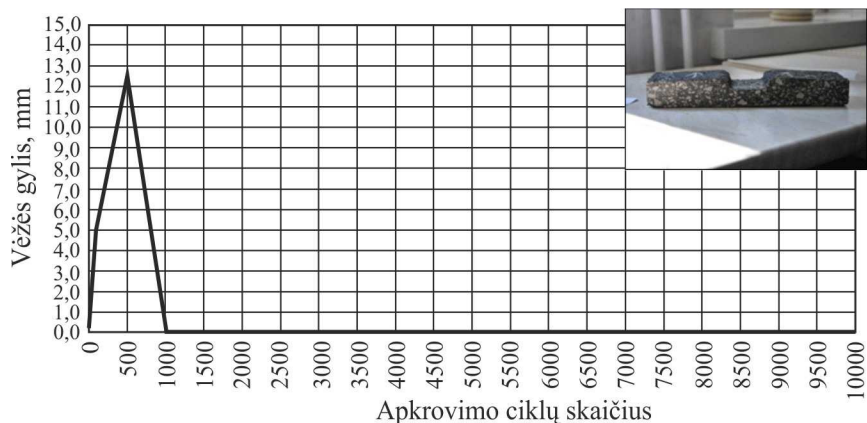
a – bendrasis vaizdas; b – bandinys ir juo važiuojantis ratas

Fig. 3.16. Wheel Tracker CRT-WTEN1:

a – general view; b – specimen with a tracking wheel

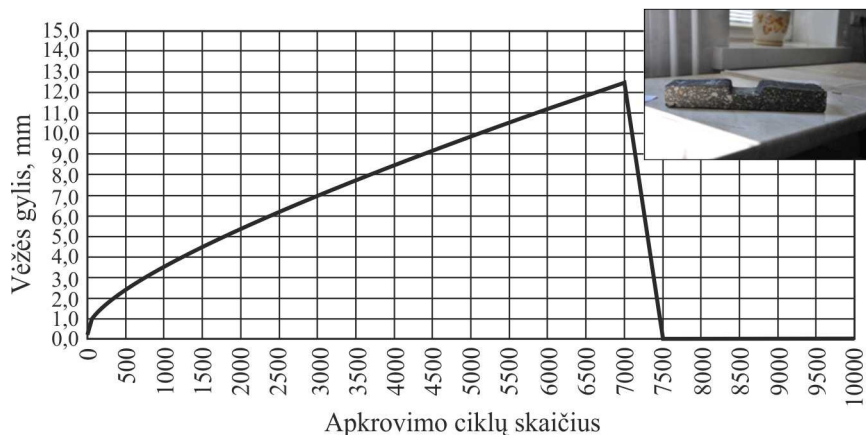
Asfaltbetonio mišinio, naudojant ratinę eksperimentinę apkrovą, deformacijų (t. y. provėžos gylį) nustatymo bandymas atliekamas 60 °C temperatūroje. Rato plotis – 80 ± 5 mm. Pneumatinio rato apkrova turi būti 600 ± 30 kPa, provėžos plotis – 110 ± 5 mm, rato judėjimas viena kryptimi užtrunka $2,5 \pm 0,5$ sekundės (vieną ciklą sudaro ratuko važiavimo laiko pirmyn ir atgal suma). Provėžos gylį, rato judėjimo greitį, bandinio temperatūrą fiksuoja kompiuteris. Bandymas atliekamas ne

vėliau kaip po 24 val. nuo jo suformavimo, bet ne anksčiau kaip po 12 val. (atsižvelgiant į plokštės storį). Bandymas vyksta tol, kol suvažinėjama 10 000 ciklų, t. y. 6 val. 30 min. Sutankintos plokštės buvo išlaikytos dvi paras ir buvo nustatomas rato vėžės gylis pagal LST EN 12697–22+A1:2007/P:2008 (3.16 pav).



3.17 pav. RA0 mišinio gautų duomenų grafikas ir ratu deformuoto bandinio pjūvio nuotrauka

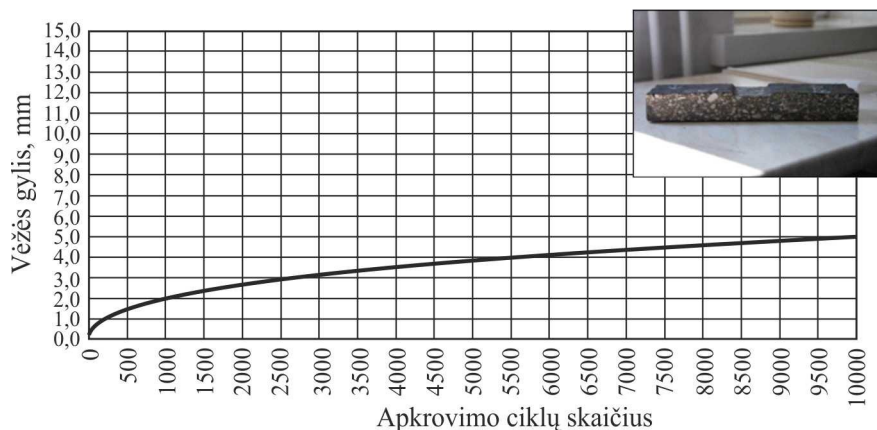
Fig. 3.17. Graph from data received for RA0 mixture and a photo of a specimen (deformed by the wheel tracker) section



3.18 pav. RA20 mišinio gautų duomenų grafikas ir ratu deformuoto bandinio pjūvio nuotrauka

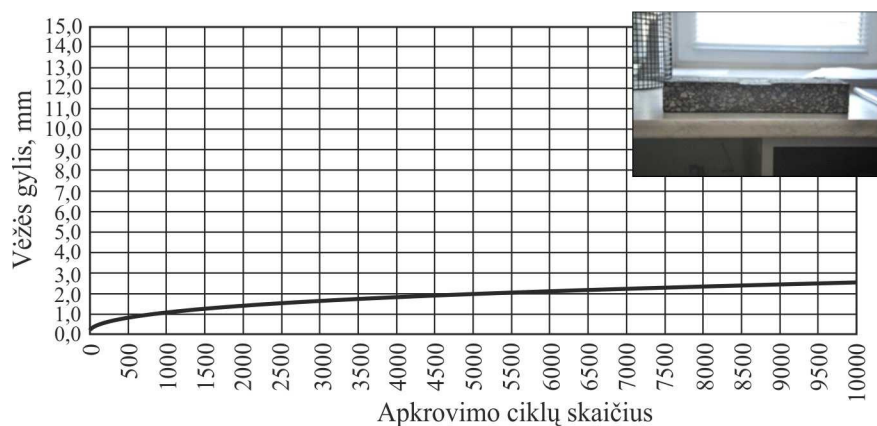
Fig. 3.18. Graph from data received for RA20 mixture and a photo of a specimen (deformed by the wheel tracker) section

Ivažinėjimo rato ciklų skaičiaus įtaka vėžės gyliui pateikta grafiškai (3.17 pav. – 3.20 pav.)



3.19 pav. RA60 mišinio gautų duomenų grafikas ir ratu deformuoto bandinio pjūvio nuotrauka

Fig. 3.19. Graph from data received for RA60 mixture and a photo of a specimen (deformed by the wheel tracker) section



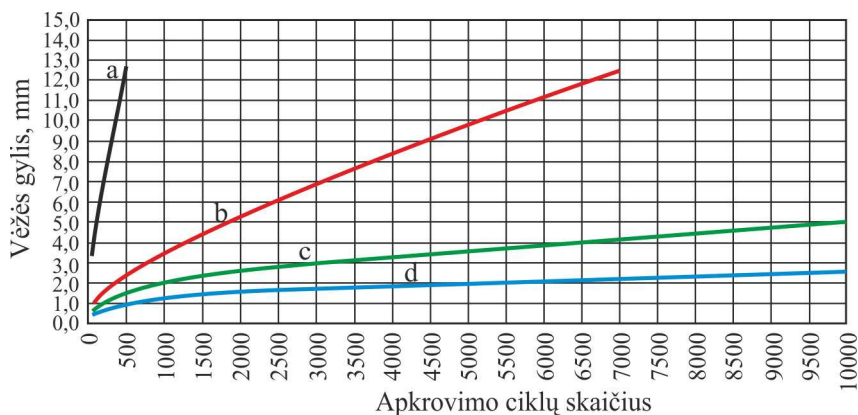
3.20 pav. RA100 mišinio gautų duomenų grafikas ir ratu deformuoto bandinio pjūvio nuotrauka

Fig. 3.20. Graph from data received for RA100 mixture and a photo of a specimen (deformed by the wheel tracker) section

Atliekant pirmą bandymą su padėklų RA0, buvo padaryta tik 1000 važiavimų, nes bandymo metu vėžės gylis labai greitai pasiekė savo kritinę ribą. Projek-

tinio RA20 mišinio pavyzdžio bandymas taip pat nebuvo atliktas iki galo, jis buvo nutrauktas prie 14 800 važiavimų dėl tos pačios priežasties (vėžės gylis buvo pasiekęs kritinę ribą).

Su RA60 KMA mišinio pavyzdžio bandymas buvo atliktas iki pat galo ir gautas rezultatas siekė vos 4,9 mm vėžės gylį po 20 tūkstančių važiavimo ciklų. RA100 KMA mišinio pavyzdžio vėžės gylis siekė tik 2,5 mm po 20 tūkstančių važiavimo ciklų.



3.21 pav. a – RA0; b – RA20; c – RA60; d – RA100 mišinio gautų duomenų grafikų pasiskirstymas

Fig. 3.21. Distribution of graphs from data received a – RA0; b – RA20; c – RA60; d – RA100 mixture

Analizuojant KMA mišinių RA0, RA10, RA20, RA40, RA60, RA80, RA100 fizines ir mechanines savybes pagal Maršalo metodą, galima teigti, kad tiek mišinys, sumaišytas iš naujų medžiagų, tiek mišinys, į kurį pridėta RA granulų skirtingais procentiniais kiekiais, visiškai atitiko AC11VL mišiniui keliamus reikalavimus (pastovumo (S), takumo (F), oro tuštymių kiekio (V_m), Maršalo koeficiento ($Q = S/F$)), net didinant procentinę RA granulų kiekį KMA mišinyje pastovumo rodiklis didėjo kaip ir Maršalo koeficientas. Tačiau didėjant pastovumui ir RA granulų procentiniam kiekiui KMA mišinyje takumas mažėja. Atlikus ratuko vėžės bandymą, akivaizdžiai matyti (3.21 pav.), kad suprojektuotas KMA mišinys iš naujų medžiagų RA0 visiškai neatitiko rezultatų, kaip ir RA20 mišinys. Tačiau didėjant procentiniam RA granulų kiekiui KMA mišinyje asfaltbetonis tampa atsparesnis vėžės susidarymui. Tai reiškia, kad RA nepablogina asfaltbetonio vėžių susidarymo požiūriu, o atvirkščiai – tampa atsparesnė vėžės susidarymui.

3.5. Trečiojo skyriaus išvados

1. Paruoštas naudoti RA pagal maksimalų granulių dydį ($\max d_{RAP} = 32$ mm) yra tinkamas dozuoti regeneruojamame KMA mišinyje. Laikomų atviroje krūvoje RA-3 vidutinė drėgmė buvo 3,4 % ir svyravo nuo 0,7 % iki 6,5 % (skirtumas – 5,8 %). RA drėgmės standartinis nuokrypis 0,93 % rodo netolygų vandens kiekio pasiskirstymą krūvoje, pareikalaušiantį papildomos varijuojančios šilumos energijos, perimamos iš perkaitintų mineralinių medžiagų, vandeniui išgarinti.
2. Bitumo kiekio, esančio RA, variacija visose trijose imtyse, vertinta standartiniu nuokrypiu s , rodo, kad ji dėl pažaidų taisymo, netolygaus bituminių medžiagų pasiskirstymo kelio dangoje visada didesnė ($s = 0,67\%$ RA-1, $s = 0,84\%$ RA-2 be išskirčių, $s = 0,35\%$ RA-3) už naujos dangos asfalte esančio bitumo kiekio. Kai kuriuose RA ėminiuose būna labai daug bitumo, kurį statistiškai reikėtų priskirti prie išskirčių.
3. Jei RA mineralinę dalį (užpildus) sijotume per skirtingas akutes turinčius sietų komplektus, nustatytus atskirų šalių normose, jų pilnutinių išbirų per sietus standartiniai nuokrypiai skirtųsi, bet granulimetrinės sudėties sklaidos parametrų (s_p vertės) koreliacinė priklausomybė nuo padėties parametrų ($\bar{p}$ vertės) būtų tokia pati. Glaudžią koreliacinę priklausomybę s_p nuo $\bar{p}$ rodo artimi vienetai determinacijos koeficientai R^2 , kintantys nuo 0,954 iki 0,993. Todėl pateiktas RA homogeniškumo vertinimo pagal iš regresijos lygčių apskaičiuotą didžiausią pilnutinių išbirų per sietus standartinį nuokrypį s_p max modelis yra universalus. Jis leidžia lyginti (gretinti) skirtingo stambumo, rūšių, tipų ir per skirtingus laboratorinių sietų komplektus išsijoto RA homogeniškumą.
4. Pagal Bartelio kriterijų tikrinant visų trijų imčių RA pilnutinių išbirų per sietus didžiausių dispersijų vienodumą (standartiniai nuokrypiai $\max s_p = 6,1\%$ RA-1, $\max s_p = 7,6\%$ RA-3, $\max s_p = 8,0\%$ RA-2) su $\alpha = 0,05$ reikšmingumo lygmeniu nustatytas vienodas jų homogeniškumas, rodantis, kad RA imčių ėmimo vieta beveik neturi įtakos rezultatams.
5. Dėl transporto apkrovų ir oro sąlygų destruktiviųjų veiksnių deformuotas ir suiręs asfalto dangos sluoksnis gali būti kartotinai panaudotas (regeneruotas), jei įdėjus papildomų atnaujinančių medžiagų arba ir naujų mineralinių medžiagų pagaminamas (KMA) mišinys, kurio savybės panašios į vien tik iš naujų medžiagų pagaminto KMA mišinio savybes. Labiausiai komplikotas yra tinkamos atnaujinamosios medžiagos arba naujo bitumo rūšies ir reikiamo procentinio kiekio parinkimo uždavinys.

Didžiausią regeneravimo darbų efektą galima gauti patikimai ir tiksliai nustatčius bei įvertinus dėl senėjimo pakitusias RA bitumo savybes, atnaujinančiosios medžiagos savybes ir jos pasiskirstymo apie RA mišinio grūdelių plėvelių struktūrą, taip pat seno ir naujo bitumų difuzijos dinamiką lemiančius veiksnius.

6. Iš RA ir skirtingos rūšies 50/70, 70/110, 100/150, 160/220 atnaujinančio naujo bitumo laboratorijoje pagamintų Maršalo bandinių fiziniai ir mechaniniai rodikliai rodo, kad mažėjant pridedamo naujo bitumo klampai (didėjant penetracijai) mažėja pastovumas ir Maršalo koeficientas, bet didėja takumas ir beveik nekinta oro tuštymių kiekis. Didinant atnaujinančio bitumo procentinį kiekį RA mišinyje, mažėja jo pastovumas, Maršalo koeficientas ir oro tuštymių kiekis, bet didėja mišinio takumas. Su dideliu atnaujinančio bitumo kiekiu pagaminti bandiniai ne visada atitiko jiems keliamus reikalavimus.
7. RA seną bitumą atnaujinant nauju bitumu, padidėja regeneruoto KMA mišinio suminio bitumo kiekis, kuris dažniausia būna didesnis už optimalų, priklausantį nuo nepakeistos granulimetrinės sudėties. Todėl tenkinant regeneruoto bitumo kiekio optimalumo sąlygą ir neturint praktinės galimybės jo pertekliui sumažinti, būtina į RA pridėti ir naujų mineralinių medžiagų. Šiame tyrime naujų mineralinių medžiagų nebuvo pridėta.
8. Ekstrahavus regeneruoto asfalto bandinius ir rotaciniame garintuve atskyrus iš tirpiklio suminį visų 18 serijų bitumą, nustatytos savybės parodė, kad didinant naujo bitumo procentinį kiekį RA mišinyje, didėjo suminio bitumo penetracija, mažėjo minkštėjimo temperatūra, trapumo temperatūra ir penetracijos indeksas. Tikėtasi gauti didesnius suminio bitumo savybių pokyčius, lyginant su RA seno bitumo savybėmis, t. y. didesnio naujo bitumo veiksmingumo keičiant seno bitumo savybes. RA seno bitumo penetracija $Pen_{25} = 27 \cdot 0,1$ mm; minkštėjimo temperatūra $T_{SP} = 62,5^\circ\text{C}$; $T_{FBP} = -9^\circ\text{C}$; penetracijos indeksas $I_p = +0,124$. Su 0,5 %, ..., 6,0 % atnaujinamąja medžiaga regeneruoto bitumo Pen_{25} kito nuo $12 \cdot 0,1$ mm iki $31 \cdot 0,1$ mm, $T_{SP} = 59,6 - 86,2^\circ\text{C}$, $T_{FBP} = -(9-19)^\circ\text{C}$, $I_p =$ nuo $+2,05$ iki $-0,14$.
9. Po RA regeneravimo ekstrahuoto tirpaus bitumo kiekis dažniausia buvo mažesnis už kontrolinį jo kiekį, gautą prie RA ėminiuose esančio seno bitumo kiekio vidurkio pridėjus atnaujinančio naujo bitumo kiekį. Ši neatitiktis paaiškinama RA dideliu nehomogeniškumu ne tik sandėlio krūvoje, bet ir iš jos paimtuose laboratoriniams tyrimams ėminiuose.

10. Atlikus RA0, RA10, RA20, RA40, RA60, RA80, RA100 KMA mišinių fizinių ir mechaninių savybių tyrimus pagal Maršalą, gauti rezultatai rodo, kad didinant RA granulių kiekį KMA mišinyje taip pat didėja pas-tovumas (S), Maršalo koeficientas ($Q = S/F$), oro tuštymių skaičius (V_m) ir mažėja takumas (F). Taigi galime teigti, kad RA tik pagerina KMA mišinio fizines ir mechanines savybes.
11. Tiriant RA0, RA10, RA20, RA40, RA60, RA80, RA100 KMA mišinius buvo nustatyti jų bitumo kiekiai ir palyginti su teoriniu 5,5 % procentiniu kiekiu, kuris buvo imamas kaip projektinis. Iš tyrimų matome, kad didėjant procentiniam RA granulių kiekiui KMA mišinyje, bitumo nuo-krypiai nuo projektinio (5,5 %) kiekio didėja ir RA80 mišinyje siekia net $-0,60\%$. Tai dar karta parodo, kad RA granulės yra labai nehomogeniš-kos ir naudojant didelį jų kiekį KMA mišinyje sudėtinga kontroliuoti kokybinius asfalto mišinio parametrus.
12. Atliekant bandymą vėžės susidarymo ratuku buvo pastebėta, kad didė-jant procentiniam RA granulių kiekiui KMA mišinyje asfaltbetonis at-spausnis vėžių susidarymui. Todėl galima teigti, kad procentinis RA granulių kiekis KMA mišinyje tik pagerina asfaltbetonio atsparumą vė-žių susidarymui.
13. Taip pat iš atliktų bandymų galima teigti, kad projektuojant bet kokius asfaltbetonio mišinius neužtenka vien tik atlikti bandymų Maršalo me-todu. Bandymai rodo, kad suprojektuoti visi mišiniai RA0 RA10, RA20, RA40, RA60, RA80, RA100 puikiai atitiko AC11VL markės mišiniui keliamus reikalavimus, bet RA0 ir RA20 mišiniai visiškai neatitiko ban-dymo vėžės susidarymo ratu.

Šiame darbe buvo atlikta tik RA ir naujo bitumo, paimtų iš vieno šaltinio, anali-zė. Universaliam apibendrinimui, būtina įvertinti, kaip taikomas analizės metodas skirtingiems RA ir asfalto rišikliams, paimtiems iš skirtingų šaltinių.

Karštai regeneruojamo asfalto komponentinės sudėties optimizavimas

4.1. Maksimalus leidžiamas naudoto asfalto kiekis regeneruotame KMA mišinyje

Remiantis visais pagal Europos normas parengtais Lietuvos standartais LST EN 13108 (1–7 dalys) į gaminamą KMA mišinį galima dėti RA. Pagal juos parengtame Techninių reikalavimų apraše TRA ASFALTAS 08 (2009) reikalaujama RA granulių leidžiamą (galimą) pridėti maksimalų procentinį kiekį K_i skaičiuoti pagal (4.1) arba (4.2) formules, atsižvelgiant į RA homogeniškumą. RA homogeniškumas nustatomas iš atskirų savybių rodiklių intervalų a_i . Skaičiuojant K_i naudojami bendrieji leistinieji nuokrypiai $N_{leist,i}$, priklausantys nuo RA savybės ir regeneruoto KMA mišinio rūšies (4.1 lentelė):

$$K_i = \frac{0,50 N_{leist,i}}{a_i} \cdot 100 \quad (4.1)$$

arba

$$K_i = \frac{0,33 N_{leist,i}}{a_i} \cdot 100, \quad (4.2)$$

čia a_i – RA i -tosios savybės rodiklio iš imties (mažiausias imties dydis $n = 5$) apskaičiuotas didžiausios $x_{i \max}$ ir mažiausios $x_{i \min}$ verčių skirtumas:

$$a_i = x_{i \max} - x_{i \min}. \quad (4.3)$$

Asfalto pagrindo sluoksnio mišinio ir asfalto pagrindo dangos sluoksnio mišinio atveju visoms savybėms taikoma (4.1) formulė. Asfalto apatinio sluoksnio mišinio ir asfalto viršutinio sluoksnio mišinio atveju minkštėjimo temperatūros savybei taikoma (4.1) formulė, o visoms kitoms savybėms – (4.2) formulė.

4.1 lentelė. RA granulių sudėties bendrieji leistinieji nuokrypiai $N_{leist,i}$ (pastovūs koeficientai)

Table 4.1. General permissible deviations $N_{leist,i}$ for the gradation of particle of RAP granules (constant coefficients)

Naudoto asfalto komponentai	Mišiniams	
	viršutiniams, apatiniams ir pagrindo dangos sluoksniams	pagrindo sluoksniams
Minkštėjimo temperatūra °C (bitumas)	8	8
Rišklio kiekis masės % (bitumas)	1,0	1,2
Dalelių < 0,063 mm kiekis masės % (mineraliniai milteliai)	6,0	10,0
Dalelių nuo 0,063 iki 2 mm kiekis masės % (smėlis)	16,0	16,0
Dalelių > 2 mm kiekis masės % (skalda)	16,0	18,0

Iš gautų atlikto eksperimento duomenų apskaičiuotas didžiausias į regeneruojamą KMA mišinį leidžiamas dėti RA granulių procentinis masės kiekis, atitinkantis Lietuvoje nufrezuoto RA faktiškąją homogeniškumą pagal atskirų komponentų kiekį, pateiktas 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė. Didžiausias į regeneruojamo KMA mišinius leidžiamas dėti RA granulių masės procentinis kiekis, atitinkantis jo homogeniškumą pagal komponentinę sudėtį ir asfalto mišinio rūšį

Table 4.2. The most content of RAP (percentage mass) allowed for proportion in recycled KMA mixtures corresponding to RAP homogeneity by its componential structure and the type of asphalt mixture

RA komponentas	Imtis	Iš tyrimo nustatyta vertė, masės %			Apskaičiuotas RA masės procentinis kiekis K_i asfalto mišiniams, naudojamiems		
		didžiausia $x_{i \max}$	mažiausia $x_{i \min}$	skirtumas a_i	pagrindo sluoksniams; (4.1) formulė, $N_{leist,i}$ skiltis 2	pagrindo-dangos sluoksniams; (4.1) formulė, $N_{leist,i}$ skiltis 1	apatiniam ir viršutiniam sluoksniams; (4.2) formulė, $N_{leist,i}$ skiltis 1
Minkštėjimo temperatūra °C	RA-1	–	–	–	–	–	–
	RA-2	62,2	44,9	17,3	23,1	23,1	15,3
	RA-3	–	–	–	–	–	–
Bitumas B	RA-1	6,58	4,39	2,19	27,4	22,8	15,1
	RA-2	8,22	4,99	3,23	18,6	15,5	10,2
	RA-3	5,43	3,66	1,77	33,9	28,2	18,6
Mineraliniai milteliai (< 0,063 mm) MM	RA-1	17,1	10,8	6,3	79,4	47,6	31,4
	RA-2	17,5	7,8	9,7	51,5	30,9	20,4
	RA-3	14,2	8,4	5,8	86,2	51,7	34,1
Smėlis (0,063–2 mm) SM	RA-1	45,1	30,1	15,0	53,3	53,3	35,2
	RA-2	44,9	25,0	19,9	40,2	40,2	26,5
	RA-3	52,1	19,1	33,0	24,2	24,2	16,0
Skalda (< 2 mm) SK	RA-1	56,5	41,7	14,8	60,8	54,0	35,7
	RA-2	63,6	40,6	23,0	39,1	34,8	23,0
	RA-3	70,9	33,7	37,2	24,2	21,5	14,2

Kiekvienos RA savybės atskirų imčių apskaičiuotoji K_f vertė skiriasi. Mažiausią ištirto RA kiekį į regeneruojamą KMA galima pridėti pagal bitumo kiekį (imtis RA-2), didesnę – pagal smėlio kiekį (imtis RA-3) ir didžiausią – pagal mineralinių miltelių kiekį (RA-2). Norint padidinti didžiausią į KMA leidžiamą pridėti RA kiekį, būtina jį homogenizuoti.

4.2. Regeneruojamos asfalto dangos mineralinių medžiagų variacijos įtakos regeneruoto KMA mišinio homogeniškumui stochastinis modeliavimas

4.2.1. Regeneruoto asfalto komponentinės sudėties variacijai įtakos turintys veiksniai

Asfaltbetonio komponentų kiekis nulemia jo struktūrą ir fizinius bei mechaninius rodiklius (Ceylan *et al.* 2009; Radziszewski 2007; Witzak, Fonseca 1996; Abdullah *et al.* 1998; Shu, Hyang 2008; Seo *et al.* 2007; Kim *et al.* 2006; Recasens *et al.* 2005). Jį sudarančių mineralinių komponentų (skaldos, smėlio, mineralinių miltelių) ir bitumo optimalus kiekis nustatomas taikant skirtingais principais paremtus deterministinius metodus (Mix Design Methods... 1993; Roberts *et al.* 2002; Abdel-Jawad, Adbullah 2002; Buchanan, White 2005).

Tyrimais (Brown *et al.* 1989; Petkevičius, Sivilevičius 2008; Stroup-Gardiner, Brown 2000) įrodyta, kad (KMA) mišinio komponentų kiekis visada turi tam tikrą variaciją, kuri priklauso nuo daugelio veiksnių. Varijuoja ne tik KMA mišiniui gaminti naudojamų mineralinių medžiagų granulimetrinė sudėtis (Sivilevičius, Vislavičius 2008), bet ir jų dozių masė (Sivilevičius *et al.* 2003; Sivilevičius 2005). Kuo platesniame ruože varijuoja KMA mišiniui gaminti panaudotų mineralinių medžiagų granulimetrinė sudėtis, tuo mažesnio vienalytiškumo jis būna (Sivilevičius, Vislavičius 2008).

KMA mišinys gaminamas ne vien tik iš naujų mineralinių medžiagų, bet ir kelio asfalto dangos iš frezuotų arba ją laužant gautų, o paskui susmulkintų trupinių, t.y. iš regeneruojamos asfalto dangos (*reclaimed asphalt*, RA) medžiagų. RA granulės taip pat būna nevienalytės (Mučinis *et al.* 2009; Karlsson, Isacsson 2006). Susmulkinto RA vienalytiškumas priklauso nuo naujos dangos eksploatavimo pradžioje asfalte esančių komponentų kiekio variacijos, dangą eksploatuojant pažeidimams taisyti naudotų papildomų medžiagų kiekio bei pasiskirstymo tolygumo, taip pat nuo RA krovimo, transportavimo, homogenizavimo ir sandėliavimo technologijų. Ypač didelę įtaką RA granulių vienalytiškumui turi kelio dangos pažeidų skaičius, priklausantis nuo kelio dangos eksploatavimo sąlygų (2.1 poskyris). Atskiruose automobilių kelio ruožuose skiriasi vidutinis paros

eismo intensyvumas ir ekvivalentinių standartinių ašių apkrovų skaičius, dėl kurių kitimo būna nevienodas asfalto dangos suirimo mastas, reikalaujantis skirtingos rūšies ir skaičiaus pažaidų taisymo medžiagų, didinančių RA nevienalytiškumą (Sivilevičius, Šukevičius 2007; Sriramula *et al.* 2007).

Lietuvoje, kaip ir kitose šalyse, kiekvienais paskutinio dešimtmečio metais didėjo ne tik KMA mišinio gamybos kiekiai (Sivilevičius, Šukevičius 2009), bet ir jam gaminti panaudotų RA granulių procentinis kiekis (European Asphalt Pavement Association – Asphalt in figures 2006; Huang *et al.* 2006). Galimybė RA naudoti regeneruotame karštai maišyto asfalto (RKMA) mišinyje atsirado tik išsigijus naujausius asfalto maišytuvus, galinčius priimti, dozuoti ir transportuoti RA granules, taip pat džiovinti ir kaitinti pritaikytais įrenginiais arba tokius RA įrenginius papildomai sumontavus ten, kur jų nebuvo.

Automobilių kelių dangai tiesti naudojamo asfaltbetonio maišytuve ar kelyje pagaminto RKMA mišinio struktūra ir savybės priklauso nuo RA mišinio, naujų mineralinių medžiagų, naujo bitumo ar kitos atnaujinamosios medžiagos fizinių, mechaninių savybių ir cheminės sudėties. RKMA mišinio struktūra ir savybės gerėja tinkamai parinkus visų medžiagų procentinę masę ir regeneravimo technologiją (Widyatmoko 2008; Aravind, Das 2007; Hassan 2005; Shen *et al.* 2007; Park 2007; Atkins *et al.* 2008). Kuo mažesnis RA vienalytiškumas, tuo mažiau jo leidžiama dėti į RKMA mišinį. RA mažiausio kiekio, leidžiamo dėti į RKMA, nustatymo metodikos skiriasi (*Mix Design Methods...* 1993; Kandhal, Mallic 1997; Mučinis *et al.* 2009).

Pagaminto vien tik iš naujų medžiagų (be RA) KMA mišinio vienalytiškumas priklauso nuo asfaltbetonio maišytuvo konstrukcijos, techninės jo būklės, pritaiktos mišinio gamybos technologijos schemos, RA gamybos technologinio proceso operacijų parametrų, panaudotų pradinių mineralinių medžiagų savybių vienodumo ir operatoriaus, valdančio gamybos procesą, veiksmų (Petkevičius, Sivilevičius 2008; Sivilevičius 2011a).

RKMA vienalytiškumą, be jo gamybos technologijos schemos ir supiltų į maišyklę medžiagų sumaišymo kokybės papildomai veikia RA, baigiamojo dozavimo karštųjų mineralinių medžiagų, mineralinio dulquio, mineralinių miltelių granulimetrinės sudėties, RA esančio seno bitumo kiekio variacija bei jų ir naujo bitumo dozavimo paklaidos. Pastarieji du veiksniai (granulimetrinės sudėties variacija ir dozavimo atsitiktinės paklaidos) yra stochastinio pobūdžio (Sivilevičius 2005; Mučinis *et al.* 2009; Sivilevičius, Vislavičius 2008).

Darbe išanalizuota RA ir mineralinių medžiagų granulimetrinės sudėties variacijos įtaka RKMA vienalytiškumui (naujo bitumo dozavimo paklaidų ir visų medžiagų sumaišymo kokybės įtaka netirta). Sukurtas RKMA granulimetrinės sudėties variacijos prognozavimo algoritmas, t. y. algoritmas, leidžiantis įvertinti RA pilnutinių išbirų per kontrolinius sietus variacijos įtaką RKMA partijos (vienetinės, sudėtinės) vienalytiškumui. Pateiktas RA vienalytiškumo ir

procentinis kiekio įtakos RKMA granulimetrinės sudėties stabilumui modelavimo skaitinis pavyzdys, atlikta rezultatų analizė.

4.2.2. Regeneruojamo karštai maišyto asfalto mišinio sudėties projektas

RKMA kaip ir vien iš naujų medžiagų gaminamo KMA sudėties projektas sudaromas atsižvelgiant į jo grupę (rūšį), tipą, paskirtį ir apkrovas. Jame imami gamybai (regeneravimui) numatytų naudoti medžiagų granulimetrinės sudėties aritmetiniai vidurkiai ir įvertinama gamybos asfaltbetonio maišytuve technologija. Siekiamas RKMA savybės, kartu ir jo vienalytiškumą, užtikrina tinkamai parengtas jo mineralinės dalies granulimetrinės sudėties projektas, kuriame nustatomas pradinių šaltųjų mineralinių medžiagų ir RA masės santykis, dažniausia užtikrinantis didžiausią RKMA mineralinės dalies tankį. KMA optimalios sudėties projektavimo principai ir metodai, kai naudojami medžiagų savybių rodiklių aritmetiniai vidurkiai (sprendžiamas deterministinis uždavinys), pateikti mokslo darbuose (Mix Design Methods... 1993; Widyatmoko 2008; Doh *et al.* 2008; Aravin, Das 2007; Hassan 2005; Shen *et al.* 2007; Sivilevičius *et al.* 2011). Kai kurie tyrėjai KMA optimalios sudėties nustatymo uždavinį rekomenduoja spręsti taikant matematinio programavimo metodus (Sivilevičius, Vislavičius 2008; Sivilevičius *et al.* 2009). Taikant matematinį programavimą esmine KMA optimalios granulimetrinės sudėties skaičiavimo problema tampa ne skaičiavimo apimtis, o optimalumo kriterijus.

4.2.3. Medžiagų granulimetrinės sudėties variacija

RKMA gaminti naudojamų mineralinių medžiagų ir RA granulimetrinė sudėtis varijuoja tam tikrame intervale, priklausančiame nuo jų laikymo, transportavimo ir krovimo technologijos. RA homogeniškumas labiausiai priklauso nuo eksploatuotos kelio dangos pažeidoms taisyti ir paviršiaus apdarui rengti naudotų medžiagų kiekio, įterpimo, lopymo paskleidimo joje tolygumo ir kiekių, taip pat nuo senos dangos asfaltbetonio pradinio vienalytiškumo (Mučinis *et al.* 2009). Iš pradinių mineralinių medžiagų ir RA suprojektuotas RKMA gaminamas maišiniais, kurių sudėtis (granulimetrinė ir bitumo kiekis) privalo nenukrypti nuo projektinių skaldos, smėlio, mineralinių miltelių ir bitumo kiekių, t. y. nuo darbinės mišinio formulės (DMF), daugiau nei leidžia statistinės tolerancijos Δx_{il} . Statistinės tolerancijose vienoje šalyje (ASTM D 3515-01) nepriklauso nuo ėminių skaičiaus, kitose, pavyzdžiui Vokietijoje (ZTV Asphalt-Stb01) ir Lietuvoje (IT ASFALTAS 08; R 35-01), yra diferencijuotos pagal imties didumą: didėjant imčiai jos mažėja.

Gaminant RKMA periodinio veikimo asfaltbetonio maišytuve, jo maišiniai sudaromi ne iš pradinių šaltųjų mineralinių medžiagų, iš kurių jis buvo suprojek-

tuotas, bet iš maišytuve papildomai išsijotų baigiamojo dozavimo perkaitintų karštųjų frakcijų ir mineralinio dulquio. Šių baigiamojo dozavimo mineralinių medžiagų vidutinė granulimetrinė sudėtis ir jos variacija (sklaidos parametrai) dažniausia nebūna žinomi, jei išanksto nenustatomi eksperimentiniais tyrimais. RA granulimetrinė sudėtis, seno bitumo kiekis ir savybės taip pat nustatomi eksperimentais ir apskaičiuojama šių rodiklių sklaida, rodanti jų vienalytiškumą (TRA ASFALTAS 08; LS TEN 13108-8; Mučinis *et al.* 2009).

RKMA gaminti suvartotų karštųjų frakcijų pilnutinės išbiros per kontrolinius sietus varijuoja dėl šių trijų svarbiausių priežasčių (Sivilevičius 2005; Sivilevičius, Vislavičius 2008):

- ant asfaltbetonio maišytuvo sijotuvo nepertraukiamai byrančio karštojo mineralinio mišinio srauto (debito) kaitos, bėgant gamybos laikui;
- ant asfaltbetonio maišytuvo sijotuvo byrančio karštojo mineralinio mišinio granulimetrinės sudėties variacijos;
- į bunkerio, esančio po sijotuvu, sekcijas į byrančių karštųjų frakcijų segregacijos (sluoksniavimosi) ir jų segregacijos išbyrant į svorinio dozatoriaus bunkerį.

Visi šie technologiniai stochastinio pobūdžio veiksniai lemia tai, kad iš karštųjų mineralinių medžiagų bunkerio kiekvienos sekcijos į dozatoriaus bunkerį byra varijuojančios granulimetrinės sudėties atitinkamos karštosios frakcijos trūkusi srautas. Net ir labai tiksliai su dozavus skirtingos granulimetrinės sudėties tos pačios karštosios frakcijos ir RA porcijas (dozes), RKMA atskirų maišinių pilnutinės išbiros per kontrolinius sietus skiriasi, t.y. jis nebūna vienalytis. Jos pasiskirsto pagal normalųjį skirstinį.

4.2.4. Normaliojo skirstinio verčių stochastinio modeliavimo algoritmas

Tyrimai (Sivilevičius, Vislavičius 2008) parodė, kad KMA sudarančių mineralinių medžiagų pilnutinių išbirų per kontrolinius sietus masės procentai dažniausia pasiskirsto pagal normalųjį skirstinį. Nuo šio skirstinio kai kuriais atvejais nukrypsta tik pilnutinė išbira per didžiausias akutes turint kontrolinį sieta, kurį sudaro beveik 100 %. Paprastai mineralinių medžiagų pilnutinių išbirų per kontrolinius sietus vidurkiai ir standartiniai nuokrypiai nustatomi eksperimentiniais tyrimais. Žinant vidurkius ir standartinius nuokrypius nesunku apskaičiuoti pilnutinių išbirų normaliojo skirstinio tikimybių tankius. Tačiau modeliuojant KMA mineralinės dalies vienalytiškumą, reikia žinoti ne normaliojo skirstinio tikimybių tankius, o tiriamojo dydžio vertes. Tiriamojo dydžio vertėms nustatyti sukurtas algoritmas, pateiktas straipsnių autorių (Sivilevičius, Vislavičius 2008; Vislavičius, Sivilevičius 2010) darbuose.

4.2.5. Naudoto asfalto granulių homogeniškumo ir procentinio kiekio įtakos regeneruoto karštai maišyto asfalto mišinio granulimetrinės sudėties stabilumui modeliavimo pavyzdys

RKMA vienalytiškumą apibūdina jį sudarančių komponentų (mineralinių miltelių – mažesnių kaip 0,063 mm grūdelių, smėlio – 0,063 mm – 2 mm grūdelių, skaldos – didesnių kaip 2 mm grūdelių, taip pat bitumo) kiekio sklaidos apie populiacijos vidurkį μ statistiniai rodikliai: standartinis nuokrypis σ , dispersija

σ^2 ir procentinis variacijos koeficientas CV . Kai vertinama pagaminta produkcija (regeneruojant gautas KMA mišinys ar regeneruotas dangos sluoksnius), tai vietoje populiacijos vidurkio μ naudojamas aritmetinis imties vidurkis $\bar{x}$, o vietoje populiacijos sklaidos rodiklių σ ir σ^2 – apskaičiuotasis imties standartinis nuokrypis s ir imties dispersija s^2 .

RA homogeniškumo ir procentinio kiekio įtakos RKMA granulimetrinės sudėties stabilumui modeliavimo uždavinius galima formuluoti dvejopai. Pirmuoju atveju pagal tam tikrą dėsninę sąryšį keičiant RA pilnutinių išbirų per kontrolinius sietus ir dozių masės standartinius nuokrypius, gali būti tiriama šių veiksnių įtaka RKMA granulimetrinės sudėties variacijai. Tai įdomus atskiro tyrimo reikalingas uždavinys. Antruoju atveju, žinant RA (ir mineralinių medžiagų) pilnutinių išbirų per kontrolinius sietus ir dozių masės standartinius nuokrypius, gali būti sprendžiamas tiesioginis uždavinys, t. y. nustatomi RKMA maišinių mineralinės dalies pilnutinių išbirų per kontrolinius sietus ir komponentų kiekių sklaidos laukai. Šie duomenys leidžia, priėmus tam tikrą tikimybę, patikrinti, ar RKMA maišiniai atitinka normų reikalavimus. Darbe sprendžiamas antro tipo uždavinys, t. y. varijuoja tik RA granulimetrinė sudėtis, o RA granulių kiekis RKMA laipsniškai kinta ir sudaro 10 %, 20 %, 30 %, 40 % ir 50 %. Kitų mineralinių medžiagų granulimetrinės sudėties variacijos nėra, o jų masės procentas nustatomas optimizuojant RKMA sudėtį viršutinės U ir apatinės techninių tolerancijų (ypatingųjų taškų) L verčių atžvilgiu.

Skaitinis eksperimentas atliktas su asfalto viršutinio sluoksnio asfaltbetonio AC 16 VS markės mišiniu, gaminamu iš mineralinių miltelių, mineralinio dulko, karštųjų mineralinių medžiagų, taip pat į jį dozuotai dedamos RA granulės. Medžiagų įvesties granulimetrinė sudėtis pateikta 4.3 lentelėje. Modeliuoti imtas naujausių standartinių laboratorinių sietų komplektas (TRA ASFALTAS 08), kurio kažkurių sietų kvadratiniai akučių kraštinės ilgis skiriasi nuo iki 2009 m. galiojančiose statybos rekomendacijose R 35-01 nustatytų matmenų.

Pradedant modeliavimą buvo imta, kad RA pilnutinių išbirų per laboratorinius sietus modeliuojamų verčių skaičius yra vienodas ir lygus 61. Žinant RA granulių, esančių asfaltbetonio bazės sandėlyje, pilnutinių išbirų per kontrolinius

sietus imties standartinius nuokrypius s ir aritmetinius vidurkius $\bar{x}$ (4.3 lentelė) bei tai, kad jos pasiskirsto pagal normalųjį dėsnį, sumodeliuota RA pilnutinių išbirų per kiekvieną kontrolinį sietą 61 vertė. Pavyzdžiui, 5,6 kontroliniam sietui buvo gauta tokia išbirų verčių seka: 50,44, 55,81, 57,68, 59,03, 60,11, 61,04, 61,85, 62,57, 63,24, 63,85, 64,42, 64,96, 65,48, 65,97, 66,43, 66,89, 67,32, 67,75, 68,16, 68,56, 68,96, 69,35, 69,73, 70,11, 70,48, 70,85, 71,21, 71,58, 71,94, 72,31, 72,67, 73,03, 73,40, 73,76, 74,13, 74,49, 74,87, 75,24, 75,62, 76,01, 76,40, 76,81, 77,22, 77,64, 78,07, 78,52, 78,98, 79,45, 79,95, 80,48, 81,03, 81,62, 82,25, 82,94, 83,70, 84,55, 85,54, 86,73, 88,26, 90,59, 95,53.

4.3 lentelė. Medžiagų įvesties granulimetrinė sudėtis

Table 4.3. Data used when simulation the influence of RAP of homogeneity

KMA ir naudojamos medžiagos gamybos procese		Pilnutinė išbira per sietus su akutėmis, mm										
		0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	5,6	8	11,2	16	22,4
AC 16 VS	U	9	17	24	30	36	45	66	76	85	100	–
	L	5	7	14	20	26	35	54	62	70	90	–
	$\frac{U+L}{2}$	7	12	19	25	31	40	60	69	77,5	95	–
Mm	$\bar{x}_{Mm}$	82,9	95,0	99,2	100	100	100	100	100	100	100	–
Md	$\bar{x}_{Md}$	85,1	92,6	98,7	100	100	100	100	100	100	100	–
Fr 0/2	$\bar{x}_{0/2}$	2,8	16,3	42,1	54,9	77,6	94,0	100	100	100	100	–
Fr 2/5	$\bar{x}_{2/5}$	1,1	1,2	1,3	1,5	3,3	10,8	91,4	10	100	100	–
Fr 5/8	$\bar{x}_{5/8}$	0,8	0,9	1,1	1,2	1,5	3,5	13,2	92,8	100	100	–
Fr 8/11	$\bar{x}_{8/11}$	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1	1,4	2,2	8,4	89,5	100	–
Fr 11/16	$\bar{x}_{11/16}$	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	1,0	3,6	11,2	95,0	–
RA	$\bar{x}_{RA}$	9,4	14,3	20,6	28,7	38,1	49,8	72,6	84,8	94,8	98,8	99,6
	S_{RA}	1,38	2,21	3,11	4,02	5,31	6,39	8,81	6,88	3,87	1,91	1,04

Iš mineralinių medžiagų ir RA granulių, taikant darbuose (Sivilevičius, Vislavičius 2008; Vislavičius, Sivilevičius 2010) pateiktą metodiką, buvo projektuojamas optimalios granulimetrinės sudėties AC 16 VS markės RKMA, kuriame RA granulės sudaro 10 % masės, po to kai RA granulės sudaro 20 %,

30 %, 40 % ir 50 %. Optimalus kitų mineralinių medžiagų procentinis kiekis RKMA pateiktas 4.4 lentelėje.

4.4 lentelė. Optimali mineralinių medžiagų procentinė dalis RKMA, kai varijuoja RA granulių kiekis mišinyje

Table 4.4. Optimal weight percent of mineral materials contained in recycled HMA when RAP quantity varies

RA granulių (%)	Mineralinių medžiagų procentinė svorio dalis (%)						Bendras svoris (%)
	Mm	Fr 0/2	Fr 2/5	Fr 5/8	Fr 8/11	Fr 11/16	
10,0	7,5	21,2	16,8	20,9	6,0	17,6	100,0
20,0	6,5	17,4	14,4	19,6	5,3	16,8	100,0
30,0	5,6	13,4	12,0	18,4	4,2	16,4	100,0
40,0	5,0	9,4	9,8	16,6	3,2	16,0	100,0
50,0	4,4	4,9	7,2	16,2	2,3	15,0	100,0

Mineralinių medžiagų ir RA granulių procentinės masės santykis parinktas taip, kad iš jų suprojektuoto AC 16 VS markės RKMA mineralinės dalies pilnutinių išbūrų per visus sietus nuokrypių nuo techninių tolerancijų vidurkių $\frac{U + L}{2}$

būtų minimalūs. Optimizuojant medžiagų masės santykį paaiškėjo, kad mineralinio dulquio (Md) nereikia naudoti. Šią gamybos procese susidarantią ir talpykloje (silose) sukauptą medžiagą galima panaudoti žemesnių markių KMA mišinio gamybai.

Su skirtingu RA granulių procentiniu kiekiu ir mineralinių medžiagų granulimetrinės sudėties vidurkiais suprojektuotos RKMA mineralinės dalies optimalios pilnutinių išbūrų per kontrolinius sietus vertės yra artimos (4.5 lentelė).

Nekeičiant visų medžiagų optimalaus procentinio masės santykio ir varijuojant RA pilnutinėms išbiroms per sietus su kiekvienu RA granulių procentiniu kiekiu (nuo 10 % iki 50 %) buvo sumodeliuoti 9999 RKMA maišiniai, t. y. gautos 9999 granulimetrinės sudėties kreivės. Modeliuojant RKMA maišinius mineralinių medžiagų ir RA granulių derinius rinko atsitiktinių skaičių generatorius. Modeliuojant RKMA granulimetrinės sudėties kreives buvo tikrinama sąlyga, kad per didesnių matmenų kontrolinį sietą $i + 1$ išburtų daugiau mineralinių grūdelių (arba lygiai), lyginant su grūdelių, išbyrančių per gretimą mažesnių matmenų kontrolinį sietą i , kiekiu.

4.5 lentelė. Suprojektuoto RKMA su skirtingu RA procentiniu kiekiu granulimetrinė sudėtis

Table 4.5. Values of RKMA grading designed from different weight percent of RAP (job mix formula – JMF)

RA (%)	Pilnutinės išbiros per sietus $p_{i,DMF}$, mm										
	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	5,6	8	11,2	16	22,4
10	8,19	12,50	18,99	22,65	28,80	35,16	54,38	74,51	83,22	99,00	100
20	8,15	12,31	18,41	22,38	28,55	35,25	54,45	74,50	83,49	98,92	100
30	8,19	12,18	17,83	22,09	28,25	35,25	54,43	74,46	83,44	98,92	100
40	8,48	12,34	17,56	22,10	28,24	35,55	54,82	74,37	83,38	98,72	100
50	8,75	12,42	17,08	21,84	27,85	35,39	54,52	74,67	83,84	98,65	100

Modeliuojamo RKMA pilnutinės išbiros per kontrolinius sietus apskaičiuotos pagal formulę (Sivilevičius, Vislavičius 2008):

$$p_{i,\zeta} = \sum_{j=1}^m p_{i,j,\zeta} \cdot q_{j,\zeta} \cdot 0,01, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad \zeta = 1, 2, \dots, r, \quad (4.4)$$

čia $p_{i,\zeta}$ – ζ -ojo maišinio pilnutinės išbiros per i -tąjį kontrolinį sieta, masės procentais; $p_{i,j,\zeta}$ – ζ -ojo maišinio j -osios medžiagos pilnutinės išbiros per i -tąjį kontrolinį sieta, masės procentais; $q_{j,\zeta}$ – ζ -ojo maišinio j -osios medžiagos kiekis, masės procentais; m – medžiagų skaičius; n – sietų skaičius; r – modeliuojamų maišinių skaičius.

Kuo didesnis sumodeliuotų maišinių skaičius r , tuo tiksliau įvertinama RA granulimetrinės sudėties variacijos įtaka RKMA mineralinės dalies sklaidai. Taip buvo gauti RKMA r maišinių granulimetrinės sudėties kreivių sklaidos laukai.

Gavus visų 9999 RKMA maišinių granulimetrinės sudėties kreives (laužtes), skaičiuojant nustatyta vidutinė jo granulimetrinė sudėtis. RKMA maišinių mineralinės dalies vidutinės pilnutinės išbiros per kontrolinius sietus $\bar{p}_i$ apskaičiuotos naudojant formulę:

$$\bar{p}_i = \frac{\sum_{\zeta=1}^r p_{i,\zeta}}{r}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4.5)$$

Gautos $\bar{p}_i$ vertės, kai naudojami skirtingi RA granulijų procentiniai kiekiai, pateiktos 4.6 lentelėje. Jos beveik nesiskiria nuo 4.5 lentelėje pateiktų verčių, gautų optimizuojant procentinę medžiagų masę, kai tam naudojami jų granulimetrinės sudėties vidurkiai.

4.6 lentelė. Sumodeliuotų RKMA 9999 maišinių su kintamais RA granuliu kiekliais granulimetrinės sudėties statistiniai duomenys

Table 4.6. Statistical data of 9999 grading of recycled HMA mixes simulated including RAP with different weight percent

RA (%)	Rodiklis	Pilnutinė išbira per sietą, mm										
		0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	5,6	8	11,2	16	22,4
10	$\bar{p}_i$	8,19	12,49	18,95	20,59	28,72	35,13	54,15	74,36	83,11	100	100
	σ_i	0,13	0,21	0,29	0,37	0,49	0,60	0,75	0,58	0,32	0,15	0
	$p_{\min,i}$	7,79	11,86	18,09	21,47	27,25	33,34	51,91	72,61	82,16	98,53	100
	$p_{\max,i}$	8,58	13,12	19,82	23,71	30,19	36,92	56,39	76,11	84,05	99,40	100
20	$\bar{p}_i$	8,15	12,29	18,33	22,24	28,39	35,19	53,99	74,19	83,25	100	100
	σ_i	0,26	0,42	0,58	0,75	0,98	1,20	1,49	1,16	0,63	0,29	0
	$p_{\min,i}$	7,36	11,03	16,60	20,00	25,46	31,60	49,51	70,70	81,36	97,99	100
	$p_{\max,i}$	8,94	13,56	20,06	24,48	31,33	38,77	58,48	77,69	85,15	99,73	100
30	$\bar{p}_i$	8,18	12,16	17,72	21,89	28,01	35,16	53,74	74,00	83,09	100	100
	σ_i	0,40	0,63	0,87	1,12	1,47	1,79	2,24	1,75	0,95	0,44	0
	$p_{\min,i}$	7,00	10,26	15,13	18,52	23,60	29,78	47,02	68,76	80,25	97,42	100
	$p_{\max,i}$	9,37	14,06	20,32	25,25	32,42	40,54	60,47	79,24	85,93	100	100
40	$\bar{p}_i$	8,46	13,31	17,41	21,83	27,92	35,43	53,90	73,76	82,91	100	100
	σ_i	0,53	0,84	1,15	1,49	1,96	2,39	2,99	2,33	1,26	0,58	0
	$p_{\min,i}$	6,88	9,78	13,95	17,34	22,05	28,26	44,94	66,78	79,13	96,85	100
	$p_{\max,i}$	10,05	14,85	20,87	26,31	33,80	42,60	62,86	80,74	86,70	100	100
50	$\bar{p}_i$	8,74	12,39	16,89	21,50	27,46	35,24	53,37	73,91	83,26	100	100
	σ_i	0,66	1,06	1,44	1,87	2,45	2,99	3,73	2,91	1,58	0,73	0
	$p_{\min,i}$	6,76	9,22	12,56	15,90	20,11	26,27	42,17	65,18	78,53	96,32	100
	$p_{\max,i}$	10,72	15,55	21,22	27,10	34,80	44,20	64,57	83,64	87,99	100	100

Žinant sumodeliuotų RKMA maišinių mineralinės dalies vidutines pilnutinės išbiras per kontrolinius sietus $\bar{p}_i$, nustatyti skaičiuojamieji standartiniai nuokrypiai:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{\zeta=1}^r (p_{i,\zeta} - \bar{p}_i)^2}{r-1}}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4.6)$$

Skaičiuojamųjų standartinių nuokrypių σ_i sumodeliuotos vertės, kai naudojamas skirtingas RA granulių kiekis, pateiktos 4.6 lentelėje.

Pabaigoje nustatytos RKMA mineralinės dalies pilnutinių išbirų per visus kontrolinius sietus sklaidos lauko ribos:

$$p_{\min,i}(p_{\max,i}) = \bar{p}_i \mp 3\sigma_i. \quad (4.7)$$

Gautos ribos (4.6 lentelė) gali būti naudojamos regeneruojamo KMA mišinio mineralinės dalies pilnutinių išbirų per kontrolinius sietus sklaidos laukui vaizduoti ir jį lyginti su statistinėmis tolerancijomis Δx_{il} (IT ASFALTAS 08). Toks laukas rodo, kaip plačiai varijuoja RKMA granulimetrinė sudėtis vien tik dėl RA granulių mineralinių medžiagų nehomogeniškumo, kai kitų mineralinių medžiagų granulimetrinė sudėtis stabili, o jų ir RA granulių atsitiktinių dozavimo paklaidų nėra. Įvertinus ir pastaruosius veiksnius, kurie turi mažesnę ar didesnę įtaką (Sivilevičius *et al.* 2003), laukas prasiplėstų.

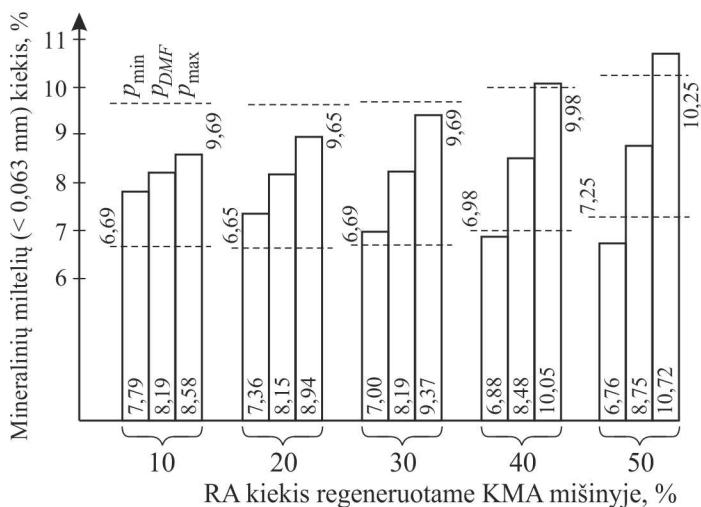
Tarkime, kad iš RKMA mišinio buvo paimta daugiau kaip 20 ėminių. Tuomet pagal IT ASFALTAS 08 leidžiama skaldos kiekio tolerancija nuo projekto yra $\pm 3,0\%$, mineralinių miltelių $\pm 1,5\%$.

Mineralinių miltelių ir skaldos (sumodeliuoto) kiekio RKMA mišinyje leistinųjų nuokrypių ribos (4.1 ir 4.2 pav. horizontalios punktyrinės linijos) skaičiuojamos taip:

$$\bullet \text{ apatinė } x_{i,DMF} - \Delta x_{i,l}, \quad (4.8)$$

$$\bullet \text{ viršutinė } x_{i,DMF} + \Delta x_{i,l}, \quad (4.9)$$

čia $\Delta x_{i,DMF}$ – RKMA mišinyje esančio i -tojo mineralinio komponento suprojektuotas optimalus kiekis (pagal darbinę mišinio formulę – DMF), masės %; $\Delta x_{i,l}$ i -tojo komponento kiekio RKMA mišinyje statistinė tolerancija, t. y. tiriamojo dydžio dalelių kiekio atskirosios vertės ar jų aritmetinio vidurkio leistinasis nuokrypis nuo projektinės vertės (DMF) pagal IT ASFALTAS 08 reikalavimus.



4.1 pav. Pilnutinės išbiros per 0,063 mm sietą (mineralinių miltelių komponento) sklaidos priklausomybė nuo RA procentinio kiekio RKMA mišinyje

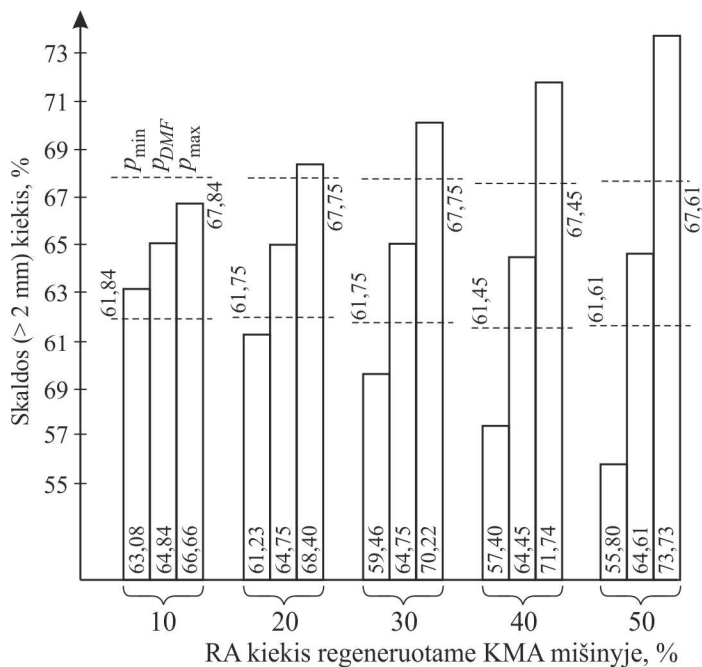
Fig. 4.1. Variation of cumulative percent passing through a 0,063 mm sieve, depending on the quantity of RAP in recycled HMA

RKMA mišinyje sumodeliuoto mineralinių miltelių (<0,063 mm dalelių) komponento kiekio $x_{i,DMF} = x_{MM,DMF} = \bar{p}_{0,063}$. Skaldos (>2 mm dalelių) komponento kiekio $x_{i,DMF} = x_{SK,DMF} = 100 - \bar{p}_2$. Smėlio (0,063–2 mm) komponento kiekio $x_{i,DMF} = x_{SM,DMF} = \bar{p}_2 - \bar{p}_{0,063}$.

Sumodeliuotos ir 4.1 pav. bei 4.2 pav. stulpeliais pavaizduotos komponentų kiekio vertės rodo:

- vidurinių stulpelių – $p_{i,DMF}$: imtos iš 4.5 lentelės, mažesnių kaip 0,063 mm dalelių ir apskaičiuotos iš 100 % atėmus mažesnių kaip 2 mm dalelių kiekius;
- kairiojo (žemesnio) stulpelio – $p_{\min j}$, apskaičiuotos pagal (4.7) formulę ir imtos iš 4.6 lentelės;
- dešiniojo (aukštesnio) stulpelio – $p_{\max j}$, imtos iš 4.6 lentelės.

Skaiciavimai rodo, kad tolerancija pagal skaldos kiekį pažeidžiama tuomet, kai RA granulių kiekis mišinyje pasiekia 20 % (4.2 pav.), o tolerancija pagal mineralinius miltelius pažeidžiama tuomet, kai RA kiekis mišinyje pasiekia 40 % (4.1 pav.).



4.2 pav. Pilnutinės liekanos ant 2 mm sieto (skaldos komponento) sklaidos priklausomybė nuo RA granulių procentinio kiekio RKMA mišinyje

Fig. 4.2. Variation of residues on a 2 mm sieve, depending on the quantity of RAP in recycled HMA

Gauti rezultatai rodo, kad vidutinei pilnutinei išbirai per kontrolinius sietus (jos aritmetiniam vidurkiui) $\bar{p}_i$ artėjant prie 50 % vertės, standartinio nuokrypio σ_i vertė didėja. Tai neprieštarauja bendrai biriųjų mineralinių medžiagų ir mišinių maksimalios variacijos, gaunamos tam sietai, per kuri išbyra apie 50 % masės visų grūdelių, teorijos ir praktikos dėsniams (Evaluation... 1967; Stroup-Gardiner, Brown 2000; Sivilevičius 2005; Brown *et al.* 1989) ir patvirtina, kad pateikta metodika leidžia gauti inžinerijos požiūriu patikimus rezultatus.

4.3. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. RA homogeniškumas pagal atskirų komponentų kiekio variaciją leidžia pridėti skirtingą maksimalų jo kiekį į regeneruojamą KMA mišinį. Mažiausią visų trijų imčių RA leidžiamą pridėti kiekį nulemia jame esančio bitumo kiekio sklaida (pavyzdžiui, į apatinio ir viršutinio sluoksniu mišinį jo galima pridėti 10,2–18,6 %). Skaldos ir smėlio komponentų va-

riacija RA leidžia jo pridėti į šios rūšies KMA mišinį atitinkamai 14,2–35,7 % ir 16,0–35,2 %. Mineralinių miltelių kiekio RA variacija leidžia jo pridėti į KAM mišinį daugiausia – nuo 20,4 % iki 34,1 %.

2. Viena svarbiausių RA savybių – vienalytiškumas, apibūdinamas jo sudėties ir bitumo savybių sklaidos didumu. RA nevienalytiškumą nulėmęs regeneruojamos kelio dangos pradinis nevienalytiškumas ir eksploatacijos laikotarpiu taisymo vietose naudotų papildomų medžiagų netolygus pasiskirstymas dangos plote turi būti įvertintas projektuojant regeneruojamo mišinio sudėtį, t. y. renkant optimalų RA kiekį jame. Padidinti RA vienalytiškumą gamybos įmonėse labai sudėtinga, todėl imamas tikrasis jo vienalytiškumas, nulemiantis didžiausią leidžiamą jo kiekį.
3. RA nevienalytiškumo įtaka RKMA mišinio sudėčiai iki šiol nebuvo tirta. Darbe pateikta RA granuliometrinės sudėties sklaidos ir jų kiekio įtakos RKMA vienalytiškumui stochastinio modeliavimo metodika ir algoritmas leidžia apskaičiuoti RKMA granuliometrinės sudėties sklaidos rodiklių skaitines vertes, kai imamas skirtingas žinomo (eksperimentu nustatyto) vienalytiškumo RA kiekis. Išspręstas su realiomis RA homogeniškumo vertėmis pavyzdys rodo, kad pateikta modeliavimo metodika tinkama naudoti gamyboje ir leidžia nustatyti ribinį didžiausią RA kiekį pagal jo granuliometrinės sudėties sklaidos parametrus (pilnutinių išbirų per kontrolinius sietus standartinius nuokrypius).
4. Iš pateikto skaičiuojamojo eksperimento stochastinio modeliavimo duomenų matyti, kad didinant RA procentinę masę, plėtėja RKMA granuliometrinės sudėties sklaidos laukas. Kai pilnutinės išbiros per atitinkamą kontrolinį sieta sklaidos lauko ribos priartėja prie gaminamos markės KMA nustatyto maksimalaus leidžiamo pločio, RA kiekio didinti negalima. Pavyzdžiui gaminant regeneruotą AC 16 VS markės asfalto mišinį pagal mineralinių miltelių komponento jame sklaidą galima dozuoti iki 30 % RA granulių, o pagal skaldos komponento kiekio jame, galima dozuoti iki 10 % RA granulių.

Bendrosios išvados

1. Asfaltas kaip ir dauguma statybinių medžiagų, iki šiol buvo vienaciclio naudojimo eksploatacijos laikotarpyje suirusio kelio ar kito transporto infrastruktūros tiesinio dangos medžiaga. Ji gali būti atnaujinta taikant darbe susistemintus mokslinius principus, pateiktus komponentų sąveikos modelius bei eksperimentais gautus tyrimų duomenis. Atlikus tyrimus buvo nustatyta, kad RA granulių struktūra ir savybės turi lemiamą įtaką regeneruoto KMA mišinio fiziniams ir mechaniniams rodikliams. Jos nenuspėjamos, nes būna nulemtos daugelio stochastinių pobūdį turinčių pradinių (naujos dangos savybių), kelio eksploatacijos laikotarpio ir regeneravimo technologinio proceso veiksnių. Dėl senėjimo procesų būna iš esmės pakitusios RA bitumo savybės, o ne jų granulimetrinė sudėtis.

2. Regeneravimo procese atkuriant RA seno bitumo pakitusią sudėtį, struktūrą bei savybes naudojamos atstatančiosios medžiagos, iš kurių ir mažesnės klampos naujas bitumas. Seno ir naujo bitumų mechaninio ir difuzinio maišymosi dvisluoksnėse skirtingo dydžio mineralinius grūdelius dengiančiose plėvelėse procesai tarp grūdelių oro tuštymių ir grūdelių kontakto vietose skiriasi. Nustatyta, kad maišymosi proceso laikas bei atnaujinimo veiksmingumas priklauso nuo temperatūros, slėgio, bitumo savybių (difuzijos koeficiento, plėvelių storio, procentinio santykio) ir aprašomas Fiko dėsnium.

3. Nustatytas Lietuvos kelių statybos ir eksploataavimo įmonėse išgaunamo ir regeneruojamo naudoto asfalto kiekis (apie 112 tūkst. t per metus) leidžia teigti, kad regeneruoto asfalto panaudojimo technologija yra populiari ne tik išvystytos ekonomikos šalyse, jos mastas didėja ir Lietuvoje. Ji reikalauja mokslinio pagrindimo, leidžiančio efektyviai naudoti RA granules regeneruotame KMA mišinyje. Eksperimentiniai RA granulių savybių kompleksiniai tyrimai parodė, kad jos yra nevienalytės komponentine sudėtimi ir seno bitumo savybėmis. Pilnutinių išbirų per sietus aritmetinio vidurkio bei standartinio nuokrypio sąsajos matematiniai modeliai (regresijos lygtys), leidžiantys pagal Bartleto kriterijų lyginti skirtingos granulimetrinės sudėties bei imties didumo RA granules, yra universalūs.

4. Į naudoto asfalto granules skirtingu procentiniu kiekiu ir skirtingos rūšies pridedamo naujo bitumo (atstatymo medžiagos) veiksmingumas regeneruoto KMA mišinio fiziniams bei mechaniniams Maršalo rodikliams skiriasi ir ne visada būna toks, kokio tikimasi dėl nesibaigusios suminio bitumo difuzijos ir ne viso bitumo kiekio atskyrimo eksperimentuojant ir regeneruojant sūkiuoju garintuvu praktinių galimybių. Taikant Maršalo metodą regeneruoto KMA mišinio optimaliai sudėčiai nustatyti, ne visada užtikrinamas jo atsparumas vėžėms. Įvažinėjimo ratu nustatytas RA granulių kiekis yra galutinis ir rodo, kad didėjant RA granulių masei didėja KMA mišinio atsparumas vėžėms, tačiau atsparumas plyšiams ir korozijai (šalčio poveikiui) nėra ištyrinėtas.

5. Didėjant kiekvienais metais išfrezuoto RA kiekiui, jo sunaudojimas turi būti adekvatus ir todėl reikia didinti RA granulių procentą regeneruotame KMA mišinyje arba neefektyviai jas naudoti kelio dangos konstrukcijos pagrindo sluoksniuose ar vietinės reikšmės kelių dangai stiprinti. Aukščiausios kokybės iš automagistralių frezuotas RA granules racionalu naudoti viršutinio ir apatinio dangos sluoksnių KMA mišiniui gaminti. Pagal LST EN standartus RA granulių didžiausias leistinas vidutinis kiekis negali viršyti 10–20 %, tačiau jis turi būti patikslintas kiekvienam komponentui atsižvelgiant į granulių vienalytiškumą ir KMA mišinio paskirtį bei rūšį. Siekiant ne tik reikiamos regeneruoto KMA mišinio komponentinės sudėties, bet ir jos mažos sklaidos, racionalu taikyti stochastinio modeliavimo principais pagrįstą optimalios sudėties projektavimo metodą.

Literatūrai šaltiniai

- Abdel-Jawad, Y. A.; Abdullah, W. S. 2002. Design of maximum density aggregate grading, *Construction and Building Materials* 16(8): 495–508.
- Abdullah, W. S.; Obaidat, M. T.; Abu-Sa'da, N. M. 1998. Influence of aggregate type and gradation on voids of asphalt concrete pavement, *Journal of Materials in Civil Engineering* 10(2): 76–85.
- Al-Hadidy, A. I.; Yi-qiu, T. 2009. Mechanistic approach for polypropylene-modified flexible pavements, *Materials and Design* 30(4): 1133–1140. doi:10.1016/j.matdes.2008.06.021
- Alkins, A. E.; Lane, B.; Kazmierowski, T. 2008. Sustainable pavements. Environmental, economic, and social benefits of In Situ pavements recycling, *Transportation Research Record* 2084: 100–103. doi:10.3141/2084-11
- Al-Qadi, I. L.; Carpenter, S. H.; Roberts, G.; Ozer, H.; Aurangzeb, Q.; Elseify, M.; Trepanier, J. 2009. *Determination of Usable Residual Asphalt Binder in RAP*. Research Report ICT-09-031, Illinois Center for Transportation.
- Al-Qadi, I. L.; Fini, E. H.; Masson, J.-F.; McGhee, K. M. 2008. Effect of bituminous material rheology on adhesion, *Transportation Research Record* 2044: 96–104. doi:10.3141/2044-11
- Apeagyei, A. K. 2011. Laboratory evaluation of antioxidants for asphalt binders, *Construction and Building Materials* 25(1): 47–53. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.058
- Aravind, K.; Das, A. 2007a. Pavement design with central plant hot-mix recycled asphalt mixes, *Construction and Building Materials* 21(5): 928–936. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.05.004
- Aravind, K.; Das, A. 2007b. Preliminary constituent proportioning for central plant hotmix asphalt recycling, *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(9): 740–745. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:9(740)

- Aravind, K.; Das, A. 2007. Pavement design with central plant hot-mix recycled asphalt mixes, *Construction and Building Materials* 21(5): 928–936. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.05.004
- Arhenius, S. 1887. Uher die Junerc Reinbung Verdünnter Wesseriger Lösungen (in German), *Zeitschrift für Physikalisches Chemie* 1: 285–298.
- Asfaltbetonio regeneravimo technologijos ir įrenginiai. Instrukcija*. 1998. [Recycling asphalt concrete technologies and equipments. Guidelines], States Enterprise “Problematika”. Vilnius. 42 p.
- Asphalt Hot-Mix Recycling*. 1986. Manual Series No 20 (MS-20) Second Edition. Maryland: The Asphalt Institute. 46 p.
- Asphalt in Figures 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009*. European Asphalt Pavement Association (EAPA).
- Attia, M.; Abdelrahman, M. 2010. Sensitivity of untreated reclaimed asphalt pavement to moisture, density and freeze thaw, *Journal of Materials in Civil Engineering* 22(12): 1260–1269. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000135
- Baroux, R. 1980. Recyclage des enrobes bitumineux en central d’enrobage. Les problèmes de materiel, *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées* 105: 98–102.
- Behnia, B.; Ahmed, S.; Dave, E. V.; Buttlar, W. G. 2010. Fracture characterization of asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavement, *International Journal of Pavement Research and Technology* 3(2): 72–78.
- Bennert, T.; Dongré, R. 2010. Backcalculation method to determine effective asphalt binder properties of recycled asphalt pavement mixtures, *Transportation Research Record* 2179: 75–84. doi:10.3141/2179-09
- Bhasin, A.; Little, D. N. 2009. Application of micro calorimeter to characterize adhesion between asphalt binders and aggregates, *Journal of Materials in Civil Engineering* 21(6): 235–243. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:6(235)
- Bonaquist, R.; Christensen, D. W. 2005. Practical procedure for developing dynamic modulus master curves for pavement structural design, *Transportation Research Record* 1929: 208–217. doi:10.3141/1929-25
- Bražiūnas, J.; Sivilėvičius, H. 2010. The bitumen batching system’s modernization and its effective analysis at the asphalt mixing plant, *Transport* 25(3): 325–335. doi:10.3846/transport.2010.40
- Brown, E. R.; Collins, R.; Brownfield, J. R. 1989. Investigation of segregation of asphalt mixtures in the state of Georgia, *Transportation Research Record* 1217: 1–8.
- Buchanan, M. S.; White, T. D. 2005. Hot mix asphalt mix design evaluation using the Coreloc vacuum-sealing device, *Journal of Materials in Civil Engineering* 17(2): 137–142. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:2(137)
- Butkevičius, S.; Petkevičius, K.; Kamaitis, I. Z. 2007. Evaluation of flexible road pavement construction state using objective strength criteria, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 2(2): 61–66.
- Carpenter, S. H.; Wolosick, J. R. 1980. Modifier influence in the characterization of hot-mix recycled material, *Transportation Research Record* 777: 15–22.
- Carter, A.; Stroup-Gardiner, M. 2007. Indirect tension relaxation test to evaluate the effect of the addition of RAP to HMA mixes, *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(3): 219–226. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:3(219)
- Ceylan, H.; Schwartz, C. W.; Kim, S.; Gapalakrishnan, K. 2009. Accuracy of Predictive Models for Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt, *Journal of Materials in Civil Engineering* 21(6): 286–293. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:6(286)

- Chatti, K.; ElMohtar, C. S. 2004. Effect of different axle configurations on fatigue life of asphalt concrete mixtures, *Transportation Research Record* 1819: 121–130.
- Cheng, D.; Little, D. N.; Lytton, R. L.; Holste, J. C. 2002. Surface energy measurement of asphalt and its application to predicting fatigue and healing in asphalt mixtures, *Transportation Research Record* 1810: 44–53. doi:10.3141/1810-06
- Cohen, E.; Sidess, A.; Zoltan, G. 1989. Performance of a full-scale pavement using cold recycled asphalt mixture, *Transportation Research Record* 1228: 88–93.
- Collop, A. C.; McDowell, G. R.; Lee, Y. W. 2006. Modelling dilation in an idealised asphalt mixture using discrete element modelling, *Granular Matter* 8: 174–184. doi:10.1007/s10035-006-0013-3
- Cranc, J. 1979. The Mathematics of Diffusion. *Oxford University Press*. 414 p.
- Daniel, J. S.; Kim, Y. R. 2001. Laboratory evaluation of fatigue damage and heading of asphalt mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering* 13(6): 434–440.
- Daniel, J. S.; Lachance, A. 2005. Mechanistic and volumetric properties of asphalt mixtures with recycled asphalts pavement, *Transportation Research Record* 1929: 28–36. doi:10.3141/1929-04
- Doh, Y. S.; Amirkhanian, S. N.; Kim, K. W. 2008. Analysis of unbalanced binder oxidation level in recycled asphalt mixture using GPC, *Construction and Building Materials* 22(6): 1253–1260. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.01.026
- Evaluation of construction control procedures*. 1967. Interin report. National Cooperative Highway Research Program. Report 34. Highway Research Board. 117 p.
- Firoozifar, S. H.; Foroutan, S. 2011. The effect of asphaltene on Thermal Properties of bitumen, *Chemical Engineering Research and Design* (article in press). doi:10.1016/j.cherd.2011.01.25
- Gopalakrishnan, K.; Kim, S.; Ceylan, H. 2010. Non-destructive evaluation of in-place rehabilitated concrete pavements, *Journal of Civil Engineering and Management* 16(4): 552–560. doi:10.3846/jcem.2010.61
- Haryanto, I.; Takahashi, O. 2007. Use of secant shear modulus for rutting potential assessment of Indonesian wearing course mixtures, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 2(3): 95–100.
- Hassan, H. F. 2005. Recycling of municipal solid waste incinerator ash in hot mix asphalt concrete, *Construction and Building Materials* 19(2): 91–98. doi:10.1016/j.conbuildmat.2004.05.010
- Hossain, Z.; Tia, M.; Bergin, M. J. 2010a. Concrete containing RAP for use in concrete pavement, *International Journal of Pavement Research and Technology* 3(5): 251–258.
- Hossain, Z.; Zaman, M.; Hobson, K. R. 2010b. Effects of liquid anti-stripping additives on rheological properties of performance grade binders, *International Journal of Pavement Research and Technology* 3(4): 160–170.
- Huang, B.; Li, G.; Vukosaljevic, D.; Shu, X.; Egan, B. K. 2005. Laboratory investigation of mixing hot-mix asphalt with reclaimed asphalt pavement, *Transportation Research Record* 1929: 37–45. doi:10.3141/1929-05
- Huang, B.; Shu, X.; Burdette, E. G. 2006. Mechanical properties of concrete containing recycled asphalt pavements, *Magazine of Concrete Research* 58(5): 313–320. doi:10.1680/mac.2006.58.5.313
- ĮT ASFALTAS 08. *Automobilių kelių dangos konstrukcijos asfalto sluoksnių įrengimo taisyklės*. Vilnius: LAKD. 2008. 62 p.

Jung, S. H. 2006. *The Effects of Asphalt Binder Oxidation on Hot Mix Asphalt Concrete Mixture Rheology and Fatigue Performance*. Ph. D. dissertation. Texas A&M University, College Station, Tex.

Kandhal, P. S.; Mallic, R. B. 1997. *Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments*. Publication No FHWA-SA-98-042. Federal Highway Administration. Washington, D. C.

Karalevičius, I.; Sivilevičius, H. 2005. The dynamics of changes in asphalt concrete mixture composition in storage, transportation and laying, in *Proc of the 6th International Conference "Environmental Engineering": selected papers*, vol. 2. Ed. by Čygas, D.; Froehner, K. D. May 26–27, 2005. Vilnius, Lithuania. Vilnius: technika, 719–725.

Karlsson, R. 2002. *Investigations of Binder Rejuvenation Relate to Asphalt Recycling*. Doctoral thesis. Royal Institute of Technology. Stockholm. Sweden.

Karlsson, R.; Isacson, U. 2003a. Application of FTIR–ATR to characterization of bitumen rejuvenator diffusion, *Journal of Materials in Civil Engineering* 15(2): 157–165. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:2(157)

Karlsson, R.; Isacson, U. 2003b. Investigations on bitumen rejuvenator diffusion and structural stability, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 72: 463–501.

Karlsson, R.; Isacson, U. 2006. Material – related aspects of asphalt recycling – State-of-the-art, *Journal of Materials in Civil Engineering* 18(1): 81–92. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:1(81)

Kim, H.; Lee, S.-J.; Amirkhanian, S. N. 2011. Rheology of warm mix asphalt binders with aged binders, *Construction and Building Materials* 25(1): 182–189. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.040

Kim, K. W.; Kim, K.; Doh, Y. S.; Amirkhanian, S. N. 2006. Estimation of RAP's binder viscosity using GPS without binder recovery, *Journal of Materials in Civil Engineering* 18(4): 561–567. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:4(561)

Laurinavičius, A.; Oginskas, R. 2006. Experimental research on the development of rutting in asphalt concrete pavements reinforced with geosynthetic materials, *Journal of Civil Engineering and Management* 12(4): 311–317.

Lee, S.-J.; Amirkhanian, S. N.; Kim, K. W. 2009. Laboratory evaluation of the effects of short-term oven aging on asphalt binders in asphalt mixtures using HP-GPS, *Construction and Building Materials* 23(9): 3087–3093. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.03.012

Lee, T.-C.; Terrel, R. L.; Mehoney, J. P. 1983. Test for efficiency of mixing of recycled asphalt paving mixtures, *Transportation Research Record* 911: 51–60.

Li, X.; Williams, R. C.; Marasteanu, M. O.; Clyne, T. R.; Johnson, E. 2009. Investigation of in-place asphalt film thickness and performance of Hot-Mix asphalt mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering* 21(6):262–270. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:6(262)

Liu, Q.; Schlangen, E.; Garcia, A.; van de Ven, M. 2010. Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete, *Construction and Building Materials* 24(7): 1207–1213. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.12.019

Masad, E.; Huang, C.-W.; Airey, G.; Muliana, A. 2008. Nonlinear viscoelastic analysis of unaged and aged asphalt binders, *Construction and Building Materials* 22(11): 2170–2179. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.08.012

McDaniel, R.; Anderson, R. M. 2001. *Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method*: Technician's Manual, NCHRP Report 452. National Academy Press, Washington, D. C. 49 p.

Mills-Beale, J.; You, Z. 2010. The mechanical properties of asphalt mixtures with recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials* 24(2): 230–235. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.08.046

Mix Design Methods for Asphalt Concrete and other Hot-Mix Types. 1993. Manual Series No 2 (MS-2). Sixth edition. Asphalt Institute. Lexington: 141 p.

Mo, L. T. 2010. *Damage Development of the Adhesive Zone and moRtar Of Porous Asphalt Concrete*. PhD thesis. Delft University of Technology.

Mo, L. T.; Huurman, M.; Woldekidan, M. F.; Wu, S. P.; Molenaar, A. A. A. 2010. Investigation into material optimization and development for improved ravelling resistant porous asphalt concrete, *Materials and Design* 31(7): 3194–3206. doi:10.1016/j.matdes.2010.02.006

Molenaar, A. A. A.; Hagos, E. T., van de Ven, M. F. C. 2010. Effect of aging on the mechanical characteristics of bituminous binders in PAC, *Journal of Materials in Civil Engineering* 22(8): 779–787. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000021

Mundt, D. J.; Marano, K. M.; Nunes, A. P.; Adams, R. C. 2009. A review of changes in composition of hot mix asphalt in the United States, *Journal of Occupation and Environmental Hygiene* 6(11): 714–725. doi:10.1080/15459620903249125

Noureldin, A. S.; Wood, L. E. 1987. Rejuvenator diffusion in binder film for hot-mix recycled asphalt pavement, *Transportation Research Record* 1115: 51–61.

Noureldin, A. S.; Wood, L. E. 1989. Variations in molecular size distribution of virgin and recycled asphalt binders associated with aging, *Transportation Research record* 1228: 191–197.

Noureldin, A. S.; Wood, L. E. 1990. Laboratory evaluation of recycled asphalt pavement using non-destructive tests, *Transportation Research Record* 1269: 92–100.

Park, T. 2007. Causes of bleeding in a hot-in-place asphalt pavement, *Construction and Building Materials* 21(12): 2033–2030. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.06.008

Pereira, P. A. A.; Oliveira, J. R. M.; Picado-Santos, L. G. 2004. Mechanical characterization of hot mix recycled materials, *The International Journal of Pavement Engineering* 5(4): 211–220. doi:10.1080/10298430412331333668

Petkevičius, K.; Sivilevičius, H. 2008. Necessary measures for ensuring the quality of hot mix asphalt in Lithuania, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 3(1): 29–47.

Petkevičius, K.; Žilionienė, D.; Vorobjovas, V. 2010. Funkcional conditions and state of hot mix asphalt pavement and its structure of Lithuanian motor roads, *The Baltic Journal of Roads and Bridge Engineering* 5(1): 43–49. doi:10.3846/bjrbe.2010.06

R NAG 09. Automobilių kelių naudoto asfalto granuliu panaudojimo rekomendacijos. Vilnius: LAKD. 2009. 21 p.

Radziszewski, P. 2007. Modified Asphalt Mixtures Resistance to Permanent Deformations, *Journal or Civil Engineering and Management* 8(4): 307–315.

Read, J. M.; Whiteoak, D. 2003. *The Shell Bitumen Handbook*. London: Thomas Telford Services Ltd. 460 p. ISBN0 7277–3220X.

Recasens, R. M.; Martinez, A.; Jiménez, F. P.; Bianchetto, H. 2005. Effect of filler on the aging potential of as asphalt mixtures, *Transportation Research Record* 1901: 10–17.

Roberts, F. L.; Mohammad, L. N.; Wang, L. B. 2002. History of hot-mix asphalt mixture design in the United States, *Journal or Material in Civil Engineering* 14(4): 279–293. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:4(279)

Said, S. F. 2005. Aging effect on mechanical characteristics of bituminous mixtures, *Transportation Research Record* 1901: 1–9.

- Sengoz, B.; Isikyakar, G. 2008. Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen, *Construction and Building Materials* 22(9): 1897–1905. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.07.013
- Sengoz, B.; Topal, A. 2007. Minimum voids in mineral aggregate in hot-mix asphalt based on asphalt film thickness, *Building and Environment* 42(10): 3629–3635.
- Sengoz, B.; Topal, A.; Isikyakar, G. 2009. Morphology and image analysis of polymer modified bitumens, *Construction and Building Materials* 23(5): 1986–1992. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.08.020
- Seo, Y.; El-Haggan, O.; King, M.; Lec, J.; Kim, Y. R. 2007. Air voids models for the dynamic modulus, fatigue cracking and rutting of asphalt concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(10): 874–883. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:10(874)
- Shen, J.; Amirkhamian, S.; Tang, B. 2007. Effects of rejuvenator on performance-based properties of rejuvenated asphalt binders and mixtures, *Construction and Building Materials* 21(5): 958–964. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.03.006
- Shen, J.; Amirkhamian, S.; Miller, J. A. 2007a. Effects of rejuvenating agents on Superpave mixtures containing reclaimed asphalt pavement, *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(5): 376–384. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:5(376)
- Shen, J.; Amirkhamian, S.; Tang, B. 2007b. Effects of rejuvenator on performance-based properties of rejuvenated asphalt binder and mixtures, *Construction and Building Materials* 21(5): 958–964. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.03.006
- Shirodkar, P.; Mehta, Y.; Nolan, A.; Sonpal, K.; Norton, A.; Tomlinson, C.; Dubois, E.; Sullivan, P.; Sauber, R. 2011. A study to determine the degree of partial bending of reclaimed asphalt pavement (RAP) binder for high RAP hot mix asphalt, *Construction and Building Materials* 25(1): 150–155. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.045
- Shoenberger, J. E.; Demoss, T. E. 2005. Hot-mix recycling of asphalt concrete airfield pavements, *The International Journal of Pavement Engineering* 6(1): 17–26. doi:10.1080/10298430500041198
- Sholar, G. A.; Page, G. C.; Musselman, J. A. 2002. Precision statements for ignition oven for use with plant-produced mixtures, *Transportation Research Record* 1813: 142–150.
- Shu, X.; Huang, B.; Vukosavljevic, D. 2008. Laboratory evaluation of fatigue characteristics of recycled asphalt mixture, *Construction and Building Materials* 22 (7): 1323–1330. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.04.019
- Sivilevičius, H. 2003. Influence of homogeneity of mineral materials grading and dosing errors on the stability of asphalt concrete mixture composition, *Journal of Civil Engineering and Management* 9(1): 25–35.
- Sivilevičius, H. 2005. The analysis of the new asphalt concrete mixing plant batchers and their smart control systems, in *Proc. of the 6th International Conference „Environmental Engineering“*: Selected papers, vol. 2. Ed. by D. Čygas, K. D. Froehner, May 26–27, 2005, Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 775–782.
- Sivilevičius, H. 2011a. Application of expert evaluation method to determine the importance of operating asphalt mixing plant quality criteria and rank correlation, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 6(1):48–58. doi:10.3846/bjrbe.2011.07
- Sivilevičius, H. 2011b. Modelling the interaction of transport system elements, *Transport* 26(1):20–34. doi:10.3846/16484142.2011.560366
- Sivilevičius, H.; Karalevičius, J.; Gailius, A. 2003. Naujo kompiuterizuoto asfaltbetonio maišytuvo medžiagų diskretinių dozatorių technologinių rodiklių statistinis vertinimas [Statistical evaluation of the material discrete doser technology indicators statistical evaluation]

tion of technological indicators of the new computerized asphalt concrete mixing plant materials discrete dosing units], *Journal of Civil Engineering and Management* 9(2): 131–140.

Sivilevičius, H.; Podvezko, V.; Vakrinienė, S. 2011. The use of constrained and unconstrained optimization models in gradation design of hot mix asphalt mixture, *Construction and Building Materials* 25(1): 115–122. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.050

Sivilevičius, H.; Šukevičius, Š. 2007. Dynamics of vehicle loads on the asphalt pavement of European roads which cross Lithuania, *The Baltic Journal Road and bridge Engineering* 2(4): 147–154.

Sivilevičius, H.; Šukevičius, Š. 2009. Manufacturing technologies and dynamics of hot-mix asphalt mixture production, *Journal of Civil Engineering and Management* 15(2): 169–179. doi:10.3846/1392-3730.2009.15.169-179

Sivilevičius, H.; Vislavičius, K. 2008. Stochastic simulation of the influence of variation of mineral material grading and dose weight on the homogeneity of hot-mix asphalt, *Construction and Building Materials* 22(9): 2007–2014. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.07.001

Sriramula, S.; Menon, D.; Prasad, A. M. 2007. Axle load variations and vehicle growth projection models for safety assessment of transportation structures, *Transport* 22(1): 31–37.

Statybos rekomendacijos R 35-01. *Automobilių kelių asfaltbetonio ir žvyro dangos*. Vilnius: LAKD. 2001. 117 p.

Stock, A. F. 1985. Bitumen recovered from highways and its use in recycled mixes, *The Journal of the Institution of Highways and Transportation* 5: 12–16.

Stroup-Gardiner, M.; Brown, E. R. 2000. *A Segregation In Hot Mix Asphalt Pavements*. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). Report 441. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C.: National Academy Press. 95 p.

Stroup-Gardiner, M.; Newcomb, D. E.; Epps, J. A. 1989. Precision of methods for determining asphalt cement content, *Transportation Research Record* 1228: 156–167.

Stroup-Gardiner, M.; Wagner, C. 1999. Use of reclaimed asphalt pavement in superpave hot-mix asphalt applications, *Transportation Research Record* 1681: 1–9. doi:10.3141/1681-01

Tabakovič, A.; Gibney, A.; McNally, C.; Gilhrist, M. D. 2010. Influence of recycled asphalt pavement on fatigue performance of asphalt concrete base courses, *Journal of Materials in Civil Engineering* 22 (6): 643–650. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000093

Tamaliūnas, S.; Sivilevičius, H. 2010. Asfaltbetonio dangos regeneravimo asfaltbetonio maišytuvuose technologijų modeliavimas, *Mokslas-Lietuvos ateitis. Science-Future of Lithuania* 2(6):98–102. doi:10.3846/mla.2010.121

Tao, M.; Zhang, Z.; Wu, Z. 2008. Simple procedure to assess performance and cost benefits of using recycled materials in pavement construction, *Journal of Materials in Civil Engineering* 20(11): 718–725. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:11(718)

The Asphalt Handbook. 2007 MS-4. Asphalt institute. 788 p.

TRA ASFALTAS 08. *Automobilių kelių asfalto mišinių techninių reikalavimų aprašas*. Vilnius: LAKD. 2008. 61 p.

TRA NAG 09. *Automobilių kelių naudoto asfalto granulių techninių reikalavimų aprašas*. Vilnius: LAKD. 2009. 21 p.

Vaitkus, A.; Čygas, D.; Laurinavičius, L.; Juzėnas, A. A. 2007. Evaluation of geotextiles separation performance on the impact of transport loads: experimental research-stage 1, *The Baltic Journal of Road Bridge Engineering* 2(1): 45–50.

- Valdés, G.; Pérez-Jiménez, F.; Miró, R.; Martínez, A.; Botella, R. 2011. Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP), *Construction and Building Materials* 25(3): 1289–1297. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.09.016
- Vassiliev, N. Y.; Davison, R. R.; Glover, C. 2002. Development of a stirred airflow test procedure for short-term aging of asphalt materials, *Transportation Research Record* 1810: 25–32.
- Vislavičius, K.; Sivilevičius, H. 2010. Stochastic simulation of the influence of reclaimed asphalt pavement mineral aggregate variation on the homogeneity of recycled hot-mix asphalt, in *Proc of the 10th International Conference "Modern Building Materials, Structures and Techniques": Selected Papers*, vol. 1. Ed. by Vainiūnas, P.; Zavadskas, E. K. May 19–21, 2010, Vilnius: Technika, 323–329.
- Wei, J.; Zhang, Y. 2010. Influence of aging on surface free energy of asphalt binder, *International Journal of Pavement Research and Technology* 3(6):343–351.
- White, T. D.; Brown, E. R. 1977. Statistical quality control procedures for airfield pavement materials and construction, *Transportation Research Record* 652: 36–42.
- Widyatmoko, I. 2008. Mechanistic-empirical mixture design for hot mix asphalt pavement recycling, *Construction and Building Materials* 22(2): 77–87. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.05.041
- Witczak, M. 2005. *Simple Performance Tests: Summary of Recommended Methods and Database*. National Cooperative Highway Research Program. NCHRP Report 547. Washington, D. C. TRB 15 p.
- Witczak, M. W.; Fonseca, O. A. 1996. Revised predictive model for dynamic (complex) modulus of asphalt mixtures, *Transportation research Record* 1540:15–23. doi:10.3141/1540-03
- Wu, S.; Pang, L.; Lui, G.; Zhu, J. 2010. Laboratory study on ultraviolet radiation aging of bitumen, *Journal of Materials in Civil Engineering* 22(8): 767–772. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000010
- Xiao, F.; Amirkhanian, S. N. 2009. Laboratory investigation of moisture damage in rubberised asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement, *International Journal of Pavement Engineering* 10(5): 319–328. doi:10.1080/10298430802169432
- Xu, Q.; Chen, H.; Prozzi, J. A. 2010. Performance of fiber reinforced asphalt concrete under environmental temperature and water effects, *Construction and Building Materials* 24(10): 2003–2010. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.03.012
- Yu, J.-Y.; Feng, P.-C.; Zhang, H.-L.; Wu, S.-P. 2009. Effect of organo-montmorillonite on aging properties of asphalt, *Construction and Building Materials* 23(7): 2636–2640. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.01.007
- Zaghloul, S.; Holland, J. T. 2008. Comparative analysis of long-term field performance of recycled asphalt in California environmental zones, *Transportation Research Record* 2084: 83–99. doi:10.3141/2084-10
- Zavadskas, E. K.; Turskis, Z.; Tamošaitienė, J. 2010. Risk assessment of construction projects, *Journal of Civil Engineering and Management* 16 (1): 33-46. (IF=3,711)
- Zavadskas, E. K.; Liias, R.; Turskis, Z.; 2008. Multi-attributed decision-making methods for assessment of quality in bridge and road construction: State-of-the-art surveys, *Journal of Road Bridge Engineering* 3 (3): 152-160. Vilniaus Gediminas Tech. Univ., Lithuania (IF=2,436)
- Zavadskas, E. K.; Turskis, Z.; Tamošaitienė, J.; Marina, V 2008. Multicriteria selection of project managers by applying grey criteria, *Technological and Economic Development of Economy* 14 (4): 462-477. Vilniaus Gediminas Tech. Univ., Lithuania (IF=2,615)
- Кашевская, Е. В. 2003. *Регенерация асфальтобетонов*. Минск: Дизайн ПРО. 191 с.

Королев, И. В. 1986. *Пути экономии битума в дорожном строительстве* [Ways of Economy of Bitumen in Road Construction]. Москва: Транспорт. 149 р.

Королев, И. В.; Агеева, Е. Н.; Головкин, В. А.; Фоменко, Г. Р. 1984. *Дорожный теплый асфальтобетон* [The Road Warm Asphalt Concrete]. Киев: Вища школа. 200 р.

Котляровский, Э. В. 2008. Влияние противогололёдных реагентов на свойства битумов и асфальтобетонов, *Наука и техника в дорожной отрасли* 47(4): 39–41.

Autoriaus publikacijos disertacijos tema

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

- Mučinis, D.; Sivilevičius, H.; Oginskas, R. 2009. Factors determining the inhomogeneity of reclaimed asphalt pavement and estimation of its component content variation parameters, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 4(2): 69–79. doi:10.3846/1822-427X.2009.4.69-79 (Thomson ISI Web of Science) (IF=2,06; AIF=1,324).
- Čygas, D.; Mučinis, D.; Sivilevičius, H.; Abukauskas, N. 2011. Dependence of the recycled asphalt mixture physical and mechanical properties on the grade and amount of rejuvenating bitumen, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 6(2): 124–134. doi:10.3846/bjrbe.2011.17 (Thomson ISI Web of Science) (IF=2,436; AIF=1,479).

Straipsniai kituose leidiniuose

- Mučinis, D.; Čygas, D.; Oginskas, R. 2008. The possibility of using reclaimed asphalt pavement (RAP) in hot mix asphalt in Lithuania, in *Proc of the 7th International Conference “Environmental Engineering”*: selected papers, vol. 3. Ed. by Čygas, D.; Froehner, K. D. May 22–23, 2008, Vilnius, Lithuania. Vilnius: technika, 1199–1203. (Thomson ISI Proceedings)
- Oginskas, M.; Mučinis, D.; Sivilevičius, H. 2009. Research the homogeneity of reclaimed asphalt pavement used in Lithuania, in *II International Conference Environmentally Friendly Roads „enviroad 2009”*. Pavement Design and Construction, 15–16 X 2009. Warszawa: 1–9.

Darjušas MUČINIS

KARŠTAI REGENERUOTO ASFALTO MIŠINIO KOMPONENTŲ SĄVEIKOS MODELIAVIMAS IR JO NAUDOJIMO KELIŲ DANGOS KONSTRUKCIJOJE TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
statybos inžinerija (02T)

MODELLING OF THE INTERACTION COMPONENT'S OF RECYCLED HOT MIX ASPHALT AND RESEARCH ITS USE IN THE ROAD PAVEMENT CONSTRUCTION
Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
CivilEngineering (02T)

2011 12 19. 10,25 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius