



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
KELIŲ KATEDRA

Ieva Jakubėnaitė

**DANGOS PRALAIMUMĄ VANDENIUI UŽTIKRINANČIŲ ASFALTO
MIŠINIŲ FUNKCINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAS**

**RESEARCH OF ASPHALT MIXTURE PERFORMANCE
CHARACTERISTICS OF PERMEABLE PAVEMENTS**

Baigiamasis magistro darbas

Kelių ir geležinkelių inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX039
Kelių ir geležinkelių inžinerijos specializacija
Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2023

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
KELIŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Ieva Jakubėnaitė

DANGOS PRALAIMUMĄ VANDENIUI UŽTIKRINANČIŲ ASFALTO
MIŠINIŲ FUNKCINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAS

RESEARCH OF ASPHALT MIXTURE PERFORMANCE
CHARACTERISTICS OF PERMEABLE PAVEMENTS

Baigiamasis magistro darbas

Kelių ir geležinkelių inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX039
Kelių ir geležinkelių inžinerijos specializacija
Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

prof. dr. Audrius Vaitkus

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantė

dr. Judita Škulceckė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas dr. Aušra Žemienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2023

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
KELIŲ KATEDRA

Studijų kryptis: Statybos inžinerija
Studijų programa: Keliai ir geležinkeliai , valstybinis kodas 6211EX039
Specializacija: Keliai ir geležinkeliai

TVIRTINU
Katedros vedėjas
Viktoras Vorobjovas
2023-05-30

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Nr. Kfm-21-4243

Vilnius

Studentas (-ė): Ieva Jakubėnaitė

Baigiamojo darbo tema: Dangos pralaidumą vandeniui užtikrinančių asfalto mišinių funkcinių savybių tyrimas

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas pagal numatytą studijų kalendorinį grafiką.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Aiškinamasis raštas:

Darbo tikslas - nustatyti asfalto mišinių funkcinių savybių ribines sąlygas, užtikrinančias asfalto dangų pralaidumą vandeniui.

Darbo tikslui pasiekti suformuoti uždaviniai:

1. Išanalizuoti taikomas vandeniui pralaidžias kelio dangas išskiriant jų savybes, taikymo sritis, privalumus ir trūkumus.
2. Atlikti vandeniui pralaidžių kelio dangos konstrukcijų projektavimo principų analizę. Išanalizuoti mokslinius straipsnius,.
3. Remiantis atlikta literatūros analize apibrėžti asfalto dangų ir jų mišinių funkcinių savybių ribines sąlygas, užtikrinančias kelio dangos pralaidumą vandeniui.
4. Atlikti eksperimentinį tyrimą.
5. Susisteminti bei statistiškai apdoroti eksperimentinio tyrimo duomenis bei atlikti jų interpretaciją;
6. Remiantis eksperimentinio tyrimo rezultatais patikslinti teoriniame lygmenyje nustatytas ribines sąlygas, užtikrinančias asfalto dangos pralaidumą vandeniui.
7. Pateikti išvadas ir rekomendacijas.

Baigiamojo bakalauro darbo (projekto) konsultantai: Judita Škuldeckė.

Vadovas profesorius Audrius Vaitkus

Vilniaus Gedimino technikos universitetas		ISBN	ISSN
Aplinkos inžinerijos fakultetas		Egz. sk.	
Kelių katedra		Data	

Antrosios pakopos studijų Kelių ir geležinkelių programos magistro baigiamasis darbas	
Pavadinimas	Dangos pralaidumą vandeniui užtikrinančių asfalto mišinių funkcinių savybių tyrimas
Autorius	Ieva Jakubėnaitė
Vadovas	Audrius Vaitkus

	Kalba: lietuvių
--	------------------------

<p>Anotacija</p> <p>Išskiriant dideliame kritulių kiekiui, esamos vandens surinkimo sistemos dažnai nebeužtikrina reikalingo vandens nuvedimo, todėl tikslinga vandeni nuo kelio dangos paviršiaus pašalinti įrengiant vandeniui pralaidžias dangas. Siekiant užtikrinti šių dangų pralaidumą vandeniui svarbu jas tinkamai suprojektuoti – taikyti tam tikras funkcines savybes. Šiame baigiamajame magistro darbe siekiama nustatyti asfalto mišinių funkcinių savybių ribines sąlygas, užtikrinančias asfalto dangų pralaidumą vandeniui. Šiam tikslui pasiekti darbe analizuojami Lietuvoje ir kitose šalyse taikomų vandeniui pralaidžių kelio dangų, išskiriant jų savybes, taikymo sritis, privalumus ir trūkumus bei visos dangos konstrukcijos projektavimo principus. Apžvelgiama ir kitų šalių patirtis taikant vandeniui pralaidžių asfalto dangų funkcionavimą ir priežiūrą. Taip pat remiantis kitų mokslininkų atliktais tyrimais teoriniu lygmeniu nustatytos funkcinių savybių ribinės sąlygos, užtikrinančios asfalto dangos pralaidumą vandeniui. Atliekamas eksperimentinis tyrimas vandeniui pralaidžių asfalto dangų ir jų mišinių funkcinių savybių ribinėms sąlygoms nustatymui. Eksperimentinio tyrimo rezultatų analize patikslintos teoriniu lygmeniu nustatytos funkcinių savybių ribinės sąlygos, užtikrinančios asfalto dangų pralaidumą vandeniui bei suformuluotos išvados ir rekomendacijos dėl vandeniui pralaidžių asfalto dangų projektavimo ir taikymo.</p> <p>Darbo apimtis: 95 puslapiai teksto be priedų, 37 paveikslai, 28 lentelės, 93 literatūros šaltiniai.</p>
--

<p>Prasminiai žodžiai: vandeniui pralaidi dangos konstrukcija, asfalto danga, poringasis asfaltas, pralaidumas vandeniui, asfalto fizikinės savybės, vandeniui pralaidžių dangų taikymas.</p>
--

Vilnius Gediminas Technical University Faculty of Environmental Engineering Department of Roads		ISBN Copies No. Date-.....-.....	ISSN
Master Degree Studies Roads and Railways study programme Master Thesis			
Title	Research of Asphalt Mixture Performance Characteristics of Permeable Pavements		
Author	Ieva Jakubėnaitė		
Academic supervisor	Audrius Vaitkus		
			Thesis language: Lithuanian
Annotation			
<p>When heavy rainfall occurs, existing water collection systems often no longer provide the necessary drainage, thus it is advisable to drain excess water from the road surface by installing permeable pavements. To ensure permeability, permeable pavements must be properly designed with specific performance characteristics. This master thesis aims to determine the boundary conditions for the performance properties of permeable asphalt mixtures. To achieve this goal, the thesis analyses the permeable pavements used in Lithuania and other countries, highlighting their properties, applications, advantages and disadvantages, and the design principles of the pavement structure. In addition, the functionality and maintenance of permeable asphalt pavements in other countries are examined. Based on studies conducted by other researchers, at the theoretical level, the boundary conditions for the performance characteristics of the permeable asphalt pavement are reviewed. An experimental study is carried out to determine the boundary conditions for the performance characteristics of permeable asphalt pavements and mixtures thereof. The results of the experimental study are analysed to further define the theoretical boundary conditions for the performance characteristics of asphalt pavements, ensuring their permeability, and to form conclusions and recommendations for the design and application of permeable asphalt pavements.</p> <p>Thesis consists of: 95 pages without appendixes, 37 figures, 28 tables, 93 references.</p>			
Keywords: permeable pavement, asphalt pavement, porous asphalt, permeability, physical properties of asphalt, application of permeable pavement.			

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

	Ieva Jakubėnaitė, 20172410	
	(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)	
	Aplinkos inžinerijos fakultetas	
	(Fakultetas)	
	Keliai ir geležinkeliai, Kfm-21	
	(Studijų programa, akademinė grupė)	

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO) SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2023 m. gegužės 30 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Dangos pralaidumą vandeniui užtikrinančių asfalto mišinių funkcinių savybių tyrimas“ yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: daktaras Judita Škulčekė. Mano darbo vadovas profesorius daktaras Audrius Vaitkus.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

			Ieva Jakubėnaitė
	(Parašas)		(Vardas ir pavardė)

TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	9
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	11
SANTRUMPOS	13
ĮVADAS.....	14
1. LITERATŪROS APŽVALGA VANDENIUI PRALAIKŽIŲ KELIO DANGŲ TEMATIKA....	15
1.1. Vandeniui pralaidžiŲ kelio dangŲ tipai	15
1.2. Vandeniui pralaidžiŲ dangos konstrukcijŲ projektavimo principai ir Lietuvos klimatinės sąlygos	20
1.3. Vandeniui pralaidžiŲ asfalto dangŲ funkcionavimas	33
1.4. Teorinės asfalto dangos pralaidumą vandeniui užtikrinančios funkcinių savybiŲ ribinės sąlygos.....	44
1.5. Pirmojo skyriaus išvados	45
2. VANDENIUI PRALAIKŽIŲ ASFALTO DANGŲ EKSPERIMENTINIS TYRIMAS	48
2.1. Tyrimo objektas	48
2.2. Tyrimo metodika.....	53
2.2.1. Oro tuštymiŲ kiekio nustatymas	53
2.2.2. Pralaidumo vandeniui nustatymas	55
2.2.3. Jautrumo vandeniui nustatymas	56
2.2.4. Skeliamojo stiprio nustatymas po UVA spinduliuotės poveikio ir po mirkymo vandenyje.....	57
2.2.5. Dalelių (masės) nuostoliŲ nustatymas	58
2.3. Eksperimentinio tyrimo rezultatai.....	59
2.3.1. Oro tuštymiŲ kiekis.....	60
2.3.2. Pralaidumas vandeniui.....	62
2.3.3. Jautrumas vandeniui	63
2.3.4. Skeliamasis stipris po UVA spinduliuotės poveikio ir po mirkymo vandenyje.....	64
2.3.5. Dalelių (masės) nuostoliai	65
2.4. Antrojo skyriaus išvados	66

3. VANDENIUI PRALAIIDŽIŲ ASFALTO DANGŲ TAIKYMAS.....	68
3.1. Eksperimentiniu tyrimu pagrįstos funkcinių savybių ribinės sąlygos, užtikrinančios asfalto dangos pralaidumą vandeniui	68
3.2. Rekomendacijos vandeniui pralaidžių asfalto dangų projektavimui ir taikymui.....	77
3.3. Trečiojo skyriaus išvados	81
BENDROSIOS IŠVADOS.....	83
REKOMENDACIJOS	85
LITERATŪROS SĄRAŠAS	86
PRIEDAI	95

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Vandeniui pralaidžių dangų privalumai ir trūkumai (W. R. Selbig & Buer, 2018; Weiss et al., 2019).....	19
1.2 lentelė. Vandeniui pralaidžių asfalto dangų modifikacijos, teršalų slopinimui) (Kuruppu et al., 2019).....	19
1.3 lentelė. Vandeniui pralaidžių ir įprastų vandeniui nepralaidžių dangų palyginimas (Kayhanian et al., 2019).....	23
1.4 lentelė. 2021 metų kiekvieno mėnesio iškritę krituliai	29
1.5 lentelė. 2021 metų kiekvieno mėnesio ultravioletinė spinduliuotės vidutinė reikšmė.....	31
1.6 lentelė. Teorinės poringojo asfalto specifikacijos (Eisenberg et al., 2015)	33
1.7 lentelė. Vandeniui pralaidžių asfalto dangų specifikacija.....	35
1.8 lentelė. Priedai, turintys įtakos pralaidaus vandeniui poringojo asfalto mišiniui	39
1.9 lentelė. Vandeniui pralaidžių asfalto dangų priežiūra.....	41
1.10 lentelė. Vandeniui pralaidžių asfalto dangų priežiūra žiemos metu	43
1.11 lentelė. Teorinės asfalto dangos pralaidumą vandeniui užtikrinančios funkcinių savybių ribinės vertės.....	45
2.12 lentelė. Poringųjų asfalto mišinių užpildų projektinė sudėtis	48
2.13 lentelė. Poringųjų asfalto mišinių projektinė granulimetrinė sudėtis.....	49
2.14 lentelė. PA 16 ir PA 16 modifikuotų mišinių projektinė sudėtis	49
2.15 lentelė. PA 11 ir PA 11 modifikuotų mišinių projektinė sudėtis	50
2.16 lentelė. PA 8 ir PA 8 modifikuotų mišinių projektinė sudėtis	51
2.17 lentelė. Polimerais modifikuoto bituminio rišiklio PMB 45/80-65 savybės.....	52
2.18 lentelė. Patikslinta granulimetrinė sudėtis su rišiklio kiekių mišinyje.....	59
2.19 lentelė. Eksperimentinio tyrimo rezultatai	59
3.20 lentelė. 2021 metų didžiausi iškritusių kritulių kiekis per valandą.....	68
3.21 lentelė. Eksperimentinio tyrimo rezultatai su teorinėmis ir faktinėmis asfalto dangos pralaidumą užtikrinančiomis funkcinių savybių ribinėmis vertėmis.....	70
3.22 lentelė. Rodiklių reikšmingumas.....	74
3.23 lentelė. Poringojo asfalto mišinių (alternatyvų) įverčiai ir rangai.....	74
3.24 lentelė. Patikslintos asfalto dangos pralaidumą vandeniui užtikrinančios funkcinių savybių ribinės vertės.....	76
3.25 lentelė. Pavyzdinės asfalto mišinių sudėtis, užtikrinančios asfalto dangos pralaidumą vandeniui	76

3.26 lentelė. Rekomenduojamos dangos konstrukcijų su vandeniui pralaidžia danga klasės priklausomai nuo taikymo paskirties.....	77
3.27 lentelė. Rekomenduojamos vandeniui pralaidžių asfalto dangų konstrukcijos pagal dangų konstrukcijų klasę.....	80
3.28 lentelė. Rekomenduojamos dangos konstrukcijų su vandeniui pralaidžia danga klasės priklausomai nuo taikymo paskirties.....	81

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Asfalto danga ir vandeniui pralaidi poringojo asfalto danga (Sophie Rhéaume, 2018)	15
1.2 pav. Vandeniui pralaidžių dangų tipai (W. Selbig, 2019).....	16
1.3 pav. Trinkelių arba plokščių dangų tipai (Auckland Council, 2015).....	17
1.4 pav. Geokorio dangos tipai	18
1.5 pav. (a), (b), (c) – geokorio tinkelių danga; (d) – geokorio griovelių danga (icpi, 2020).....	18
1.6 pav. Vandeniui pralaidžios dangos klasifikavimas pagal konstrukciją (Zhu et al., 2021).....	20
1.7 pav. Vandeniui pralaidžių dangų konstrukcijos (Guan et al., 2021).....	21
1.8 pav. Vandeniui pralaidžios dangos konstrukcijos kelkraštis (Kayhanian et al., 2019).....	23
1.9 pav. Vandeniui pralaidžios dangos konstrukcijų projektavimo principai (Eisenberg et al., 2015)	24
1.10 pav. 2021 metais kiekvieną mėnesį iškritusių kritulių pasiskirstymas	30
1.11 pav. 2021 metų iškritusių kritulių kiekio dažnumas per valandą.....	30
1.12 pav. 2021 metais kiekvieną mėnesį Žemės paviršių pasiekusios ultravioletinės spinduliuotės pasiskirstymas.....	32
1.13 pav. 2021 metų ultravioletinės spinduliuotės vidurkio dažnumas per valandą.....	32
1.14 pav. Granulimetrinės sudėties kreivės poringųjų asfalto mišinių	36
1.15 pav. Optimalus rišiklio kiekis priklausomai nuo oro tuštymių kiekio	37
1.16 pav. Užsikimšančios dalelės masės įtaka prasiskverbimo greičiui (Meng, Xing, et al., 2020)	40
1.17 pav. Regeneracinė šlavimo mašina (kairėje), Vakuuminė šlavimo mašina (dešinėje) (TYMCO, n.d.).....	42
1.18 pav. Šluotos paviršiaus išvalymui: a) mechaninė; b) vakuuminė; c) regeneracinė oro (TYMCO, n.d.).....	42
1.19 pav. Sniego tirpimas ant vandeniui pralaidaus poringojo asfalto ir vandeniui nepralaidaus įprasto asfaltbetonio: a) poringas asfaltas 11:20 val. ir b) poringas asfaltas po 100 min; c) tankaus asfalto danga 11:20 val. ir d) tankaus asfalto dangą po 100 min. (Roseen et al., 2014).....	44
2.20 pav. PA 16 ir PA 16 modifikuotų mišinių granulimetrinės sudėties.....	50
2.21 pav. PA 11 ir PA 11 modifikuotų mišinių granulimetrinės sudėties	51
2.22 pav. PA 8 ir PA 8 modifikuotų mišinių granulimetrinės sudėties	52
2.23 pav. Eksperimentinio tyrimo schema.....	53
2.24 pav. Vertikalaus (a) ir horizontalaus (b) pralaidumo vandeniui nustatymas (c) pagal LST EN 12697-19:2020.....	55
2.25 pav. Netiesioginio tempimo stiprio bandymas pagal LST EN 12697-23:2018	57
2.26 pav. Tariamojo tankio ir mišinio didžiausio tankio vidurkių bandymo rezultatai	61

2.27 pav. Oro tuštymių kiekio bandymo rezultatai	61
2.28 pav. Pralaidumo vandeniui, bandymo rezultatai	62
2.29 pav. Jautrumo vandeniui bandymo rezultatai	64
2.30 pav. Skeliamojo stiprio po UVA spinduliuotės poveikio ir po mirkymo vandenyje bandymo rezultatai	65
2.31 pav. Dalelių (masės) nuostolių bandymo rezultatai	66
3.32 pav. 2021 metų Kaune didžiausias iškritusių kritulių kiekis per parą.....	69
3.33 pav. 2021 metų Kaune iškritusių kritulių kiekio dažnumas per parą.....	69
3.34 pav. Sklaidos diagrama tarp asfalto bandinių vertikalalaus pralaidumo vandeniui ir oro tuštymių kiekio	72
3.35 pav. Sklaidos diagrama tarp horizontalalaus pralaidumo vandeniui ir asfalto bandinių oro tuštymių kiekio	73
3.36 pav. Poringojo asfalto mišinių (alternatyvų) įverčiai gauti taikant metodus SAW ir TOPSIS.	75
3.37 pav. Rekomenduojamos alternatyvios vandeniui pralaidžios dangos konstrukcijos	78

SANTRUMPOS

- ATPB - vandeniui pralaidus asfalto pagrindo sluoksnis (angl. *asphalt-treated permeable base*);
- CR – gumos milteliai (angl. *crumb rubber*);
- DK – dangos konstrukcija;
- HMA – atviros struktūros karšto asfalto mišinys (angl. *open-graded hot-mix asphalt*);
- HVB – didelio klampumo rišiklis (angl. *high-viscosity binder*);
- ICP – atviros struktūros betono trinkelės (angl. *open-graded interlocking concrete pavement*);
- ITSR – netiesioginio tempiamo stiprių santykis (angl. *indirect tensile stress ratio*);
- OGFC – Jungtinėse Amerikos Valstijose naudojamas panašus asfalto mišinys į poringąjį asfaltą (angl. *open-graded friction course*);
- PA – poringasis asfaltas (angl. *porous asphalt*);
- PAC – poringojo asfalto betonas (angl. *porous asphalt concrete*);
- PAM – poringojo asfalto mišinys (angl. *porous asphalt mixture*);
- PCC – atviros struktūros portlandcemenčio betono mišinys (angl. *open-graded portland cement concrete*);
- PG – bitumo eksploatacinių charakteristikų reikalavimai (angl. *performance grade specifications*);
- PMB – polimerais modifikuotas bitumas (angl. *polymer modified bitumen*);
- SAW – paprastas adityviu svorių metodas (angl. *Simple Additive Weighting*);
- SBS – polimerais modifikuotas bitumas su mineraliniu užpildu (angl. *styrene butadiene styrene*);
- TOPSIS – variantų racionalumo nustatymo artumo idealiajam taškui metodas (angl. *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*);
- UVA – ultravioletinė (A) spinduliuotė;

IVADAS

Šiaurės Europoje vienas iš didžiausių klimato kaitos padarinių – gausėjimas kritulių, ypač smarkių liūčių. Lietuvoje perteklinis vanduo nuo dangos paviršiaus nuvedamas suformuojant kelio skersinį ir išilginį nuolydį bei įrengiant griovius arba vandens surinkimo sistemas. Tačiau iškrinant dideliam momentiniam kritulių kiekiui, esamos vandens surinkimo sistemos dažnai nebeužtikrina reikalingo vandens nuvedimo, o naujų sistemų įrengimą riboja šalia esantys pastatai (ypač miestuose) ir tai reikalauja didelių investicijų, kurioms dažnai nėra pakankamai resursų. Todėl būtina ieškoti kitų sprendinių vandeniui nuo dangos paviršiaus pašalinti. Vienas iš jų – vandeniui pralaidžių dangų įrengimas.

Nagrinėjama tema nauja ir aktuali, nes Lietuvoje nėra praktikos ir normatyvinių techninių dokumentų, reglamentuojančių vandeniui pralaidžių dangų projektavimą, taikymą ir įrengimą.

Baigiamojo darbo tikslas – nustatyti asfalto mišinių funkcinių savybių ribines sąlygas, užtikrinančias asfalto dangų pralaidumą vandeniui.

Darbo tikslui pasiekti suformuoti uždaviniai:

1. Išanalizuoti Lietuvoje ir kitose šalyse taikomas vandeniui pralaidžias kelio dangas išskiriant jų savybes, taikymo sritis, privalumus ir trūkumus.
2. Atlikti vandeniui pralaidžių kelio dangos konstrukcijų projektavimo principų analizę.
3. Išanalizuoti mokslinius straipsnius, susijusius su vandeniui pralaidžių asfalto dangų funkcionavimu ir priežiūra.
4. Remiantis atlikta literatūros analize apibrėžti asfalto dangų ir jų mišinių funkcinių savybių ribines sąlygas, užtikrinančias kelio dangos pralaidumą vandeniui.
5. Atlikti eksperimentinį tyrimą vandeniui pralaidžių asfalto dangų ir jų mišinių funkcinių savybių ribinėms sąlygoms nustatyti.
6. Susisteminti bei statistiškai apdoroti eksperimentinio tyrimo duomenis bei atlikti jų interpretaciją.
7. Remiantis eksperimentinio tyrimo rezultatais patikslinti teoriniame lygmenyje nustatytas funkcinių savybių ribines sąlygas, užtikrinančias asfalto dangos pralaidumą vandeniui.
8. Pateikti išvadas ir rekomendacijas dėl vandeniui pralaidžių asfalto dangų projektavimo ir taikymo.

Baigiamajame darbe siekiama patvirtinti hipotezę apie asfalto dangų pralaidumą vandeniui, priklausomai nuo asfalto mišinio sudėties. Taip pat iškeliamą hipotezę, kad asfalto mišinį projektuojant pagal nustatytas funkcinių savybių ribines sąlygas, užtikrinamas reikalingas asfalto dangos pralaidumas vandeniui.

1. LITERATŪROS APŽVALGA VANDENIUI PRALAIIDŽIŲ KELIO DANGŲ TEMATIKA

1.1. Vandeniui pralaidžių kelio dangų tipai

Vandeniui pralaidi danga – tai draugiška aplinkai danga, per kurią prasiskverbia krituliai ir paviršinės nuotekos į žemiau esančius dangos konstrukcijos sluoksnius bei dirvožemį (W. R. Selbig & Buer, 2018). Šių dangų išskirtinumas, kad jos ne tik praleidžia vandenį ir neleidžia jam kauptis dangos paviršiuje (žr. 1.1 pav.), bet ir sumažina triukšmą bei slydimą. Vandeniui pralaidžios dangos išsiskiria iš įprastų dangų tuo, kad jose naudojami stambūs užpildai be smulkių, išskyrus tuos, kurie galėtų praleisti vandenį, t. y. $> 0,063$ mm. Tokių dangų oro tuštymių kiekis kinta nuo 18 % iki 98 % (Giunta et al., 2022).



1.1 pav. Asfalto danga ir vandeniui pralaidi poringojo asfalto danga (Sophie Rhéaume, 2018)

Išskiriama, kad keliuose naudojami keturi pagrindiniai vandeniui pralaidžių dangų tipai (žr. 1.2 pav.) (Bruinsma et al., 2017; Eisenberg et al., 2015; Kuruppu et al., 2019; Zhu et al., 2021):

- poringojo asfalto danga;
- poringojo betono danga;
- trinkelių arba plokščių danga;
- geokorio danga (užpildyto stambiuoju užpildu).



1.2 pav. Vandeniui pralaidžių dangų tipai (W. Selbig, 2019)

Džeimso Bruinsma ir kt. (2017) bei Bethany Eisenberg ir kitų mokslininkų (2015) gairėse aprašoma, kad poringajame asfalte yra 18–25 % oro tuštymių. Šio tipo dangos įrengiamos viensluoksnės arba gali būti įrengiamos dvisluoksnės. Įrengiant poringąjį asfaltą esant dideliame tuštymių kiekiui, pastebėta, kad sugeriamas paviršinis vanduo, taip išsprendžiant teškenimo bei pusrlojimo problemą, dėl to pagerėja vairuotojų matomumas ir padidėja transporto priemonių greitis esant lietingam orui. Poringojo asfalto danga priklausomai nuo mišinio sudėties bei aplinkos sąlygų gali nudrenuoti 4318–12700 mm/h vandens. Poringojo asfalto dangos storis dažniausiai kinta nuo 75 mm iki 180 mm, priklausomai nuo projekcinio vidutinio metinio eismo intensyvumo (Mullaney & Lucke, 2014).

Poringojo asfalto vandens pralaidumas priklauso nuo oro tuštymių kiekio ir jų tarpusavio sąryšio (Amirjani, 2010). Mokslininkai jau seniai pastebėjo ir pradėjo naudoti poringąjį asfaltą, kuris gali sumažinti vandens kiekį kelio paviršiuje.

Atlikta nemažai mokslinių tyrimų, iš kurių matyti, kad poringojo asfalto mišinys gali surinkti pašalines daleles, kurios yra vandenyje. Paviršinis nuotėkis vienas iš svarbiausių, kadangi jame yra daugybė teršalų, tokių kaip:

- kietosios medžiagos;
- sunkieji metalai;
- angliavandeniliai, kurie gali pabloginti požeminio vandens kokybę ir sukelti toksinį poveikį aplinkai.

Taip pat ištirta, kad tinkamai suprojektavus ir prižiūrint vandeniui pralaidžias dangas galima sulaikyti iki 80 % nuosėdų, 60 % fosforo, 80 % azoto, 70 % sunkiųjų metalų, 98 % alyvų ir tepalų (Kuruppu et al., 2019). Bet būtina atkreipti dėmesį į tai, jog minima filtravimo funkcija pagerina gruntinio vandens kokybę, tačiau susikaupusios pašalinės medžiagos gali užkimšti mišinio poras.

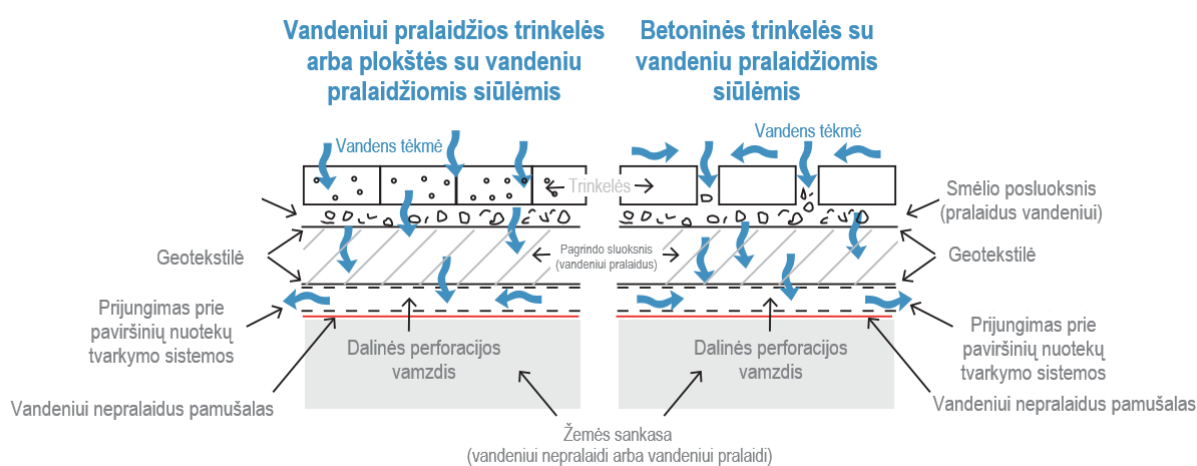
Poringasis betonas yra dažnai naudojamas Jungtinėse Amerikos Valstijose, tačiau Europoje iki šiol retai taikomas. Šios dangos mišinio sudėtį sudaro didesnės frakcijos užpildai nei poringojo asfalto, todėl poringąjį betono mišinį sudaro 15–25 % tuštymių kiekis, o atviro pagrindo sluoksnį

oro tuštymių kiekis sudaro – 40 %. Pastebėta, jog priklausomai nuo mišinio sudėties bei aplinkos sąlygų poringojo betono danga gali nudrenuoti 7620–50800 mm/h (Bruinsma et al., 2017; Eisenberg et al., 2015). Esant šaltam klimatui mažiausias dangos konstrukcijos storis – 30 cm (Mullaney & Lucke, 2014).

Mahsos Amirjanos (2010) darbe pabrėžia, kad vandeniui pralaidžios betono dangas rekomenduojama įrengti mažo intensyvumo keliuose dėl jų savybės trūkinėti, todėl renkantis dangas svarbu atkreipti dėmesį į laikomąją gebą bei atsparumą šalčiui.

Trinkelėlių arba plokščių dangos yra dviejų tipų (žr. 1.3 pav.):

1. betoninės trinkelės su vandeniui pralaidžiomis siūlėmis;
2. vandeniui pralaidžios trinkelės arba plokštės su vandeniui pralaidžiomis siūlėmis.

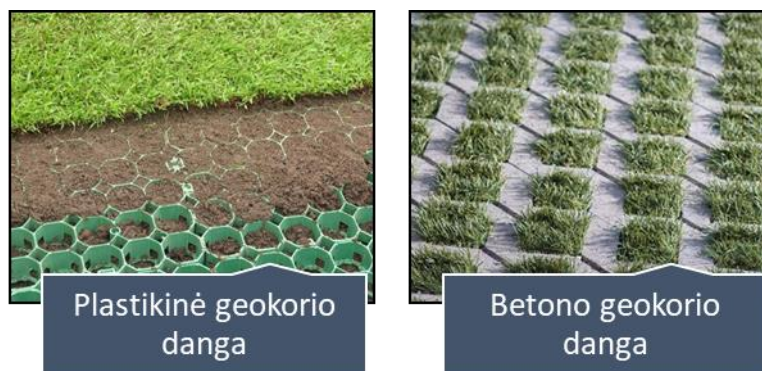


1.3 pav. Trinkelėlių arba plokščių dangų tipai (Auckland Council, 2015)

Trinkelėlių arba plokščių dangos įrengiamos tam, jog sumažinti lietaus nuotėkio tūrį bei teršalus. Trinkelėlių dangoje siūlės sudaro nuo 5 % iki 15 % viso paviršiaus ploto. Trinkelėlių siūlės paviršinėms nuotekoms leidžia patekti į skaldos pagrindo sluoksnį. Pažymėtina, jog tokia skaldos pagrindo sluoksnyje neturėtų būti smulkios frakcijos. Trinkelėlių arba plokščių danga yra patvari, lengvai atliekami remonto darbai bei nereikalauja didelės priežiūros. Trinkelėlių arba plokščių dangos dažniausiai įrengiamos stovėjimo aikštelėse, kadangi įrengus su specifine konstrukcija gali užtikrinti gerą vandens drenavimą nuo 10160 mm/h iki 15240 mm/h. Šio tipo konstrukcijos viršutinis sluoksnis dažniausiai pagamintas iš betono trinkelėlių, tačiau apatinis sluoksnis yra laidus vandeniui (Bruinsma et al., 2017; Eisenberg et al., 2015).

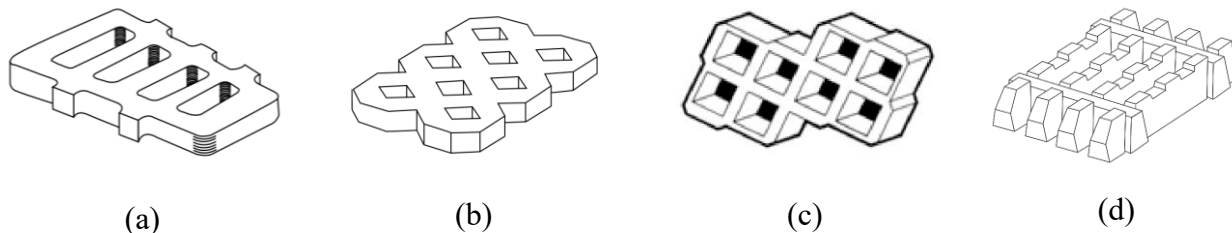
Geokorio dangos (užpildyto stambiuoju užpildu) būna dviejų tipų (žr. 1.4 pav.):

1. betono;
2. plastikinės.



1.4 pav. Geokorio dangos (užpildyto stambiuoju užpildu) tipai

Pagal ASTM C 1319 standartą, didžiausi betoninių geokorių dangų matmenys galimi 6,10 cm x 6,10 cm, o minimalus aukštis 8,0 cm. Taip pat nurodoma, kad atviro ploto procentas turėtų svyruoti tarp 20–50 %, o tuštumos užpilamos užpildais ir jų mišiniais arba dirvožemiu, kuriame sėjama žolė. Betoninio geokorio dangos gniuždymo stipris turėtų būti ≥ 35 MPa. Betoninio geokorio danga taip pat išskaidoma į du tipus: tinklelių bei griovelių. Tinklelių danga turi plokščią paviršių, tad įrengus sudaro ištisinį betono raštą. Tuo tarpu griovelių danga pasižymi netolygiu paviršiumi, tačiau ją įrengus žolė atrodo vientisa (žr. 1.5 pav.).



1.5 pav. (a), (b), (c) – geokorio tinklelių danga; (d) – geokorio griovelių danga (icpi, 2020)

Plastikinė geokorio danga susideda iš plastikinių elementų, leidžiančių vandeniui prasiskverbti per didelius tarpus, kurie yra užpildyti dirvožemiu ir apsodinami žole arba siekiant padidinti infiltraciją užpildomi smėliu arba žvyru. Plastikiniame geokorio dangoje oro tuštymių kiekis sudaro 90–98 %. Iki šiol nėra įteisintų visuotinai taikytinų standartų bei reikalavimų plastikinei geokorio dangai. Tačiau tyrėjai numato, jog tuščia plastikinės dangos laikomoji geba yra 13,8 MPa, o užpildžius ją medžiagomis laikomoji geba gali padidėti iki 38 MPa (Kumar, 2014).

Mokslinėje literatūroje pastebima, kad projektuojant vandeniui pralaidžias dangas atsižvelgiama į skirtingus faktorius, tokius kaip:

- kelio reikšmė;
- kelio kategorija;

- kelio geometriniai parametrai;
- kritulių kiekis.

Vieni mokslininkai yra linkę teigti, kad vandens kaupimasis ant kelio dangos pradeda formuotis važiuojant didesniu nei 80 km/h greičiu, dėl to racionaliausia vandeniui pralaidžias dangas rengti greitkeluose arba magistralėse (Chatfield et al., 1979; Sanz Garcia et al., 2021). Tuo tarpu kiti mokslininkai teigia atvirkščiai. Jų nuomone optimaliausia vandeniui pralaidžias dangas yra įrengti gatvėse ir keliuose, kuriuose pagrindė važiuoja lengvosios transporto priemonės ne didesniu kaip 90 km/h greičiu arba pėsčiųjų takuose (Eisenberg et al., 2015; Weiss et al., 2019; A.P. Drake et al., 2013; Kuruppu et al., 2019).

Tyrėjai savo moksliniuose darbuose išskiria vandeniui pralaidžios dangos privalumus bei trūkumus, kurie apibendrintai pateikiami 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. Vandeniui pralaidžių dangų privalumai ir trūkumai (W. R. Selbig & Buer, 2018; Weiss et al., 2019)

Privalumai	Trūkumai
Padidina atsparumą slydimui	Papildomos išlaidos priežiūrai
Teršalų sulaikymas, kas pagerina gruntinio vandens kokybę	Galimas požeminio vandens užteršimas
Žiemos metu reikalingas mažesnis druskos kiekis susidariusio ledo ištirpdimui	Įrengimo apribojimai poringoms asfalto dangoms
Skatina spartesnį sniego ir ledo tirpimą	Trumpesnis eksploatacinis laikotarpis
Sumažina purslojimo ir teškenimo efektą	

M. M. Yu ir kiti mokslininkai (2017) atlikę tyrimą pateikė išvadą, kad poringo asfalto dangos įrengimas veiksmingas mieste, kadangi gali pagerinti paviršinio vandens nuvedimą, reguliuoti liūčių metu susikaupusi vandenį bei išspręsti paviršinio vandens valymą. O Maochuan'o Hu ir kitų mokslininkų (2018) straipsnyje pateikė tyrimo metu pastebėtą išvadą, kad poringo asfalto danga gali sumažinti 1–40 % paviršinio nuotėkio, o esant didžiausiam paviršinių nuotekų srautui 7–43 %, kuomet 12 valandų tęsiasi liūtis ir iškrenta 113,9 mm kritulių.

Atlikus tinkamas vandeniui pralaidžių asfalto dangų modifikacijas, kitų autorių atliktų tyrimų rezultatai rodo teigiamus rezultatus norint pagerinti teršalų slopinimą (žr. 1.2 lentelę) (Kuruppu et al., 2019).

1.2 lentelė. Vandeniui pralaidžių asfalto dangų modifikacijos, teršalų slopinimui) (Kuruppu et al., 2019)

Modifikacija	Rezultatas	Autoriai
Išlaikomos laisvesnės struktūros, didesnės drėgmės ir didesnio bendro organinės anglies kiekio savybės	Pagerėja angliavandenių pašalinimas	Fan et al., 2014
Rhodococcus erythropolis T902.1 (angliavandenių ardančios bakterijų padermės) bioplėvelės tvirtinimas	Pagerėja angliavandenių pašalinimas	Masy et al., 2016

Modifikacija	Rezultatas	Autoriai
Glifosato turinčių herbicidų (GCH) pridėjimas	Didesnės GCH koncentracijos gali palaikyti biologinio skilimo procesus, tačiau maža GCH koncentracija (72 mg/L) neturi jokios įtakos biologinio skaidymosi procesams	Mbanaso et al., 2013
Geotekstilė	Pagerina vandens filtravimo ir biologinio skaidymo procesą	Newman et al., 2002; Nnadi et al., 2014; Novo et al., 2013

Taip pat pastebima, jog vandeniui pralaidžios dangos gali pagerinti atsparumą slydimui, taip užtikrinamos didesnį sukibimą tarp dangos ir rato (Weiss et al., 2019).

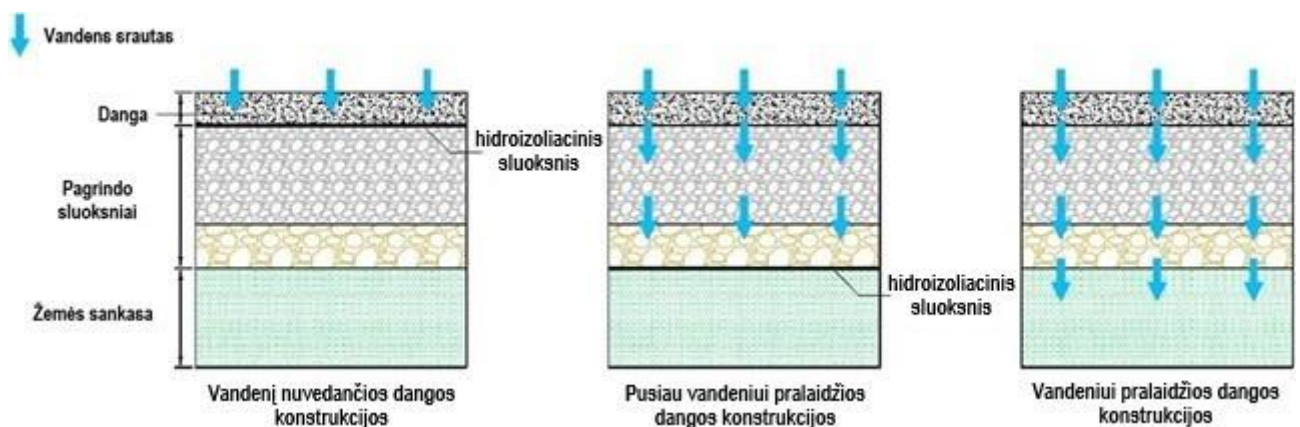
1.2. Vandeniui pralaidžių dangos konstrukcijų projektavimo principai ir Lietuvos klimatinės sąlygos

Šalyse, kuriose vyrauja šaltas klimatas įrengiant vandeniui pralaidžias dangas, turi būti papildomai atsižvelgiama į (K. Zhang & Kevern, 2021):

1. įšalo gylį ir požeminio grunto šalčio banga;
2. medžiagų atsparumą užšalimui ir atšilimui;
3. dangų priežiūrą žiemos metu;
4. galimą dangos būklės blogėjimą dėl sniego valytuvų arba transporto priemonių dygliuotų padangų poveikio.

Visos vandeniui pralaidžios dangos konstrukcijos skirstomos į (Bruinsma et al., 2017; Eisenberg et al., 2015; Kuruppu et al., 2019; Zhu et al., 2021) (žr. 1.6 pav.):

- vandenį nuvedančias dangos konstrukcijas;
- pusiau vandeniui pralaidžias dangos konstrukcijas;
- vandeniui pralaidžias dangos konstrukcijas.

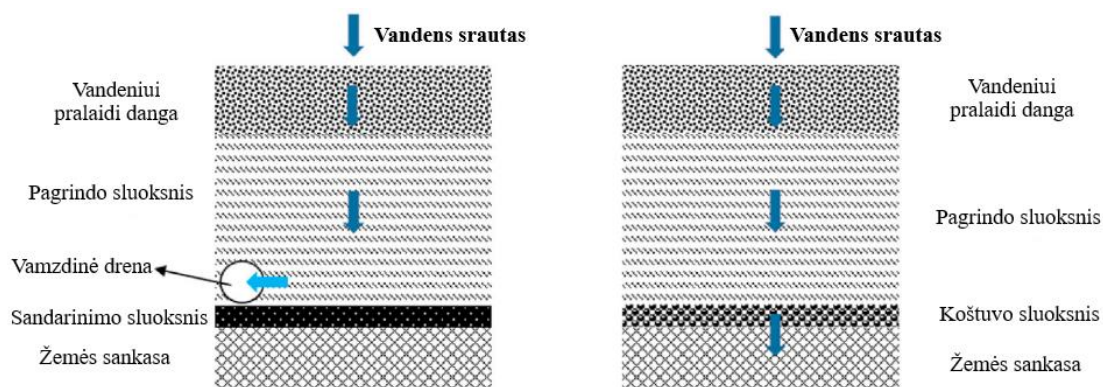


1.6 pav. Vandeniui pralaidžios dangos klasifikavimas pagal konstrukciją (Zhu et al., 2021)

Vandenį nuvedančiose dangų konstrukcijose, vandeniui pralaidus sluoksnis yra tik viršutinis dangos sluoksnis. Todėl tokiose dangos konstrukcijose viršutinis dangos sluoksnis yra atskirtas hidroizoliaciniu sluoksniu. Taip pat, tokios dangos konstrukcijos naudojamos greitkeluose ir magistralėse. Pusiau vandeniui pralaidžiose dangos konstrukcijose danga ir pagrindo sluoksniai yra vandeniui pralaidūs. Tačiau prasiskverbęs vanduo negali išfiltruoti į žemės sankasą, nes dangos konstrukcijos sluoksniai yra atskirti hidroizoliaciniu sluoksniu nuo žemės sankasa. Šios dangos konstrukcijos dažnai naudojamos rajoniniuose arba vietinės reikšmės keliuose, taip pat automobilių stovėjimo aikštelėse. Pilnai vandeniui pralaidžios dangos konstrukcijos yra ypatingos tuo, kad visi dangos konstrukcijos sluoksniai yra vandeniui pralaidūs ir prasiskverbęs vanduo gali išfiltruoti į žemės sankasą. Pažymėtina, kad tokios konstrukcijos dangos dažnai naudojamos pėsčiųjų ir dviračių takams ir aikštėse (Zhu et al., 2021).

Pažymėtina, jog būtų tinkamai užtikrintas vandens pralaidumas žemės sankasoje vandeniui pralaidžių dangų konstrukcijoje, žemės sankasa turi būti sutankinta iki 93 % (Jones et al., 2010) arba kuo įmanoma labiau išlaikyti galima nesutankinta būklę (Eisenberg et al., 2015).

Vandeniui pralaidžios dangos konstrukcijos leidžia subalansuoti hidrologinio ciklo procesą, sumažina akvaplavinimą, sumažina drenavimo surinkimo sistemų poreikį ir pagerina sukibimą tarp padangos ir dangos (Saadeh et al., 2019). Todėl tolesniame tyrimo procedūrose bus taikoma vandeniui pralaidžios dangos konstrukcija.



1.7 pav. Vandeniui pralaidžių dangų konstrukcijos (Guan et al., 2021)

Pagal pateiktą 1.7 paveikslą galima matyti, jog vandeniui pralaidžių dangų konstrukcijos gali būti dviejų tipu:

1. pridedama neaustinės geotekstilės audinys, kad rezervuaro dugnas būtų atskirtas nuo žemės sankasos bei įrengiant dalinį perforacijos vamzdį, išleisti perpildytą paviršinių vandenį į centralizuotas paviršinių nuotekų tvarkymo sistemas;

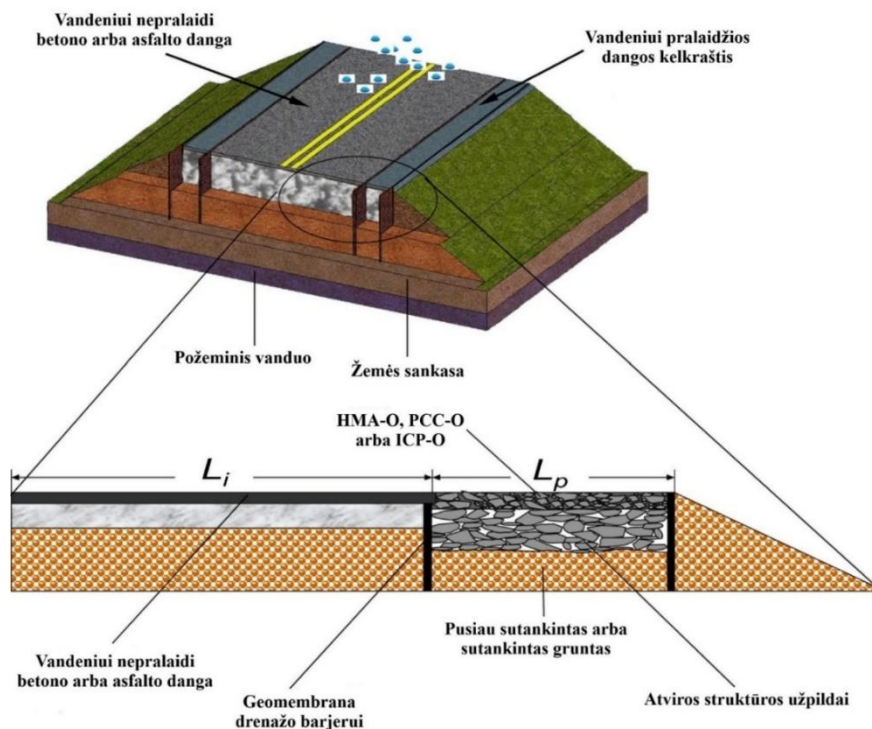
2. neatskiriamas rezervuaro dugnas bei visos paviršinės nuotekos skverbiasi pro žemės sankasą į gruntinio vandens sluoksnį, kol pasiekia požeminio vandens sluoksnį.

Vandeniui pralaidžiose dangų konstrukcijose sluoksniai yra vandeniui pralaidūs, todėl projektuojant yra įrengiamos ne vien vandeniui pralaidžios dangos, kurios turi atitikti ASTM Nr. 57 (grudelių dydis nuo 4,75 mm iki 37,5 mm) reikalavimui, tačiau ir pagrindo sluoksniai turi būti atviros struktūros, kad vanduo galėtų laisvai prasiskverbti pro juos. Tipinės vandeniui pralaidžios dangos konstrukcijos pagrindo sluoksniai pasiskirsto taip, kad viršutinis pagrindo sluoksnis susideda iš smulkių atviros struktūros užpildų, o jau apatiniame pagrindo sluoksnyje yra projektuojami stambūs atviros struktūros užpildai, leidžiantys greičiau prasiskverbti vandeniui. Įprastai įrengiant dangos konstrukcijos žemės sankasą yra atliekami sutankinimo darbai. Tačiau atsižvelgus į mokslinius straipsnius galima teigti, kad vandeniui pralaidžiose dangų konstrukcijose žemės sankasa nėra sutankinama arba sutankinimo lygis yra lengvas, retais atvejais vidutinis.

Taip pat reikėtų atsižvelgti ir į tai, kad kol kas nėra daug duomenų dėl vandeniui pralaidžios asfalto dangos įrengimo magistralėse ir greitkeliuose, tačiau yra mokslininkų, kurie teigia, jog būtent šiose taikymo vietose turėtų būti taikomos šios dangos. Todėl yra pasiūlyta alternatyva, leidžianti surinkti perteklinį vandenį tokiose kelių kategorijose – tai vandeniui pralaidžios dangos konstrukcijos kelkraščių įrengimas (žr. 1.8 pav.). Tokiame sprendinyje dažniausiai dangos gali būti iš:

- atviros struktūros karšto asfalto mišinio (angl. *open-graded hot-mix asphalt, HMA-O*), minimalus šios dangos storis – 2,6 cm, tačiau praktikoje dažniausiai priimamas 5–5,5 cm;
- atviros struktūros portlandcemenčio betono mišinio (angl. *open-graded portland cement concrete, PCC-O*) minimalus šios dangos storis – 2,8 cm, tačiau mokslininkai savo skaičiavimuose priima 14,3 cm, kadangi numato šį sluoksnį kaip bendrą dangos konstrukciją;
- atviros struktūros betono trinkelio (angl. *open-graded interlocking concrete pavement, ICP-O*).

Kadangi naudojant PCC-O priimama, jog tai dangos konstrukcija, tai projektuojant dangą su HMA-O, numatomas pagrindo sluoksnis – PCC-O su numatomu 10 cm sluoksniu (Jones et al., 2010; Hui Li et al., 2012; Saadeh et al., 2019).



1.8 pav. Vandeniui pralaidžios dangos konstrukcijos kelkraštis (Kayhanian et al., 2019)

Kadangi tolimesniame tyrime bus nagrinėjama vandeniui pralaidžios dangos konstrukcijos, reiktų nepamiršti palyginti šias dangos konstrukcijas su įprastomis. (Kayhanian et al., 2019) savo moksliniame darbe atliko šių dviejų dangų tipų palyginimą (žr. 1.3 lentelė), kurio rezultatas rodo, kad vandeniui pralaidžios dangos turi daug pliusų ir teigiamą poveikį tvarumui.

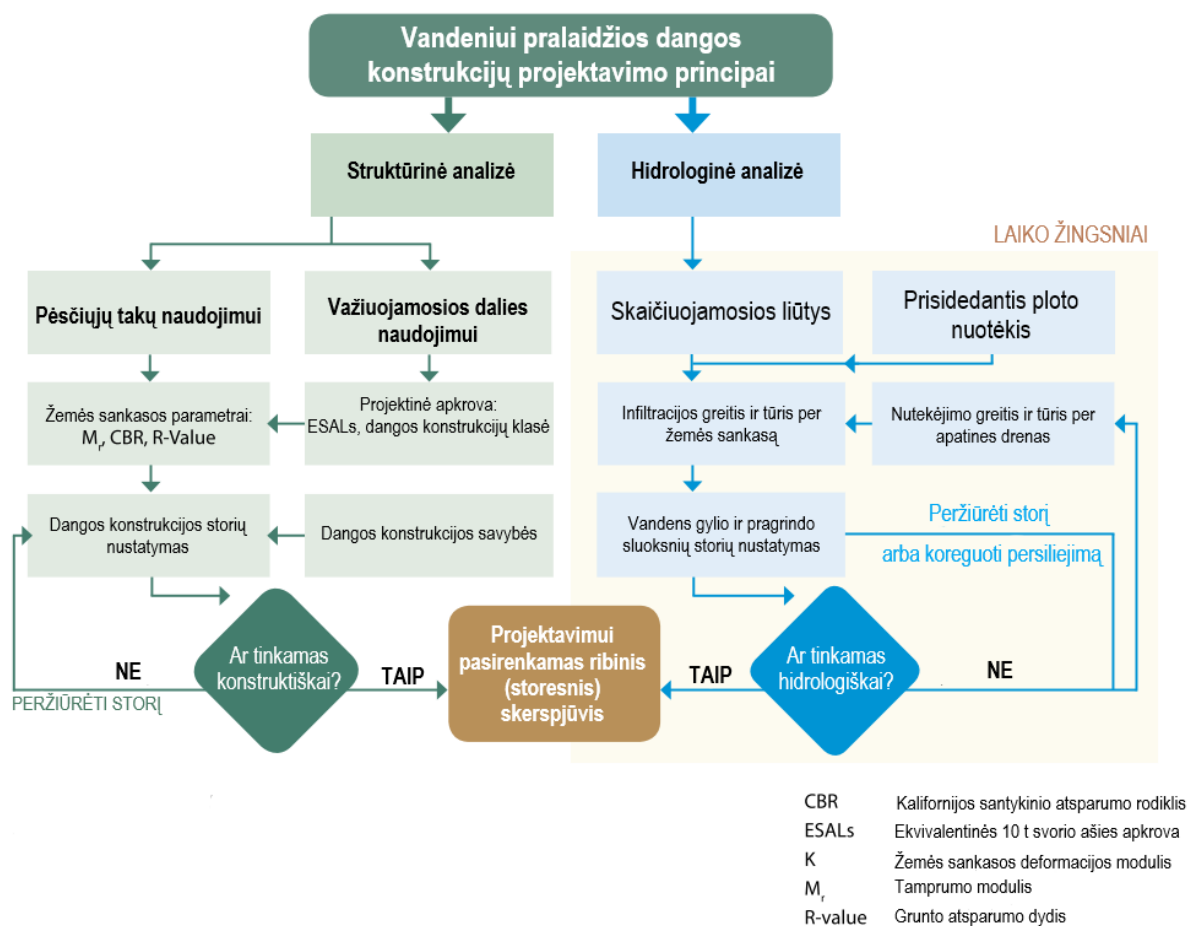
1.3 lentelė. Vandeniui pralaidžių ir įprastų vandeniui nepralaidžių dangų palyginimas (Kayhanian et al., 2019)

Kriterijus	Poveikio veiksnys	Vandeniui pralaidi danga	Įprasta nepralaidi danga
Konstrukcija	Laikomoji geba	Nedidelė	Didelė
Hidrologija	Vertikalus pralaidumas	Didelis	Žemas
	Vandens akumuliacija	Didelis	Žema
	Vandens kaupimasis dangos paviršiuje	Nedidelis	Didelis
Aplinkosauga	Taršos lygis	Nedidelis	Didelis
	Triukšmo lygis	Nedidelis ^{a)}	Didelis
	Albedo rodiklis	Vidutinis	Didelis
Energija	Įrengimo kaina	Vidutinė / didelė ^{b)}	Nedidelė
Ekonomika	Įrengimo kaina	Vidutinė / didelė ^{b)}	Nedidelė

Pastabos:
^{a)} – poringojo betono danga skleis didesnę triukšmo dažnį nei poringojo asfalto;
^{b)} – pagal gyvavimo ciklo sąnaudų analizę dangos konstrukcijos įrengimo kaina gali būti didesnė, bet bendra dangos eksploataavimo trukmė maža.

Norint tinkamai suprojektuoti vandeniui pralaidžią dangos konstrukciją turi būti atlikta struktūrinė ir hidrologinė analizė. Tai užtikrina, kad projektuojama vandeniui pralaidi danga

konstrukcija yra ne tik reikiamos laikomosios gebos, bet ir užtikrina, kad paviršinis vanduo, pratekantis pro vandeniui pralaidžią dangą, nesusikauptų viename iš dangos konstrukcijos sluoksnių dėl perpildyto rezervuaro ir galėtų nudrenuoti iki žemės sankasos. Atliekant hidrologinę analizę nustatomas reikiamas vandeniui pralaidžios dangos konstrukcijos storis, kuris reikalingas užtikrinti paviršinio nuotėkio kaupimą (absorbavimą) esant momentiniam lietai arba liūtims. Nustatytas dangos konstrukcijos storis yra lyginamas su struktūrinės analizės metu apskaičiuotu dangos konstrukcijos storiu bei priimamas tas variantas, kurio didesnis dangos konstrukcijos storis. Nagrinėjant mokslinius straipsnius pastebėta, kad mokslininkai savo tiriamosiose darbuose dažnai mini B. Eisenberg ir kt. (2015) vandeniui pralaidžios dangos konstrukcijų projektavimo principus pavaizduotus 1.9 paveiksle.



1.9 pav. Vandeniui pralaidžios dangos konstrukcijų projektavimo principai (Eisenberg et al., 2015)

Moksliniuose straipsniuose pastebima, jog hidrologinis projektavimas skirtingoms vandeniui pralaidžių dangų tipams yra vienodas, tačiau Peter'is Weiss'as ir kiti mokslininkai (2019) moksliniame straipsnyje pateikia galimas skirtingas metodikas: poringajam asfaltui, poringajam betonui bei trinkelėjų arba plokščių dangai. Vandeniui pralaidžios dangos projektuojamos taip, kad

per suprojektuotą laiką galėtų pratekėti projektinis paviršinių nuotekų tūris. Todėl projektuojant vandeniui pralaidžias dangas būtina atsižvelgti į žemės sankasos gebą absorbuoti vandenį.

Pradedant projektuoti vandeniui pralaidžias asfalto dangas pagrindinis hidrologinio projektavimo tikslas yra nustatyti didžiausią paviršinių nuotekų srautą racionaliuoju metodu (angl. *Rational method*) (K. Zhang & Kevern, 2021). Racionaliuoju metodu didžiausias nuotėkio srautas apskaičiuojamas pagal Michael'o Leming'o ir kt. 2007 ir P. Weiss'o ir kt. 2019 pateiktą 1 formulę:

$$Q = H \cdot C \cdot i \cdot A, \quad (1)$$

čia Q – didžiausias nuotėkio srautas nuo nutekančio baseino paviršiaus vandens srauto, m^3/s ; C – paviršinio nuotėkio srauto koeficientas paviršiui (nuo 0 iki 1,0); i – lietaus kritulių intensyvumas, cm/h ; A – nuotėkio baseino plotas (hektaras, aras), m^2 ; H – konvertavimo skaičius, 0,0278.

Mokslininkai nesutaria dėl racionalaus metodo naudojimo, kadangi NAPA (2008) teigė, kad šis metodas nerekomenduotinas pralaidžių dangų analizei, tačiau M. Leming'as ir kiti (2007) bei Kun Zhang'as ir John'as Kevern'as (2021) moksliniuose straipsniuose aprašo apie racionalaus metodo svarbą bei galimybę nustatyti didžiausią paviršinio nuotėkio greitį, jog projektuotojas galėtų nustatyti ar įrengus vandeniui pralaidžią dangą paviršinis vanduo susikaupęs ant dangos paviršiaus spės prasiskverbti.

Taip pat didžiausią paviršinių nuotekų srautą galima apskaičiuoti nustatant lietaus nuotėkio gylį kreivės numerio metodu (angl. *Curve Number method*) pagal 2 formulę. Šis storis užtikrina, kad suprojektuotas rezervuaras turės pakankamą storį ir talpą laikinai sulaikyti paviršines nuotekas (Leming et al., 2007; NAPA, 2008; K. Zhang & Kevern, 2021).

$$Q = \frac{(P-0,2 \cdot S)^2}{(P+0,8 \cdot S)}, \quad (2)$$

čia Q – paviršinio nuotėkio gylis, cm ; P – kritulių kiekio gylis, cm ; S – maksimali nuotėkio baseino saugykla nuo paviršinio nuotėkio pradžios, cm . S reikšmė gali būti determinuota į $S = K \cdot \frac{1000}{CN} - 10$, kur $K = 2,54$ cm (Weiss et al., 2019).

Teigiama, kad projektavimas hidrologiniu atžvilgiu yra skirtas įvertinti laiką, kuris skaičiuojamas susikaupusioms paviršinėms nuotekoms nutėkėjus nuo skaldos arba žvyro pagrindo sluoksnio į žemės sankasą. Įvertinus, projektuojama vandeniui pralaidi danga, kurį galėtų atkurti pajėgumą iškritusiems krituliams. Laisvojo paviršiaus slūgio laikas, kuris rekomenduojamas nuo 12 val. iki 72 val., gali būti nustatomas pagal prisotinto srauto teoriją arba neišotinto srauto teoriją dirvožemyje. Jei žemės sankasos pralaidumas yra žemas, tai vanduo į gruntą skverbiasi daug ilgiau. Todėl yra projektuojami ir įrengiami drenažo vamzdžiai, kurie naudojami kontroliuoti vandens kiekį vandenį nuvedančiose dangos konstrukcijose bei pusiau vandeniui pralaidžiose dangos konstrukcijose. Taip pat pastebėta, jog vidutinių platumų klimato zonoje drenažo vamzdžių įrengimas

vandeniui pralaidžiose dangose gali sumažinti tikimybę dangos konstrukcijos prisotinimui vandeniui ir jautrumui užšalimui ir atšilimui (K. Zhang & Kevern, 2021).

Taip pat, vandeniui pralaidžioms asfalto dangoms NAPA (2008) pateikia hidrologinio projektavimo rekomendacijas:

1. prieš pradėdant projektuoti, reikia tinkamai ištirti gruntus (apie tai plačiau aprašoma NAPA (2008));
2. mažiausias gylis iki uolienos arba pakilusio vandens lygio metu turėtų būti didesnis nei 0,60 m;
3. žemės sankasos apatinė dalis turi būti plokščia norint maksimaliai padidinti infiltracijos plotą;
4. didžiausias dangos sluoksnio nuolydis turi būti 5 %. Esant didesnei įkalnei įrengiama pakopa;
5. didžiausias ploto santykis tarp nelaidaus ir laidaus sluoksnio ploto – 5:1.

Atliekant hidrologinę analizę vandeniui pralaidžioms betono dangų konstrukcijai galima naudoti jau prieš tai išvardintus metodus (racionalųjį metodą arba kreivės numerio metodą). Taip pat šių dangos konstrukcijų hidrologinę analizę gali būti atliekama kompiuterine programa *PerviousPave*, kuri yra pagrįsta Los Andželo metodu. Minima kompiuterine programa iškart atliekama struktūrinė ir hidrologinė analizė, kurioje poringojo betono dangos sluoksnis parenkamas pagal konstrukcijos analizę, o pagrindo sluoksnis reguliuojamas tol, kol visa dangos konstrukcija sulaikys projekcinį vandens tūrį (Weiss et al., 2019).

P. Weiss'as ir kiti mokslininkai (2019) straipsnyje rašo, kad vandeniui pralaidžioms dangoms atliekant hidrologinę analizę tikslinga būtų papildomai apskaičiuoti maksimalų leistiną paviršinių nuotekų saugojimo laiką. Taip būtų užtikrinta, jog pagrindo sluoksnis nebus per ilgai prisotintas vandeniui. Pagal 3 formulę galima apskaičiuoti ir nustatyti didžiausią leistiną pagrindo sluoksnio arba žemės sankasos gylį (Smith, 2011):

$$d_{max} = \frac{f \cdot T_s}{V_r}, \quad (3)$$

čia d_{max} – didžiausias pagrindo sluoksnio arba žemės sankasos gylis; f – galutinis įsisunkimo greitis į žemės sankasą; T_s – maksimalus rezervuaro trukmė; V_r – pagrindo sluoksnio ir žemės sankasos oro tuštumos santykis (įprastai priimamas 0,4).

Deividas R. Smith'as (2011) knygoje aprašė savo išvestas dvi lygtis, skirtas sistemoms, kuriose nėra numatomas vamzdinių drenų įrengimas. 4 lygtis įvertina paviršinių nuotekų įsisunkimo greitį, kritulių kiekį ir įsisunkimu per vandeniui pralaidžią dangos konstrukciją, o 5 lygtis grindžiama dangos geometrija.

$$A_p = \frac{\Delta Q_c \cdot A_c}{V_r \cdot d_p - P + f \cdot T}, \quad (4)$$

$$d_p = \frac{\Delta Q_c \cdot R + P - f \cdot T}{V_r}, \quad (5)$$

čia A_p – horizontalus vandeniui pralaidžios dangos paviršiaus plotas; DQ_c – paviršinės nuotekos esančios vandens baseino, tekantis ant vandeniui pralaidžios dangos gylis; A_c – vandens baseino plotas; V_r – skaldos pagrindo sluoksnio ir žemės sankasos oro tuštumos santykis (įprastai priimama 0,4 reikšmė); d_p – skaldos pagrindo sluoksnio ir žemės sankasos gylis; R – papildomo ploto ir vandeniui pralaidžios dangos ploto santykis; P – projektinis liūtis nuotėkio gylis; f – galutinis įsisunkimo greitis į žemės sankasą; T – efektyvus pagrindo sluoksnio ir žemės sankasos užpildymo laikas.

Be tinkamo hidrologinio suprojektavimo turi būti tinkamas struktūrinis suprojektavimas. NAPA (2008) rekomendacijų vadove ir B. Eisenberg ir kitų mokslininkų (2015) gairėse patariama, kad po poringojo asfalto mišinio dangos sluoksniu būtų įrengiamas vandeniui pralaidus asfalto pagrindo sluoksnis (angl. *asphalt-treated permeable base*, ATPB) vyraujant sunkiojo transporto apkrovoms arba išlyginamasis (stabilizuojantis) pagrindo sluoksnis be rišiklių (angl. *Choker course*), o po juo vandeniui pralaidus pagrindo sluoksnis be rišiklių, užtikrinantis pratekėjusio vandens akumuliaciją dangos konstrukcijoje. NAPA (2008) mokslininkai teigia, kad išlyginamojo (stabilizuojantis) pagrindo sluoksnio be rišiklių optimalus storis – 2,5 cm. Be to, šie mokslininkai atlikę eksperimentus nustatė siūlomus asfalto dangos storį, priklausomai nuo eismo intensyvumo:

- stovėjimo aikštelėse, kuomet nėra numatomas krovinio transporto eismas – 6,0 cm;
- gyvenviečių gatvėse, kuomet yra nedidelis krovinio transporto eismas – 10,0 cm;
- kai numatomas intensyvus krovinio transporto eismas – 15,0 cm.

Dažniausiai poringojo asfalto konstrukcijos vadovaujantis Amerikos valstybinių greitkelių ir transporto pareigūnų asociacijos (angl. *The American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*) dangų konstrukcijų projektavimo gairėmis. AASHTO 1993 aprašomas dangos konstrukcijos projektavimo metodas, kuris pateiktas 6 lygtyje:

$$\log W = Z_R \cdot S_0 + 9,36 \cdot \log(SN + 1) - 0,02 + \frac{\log\left[\frac{P_i - P_t}{P_t - 1,5}\right]}{0,4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5,19}}} + 2,32 \cdot \log(0,145 \cdot M_R) - 8,07, \quad (6)$$

čia W – projektinė eismo apkrova išreikšta ekvivalentinių standartinių (10 t svorio) ašių apkrova bendroje sumoje (ESAs (angl. *equivalent single axle loads (ESALs)*)); Z_R – standartinis normalus nuokrypis su patikimumo lygiu R ; S_0 – standartinis nuokrypis; SN – dangos konstrukcijos numeris, kuris apskaičiuojamas $SN = \sum a_i \cdot d_i$, kur a_i – konstrukcinis sluoksnio koeficientas, d_i – sluoksnio storis; P_i – pradinis tinkamumas; P_t – galutinis tinkamumas; M_R – pagrindo atsparumo modulis, kPa.

Patikimumo lygis R , dar vadinamas saugumo lygiu, o projektuojant turi būti atsižvelgiama, jog projektuojama danga gali netenkinti numatyto eksploataavimo laikotarpio, todėl pasirinkus didesnę reikšmę, numatoma, jog projektuojama danga bus tvirtesnė. Įprastai koeficientai yra išskirstomi taip:

- labai svarbiems objektams su dideliu eismo intensyvumu priskiriamas didesnis nei 95 % patikimumo koeficientas;
- mažo eismo intensyvumo keliams < 75 % patikimumo koeficientas;
- vandeniui pralaidžios dangos konstrukcijos kelkraščiui priskiriamas 80 % patikimumo koeficientas.

Standartinis nuokrypis nustatomas pagal dimensiją, kuri yra susijusi su projektavimu ir konstrukcija, taip pat medžiagų savybėmis, žemės sankasa, eismu ir aplinkos poveikiu. Įprastai standartinis nuokrypis yra priimamas – 0,13 m.

Dangos konstrukcijos numeris, nurodo dangos pjūvio stiprumą. Kuo didesnis dangos konstrukcijos numeris, tuo stipresnė dangos konstrukcija. Konstrukcijos sluoksnio koeficientas svyruoja nuo 0,06 nesurištajam pagrindo sluoksniui iki 0,44 surištiems sluoksniams. NAPA (2008) taip pat pateikia rekomenduotinus vandeniui pralaidžios asfalto dangos sluoksnio koeficientus:

- poringasis asfaltas – 0,40–0,42;
- asfaltu apdorotas pralaidus pagrindo sluoksnis – 0,30–0,35;
- pagrindo sluoksnis be rišiklių – 0,1–0,14.

Tačiau ne visi mokslininkai sutinka su NAPA (2008) rekomenduotinu vandeniui pralaidžių asfalto dangų sluoksniui priskirtu koeficientu Pavyzdžiui D. K. Hein'as ir kiti mokslininkai (2013) poringajam asfaltui siūlo taikyti 0,2–0,3 koeficientą.

Pradinio tinkamumo kintamasis dar vadinamas PSI indeksu, kuris yra skirtas provėžų įvertinimui. Intensyvioms naujai suprojektuotai dangai tinkamumas yra nuo 4,1 iki 4,5. O galutinis tinkamumas – tai kintamasis, kuomet numatomas galutinis eksploataavimo laikotarpis ir įprastai intensyvių eismo kelių vertės svyruoja nuo 2,2 iki 3,2 (Weiss et al., 2019).

Taip pat struktūrinę analizę galima atlikti pasitelkus mechanistinį–empirinį projektavimo metodą, kurį detaliau aprašo Hui Li ir kiti (2012) ir AASHTO (1993). Pabrėžtina, kad vadovaujantis mechanistiniu–empiriniu projektavimo metodu buvo įrengta stovėjimo aikštelė (Li et al., 2012).

Projektuojant vandeniui pralaidžias asfalto dangas, vienas iš svarbiausių faktorių, turinčių įtakos pralaidumui vandeniui – kritulių kiekis. Kritulių kiekis – vandens sluoksnis susidarantis horizontaliame paviršiuje dėl kritulių, tokių kaip lietus, dulksna, sniegas ir pan., ant vandeniui nepralaidaus paviršiaus per tam tikrą laikotarpį. Iškritusių kritulių kiekis priklausomai nuo vietovės, t. y. vietovės geografinės padėties, reljefo, gretimai esančių vandens telkinių ir miškų, atstumo nuo jūros ir kt. Pažymėtina, jog Lietuvoje didžioji dalis metinio kritulių kiekio iškrenta šiltuoju metu laiku balandžio–spalio mėnesiais ir tai sudaro 64–72 % per metus iškrintančių kritulių kiekio.

Todėl projektuojant vandeniui pralaidžias dangas turi būti atsižvelgiama į per metus iškrentančių kritulių kiekį ir jų pasiskirstymą pagal mėnesius (Leonovič et al., 2014).

Kitas svarbus aspektas projektuojant vandeniui pralaidžias dangas – ultravioletinės spinduliuotės poveikis. Vandeniui pralaidžios dangos pasižymi ženkliai didesniu oro tuštymių kiekiu, todėl šių dangų bitumas sensta daug greičiau nei įprastų asfalto dangų. Saulės spinduliuotė – vientisas saulės skleidžiamas spinduliavimo srautas, kurio spektrą sudaro 5 % ultravioletinių spindulių ties Žemės atmosferos riba. Priežemio sluoksnyje ultravioletiniai spindulių spektras sudaro 1 % bendros spinduliuotės (Leonovič et al., 2014).

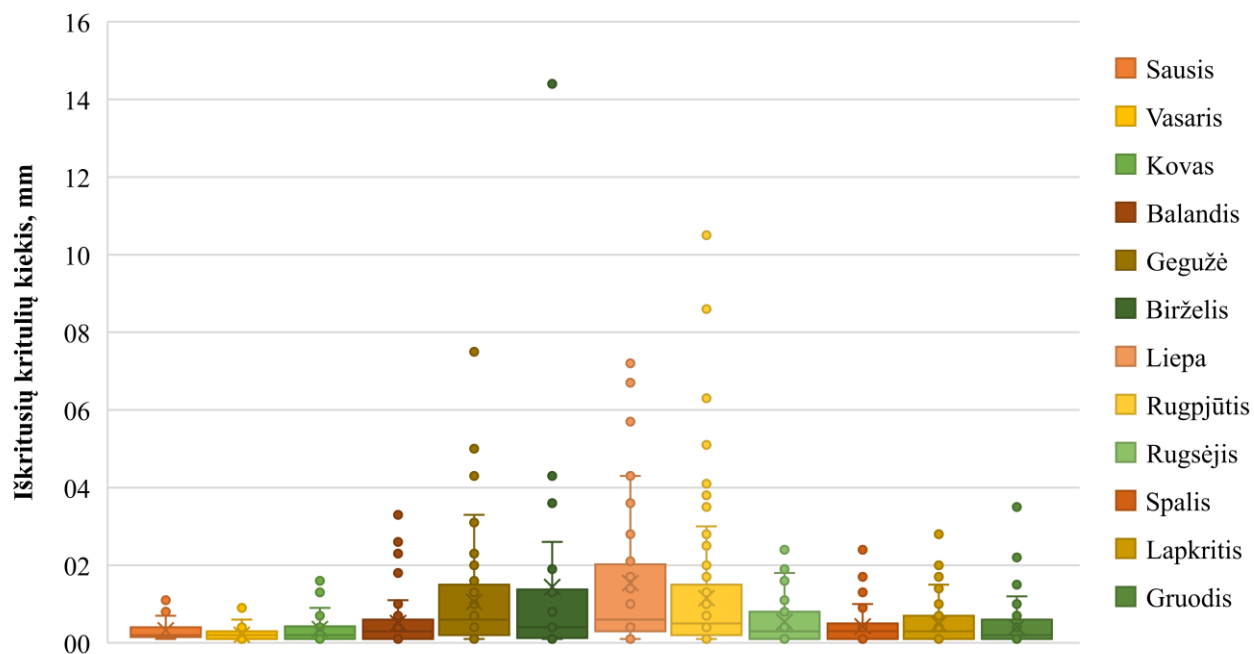
Siekiant įvertinti Lietuvos klimatinės sąlygas projektuojant vandeniui pralaidžias dangas, išanalizuoti Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos prie Aplinkos ministerijos Kauno meteorologijos stoties 2021 metų užfiksuoti duomenys:

- iškritusių kritulių kiekis (mm);
- ultravioletinės (A) spinduliuotės vidurkis (kW/m²).

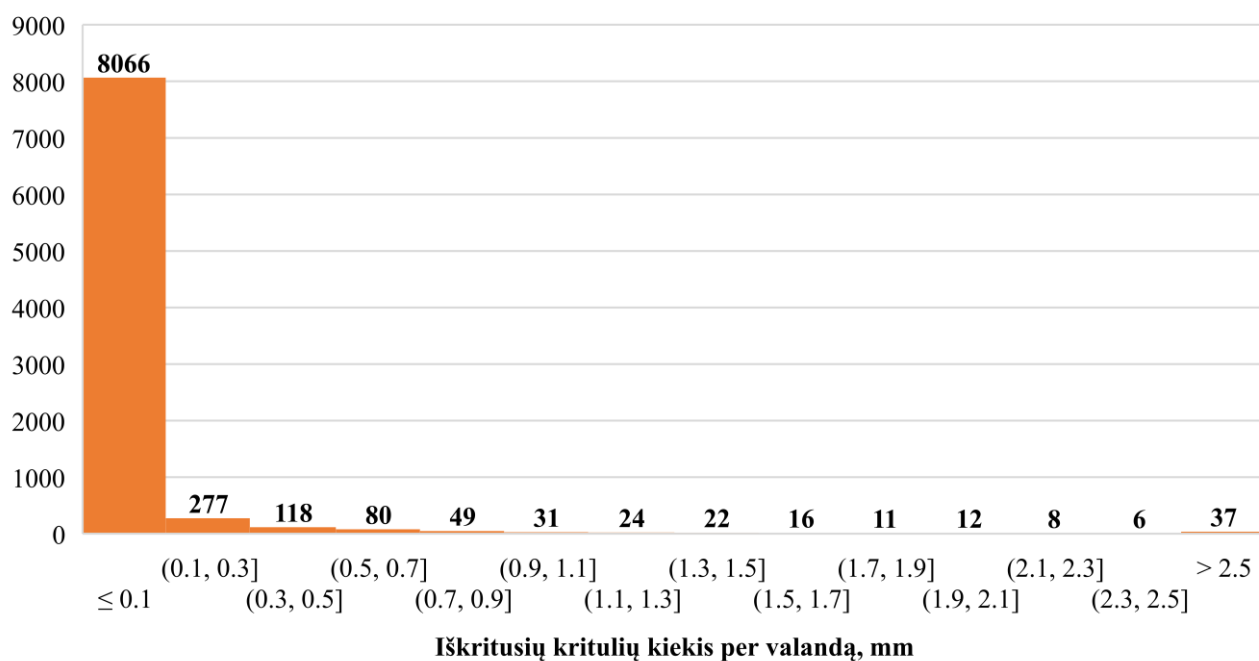
2021 metais kiekvieną mėnesį iškritęs bendras kritulių kiekis, vidurkis, maksimali ir minimali kritulių vertė, pateikta 1.4 lentelėje ir stačiakampėje diagramoje (žr. 1.10 pav.). Atlikus analizę, nustatyta, kad bendras 2021 metų iškritusių kritulių kiekis – 610,20 mm, daugiausiai kritulių iškrito gegužės mėn. – 121,70 mm ir rugpjūčio mėn. – 115,40 mm, o mažiausiai – vasario mėnesį, kuriame iškritusių kritulių kiekis siekė tik 12,30 mm. Kaip matyti iš 1.4 lentelės, liepos mėnesį buvo didžiausias iškritusių kritulių vidurkis, kuris siekė 1,54 mm. Didžiausios 2021 metų iškritusių kritulių kiekio vertės užfiksuotos birželio mėn. – 14,40 mm ir rugpjūčio mėn. – 10,50 mm (žr. 1.10 pav.). Išsiskiriančios vertės pažymėtos raudona spalva, kadangi jų vertės ženkliai didesnės už kitus mėnesius (žr. 1.4 lentelė).

1.4 lentelė. 2021 metų kiekvieno mėnesio iškritę krituliai

2021 metų kiekvieno mėnesio iškritę krituliai, mm				
Mėnesiai	Bendras kiekis	Vidurkis	Maksimali vertė	Minimali vertė
Sausis	53,30	0,32	1,30	0,10
Vasaris	12,30	0,21	0,90	0,10
Kovas	22,00	0,35	1,60	0,10
Balandis	33,70	0,51	3,30	0,10
Gegužė	121,70	1,06	7,50	0,10
Birželis	40,30	1,44	14,40	0,10
Liepa	55,50	1,54	7,20	0,10
Rugpjūtis	115,40	1,15	10,50	0,10
Rugsėjis	30,80	0,54	2,40	0,10
Spalis	27,80	0,42	2,40	0,10
Lapkritis	58,50	0,49	2,80	0,10
Gruodis	38,90	0,41	3,50	0,10
Iš viso:	610,20	0,70	14,40	0,10



1.10 pav. 2021 metais kiekvieną mėnesį iškritusių kritulių pasiskirstymas



1.11 pav. 2021 metų iškritusių kritulių kiekio dažnumas per valandą

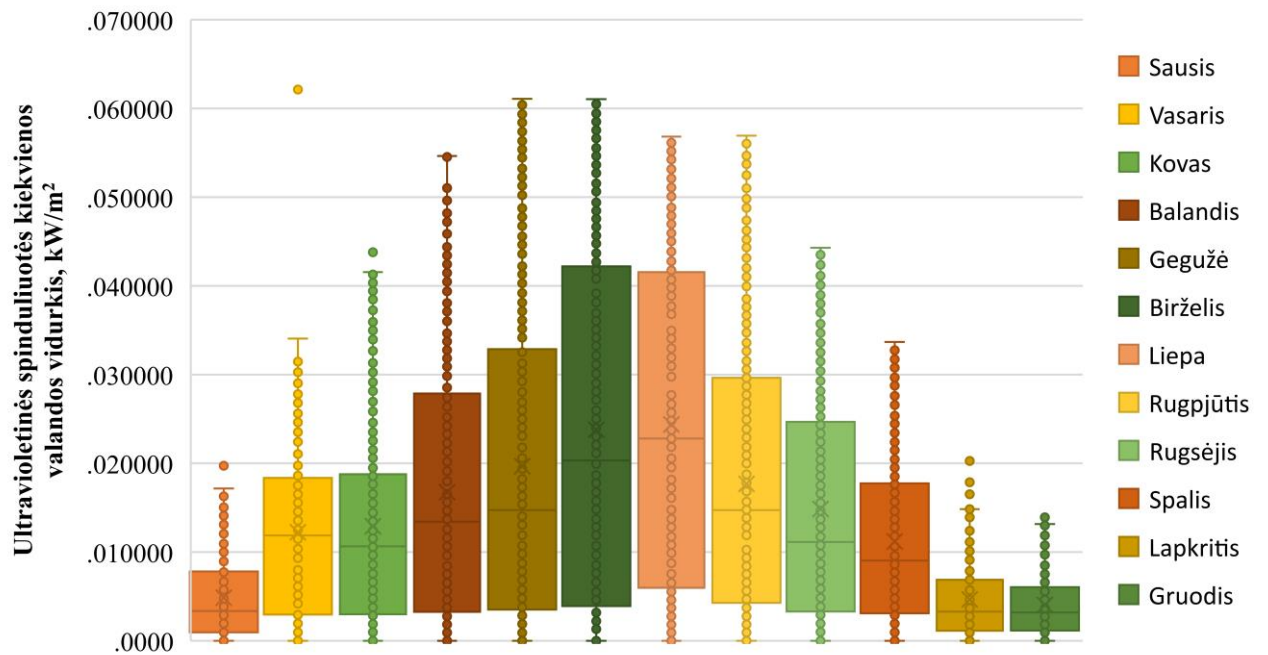
Remiantis 1.11 paveiksle pateiktais duomenimis, galima teigti, kad 2021 metais 8066 kartus per valandą iškritusių kritulių kiekis siekė iki 0,10 mm, 277 kartus per valandą iškrito kritulių nuo 0,11 mm iki 0,30 mm, o daugiau nei 2,5 mm per 2021 metus iškritusių kritulių siekė 37 kartus per valandą.

2021 metais kiekvieną mėnesį ultravioletinės (A) spinduliuotės (toliau - UVA) vidutinis bendras kiekis, vidurkis, maksimali ir minimali UVA vertė, pateikta 1.5 lentelėje ir stačiakampėje diagramoje (žr. 1.12 pav.). Atlikus analizę, nustatyta, kad bendras 2021 metų Žemės paviršių pasiekusios UVA kiekis – 76,35 kW/m² arba 7635 mW/m², didžiausias UVA kiekis Žemės paviršių pasiekė birželio mėn. – 13,97 kW/m² ir liepos mėn. – 13,09 kW/m², o mažiausiai – gruodžio mėnesį, kuriame Žemės paviršių UVA vidutiniškai pasiekė tik 1,05 kW/m². Didžiausios 2021 metų UVA vertės užfiksuotos vasario mėn. – 0,062 kW/m², gegužės mėn. ir birželio mėn. – 0,061 kW/m². Išsiskiriančios vertės pažymėtos raudona spalva, kadangi jų vertės ženkliai didesnės už kitus mėnesius (žr. 1.5 lentelė).

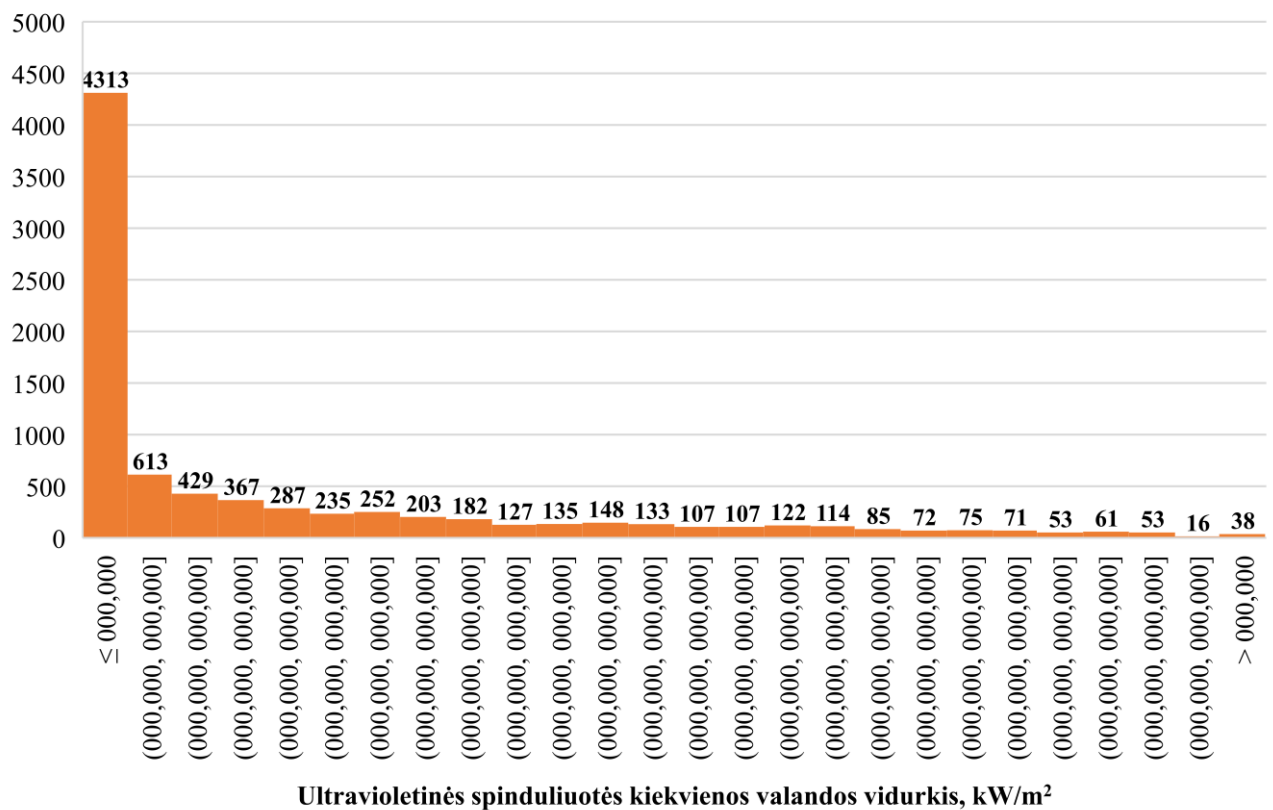
Remiantis 1.13 paveiksle pateiktais duomenimis, galima teigti, kad 2021 metais 4313 kartus per valandą Žemės paviršių UVA vidutiniškai siekė iki 0,0010 kW/m², 613 kartus per valandą UVA vidutiniškai siekė daugiau nei nuo 0,0010 kW/m² iki 0,0034 kW/m², o daugiau nei 0,57 kW/m² per 2021 metus Žemės paviršių UVA vidutiniškai pasiekė 38 kartus per valandą.

1.5 lentelė. 2021 metų kiekvieno mėnesio ultravioletinė spinduliuotės vidutinė reikšmė

2021 metų kiekvieno mėnesio ultravioletinė (A) spinduliuotės vidutinė reikšmė, kW/m ²				
Mėnesiai	Bendras kiekis	Vidurkis	Maksimali vertė	Minimali vertė
Sausis	1,201995	0,004866	0,019730	0,000006
Vasaris	2,695442	0,012252	0,062140	0,000005
Kovas	5,393873	0,012904	0,043800	0,000005
Balandis	7,922058	0,016749	0,054650	0,000006
Gegužė	11,115979	0,019674	0,061090	0,000001
Birželis	13,966497	0,023793	0,061050	0,000001
Liepa	13,094380	0,024384	0,056820	0,000001
Rugpjūtis	8,581254	0,017693	0,056940	0,000001
Rugsėjis	6,094882	0,014866	0,044300	0,000001
Spalis	3,928837	0,011193	0,033690	0,000001
Lapkritis	1,301352	0,004664	0,020610	0,000001
Gruodis	1,049172	0,004051	0,013930	0,000001
Iš viso:	76,345721	0,013924	0,062140	0,000001



1.12 pav. 2021 metais kiekvieną mėnesį Žemės paviršių pasiekusios ultravioletinės spinduliuotės pasiskirstymas



1.13 pav. 2021 metų ultravioletinės spinduliuotės vidurkio dažnumas per valandą

1.3. Vandeniui pralaidžių asfalto dangų funkcionavimas

B. Eisenberg ir kitų mokslininkų (2015) gairėse pateikia teorines poringojo asfalto specifikacijas, kurios pateiktos 1.6 lentelėje. Vadovaujantis pateiktomis teorinėmis poringojo asfalto specifikacijomis bei kitų mokslininkų atliktais eksperimentais galima bus palyginti ir nustatyti tinkamą vandeniui pralaidžių asfalto dangos konstrukcijos sudėtį.

1.6 lentelė. Teorinės poringojo asfalto specifikacijos (Eisenberg et al., 2015)

Užpildai	
Sietų akučių dydis, mm	Masės procentas, %
19	100
12,5	85–100
9,5	55–75
4,75	10–25
2,36	5–10
0,075	2–4
Asfalto mišinio rišiklis ir stabilizuojantis priedas	
Asfalto mišinio rišiklio kiekis (AASHTO T164)	6–6,5 %
Stabilizuojančio priedo kiekis pagal bendrą mišinio masę	0,3 % celiuliozės arba 0,4 % mineralų
Gumos kietųjų dalelių (SBR) kiekis pagal bitumo svorį	1,5–3 % arba TBR
Fizinės savybės	
Oro tuštymių kiekis (ASTM D6752/AASHTO T275)	18,0–22,0 %
Rišiklio nutekėjimas (ASTM D6390)	ne mažesnis nei 0,3 %
Jautrumas vandeniui (AASHTO T283)	ne mažesnis nei 80 %
Masės nuostoliai po Kantabro abrazyvinis bandymas su nesendintais mėginiais (ASTM D7064-04)	ne didesnis nei 20 %
Kantabro abrazyvinis bandymas ((ASTM D7064-04) su 7 dienų sendintais bandiniais	ne mažesnis nei 30 %

Išanalizavus mokslinius straipsnius 1.7 lentelėje yra pateikiamos vandeniui pralaidžių asfalto dangų specifikacijos. Pažymėtina, kad nėra daug straipsnių susijusių su vandeniui pralaidžiomis asfalto dangomis arba kita dalis mokslininkų, kurie atliko eksperimentus su vandeniui pralaidžiomis asfalto dangomis nepateikia detalesnės informacijos / techninių parametrų apie tiriamąją asfalto dangą. Tačiau pagal surinktus duomenis, pateiktus 1.7 lentelėje bei 1.14 paveiksle, lyginant su teorine granulimetrine sudėtimi, kuri pateikta 1.7 lentelėje, galima teigti, jog didžioji dalis vandeniui pralaidžių dangų tenkina teorines sąlygas, t. y. jų maksimali išbyra yra ties 13,2 mm pagal Jungtinėse Amerikos Valstijose naudojama granulimetrinę sudėtį. Pažymėtina, kad mokslininkai atliko eksperimentinius tyrimus nustatant nominalų maksimalaus užpildo dydį, kurio metu buvo iširta, jog esant maksimaliai išbirai, kurį didesnė nei 10 mm turėjo teigiamos įtakos provėžų susidarymui, pralaidumui vandeniui, atsparumui įtrūkimams asfalto mišiniams (skaldos ir mastikos asfaltui bei poringo asfalto) (W. Huang et al., 2020; H. Liu et al., 2017). Taip pat išnagrinėjus

1.7 lentelėje surinktus duomenys, priimta, kad granulimetrinės sudėties išbiros per sietus masės procentas turėtų būti:

- 16 mm – 100 %;
- 11,2 mm – 80–100 %;
- 8 mm – 40–80 %;
- 5,6 mm – 15–44 %;
- 2 mm – 5–20 %;
- 0,063 mm – 2–5 %.

Palyginus priimtą granulimetrinę sudėtį su 1.6 lentele, galima teigti, kad teorinės reikšmės dalinai atitinka su jau išnagrinėtomis ir pateiktomis granulimetrinės sudėties reikšmėmis.

Atsižvelgus į 1.7 lentelėje pateiktus mokslininkų eksperimentu metu nustatytus tiriamuosius tankius, priimama, kad tiriamojo tankio vertė neturėtų būti didesnė nei 2300 kg/m^3 .

Pagal AASHTO T283 nustatant jautrumą vandeniui netiesioginio tempiamo stiprio santykis (ITSR) turėtų būti didesnis nei 80 %, tačiau vadovaujantis Šveicarijoje naudojamą SN 640 standartą ITSR reikšmė turėtų būti didesnė nei 70 %. Marcia Lopes Afonso ir kiti mokslininkai (2017) pagal LST EN 12697-12 standartą atliko eksperimentinį tyrimą, kurio rezultatai yra pateikti 1.7 lentelėje. Tyrimo metu buvo naudojami 4 mišiniai: du su celiuliozės plaušu (vienas su smulkiu užpildu, o kitas su stambiu užpildu) bei du be celiuliozės plaušu (vienas su smulkiu užpildu, o kitas su stambiu užpildu). Šiems mišiniams buvo paruošta po 6 bandinius. Tyrimo metu nustatyta, kad skirtumas tarp nagrinėjamų 4 mišinių reikšmių nebuvo ypač didelis – 8 %. Taip pat pastebėta, jog mišiniais su smulkiomis užpildais jautresnes vandeniui. Taip pat pažymėtina, kad reikšmės kurios buvo nustatytos jautrumui vandeniui pagal palygintą SN 640 standartą nepasiekė siekiamo rezultato, tačiau buvo arti ribinės vertės.

1.7 lentelė. Vandeniui pralaidžių asfalto dangų specifikacija

Autorius	Dangos konstrukcijos sluoksnis	Sietų akučių dydis, mm											Sluoksnio storis, cm	Oro tuštymų kiekis, %	Didžiausias dalelės dydis, mm	Didžiausias mišinio tankis, kg/m ³	Tariamasis tankis, kg/m ³	Optimalus rišiklio kiekis, %	Vandens tekėjimo kiekis, m ³ /s	Jautrumas vandeniui (ITSR), %	Standumas, MPa	Puasono santykis, μ	Pralaidumas vandeniui, k (m/s) x 10 ⁻³	Vertikalus pralaidumas, Kv (m/s) x 10 ⁻³	Horizontalus pralaidumas, Kh (m/s) x 10 ⁻³	Vertikalus vandens tėkmės laikas, Tv (s)	Horizontalus vandens tėkmės laikas, Th (s)	
		0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	5,6	8	11,2	16	22,4																
		Išbiros masės procentas, %																										
J. Hu et al., 2021	PAC 10 su PG64-22 CR	5	5,7	6,3	7	8,5	10,6	33	80	84,8	100	100	5	20	9,5	2800	-	4,7	0,000082	96	2270	-	0,084	-	-	-	-	
	PAC 16 su PG64-22 CR	3,6	4,0	4,4	5,6	6,7	9,2	20,6	43,1	66,2	92	100	5	22	13,2	2650	-	4,4	0,000098	97	2350	-	0,098	-	-	-	-	
Hengzhen Li et al., 2022	PA 13 su lignino polimeru	3,4	4,6	6,3	7,9	10,2	13,6	24,8	58,9	80,6	100	100	6,35	21	13,2	-	-	4,5	-	-	-	-	7,5	-	-	-	-	
Jiang et al., 2015	PAC 13 (60/80) su HBV (TAFPACK-SUPER, 12% TPS)	4,2	5,8	6,9	9,0	10,8	12,5	27,6	51,6	76,4	100	100	6,3	20,1	-	-	-	4,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Jia et al., 2021	OGFC 13 su SBS	4,2	5,8	7,5	8,3	10,6	12,7	22,4	60,6	81,5	100	100		19,8		2630	2254	4,55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Ge et al., 2021	OGFC 13 su HBV	4,5	3,0	3,8	6,4	10,4	13,6	34,4	67,0	76,4	100	100	7	17,9	13,2	2160	-	4,66	-	-	-	-	0,4	-	-	-	-	-
Saadeh et al., 2019	HMA-O su PG 70-10	2,8	3,5	4,8	7,1	8,3	11,8	33,5	69,1	80,9	100	100		14,6	-	-	-	5,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
S. Chen et al., 2021	PAC 13 su SBS	3,8	4,6	5,0	6,7	8,5	11,0	16,5	54,7	81,5	100	100	4	20	-	-	-	4,8	-	-	-	-	0,03	-	-	-	-	
G. Xu et al., 2021	PAC 16 su HBV	4,2	5,0	5,8	6,7	7,6	9,3	23,6	45,5	71,3	95	100		22,1	13,2	2679	2084	4,1	-	87,1	1704,5	-	0,11	-	-	-	-	-
G. Lu et al., 2019	PA 8	5	5,4	6,1	7,5	10,3	16	60	100	100	100	100	4	26,2	-	2541	-	-	-	-	-	-	1,9	-	-	-	-	-
Liu et al., 2021	OGFC 13	3,2	4,4	6,7	6,8	8,9	13,1	33,3	57,9	84,8	100	100	4	23	13,2	-	-	-	-	-	-	-	0,3	-	-	-	-	-
		3,1	4,2	6,4	6,5	8,4	11,9	24,1	54,6	84,8	100	100	4	16	13,2	-	-	-	-	-	-	-	0,3	-	-	-	-	-
Chu et al., 2021	PA 25 su PG76-22	5,0	5,8	7,5	10,8	12,7	15,3	25,9	60,6	72,1	95	100	9,53	25	20	-	-	4,7	-	-	-	-	-	8,34	-	-	-	-
	PA 20 su PG 76-22	3,9	4,1	4,5	6,3	8,6	10,7	18,7	42,4	64,7	95	100	9,53	20	20	-	-	5	-	-	-	-	-	5,46	-	-	-	-
	PA 15 su PG 76-22	3,9	4,1	5,0	6,3	8,6	10,7	18,7	42,4	60,5	100	100	9,53	15	16	-	-	5,2	-	-	-	-	-	2,76	-	-	-	-
Afonso et al., 2017	PA 8	2	2,4	3,3	5	7,3	12	44,2	73	99	100	100	4	19,6	-	-	1940	4,7	-	57	1950	-	-	1,3	1,9	40	27	
	PA 8	2	2,4	3,3	5	7,3	12	44,2	73	99	100	100	4	20,7	-	-	1960	4,6	-	50	1940	-	-	4,5	6,3	11	8	
	PA 12,5	2	2,3	2,8	3,9	6	8	29,9	56,7	86,8	99,5	100	4	16,6	-	-	1950	5,2	-	60	2300	-	-	2,4	3,95	21	13	
	PA 12,5	2	2,3	2,8	3,9	6	8	29,9	56,7	86,8	99,5	100	4	18,6	-	-	1940	5,1	-	65	2150	-	-	4,4	4,75	12	11	
J. Chen et al., 2018	OGFG 13	3,4	4,0	4,9	6,3	8,9	12,0	21,5	57,7	80,4	100	100	6,5	20,3	13,2	-	-	5,1	0,000022	-	-	-	-	-	-	-	-	
	OGFG 10	2,5	4,5	6,3	8,1	11,6	16,1	67,3	80,2	84,8	100	100	6,5	20	9,5	-	-	5,2	0,000022	-	-	-	-	-	-	-	-	
X. Chen et al., 2022	PAC 13	4,8	5,4	6,6	9,0	10,6	13,6	38,8	55,5	80,4	100	100	4	20,3	13,2	1978	-	-	0,000045	-	-	-	-	5,7	3,6	4,4	-	-

Santraukos:

PAC – poringojo asfalto betonas

PA – poringasis asfaltas

OGFC – Jungtinėse Amerikos Valstijose naudojamas panašus asfalto mišinys į poringąjį asfaltą

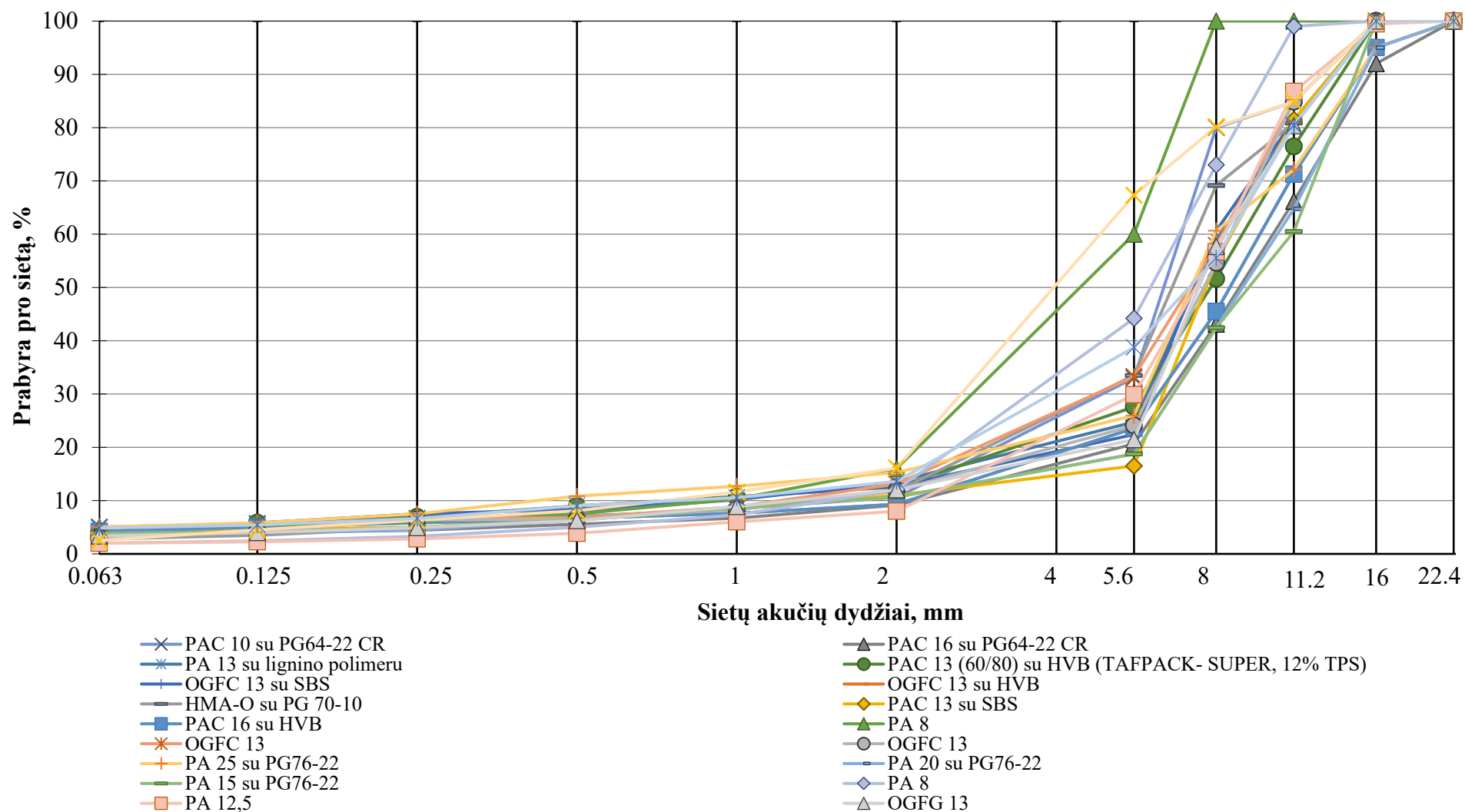
HMA-O – atviros struktūros karšto asfalto mišinys

PAM – poringojo asfalto mišinys

SBS – polimerais modifikuotas bitumas su mineraliniu užpildu

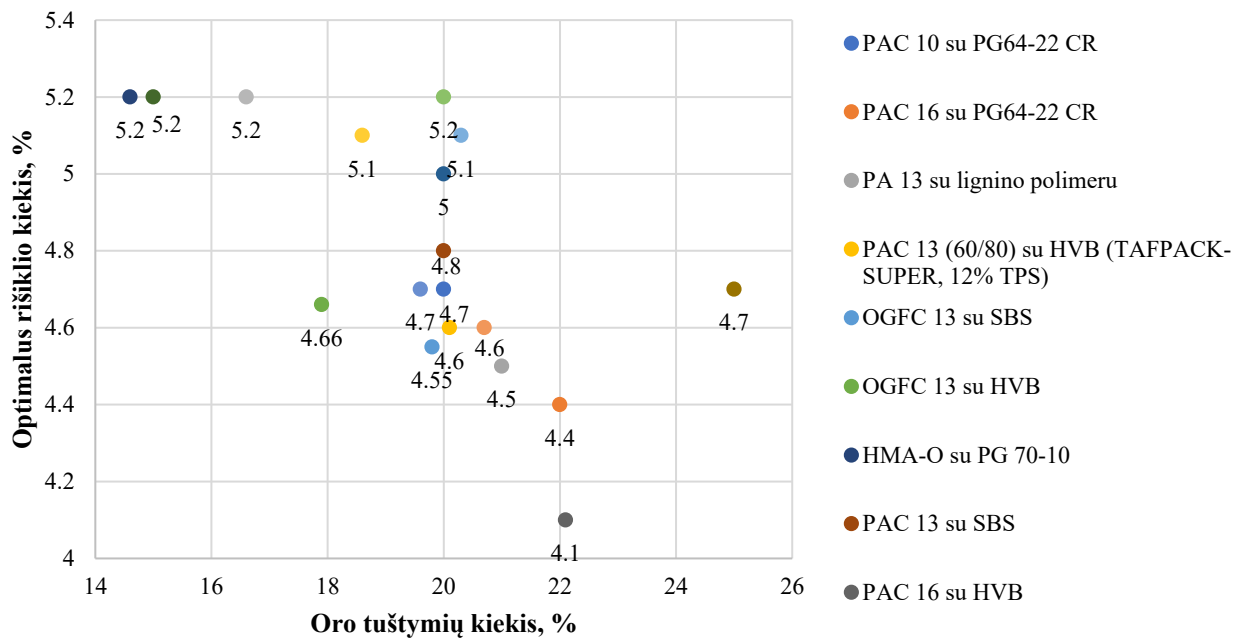
HVB – didelio klampumo rišiklis

CR – gumos milteliai



1.14 pav. Granulimetrinės sudėties kreivės poringųjų asfalto mišinių

Mokslininkai, atlikdami bandymus su vandeniui pralaidžiomis asfalto dangomis, yra pateikę tyrimo metu tiriamų asfalto dangų specifikacijas (žr. 1.7 lentelę). Iš pateiktos lentelės galima matyti, kad vandeniui pralaidžių asfalto dangų storiai labai skiriasi. Kai kurie mokslininkai teigia, kad įrengiant viršutinį asfalto dangos sluoksnį mažo eismo intensyvumo keliuose arba, pavyzdžiui, stovėjimo aikštelėse, vandeniui pralaidžių asfalto dangos storis turi būti 4 cm. Manoma, kad intensyvesniuose keliuose manoma, jog reikėtų įrengti vandeniui pralaidžią dangą nuo 10 cm storio.



1.15 pav. Optimalus rišiklio kiekis priklausomai nuo oro tuštymių kiekio

Lyginant teorines oro tuštymių vertes su eksperimentiniu metu pasirinktomis vertėmis, pateiktomis 1.15 paveiksle, galima teigti, kad oro tuštymių vidurkio vertė būtų lygi tarp 19–21 %. Optimalus rišiklio kiekis pateiktas 1.15 paveiksle, jog pagal priimta oro tuštymių kiekio reikšme, optimalus rišiklio kiekis kinta nuo 4,50 % iki 5,2 %. Taip pat Anxin’as Meng’as ir kiti mokslininkai (2020) atliko tyrimą, kurio metu siekė nustatyti rišiklio kiekį, reikiama vandeniui pralaidžiam asfaltui. Eksperimento metu, buvo naudojami 5 skirtingi rišiklio kiekiai PG 58-22 rišikliui: 3,9 %, 4,4 %, 4,9 %, 5,4 % ir 5,9 %. Tyrimo metu buvo atliekamas mišinio dalelių (masės) nuostoliu testas, kuris apskaičiuojamas atliekant Kantabro testu (angl. *Cantabro test*) ir rišiklio nutekėjimo testas. Rezultatai parodė, kad mažiausi mišinio dalelių (masės) nuostoliai gaunami naudojant 5,4 % (mišinio dalelių (masės) nuostolis – 12 %, o rišiklio nutekėjimas – 0,29 %) ir 5,9 % (mišinio dalelių (masės) nuostolis – 10 %, o rišiklio nutekėjimas – 0,33 %), tačiau A. Meng ir kt. (2020) savo eksperimentiniame darbe daro prielaidą, kad optimali rišiklio vertė yra 4,9 %, kurio mišinio dalelių (masės) nuostolis gaunamas 15 %, o rišiklio nutekėjimas – 0,25 %.

Xiang'o Ma ir kitų mokslininkų (2018) straipsnyje nustatyta, kad nėra tikslinga atlikti užšalimo ir atšilimo testo poringojo asfalto dangų patvarumui, kadangi atlikus mišinio dalelių (masės) nuostoliu testą buvo matomas didelis masės praradimas. Buvo pastebėta, kad atliekant mišinio dalelių (masės) nuostolių testą yra reikšmingas poringojo asfalto vertinimui, kadangi tyrimo metu nustatyta, kad kuo yra ilgesnis panardinimo laikas pralaidaus vandeniui poringojo asfalto bandiniui, tuo didesnis masės nuostolis. Taip pat atliekant Kantabro testą nustatyta, kad į pralaidaus vandeniui poringojo asfalto bandinį įdėjus kalkių, poliesterio ar mineralinių pluoštų turėjo teigiamos įtakos pralaidaus vandeniui poringajam asfaltui, kuris suteikia dangai patvarumo bei mažesnę mišinio dalelių (masės) nuostolį. Tačiau reiktų pažymėti, kad atliekant bandymą bandiniuose, kuriose buvo naudojamas celiuliozės plaušas turėjo atvirkštinį rezultatą.

Reiktų pažymėti, kad tik maža dalis mokslininkų atlieka rišiklio nutekėjimo nustatymo bei mišinio dalelių (masės) nuostolių tyrimą, A. Meng'as, Yiqui Tan'as ir kiti (2020) bei Shouhong'as Zhang'as ir Yiping'as Guo (2015) moksliniuose darbuose nurodo, kad rišiklio nutekėjimas negali būti didesnis nei 0,30 % bei mišinio dalelių (masės) nuostolis turėtų būti ne didesnis nei 20 %.

M. Aboufoul'as ir A. Garcia (2017) straipsnyje aprašo, jog minimalus pralaidumas vandeniui negali būti mažesnis nei $1,0 \cdot 10^{-3}$ m/s, priešingai nei B. Eisenberg ir kiti (2015), kurie aprašo, kad minimalus pralaidumas vandeniui yra $0,5 \cdot 10^{-3}$ m/s. Atsižvelgus į 1.7 lentelėje pateiktose pralaidumo reikšmes matoma, jog trijose tyrimuose nebuvo pasiektas minimalus pralaidumas, tačiau yra tyrimų, kurie pasiekė gan aukštas reikšmes pralaidumo užtikrinimui.

X. Ma ir kt. (2018) savo tyrime taip pat atliko temperatūrinių plyšių atsparumo bandymą. Minimą bandymą atliko vienašio tempimo prietaisu ribojant (suvaržant) asfalto mišinio traukimąsi (angl. *thermal stress restrained specimen test*, TSRST). Šio bandymo metu buvo nustatyt, kad poringasis asfaltas su poliesterio plaušu turėjo žemiausią trūkimo temperatūrą bei pagerino asfalto mišinio atsparumą plyšių susidarymui žemoje temperatūroje (padidėjo atsparumas temperatūriniam plyšiams).

Vienas iš svarbiausių kriterijų projektuojant vandeniui pralaidžias asfalto dangas yra pralaidumas vandeniui. X. Ma ir kiti mokslininkai (2018) atliko pralaidumo vandeniui bandymą nustatyti vertikalųjį ir horizontalųjį pralaidumą. Bandymo metu buvo nagrinėjamas poringas asfaltas su 20 % oro tuštymių kiekiu, kuriam buvo naudojami rišikliai HVB bei du polimerais modifikuoti bitumai su mineraliniu užpildu: PG76-22 bei PG70-22. Tyrime buvo įvertinti įvairūs stabilizuojantys priedai, tokie kaip poliesterio, mineralinių pluoštų, celiuliozės plaušas, hidratuotos kalkės. Rezultatai parodė, kad stabilizuojančio priedo tipas turi mažai įtakos pralaidumui. Tačiau tyrimo metu nustatyta, jog naudojant HVB su poliesterio plaušu buvo stebimas pralaidumo vandeniui sumažėjimas iki 20 %. Taip pat pastebėta, kad naudojant polimerais modifikuotą bitumą su mineraliniu užpildu PG76-22 pasiektos nežymios, bet geresnės vertės už PG70-22 užpildą.

Siekiant užtikrinti tinkamą standumą, išanalizavus 1.7 lentelę yra eliminuojamas eksperimentinis tyrimas, kurio pralaidumas nesiekia minimalios reikšmės, todėl priimama, kad standumas turėtų būti ne mažesnis nei 1900 MPa.

Nagrinėjant mokslinius tyrimus pastebima, kad straipsniuose nėra plačiai pateikiamas netiesioginis tempiamasis stiprio reikšmės, tačiau M. L. Afonso ir kt. (2017) pateikė bandymo rezultatus, todėl daroma prielaida, kad sausų bandinių netiesioginio tempimo stiprio vertė ne mažesnis nei 780 kPa, o drėgnų bandinių netiesioginio tempimo stiprio vertė neturėtų būti mažesnis nei 480 kPa.

Upek'o Kuruppu ir kitų mokslininkų (2019) straipsnyje minima, kad didelę įtaką poringajam asfaltui turi įvairius asfalto mišinio savybėms pagerinti taikomus priedus rišiklį, kadangi jie gali pagerinti konstrukciją bei hidrologines savybes. Taip pat minima, kad pralaidumas vandeniui poringajame asfalte yra iššūkis, kadangi ilgalaikis vandens kaupimasis neigiamai veikia konstrukciją dėl susilpnėjusio ryšio tarp užpildų ir rišiklio. Todėl galimai silpsta vandeniui pralaidžių asfalto dangų eksploatacinės savybės bei naudojimo laikotarpis. Atsižvelgiant į tai, buvo atlikta stabilizuojančių priedų tyrimų analizė poringojo asfalto dangoms. Tyrimų rezultatai rodo, kad minimi priedai naudojami pralaidžioms vandeniui poringojo asfalto mišiniams, pateikti 1.8 lentelėje, gali turėti teigiamo poveikio aplinkai, išlaidoms ir mechaninėms savybėms.

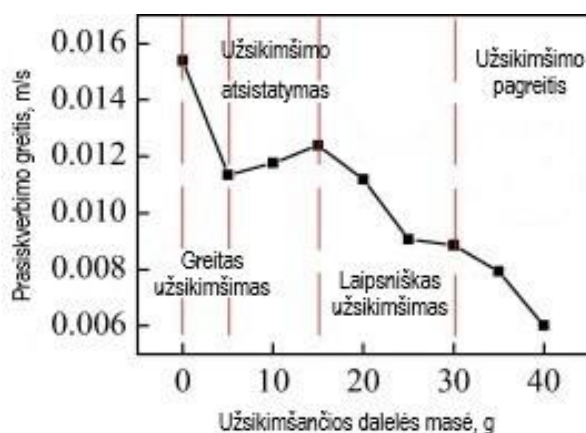
1.8 lentelė. Priedai, turintys įtakos pralaidaus vandeniui poringojo asfalto mišiniui

Priedai	Tyrimo rezultatas	Šaltinis
Celiuliozės pluoštai	Padidėjęs pralaidumas vandeniui pralaidžioms dangoms; didesnis atsparumas nuolatinei deformacijai	Afonso et al., 2017
Panaudotų padangų gumos milteliai	Taikant panaudotų padangų gumos miltelius (dalelių dydis <0.6 mm) pasiekiamas didesnis bitumo ir užpildų sukibimas nei tais atvejais, kai poringas asfaltas yra gaminamas su rišiklį stabilizuojančiais priedais (pvz. celiuliozės pluoštai)	Sangiorgi et al., 2017
Gumos milteliai (CR) ir SBS	CR (angl. <i>crumb rubber</i>) ir SBS (angl. <i>styrene butadiene styrene</i>) padidina M_R (bitumo įtempių relaksacijos modulio kitimo rodiklis) atsparumą slydimui, jautrumą drėgmei ir atsparumą provėžoms, tačiau turi neigiamą poveikį pralaidumui	Shirini & Imaninasab, 2016
Nuskilimą stabdantys priedai (hidratuotos kalkės, cementas ir diatomitas)	Geresnis atsparumas deformacijoms, bet mažesnis pralaidumas; geresnis cemento atsparumas dilimui	Mohd Shukry et al., 2016
Rišikliai: didelio klampumo rišiklis (HVB), PG76-22 ir PG70-22. Priedai: pluoštas, hidratuotos kalkės ir DBS polimeras	Pagerintas bendras HVB našumas; DBS veikia aukštoje temperatūroje, tačiau sumažino atsparumą įtrūkimams žemoje temperatūroje ir ilgaamžiškumą; Padidėjęs pluošto patvarumas ir atsparumas įtrūkimams žemoje temperatūroje pagerino drėgmės stabilumą, bet susilpnino hidratuotų kalkių patvarumą	Ma et al., 2018

S. Xu ir kiti mokslininkai (2020) moksliniame darbe nustatė, kad mažėjant pralaidumo vandeniui koeficientui, taip pat mažėja ir tuštumų vingiavimas kartu su poringumo efektyvumu. Luis'as A. Sanudo-Fontaneda ir kiti mokslininkai (2018) atliko eksperimentinį tyrimą, kuriame padarė išvadą, kad laikui bėgant pralaidžių asfalto dangų pralaidumas vandeniui mažėja. Nustatyta, kad per 10 metų vandeniui pralaidi asfalto danga praktiškai visa užsikemša. Anxin'as Meng'as, Chao Xing'as ir kiti mokslininkai (2020) siekė nustatyti vandeniui pralaidžių asfalto dangų užsikimšimo charakteristikas. Atliktame tyrime buvo naudojami 5 vandeniui pralaidūs asfalto mišiniai, priimant, kad užpildų dydis yra ne didesnis kaip 13,2 mm, bitumo kiekis – 4,90 %, o oro tuštymių kiekis kinta nuo 16,27 iki 22,75 %.

Atlikus daugiakrypčio pralaidumo tyrimą bei kompiuterinės rentgeno tomografijos pagalba, buvo nustatyta, jog didžiausias užsikimšimas, t. y. nuosėdų (dalelių) kaupimasis vandeniui pralaidžioje poringojo asfalto dangoje, vyko kurių dydis nuo 0,15 mm iki 2,36 mm. Taip pat užsikimšimas buvo išskaidytas į 4 etapus (žr. 1.16 pav.):

1. Greitas užsikimšimas;
2. Užsikimšimo atsistatymas;
3. Laipsniškas užsikimšimas;
4. Užsikimšimo pagreitis.



1.16 pav. Užsikimšiančios dalelės masės įtaka pralaidumo greičiui (Meng, Xing, et al., 2020)

Pradinėje stadijoje, prieš pradėdant atlikti bandymą pralaidumo vandeniui greitis buvo 0,015 m/s, o galutiniame etape pralaidumas vandeniui poringoje asfalto dangoje sumažėjo ir pasiekė 0,003 m/s. Taip pat šiame tyrime buvo atliktas vandens įsisunkimo greičio kitimas skirtingoms užsikimšimo proceso kryptims, t. y. vertikaliu ir horizontaliu srautu. Nustatyta, kad vertikalaus srauto užsikimšimas vyko visais 4 etapais, o horizontaliu tik trimis, neįskaitant antrąjį etapą. Taip pat tyrimo rezultatai parodė, kad horizontalus srautas labiau užsiteršia nei vertikalusis srautas, todėl pralaidumas horizontaliu srautu yra žymiai mažesnis. Tyrimo metu, buvo nustatyta, kad vandeniui

pralaidžių asfalto dangų užsikimšimo procesui turėjo vandens slėgio aukštis, taip pat vandens pralaidaus asfalto mišinio gradacijos tipas bei dalelės.

Atsižvelgdami į tai, galime teigti, kad užsikimšimas, turi didelę reikšmę poringojo asfalto pralaidumui vandeniui bei ilgaamžiškumui, todėl norint užtikrinti poringojo asfalto pralaidumą bei užtikrinti ilgą tarnavimo laikotarpį, turi būti parinkta teisinga tokių dangų priežiūra. J. Bruinsma ir kt. (2017), B. Eisenberg ir kt. (2015), U. Kuruppu ir kt. (2019), P. Weiss'as ir kt. (2019), Y. Zhu ir kt. (2021) savo darbuose pabrėžia vandeniui pralaidžių dangų priežiūros svarbą (žr. 1.9 lentelė), siekiant užtikrinti ilgaamžiškumą ir spartų lietaus vandens drenavimą. Pažymėta, kad norint atkurti hidrologines savybes turi būti pasirinktas tinkamas priežiūros metodas. Praktikoje pastebima, kad vandeniui pralaidžioms dangoms nerekomenduojama naudoti mechaninių šlavimo mašinų. Priežiūrai rekomenduojama naudoti regeneracinę šlavimo mašiną arba vakuuminę šlavimo mašiną. Papildomai reiktų paminėti, kad vis dėlto autoriai išskiria regeneracinę šlavimo mašiną kaip prioritetą, kadangi ji gali išvalyti dangos paviršiuje susidariusias nuosėdas ir smulkias daleles.

1.9 lentelė. Vandeniui pralaidžių asfalto dangų priežiūra

Priežiūros metodai	Priežiūros metodo poveikis dangos pralaidumui vandeniui	Šaltinis
Regeneracinis šlavimas ir vakuuminis šlavimas	Pasiektas dalinis paviršiaus pralaidumo atstatymas	Dougherty et al., 2011
Šlavimas šluota arba gatvių šlavimo mašina; paviršiaus skalavimas sodo žarna arba didele žarna; siurbimas; ir elektrinis plovimas	Rezultatai parodė, kad labai svarbu pakelti oro / vandens srove dangoje susikaupusias šiukšles, kad būtų išvalyta ir pašalinta kuo daugiau šiukšlių	Henderson & Tighe, 2011
Plovimas slėgiu ir siurbimas	Dalinai atkūrė infiltracijos greitį 0,5 – 3,48 mm/min, tačiau efektyvumas buvo dėl to, jog buvo naudojama reguliariai	Al-Rubaei et al., 2013
Mechaninis šlavimas	Netinkama poringo asfalto priežiūrai	Al-Rubaei et al., 2013
Plovimas slėgiu	Plovimas slėgiu efektyvesnis nei vakuuminis šlavimas išvalyti užsikimšusiai dangai	Chopra et al., 2010
Vakuuminis šlavimas	Iš dalies gali atstatyti infiltracinį pajėgumą	Mata & Leming, 2012
Siurbimas ir plovimas slėgiu	Gali iš dalies atkurti infiltracijos greitį	Drake, 2013;
Plovimas slėgiu ir vakuuminis siurbimas; plovimas slėgiu	Veiksmingi pradinio valymo būdai, o išplovus antrą kartą stebimas žymus infiltracijos greičio atstatymas	Hein et al., 2013
Plovimas aukštu slėgiu	Gali kai kurias daleles įstumti į dangą	Chopra et al., 2010; Henderson & Tighe, 2012

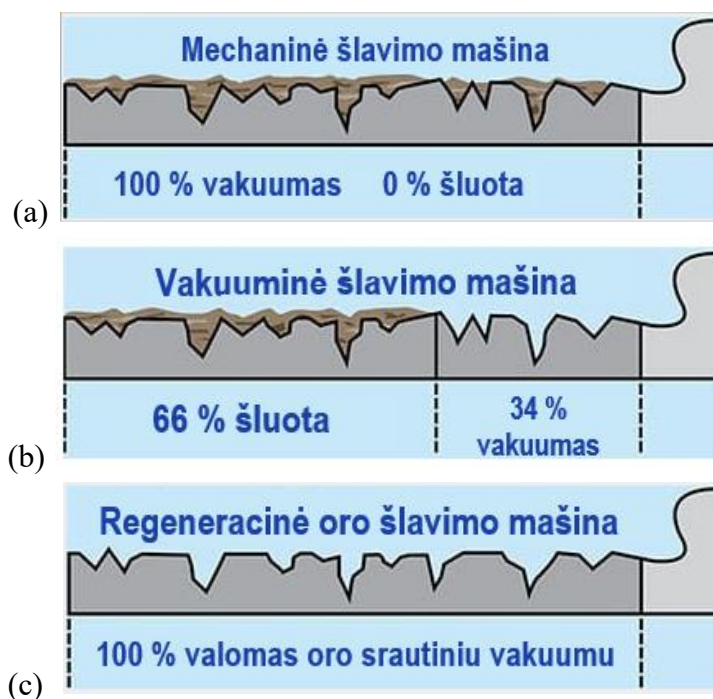
B. Eisenberg ir kiti mokslininkai (2015) savo gairėse aprašo, kad vandeniui pralaidžių dangų prevencinio valymo užtenka 2–4 kartus per metus, tačiau pažymi, jog valant su regeneracine šlavimo mašina (žr. 1.17 pav.) užtektų 1–2 kartų per metus.

TYMCO teigia, kad regeneracinės šlavimo mašinos pagalba pašalinamos visos šiukšlės, nešvarumai ir nuosėdos iš viso ploto, esančio po mašinos šlavimo plotu. Pažymėtina, kad šios šlavimo mašinos neišmeta šlavimo metu užteršto oro atgal į kelio dangos paviršių.



1.17 pav. Regeneracinė šlavimo mašina (kairėje), Vakuuminė šlavimo mašina (dešinėje)
(TYMCO, n.d.)

TYMCO taip pat pateikia pavyzdžius kaip trejomis skirtingomis šlavimo mašinomis yra pašalinami nešvarumai iš kelio dangos paviršiaus. Kalbant apie mechaninę šlavimo mašiną, ji gali išvalyti dideles šiukšles, esančias paviršiuje, tačiau neišvalo nešvarumų ir smulkių šiukšlių (žr. 1.18 pav.). Be to, pastebėta, kad šluotos turėtų būti keičiamos kas 200 darbo valandų, todėl tai yra ekonomiškai nenaudinga.



1.18 pav. Šluotos paviršiaus išvalymui: a) mechaninė; b) vakuuminė; c) regeneracinė oro
(TYMCO, n.d.)

Vakuuminėms šlavimo mašinoms naudojamos nuolat judančios šluotos, kad būtų galima šiukšles pernešti į siurbimo antgalį, kuris yra vienoje šlavimo mašinos pusėje. Vėliau šiukšlės nukreipiamos į mažo skersmens siurbimo vamzdį. Dulkių siurbliu išvaloma tik dalis, apie 34 %, esanti po antgaliu, kuris yra apie 76 cm, todėl didžioji ploto dalis (apie 66 %) lieka neišvalyta, kadangi šluota įstumia nešvarumus atgal į plyšius (žr. 1.18 pav.). Be to, šią šluotą reikia keisti maždaug kas 80–100 darbo valandų, todėl tai yra ekonomiškai nenaudinga. Taip pat atkreipiamas dėmesys į tai, kad ištraukus į atmosferą orą, pripildytą smulkių dulkių, jos nėra surenkamos ir nusėda atgal ant kelio dangos paviršiaus.

Kalbant apie regeneracines oro šlavimo mašinas, jų šlavimo šluotų plotis yra pats didžiausias. Taip pat nėra reikalinga pagrindinė šluota kaip mechaninėms ir vakuuminėms šlavimo mašinoms. Be to, regeneracinės oro šlavimo mašinos rinktuvo galvutė pritaikyta taip, kad prisitaikytų prie asfaltuotų paviršiaus nelygumų. Tokiu būdu užtikrinamas optimalus užsikimšusių porų išvalymas (žr. 1.18 pav.). Pažymėtina, kad šios valymo mašinos yra efektyvios net esant lietingam orui.

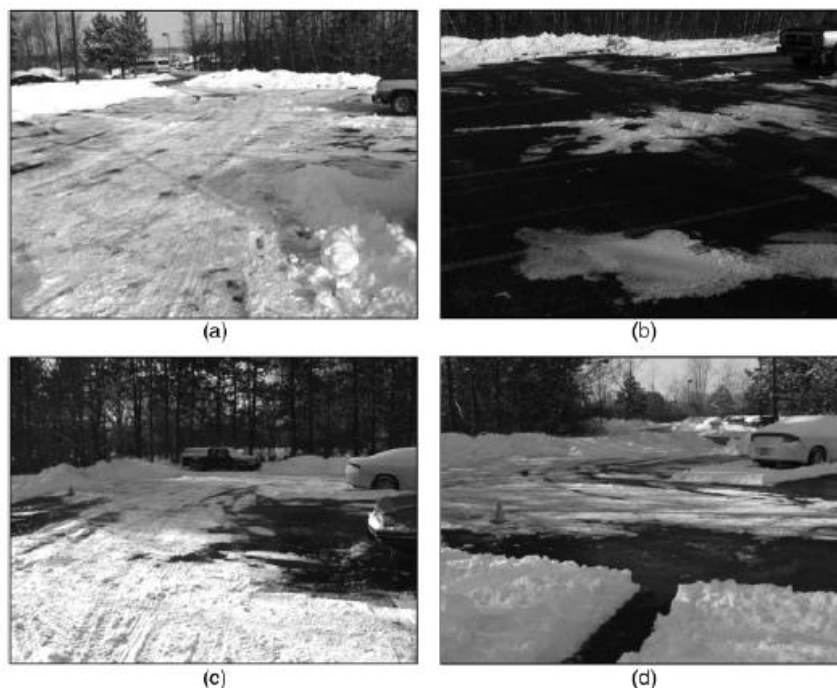
Rong'as Lu ir kiti mokslininkai (2022) savo straipsnyje rašo apie temperatūrines charakteristikas, lygindamas vandeniui pralaidžią asfalto dangos konstrukciją su tankia asfalto dangos konstrukcija. Tyrimo rezultatai rodo, kad vandeniui pralaidžioje asfalto dangos konstrukcijoje šilumos kaupimo ir išsklaidymo efektyvumas 4–40 cm gylio diapazone buvo geresnis už tankios asfalto dangos konstrukcijos. Atsižvelgus į tai, kad vandeniui pralaidžios asfalto dangos konstrukcijos sluoksniai yra poringos struktūros, todėl esančios tuštumos tolygiau perduoda šilumą tarp sluoksnių, taip pat tai gali turėti įtakos žiemos metu, ledo ir sniego tirpimui.

Atsižvelgus į Lietuvos klimatinės sąlygas, P. Weiss'as ir kiti mokslininkai (2019) straipsnyje aprašo vandeniui pralaidžių dangų priežiūrą žiemos metu. Kitų autorių darbų tyrimų rezultatai rodo, jog vandeniui pralaidžioms dangoms nerekomenduojama naudoti smėlio. Norint žiemos metu ant vandeniui pralaidžių dangų naudoti druską, reikia taikyti mažesnę jos kiekį nei įprastai, kadangi vandeniui pralaidžios dangos gali išlaikyti savo infiltracijos talpą visą žiemą, net esant dideliame šalčiui, o ledo ir sniego tirpimo metu vanduo nesikaupia dangos paviršiuje (žr. 1.10 lentelę).

1.10 lentelė. Vandeniui pralaidžių asfalto dangų priežiūra žiemos metu

Valymas/medžiaga	Veiksmingumas	Šaltinis
Smėlis	Nerekomenduojama naudoti smėlį ant vandeniui pralaidžios dangos, kadangi smėlio dalelės gali užkimšti dangą ir sumažinti infiltracijos greitį	Al-Rubaei et al., 2013
Šlifavimas	Sumažina dangos infiltracijos talpą nuo 7500 mm/h iki 500 mm/h	Huang et al., 2012
Druska ir smėlis	Neturi įtakos infiltracijos greičiui po 22 mėn. dangos įrengimo, jei danga turėjo aukštą infiltracijos greitį. Reikėtų vengti smėlio naudojimo	Henderson & Tighe, 2012
Druska	Naudojama mažesnis druskos kiekis įprastai	Wenck, 2014

Pažymėtina ir tai, kad taikant vandeniui pralaidžias dangas žiemos metu druskos mišinio gali reikėti tik ketvirtadaliu lyginant su įprastomis asfalto dangomis. Taip pat William'as Selbig'as ir Nicolas Buer'as (2018) pažymi, jog oras, susikaupęs vandeniui pralaidžioje dangoje, skleidžia orą į paviršių, taip skatindamas sniego ir ledo tirpimą. Tikėtina, kad žiemos metu, ant dangos paviršiaus gali susidaryti mažesnis sluoksnis sniego / ledo arba jo visiškai nebūti.



1.19 pav. Sniego tirpimas ant vandeniui pralaidaus poringojo asfalto ir vandeniui nepralaidaus įprasto asfaltbetonio: a) poringas asfaltas 11:20 val. ir b) poringas asfaltas po 100 min; c) tankaus asfalto danga 11:20 val. ir d) tankaus asfalto danga po 100 min. (Roseen et al., 2014)

Robertas M. Roseen'as ir kiti mokslininkai (2014) atliko tyrimą, kuomet prisnigus sniegas yra išvalomas sniego valytuvu nuo poringo asfalto bei tankios asfalto dangos. Pasilikusio sniego skirtumas buvo užfiksuotas iš karto po valymo ir po 100 min. Pastebėta, kad poringojo asfalto dangoje liko tik mažas sluoksnis sniego, o tankaus asfalto danga atrodo beveik nepakitęs (žr. 1.21 pav.).

1.4. Teorinės asfalto dangos pralaidumą vandeniui užtikrinančios funkcinių savybių ribinės sąlygos

Išanalizavus mokslinius straipsnius matoma, kad didžioji dalis mokslininkų remiasi NAPA (2008) atliktais tyrimais ir jų pateiktomis teorinėmis asfalto dangos pralaidumą vandeniui užtikrinančiomis funkcinių savybių ribinėmis vertėmis, todėl atsižvelgus į 1.3. poskyryje aprašytus mokslininkų eksperimentinių tyrimų rezultatus bei atliktą meteorologinių duomenų analizę, kuri pateikta 1.2. poskyryje, priimama, kad projektuojama vandeniui pralaidi asfalto danga pagal

1.11 lentelėje pateiktas funkcinių savybių ribines sąlygas užtikrins reikiamą vandens pralaidumą asfalto dangoje.

Pažymėtina, kad tik nedidelė dalis tyrėjų savo moksliniuose darbuose teikia informaciją pagal ką ir kodėl eksperimentuojamoms vandeniui pralaidžioms asfalto dangoms priima tam tikras funkcines savybes.

1.11 lentelė. Teorinės asfalto dangos pralaidumą vandeniui užtikrinančios funkcinių savybių ribinės vertės

Savybė	Standartas	Nustatyta funkcinių savybių ribinė vertė
Oro tuštymių kiekis	LST EN 12697-8:2019	19–21 %
Jautrumas vandeniui	LST EN 12697-12:2018 / SN 640	≥ 70 %
Dalelių nuostoliai	LST EN 12697-17:2017	≤ 20 %
Rišiklio nutekėjimas	LST EN 12697-18:2017	≤ 0,3 %
Pralaidumas vandeniui	LST EN 12697-19:2020	≥ 0,5 · 10 ⁻³ m/s
Netiesioginis tempiamasis stipris	LST EN 12697-23:2018	Sausiems bandiniams: ≥ 780 kPa; Drėgniems bandiniams: ≥ 480 kPa
Standumas	LST EN 12697-26:2018	≥ 1900 MPa
Iškritusių kritulių maksimalus momentinis kiekis	-	14,4 mm
Vidutinis ultravioletinių spindulių kiekis per metus	-	≥ 7630 mW/m ²

1.5. Pirmojo skyriaus išvados

- Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad yra keturi vandeniui pralaidžių dangų tipai :
 - poringojo asfalto danga;
 - poringojo betono danga;
 - trinkelinių arba plokščių danga;
 - geokorio danga.
- Išnagrinėjus mokslinius tiriamuosius darbus, susijusius su vandeniui pralaidžių dangų konstrukcijų klasifikavimu, išskirti trys pagrindiniai tipai:
 - vandenį nuvedančios dangos konstrukcijos;
 - pusiau vandeniui pralaidžios dangos konstrukcijos;
 - vandeniui pralaidžios dangos konstrukcijos.

Taip pat nagrinėjant mokslinius straipsnius nustatyta, jog didelio eismo intensyvumo vietovėse tikslinga taikyti vandeniui pralaidžioms dangoms alternatyvų sprendinį – vandeniui pralaidžios dangos konstrukcijos kelkraštį, kuomet važiuojamosios dangos konstrukcija yra nelaidi vandeniui, o kelkraščiai – pralaidūs vandeniui (įrengiama vandeniui pralaidi dangos konstrukcija).

- Nagrinėjant mokslinius straipsnius nustatyta, jog dauguma mokslininkų rekomenduoja vandeniui pralaidžias dangas įrengti gatvėse ir keliuose, kuriuose vyrauja lengvųjų transporto

priemonių eismas ir nedidelis sunkiojo transporto eismas, taip pat vandeniui pralaidžios dangos taikomos stovėjimo aikštelėms bei pėsčiųjų ir dviračių takams įrengti.

4. Išanalizavus praktikoje taikomas vandeniui pralaidžias asfalto dangos konstrukcijas nustatyta, kad tipinę vandeniui pralaidžią asfalto dangos konstrukciją sudaro:

- viensluksnė arba dvisluksnė poringojo asfalto danga;
- vandeniui pralaidus išlyginamasis (stabilizuojantis) pagrindo sluoksnis be rišiklių (angl. *Choker course*) arba vandeniui pralaidus asfalto pagrindo sluoksnis (angl. *Asphalt-Treated Permeable Base course*), jei vyrauja sunkiojo transporto apkrovos;
- vandeniui pralaidus pagrindo sluoksnis be rišiklių, užtikrinantis pratekėjusio vandens akumuliaciją dangos konstrukcijoje.

Taip pat esant mažai žemės sankasos laikomajai gebai arba žemės sankasos gruntams su dideliu smulkiųjų dalelių kiekiu, ant žemės sankasos viršaus numatomas geotekstilės panaudojimas.

5. Siekiant suprojektuoti tinkamą vandeniui pralaidžią dangos konstrukciją turi būti atlikta struktūrinė bei hidrologinė analizė. Nepriklausomai nuo vandeniui pralaidžios dangos konstrukcijos tipo, struktūrinės analizės metu galima taikyti identiškus skaičiavimo metodus kaip vandeniui nepralaidžioms dangoms konstrukcijoms. O atliekant hidrologinę analizę svarbu įvertinti nuotėkio baseino plotą, lietaus kritulių intensyvumą, didžiausią nuotėkio srautą nuo nutekančio baseino paviršiaus vandens srauto, paviršinio nuotėkio srauto koeficientą paviršiui ir t. t.

6. Nagrinėjant mokslinius straipsnius nustatyta, kad projektuojant vandeniui pralaidžias dangos konstrukcijas įprastai atliekama ypač detali hidrologinė analizė, kurios metu gauta vandeniui pralaidžių dangų konstrukcija yra lyginama su struktūrinės analizės būdu apskaičiuota vandeniui pralaidžia dangos konstrukcija. Palyginus apskaičiuotus vandeniui pralaidžių dangų konstrukcijų storius priimama ta, kurios dangos konstrukcijos storis yra didesnis.

7. Remiantis mokslininkų atliktais tyrimais nustatyta, kad asfalto danga yra pralaidi vandeniui, jei dangos pralaidumas vandeniui yra ne mažesnis kaip $0,5 \cdot 10^{-3}$ m/s.

8. Atlikti moksliniai tyrimai rodo, kad vandeniui pralaidūs asfalto mišiniai pasižymi mažesniu patvarumu (ilgaamžiškumu) nei vandeniui nepralaidūs asfalto mišiniai, todėl nuolatos ieškoma būdų vandeniui pralaidžių asfalto mišinių patvarumui padidinti. Todėl mokslininkai atlieka eksperimentinius tyrimus su įvairiais priedais, kurie pagerintų pralaidaus vandeniui poringojo asfalto mišinio eksploatacines savybes, tačiau tuo pat metu nesumažinti nei vieno eksploatacinio rodiklio vertės. Nustatyta, jog didelio klampumo rišiklis kartu su stabilizuojančiu poliesterio pluošto priedu padidina vandeniui pralaidaus asfalto mišinio patvarumą priešingai nei taikant didelio klampumo rišiklį kartu su celiuliozės plaušu.

9. Atlikus vandeniui pralaidžių dangos konstrukcijų asfalto dangos ir asfalto pagrindo sluoksniams įrengti taikytinų mišinių granulimetrinės sudėties analizę, nustatyta, kad siekiant

užtikrinti šių sluoksnių pralaidumą vandeniui išbyra pro 13,2 mm dydžio sietą neturėtų būti didesnė kaip 80–100 %. Taip pat mokslininkai nustatė, kad esant mažesnei nei 20–50 % išbirai pro 10 mm dydžio sietą, vandeniui pralaidžios asfalto dangos gali pasižymėti mažesniu pralaidumu vandeniui, atsparumu provėžų susidarymui bei atsparumu plyšių susidarymui esant vidutinei arba žemai temperatūrai.

10. Optimalus rišiklio kiekis, užtikrinantis vandeniui pralaidžios asfalto dangos ilgaamžiškumą bei eksploatacines savybes, yra 4,9 %, o oro tuštymių kiekis turėtų siekti 19–21 %.

11. Atlikus gautų meteorologinių duomenų analizę, nustatyta, kad Kauno rajone per metus Žemės paviršių vidutiniškai pasiekia 7635 mW/m^2 ultravioletinių spindulių. Taip pat nustatyta, kad šioje vietovėje per metus iškritusių kritulių kiekis siekia apie 610,20 mm.

12. Siekiant užtikrinti vandeniui pralaidžių asfalto dangų pralaidumą vandeniui, rekomenduojama atliekant periodinę priežiūrą dangą valyti vakuuminiu arba regeneraciniu būdu 2–4 kartus per metus. Taip pat rekomenduojama ant vandeniui pralaidžių asfalto dangų žiemos metu nenaudoti smėlio ir taikyti ledą tirpdančias chemines medžiagas. Pabrėžtina, kad ant vandeniui pralaidžių asfalto dangų ledui ištirpdyti reikalingas mažesnis šių medžiagų kiekis nei ant vandeniui nelaidžių asfalto dangų.

2. VANDENIUI PRALAIIDŽIŲ ASFALTO DANGŲ EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

2.1. Tyrimo objektas

Siekiant išanalizuoti asfalto mišinių su skirtingu oro tuštymių kiekiu pralaidumą vandeniui bei nustatyti asfalto mišinio funkcinių savybių ribines sąlygas, užtikrinančias asfalto dangų pralaidumą vandeniui eksperimentiniame tyrime suprojektuota 10 poringojo asfalto mišinių: PA 16, PA 11, PA 8, kurie suprojektuoti pagal TRA ASFALTAS 08 ir modifikuotų poringųjų asfalto mišinių: PA 16_M1, PA 16_M2, PA 16_M3, PA 11_M1, PA 11_M2, PA 8_M1, PA 8_M2 funkcinių savybių ribinės sąlygos, kurios užtikrintų asfalto dangos pralaidumą vandeniui. Eksperimentiniame tyrime taip pat siekiama įvertinti suprojektuotų asfalto mišinių fizikines ir mechanines savybes. Poringojo asfalto mišinių variantai skyrėsi didžiausios dalelės dydžiu, nuo 8 mm smulkiausias mišinys iki 16 mm stambiausias mišinys. Taip pat projektuojant poringojo asfalto mišinius siektina gauti skirtingą oro tuštymių kiekį. Pažymėtina, kad projektuojant PA 16, PA 11, PA 8 mišinius pagal techninių reikalavimų aprašą TRA ASFALTAS 08, numatyti, kad šie mišiniai turėtų didžiausią oro tuštymių kiekį. Mišinių užpildų projektinė sudėtis pateikta 2.12 lentelėje.

2.12 lentelė. Poringųjų asfalto mišinių užpildų projektinė sudėtis

PA mišinys		Žymėjimas	Mineraliniai milteliai	Dolomito skaldos atsijos fr. 0/2	Dolomito skalda fr. 2/5	Dolomito skalda fr. 5/8	Dolomito skalda fr. 8/11	Dolomito skalda fr. 11/16
PA 16	pagal TRA ASFALTAS 08	PA 16	4,0 %	–	–	–	–	96,0 %
	modifikuotas Nr. 1	PA 16_M1	4,0 %	5,0 %	5,0 %	9,0 %	7,0 %	70,0 %
	modifikuotas Nr. 2	PA 16_M2	4,0 %	10,0 %	10,0 %	10,0 %	10,0 %	56,0 %
	modifikuotas Nr. 3	PA 16_M3	4,0 %	15,0 %	–	–	–	81,0 %
PA 11	pagal TRA ASFALTAS 08	PA 11	4,0 %	–	–	–	96,0 %	–
	modifikuotas Nr. 1	PA 11_M1	4,0 %	5,0 %	5,0 %	5,0 %	81,0 %	–
	modifikuotas Nr. 2	PA 11_M2	4,0 %	8,0 %	10,0 %	10,0 %	68,0 %	–
PA 8	pagal TA ASFALTAS 08	PA 8	4,0 %	–	–	96,0 %	–	–
	modifikuotas Nr. 1	PA 8_M1	4,0 %	10,0 %	–	86,0 %	–	–
	modifikuotas Nr. 2	PA 8_M2	4,0 %	15,0 %	–	81,0 %	–	–

Rišiklio kiekis parinktas pagal TRA ASFALTAS 08 mažiausią rišiklio kiekį priklausomai nuo užpildų mišinio granulimetrinės sudėties, kuris užtikrintų pakankamą užpildo dalelės padengimą bitumo plėvele. Pasirinkus didesnę rišiklio kiekį gali turėti įtakos eksperimentinio tyrimo rezultatams,

pavyzdžiui, sumažinti oro tuštymių kiekį. 2.12 lentelėje žymima, jog visiems suprojektuojamiems mišiniams, naudojamu mineraliniai miltelių 0,063 mm kiekis – 4,0 %.

Pagal parinktą poringųjų asfalto mišinių užpildų projektinę sudėtį (žr. 2.12 lentelė) gaunama projektinė poringojo asfalto mišinių granulimetrinė sudėtis, kuri pateikta 2.13 lentelėje.

2.13 lentelė. Poringųjų asfalto mišinių projektinė granulimetrinė sudėtis

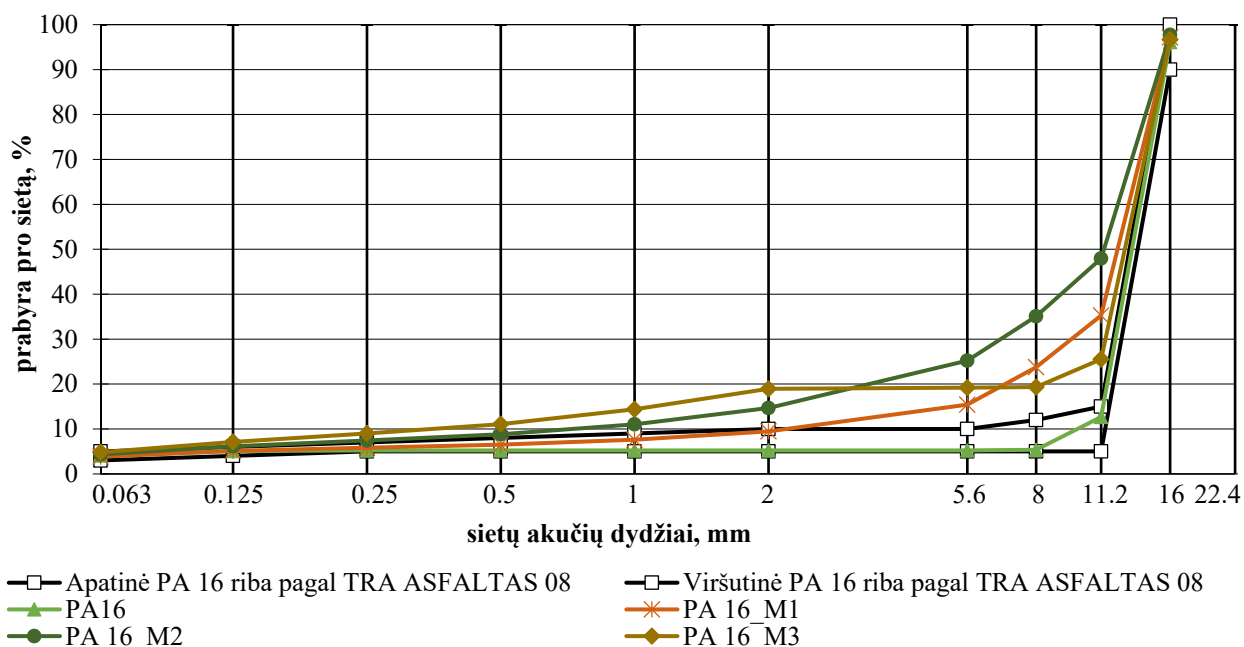
PA mišinys	Išbiros per atitinkamą akučių dydžio sietą, %										
	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	5,6	8	11,2	16	22,4
PA 16	4,1	5,1	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,4	12,7	96,1	100,0
PA 16_M1	3,8	5,1	5,8	6,5	7,6	9,5	15,4	23,8	35,3	97,1	100,0
PA 16_M2	4,3	6,1	7,4	8,8	11,0	14,7	25,2	35,1	47,9	97,7	100,0
PA 16_M3	4,8	7,1	9,0	11,1	14,4	18,9	19,2	19,3	25,5	96,7	100,0
PA 11	3,3	4,1	4,2	4,2	4,2	4,2	4,4	17,6	94,4	100,0	100,0
PA 11_M1	3,8	5,1	5,8	6,5	7,6	9,4	14,8	30,2	95,3	100,0	100,0
PA 11_M2	4,1	5,7	6,8	7,9	9,7	12,7	23,3	41,1	96,0	100,0	100,0
PA 8	3,3	4,1	4,2	4,2	4,2	4,3	20,3	94,6	100,0	100,0	100,0
PA 8_M1	4,3	6,1	7,4	8,8	11,0	14,1	28,6	95,2	100,0	100,0	100,0
PA 8_M2	4,8	7,1	9,0	11,1	14,4	19,0	32,7	95,5	100,0	100,0	100,0

2.20 paveiksle pateiktos pagal techninių reikalavimų aprašą TRA ASFALTAS 08 suprojektuoto poringojo asfalto PA 16 ir modifikuotų asfalto mišinių granulimetrinės sudėties pagal 2.20 paveiksle pateiktą grafiką ir 2.14 lentelę matoma, kad PA 16 mišinio sudėtis, suprojektuota pagal techninių reikalavimų aprašo TRA ASFALTAS 08 reikalavimus, tenkina keliamus granulimetrinės sudėties reikalavimus. PA 16 modifikuotų mišinių projektinė sudėtis pateikta 2.14 lentelėje.

2.14 lentelė. PA 16 ir PA 16 modifikuotų mišinių projektinė sudėtis

Naudojamos medžiagos	PA 16		PA 16_M1		PA 16_M2		PA 16_M3	
	Kiekis, %		Kiekis, %		Kiekis, %		Kiekis, %	
Dolomito skalda 11/16	95,7	90,4	69,7	65,84	55,7	52,62	80,7	76,23
Dolomito skalda 8/11	0	0	7	6,61	10	9,45	0	0
Dolomito skalda 5/8	0	0	9	8,5	10	9,45	0	0
Dolomito skalda 2/5	0	0	5,00	4,72	10,00	9,45	0	0
Dolomito skaldos atsijos 0/2	0	0	5,00	4,72	10,00	9,45	15,00	14,17
Mineraliniai milteliai	4,00	3,78	4,00	3,78	4,00	3,78	4,00	3,78
Celiuliozė	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Adhezinis priedas „Adhezin“	-	0,017	-	0,017	-	0,017	-	0,017
Bitumas PMB 45/80-65	-	5,50	-	5,50	-	5,50	-	5,50
Iš viso:	100	100	100	100	100	100	100	100

Suprojektavus PA 16 ir modifikuotų mišinių granulimetrinę sudėtį, buvo parinktas bituminio rišiklio kiekis – 5,50 % bitumo nuo mišinio masės. Taip pat projektuojant mišinius buvo naudojama rišiklį stabilizuojantis priedas – celiuliozė, kuri sudarė 0,30 % mišinio masės. Be to naudotas adhezinis priedas „Adhezin“ (0,017 % nuo mišinio masės).



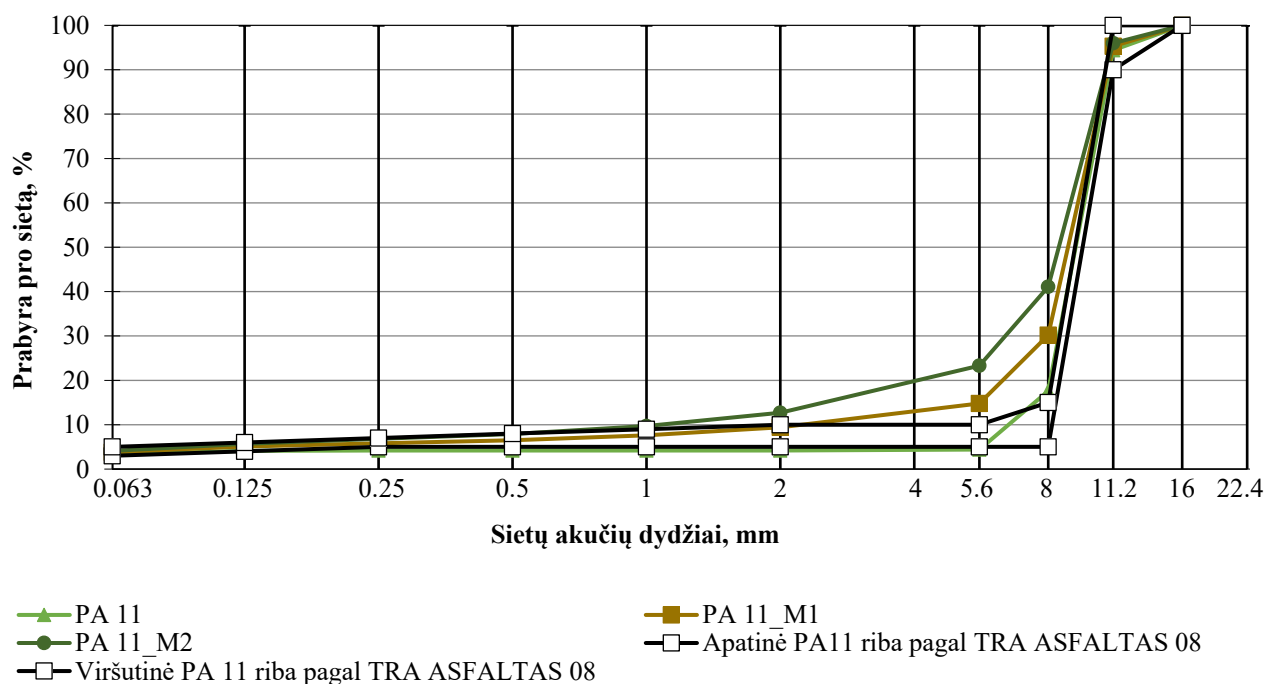
2.20 pav. PA 16 ir PA 16 modifikuotų mišinių granulimetrinės sudėtys

2.21 paveiksle pateiktos pagal techninių reikalavimų aprašą TRA ASFALTAS 08 suprojektuoto poringojo asfalto PA 11 ir modifikuotų asfalto mišinių granulimetrinės sudėtys pagal 2.21 paveiksle pateiktą grafiką ir 2.15 lentelę matoma, kad PA 11 mišinio sudėtis, suprojektuota pagal techninių reikalavimų aprašo TRA ASFALTAS 08 reikalavimus, tenkina keliamus granulimetrinės sudėties reikalavimus. PA 11 modifikuotų mišinių projektinė sudėtis pateikta 2.15 lentelėje.

2.15 lentelė. PA 11 ir PA 11 modifikuotų mišinių projektinė sudėtis

Naudojamos medžiagos	PA 11		PA 11_M1		PA 11_M2	
	Kiekis, %		Kiekis, %		Kiekis, %	
Dolomito skalda 11/16	0	0	0	0	0	0
Dolomito skalda 8/11	95,60	89,82	80,60	75,24	67,60	63,52
Dolomito skalda 5/8	0	0	5,00	4,67	10,00	9,40
Dolomito skalda 2/5	0	0	5,00	4,67	10,00	9,40
Dolomito skaldos atsijos 0/2	0	0	5,00	4,67	8,00	7,52
Mineraliniai milteliai	4,00	3,76	4,00	3,73	4,00	3,76
Celiuliozė	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Adhezinis priedas „Adhezin“	-	0,018	-	0,02	-	0,018
Bitumas PMB 45/80-65	-	6,00	-	6,60	-	6,00
Iš viso:	100	100	100	100	100	100

Suprojektavus PA 11 ir modifikuotų mišinių granulimetrinę sudėtį, buvo parinktas bituminio rišiklio kiekis – 6,00 % bitumo nuo mišinio masės, išskyrus PA 11_M1, kuriam parinktas bituminio rišiklio kiekis – 6,60 % bitumo nuo mišinio masės. Taip pat projektuojant mišinius buvo naudojama rišiklį stabilizuojantis priedas – celiuliozė, kuri sudarė 0,40 % mišinio masės. Be to naudotas adhezinis priedas „Adhezin“ (0,018 % nuo mišinio masės).



2.21 pav. PA 11 ir PA 11 modifikuotų mišinių granulimetrinės sudėties

2.22 paveiksle pateiktos pagal techninių reikalavimų aprašą TRA ASFALTAS 08 suprojektuoto poringojo asfalto PA 8 ir modifikuotų asfalto mišinių granulimetrinės sudėties pagal 2.22 paveiksle pateiktą grafiką ir 2.16 lentelę matoma, kad PA 8 mišinio sudėtis, suprojektuota pagal techninių reikalavimų aprašo TRA ASFALTAS 08 reikalavimus, tenkina keliamus granulimetrinės sudėties reikalavimus. PA 8 modifikuotų mišinių projektinė sudėtis pateikta 2.16 lentelėje.

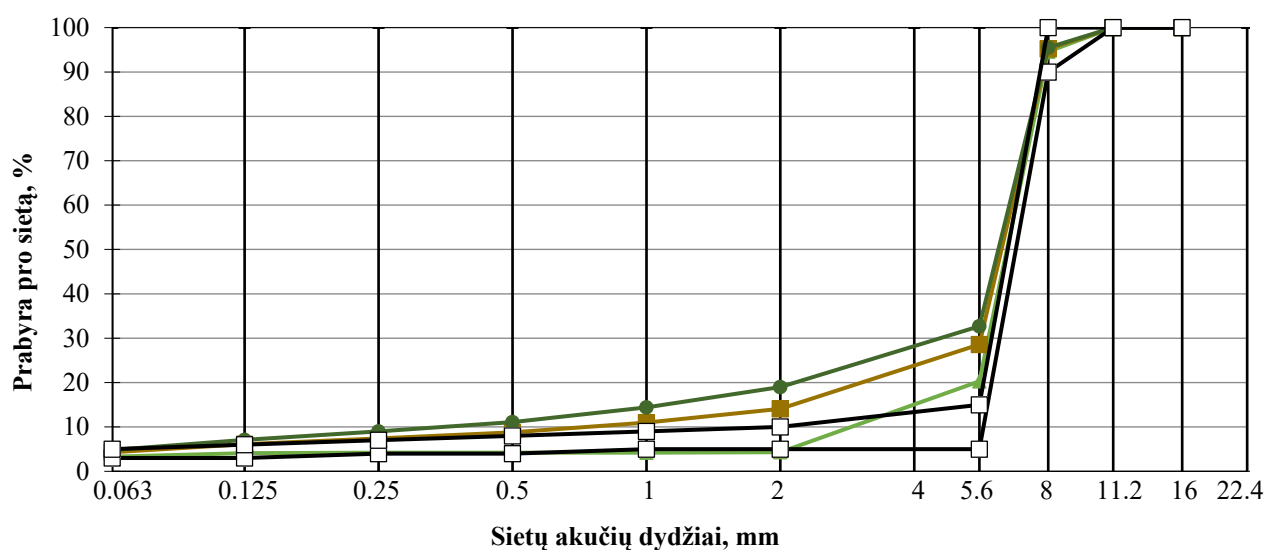
Suprojektavus PA 8 ir modifikuotų mišinių granulimetrinę sudėtį, buvo parinktas bituminio rišiklio kiekis – 6,50 % bitumo nuo mišinio masės. Taip pat projektuojant mišinius buvo naudojama rišiklį stabilizuojantis priedas – celiuliozė, kuri sudarė 0,50 % mišinio masės. Be to naudotas adhezinis priedas „Adhezin“ (0,02 % nuo mišinio masės).

2.16 lentelė. PA 8 ir PA 8 modifikuotų mišinių projektinė sudėtis

Naudojamos medžiagos	PA 8		PA 8_M1		PA 8_M2	
	Kiekis, %		Kiekis, %		Kiekis, %	
Dolomito skalda 11/16	0	0	0	0	0	0
Dolomito skalda 8/11	0	0	0	0	0	0

2.16 lentelės pabaiga

Naudojamos medžiagos	PA 8		PA 8_M1		PA 8_M2	
	Kiekis, %		Kiekis, %		Kiekis, %	
Dolomito skalda 5/8	95,50	89,24	85,50	79,90	80,50	75,23
Dolomito skalda 2/5	0	0	0	0	0	0
Dolomito skaldos atsijos 0/2	0	0	10,00	9,34	15,00	14,02
Mineraliniai milteliai	4,00	3,74	4,00	3,74	4,00	3,74
Celiuliozė	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Adhezinis priedas „Adhezin“	-	0,02	-	0,02	-	0,02
Bitumas PMB 45/80-65	-	6,50	-	6,50	-	6,50
Iš viso:	100	100	100	100	100	100



▲ PA 8
 ● PA 8_M2
 ■ PA 8_M1
 □ Viršutinė PA 8 riba pagal TRA ASFALTAS 08
 □ Apatinė PA8 riba pagal TRA ASFALTAS 08

2.22 pav. PA 8 ir PA 8 modifikuotų mišinių granulometrinės sudėtys

Projektuojamiems vandeniui laidžių asfalto dangų mišiniams naudotas polimerais modifikuotas bitumas PMB 45/80-65. 2.17 lentelėje pateiktos polimerais modifikuoto bituminio rišiklio PMB 45/80-65 savybės.

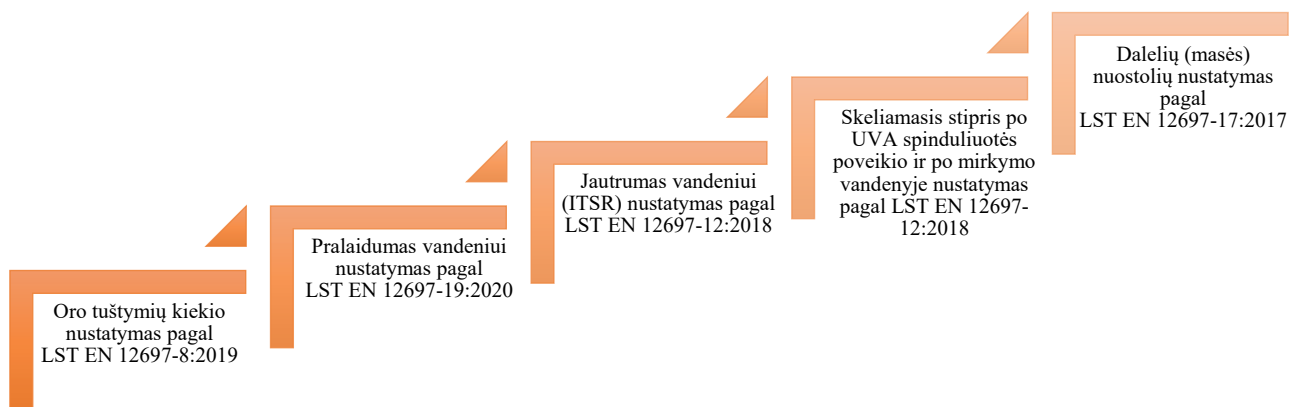
2.17 lentelė. Polimerais modifikuoto bituminio rišiklio PMB 45/80-65 savybės

Savybė	PMB 45/80-65
Penetracija, dmm	56,1
Minkštėjimo temperatūra, °C	78,0
Vidutinės atsikūrusios deformacijos, kai yra 60 °C ir 0,1 kPa ($R_{0,1}$) (MSCR bandymas), %	96,1
Vidutinės atsikūrusios deformacijos, kai yra 60 °C ir 3,2 kPa ($R_{3,2}$) (MSCR bandymas), %	89,6
R_{diff} (MSCR bandymas), %	6,7
Vidutinių liekamųjų deformacijų ir suteiktų įtempių santykis, kai yra 60 °C ir 0,1 kPa ($J_{nr0,1}$) (MSCR bandymas), kPa^{-1}	0,0359
Vidutinių liekamųjų deformacijų ir suteiktų įtempių santykis, kai yra 60 °C ir 3,2 kPa ($J_{nr3,2}$) (MSCR bandymas), kPa^{-1}	0,0982

Savybė	PMB 45/80-65
J _{nr. diff} (MSCR bandymas), %	173,5

2.2. Tyrimo metodika

Eksperimentinio tyrimo metu numatoma atlikti vandeniui pralaidžių asfalto dangų bandymus bei nustatyti funkcinę savybių ribines sąlygas pagal 2.23 paveikslą. Eksperimentinis tyrimas atliktas Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos inžinerijos fakulteto Kelių tyrimo instituto Automobilių kelių mokslo laboratorijoje.



2.23 pav. Eksperimentinio tyrimo schema

2.2.1. Oro tuštymų kiekio nustatymas

Oro tuštymų kiekis – oro tuštymų bandinyje tūris, išreikštas to bandinio viso tūrio procentais, žymimas V_a (LST EN 12697-8:2019, 2019). Oro tuštymų kiekio nustatymas atliktas pagal LST EN 12697-8:2019 standartą „Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 8 dalis. Bituminių bandinių tuštymetumo rodiklių nustatymas“.

Didžiausias mišinio tankis – bituminio mišinio be oro tuštymų, priimtai bandymo temperatūrai. Didžiausio mišinio tankio nustatymas atliktas pagal LST EN 12697-5:2019 „Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 5 dalis. Didžiausio tankio nustatymas“ standartą. Vadovaujantis LST EN 12697-5:2019 standartu didžiausias mišinio tankis nustatytas tūriniu metodu, kuomet vandens kiekis išstumiamas piktometru. Ėminys paruoštas pagal LST EN 12697-27:2017 „Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 27 dalis. Ėminių ėmimas“ standartą. Nustačius didžiausio mišinio tankį tūriniu metodu, pasvertas tuščio piktometro su antgaliu masė (m_1) bei piktometro su antgaliu ir sausu bandiniu masė (m_2), kuri buvo pažymėta bandymo lape. Piktometras užpildytas distiliuotu vandeniu iki lygio, esančio 30 mm žemiau antgalio, įdėtas bandinys į dalinį vakuomo įrenginį 15±1 min, kuriame pasiektas 4 kPa slėgis. Sekantis žingsnis buvo piktometrą su bandiniu

įmerkti į vandens vonelę, pastovios 25 °C temperatūros vandeniui ir išlaikyti 60 min. Susilyginus temperatūroms, piktometras su bandiniu ištrauktas iš vandens vonelės, sausai nušluostytas ir pasvertas piktometro masė su antgaliu ir bandiniu prisotintu vandeniui (m_3). Gauti rezultatai apskaičiuoti pagal 7 formulę:

$$\rho_{mv} = \frac{(m_2 - m_1)}{10^6 \cdot V_p - \frac{(m_3 - m_2)}{\rho_w}} \quad (7)$$

čia ρ_{mv} – didžiausias bituminio mišinio tankis megagramais kubiniam metrui, Mg/m³; m_1 – piktometro su antgaliu masė, g; m_2 – piktometro su antgaliu ir sausu bandiniu masė, g; m_3 – piktometras su antgaliu ir bandiniu prisotintu vandeniui masė, g; V_p – piktometro, pripildyto iki matavimo žymos, tūris, m³; ρ_w – bandymo temperatūros vandens tankis, Mg/m³, kuris apskaičiuojamas pagal 8 formulę:

$$\rho_w = 1,00025205 + \left(\frac{7,59 \cdot t - 5,32 \cdot t^2}{10^6} \right), \quad (8)$$

čia t – vandens temperatūra Celsijaus laipsniais, °C.

Tariamasis tankis - bituminio mišinio su oro tuštymėmis, priimtai bandymo temperatūrai. Tariamąjį tankio nustatymas atliktas pagal LST EN 12697-6:2020 „Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 6 dalis. Bituminių bandinių tariamojo tankio nustatymas“ standartą. Vadovaujantis LST EN 12697-6:2020 standartu tariamasis tankis nustatytas prisotintu sausu (SSD) metodu. Šiuo metodu, pirma nustatyta sauso bandinio masė (m_1), vėliau apskaičiuota bandymo temperatūros vandens tankis (ρ_w) pagal 8 formulę, tyrimo metu priimta pastovi 25 °C temperatūra. Bandiniai buvo įmerkti į vandens vonelę, palaikant pastovią vandens temperatūrą ir palikti prisotinimui vandens ne mažiau nei 30 minučių. Nekintant bandinių masei nustatytas kiekvieno bandinio masė vandenyje (m_2). Pažymėtina, jog nustatant masę prie bandinio neturi būti prikibusių oro burbuliukų. Pasvėrus bandinius, jie išimti iš vandens, nušluostyti zomšine medžiaga bei nustatyta kiekvieno bandinio masė, kai bandinys prisotintas vandens su nusausintu paviršiumi (m_3). Pažymėjus bandymo rezultatus buvo apskaičiuotas tariamasis tankis pagal 9 formulę:

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \cdot \rho_w, \quad (9)$$

čia ρ_{bssd} – tariamasis tankis (SSD) megagramais kubiniam metrui, Mg/m³; m_1 – sauso bandinio masė, g; m_2 – bandinio masė vandenyje, g; m_3 – bandinio, prisotinto vandens su nusausintu paviršiumi, masė, g; ρ_w – bandymo temperatūros vandens tankis, Mg/m³.

Vadovaujantis LST EN 12697-8:2019 standartu oro tuštymių kiekis apskaičiuotas pagal didžiausią mišinio tankį ir tariamąjį bandinio tankį. Skaičiavimai atlikti pagal 10 formulę:

$$V_a = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \cdot 100, \quad (10)$$

čia V_a – oro tuštymių kiekis 0,1 % (tūrio) tikslumu; ρ_m – mišinio didžiausias tankis, Mg/m³; ρ_b – bandinio tariamasis tankis, Mg/m³.

2.2.2. Pralaidumo vandeniui nustatymas

Pralaidumas vandeniui – savybė, nusakanti vandens tekėjimo intensyvumą bei mišinio tinkamumui vandeniui pralaidiems sluoksniams, šiuo atveju poringajam asfaltui. Pralaidumas vandeniui vertikalia ir horizontalia kryptimi nustatymas (žr. 2.24 pav.) atliktas pagal LST EN 12697-19:2020 „Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 19 dalis. Bandinio pralaidumas“ standartą.



2.24 pav. Vertikalaus (a) ir horizontalaus (b) pralaidumo vandeniui nustatymas (c) pagal LST EN 12697-19:2020

Atliekant vertikalų vandens pralaidumą bandinys buvo įdėtas į bandymo prietaisą ir leidžiama vandens srovė į talpą, kurį yra 300 ± 1 mm aukščio. Tam, jog vanduo netekėtų horizontalia kryptimi, bandinys buvo apgaubtas gumine membrana ir sudarytas 50 kPa slėgis, kad būtų tvirtai prispaustos bandinio sienelės ir vanduo netekėtų horizontalia kryptimi. Tada buvo leidžiama vandens srovė 10 min, kol bandinys prisisotino vandens ir nebeliko oro burbuliukų. Pasibaigus nustatytam laikui, bandinys buvo įdėtas į tuščią indą, prieš tai nustatant tuščio indo masę (m_1) ir leidžiamas vanduo 1 min. Pasibaigus vandens tekėjimo laikui nustatyta, kiek inde pritekėjo vandens (m_2), pažymėta bandymo lape ir apskaičiuotas vertikalus vandens tekėjimo kiekis (Q_v) pagal 11 formulę:

$$Q_v = \frac{(m_2 - m_1)}{t} \cdot 10^{-6}, \quad (11)$$

čia Q_v – vertikalus vandens tekėjimo kiekis, m^3/s ; m_1 – antro tuščio indo masė, g; m_2 – antro indo su vandeniu masė, g; t – vandens tekėjimo laikas, s.

Apskaičiavus vertikalus vandens tekėjimo kiekį (Q_v) pagal 11 formulę, skaičiuojamas vertikalus vandens pralaidumas (K_v) pagal 12 formulę:

$$K_v = \frac{4 \cdot Q_v \cdot l}{h \cdot \pi \cdot D^2}, \quad (12)$$

čia K_v – vertikalus vandens pralaidumas, m/s; Q_v – vertikalaus vandens tekėjimo kiekis, m³/s; l – bandinio aukštis, m; h – faktinis vandens stulpelio aukštis, m; D – bandinio skersmuo, m.

Atliekant horizontalų vandens pralaidumą, bandinys buvo įdėtas į bandymo prietaisą ir leidžiama vandens srovė į talpą, kurį yra 300±1 mm aukščio. Tam, jog vanduo netekėtų vertikalia kryptimi, bandinio apačia izoliuota parafinu, o ant bandinio viršaus uždėtas aliuminis žiedas ir suklijuotas silikonu. Tada ant aliumininio žiedo uždėtas plastikinis vamzdis, leidžiama vandens srovė 10 min, kol bandinys prisisotino vandens ir nebeliko oro burbuliukų. Pasibaigus nustatytam laikui, įdėtas tuščias indas, prieš tai nustačius tuščio indo masę (m_1) ir leidžiamas vanduo 1 min. Pasibaigus vandens tekėjimo laikui nustatyta, kiek inde pritekėjo vandens (m_2), pažymėta bandymo lape ir apskaičiuotas horizontalaus vandens tekėjimo kiekis (Q_h) pagal 13 formulę:

$$Q_h = \frac{(m_2 - m_1)}{t} \cdot 10^{-6}, \quad (13)$$

čia Q_h – horizontalaus vandens tekėjimo kiekis, m³/s; m_1 – antro tuščio indo masė, g; m_2 – antro indo su vandeniu masė, g; t – vandens tekėjimo laikas, s.

Apskaičiavus horizontalaus vandens tekėjimo kiekį (Q_h) pagal 13 formulę, skaičiuotas horizontalaus vandens pralaidumas (K_h) pagal 14 formulę:

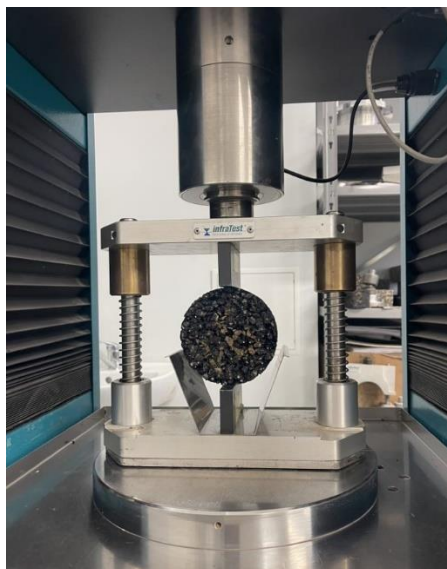
$$K_h = \frac{Q_h \cdot l}{(H + P + 0,5 \cdot l) \cdot (\pi \cdot D \cdot l)} = \frac{Q_h \cdot l}{(300 + 0,5 \cdot l) \cdot (\pi \cdot D \cdot l)}, \quad (14)$$

čia K_h – horizontalaus vandens pralaidumas, m/s; Q_h – horizontalaus vandens tekėjimo kiekis, m³/s; l – bandinio aukštis, m; D – bandinio skersmuo, m; $(H + P + 0,5 \cdot l)$ – faktinis vandens stulpelio aukštis, m; H – viršutinio vamzdžio išleidimo angos atstumas iki apatinio vamzdžio, m; P – plastikinio vamzdžio apatinės dalies aukštis, kuris pritvirtintas ant bandinio, m; $(\pi \cdot D \cdot l)$ – bandinio plotas vandens tekėjimo kryptimi, m.

2.2.3. Jautrumo vandeniui nustatymas

Jautrumas vandeniui – mišinio sutankintų bandinių ITSR vertė. Netiesioginių tempimo stiprių santykis (ITSR) – drėgnų bandinių netiesioginio tempimo stiprio ir sausų bandinių netiesioginio tempimo stiprio santykis. Jautrumo vandeniui nustatymas atliktas pagal LST EN 12697-12:2018 „Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 12 dalis. Bituminių bandinių jautrio vandeniui nustatymas“ standartą. Vadovaujantis LST EN 12697-12:2018 standartu pasirinktas smūginio tankinimo metodas, todėl bandiniai suformuoti pagal LST EN 12697-30:2019 „Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 30 dalis. Bandinio paruošimas smūginio tankintuvu“ standartą. Šiame tyrime buvo suformuoti 6 bandiniai, kuriems buvo taikoma po 50 smūgių iš abiejų pusių. Bandiniai buvo padalinti į dvi grupes po 3 bandinius. Viena bandinių grupė laikyta sausa, pastovioje 20 °C temperatūroje 72 val., o kita dalis bandinių įdėti į vandens vonią 72 val. palaikant pastovią 40 °C temperatūrą. Po 72 val. visi bandiniai laikyti klimatinėje kameroje 4 val., palaikant pastovią 20 °C. Kai klimatinėje kameroje bandinių temperatūra išlieka pastovi – 20 °C, atliktas netiesioginio tempimo stiprio bandymas su

gniuždymo mašina pagal LST EN 12697-23:2018 „Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 23 dalis. Bituminių bandinių netiesioginio tempimo stiprio nustatymas“. Bandymas atliktas per 2 min po bandinio išėmimo iš klimatinės kameros.



2.25 pav. Netiesioginio tempimo stiprio bandymas pagal LST EN 12697-23:2018

Atlikus netiesioginio tempimo stiprio bandymą (žr. 2.25 pav.) pagal LST EN 12697-23:2018, buvo užrašomi rezultatai ir apskaičiuotas kiekvieno bandinio netiesioginio tempimo stipris pagal 15 formulę:

$$ITS = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot H} \cdot 1000, \quad (15)$$

čia ITS – netiesioginis tempimo stipris, kPa; P – pikinė apkrova, N; D – bandinio skersmuo, mm; H – bandinio aukštis, mm.

Nustačius kiekvieno bandinio netiesioginį tempimo stiprį vadovaujantis LST EN 12697-12:2018 apskaičiuotas netiesioginių tempimo stiprių santykis $ITSR$ pagal 16 formulę:

$$ITSR = 100 \cdot \frac{ITS_w}{ITS_d}, \quad (16)$$

čia $ITSR$ - netiesioginių tempimo stiprių santykis, %; ITS_w - drėgnų bandinių grupės vidutinis netiesioginis tempimo stipris, kPa; ITS_d – sausų bandinių grupės vidutinis netiesioginis tempimo stipris, kPa.

2.2.4. Skeliamojo stiprio nustatymas po UVA spinduliuotės poveikio ir po mirkymo vandenyje

Skeliamojo stiprio bandymas parodo mišinio koheazines savybes, t. y. mišinio funkcinių savybių sukibimo stiprumą. Skeliamasis stipris nustatomas atliekant netiesioginį tempimo stiprio bandymą,

kurio metu didžiausia tempimo jėga nustatoma, kai cilindrinis bandinys tam tikroje temperatūroje apkraunamas gniuždymo įrenginio nustatytu greičiu.

Tyrimo metu buvo suformuoti 6 bandiniai pagal LST EN 12697-30:2019 „Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 30 dalis. Bandinio paruošimas smūginu tankintuvu“ standartą.

Vadovaujantis 1.11 lentelėje nustatytais teorinės asfalto dangos pralaidumą vandeniui užtikrinančios funkcinių savybių ribinėmis vertėmis, priimta, kad per metus Žemės paviršių vidutiniškai pasiekia 7630 mW/m^2 ultravioletinių spindulių. Vadovaujantis KPT SDK 19 naujos dangos projektinis naudojimo laikotarpis yra 20 metų. Sudauginus vidutinį Žemės paviršių pasiekiantį ultravioletinių spindulių kiekį iš projektinės dangos eksploataavimo trukmės, gautas 152600 mW/m^2 ultravioletinių spindulių, veikiančių įrengtą dangą iki 20 metų. Pagal apskaičiuotą spindulių kiekį bandiniai prietaisu sendinti 5 val. Atlikus sendinimo procedūrą suformuotiems bandiniams buvo taikoma po 50 smūgių iš abiejų pusių. Bandiniai buvo padalinti į dvi grupes po 3 bandinius. Viena bandinių grupė laikyta sausai, pastovioje $20 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūroje 72 val., o kita dalis bandinių buvo įdėti į vandens vonią 72 val. palaikant pastovią $40 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrą. Po 72 val. visi bandiniai buvo laikyti klimatinėje kameroje 4 val., palaikant pastovią $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Kai klimatinėje kameroje bandinių temperatūra išliko pastovi – $20 \text{ }^\circ\text{C}$, atliktas netiesioginio tempimo stiprio bandymas su gniuždymo mašina pagal LST EN 12697-23:2018 „Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 23 dalis. Bituminių bandinių netiesioginio tempimo stiprio nustatymas“. Šis bandymas atliktas per 2 min po bandinio išėmimo iš klimatinės kameros.

Atlikus netiesioginio tempimo stiprio bandymą pagal LST EN 12697-23:2018, buvo užrašyti gauti rezultatai.

2.2.5. Dalelių (masės) nuostolių nustatymas

Dalelių (masės) nuostolių nustatymas atliktas pagal LST EN 12697-17:2017 „Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 17 dalis. Akytojo asfalto bandinių dalelių nuostoliai“ standartą. Atliekant dalelių nuostolių bandymą, bandiniai buvo suformuoti pagal LST EN 12697-30:2019. Bandiniai buvo laikyti 4 valandas nuo $15 \text{ }^\circ\text{C}$ iki $25 \text{ }^\circ\text{C}$ pastovioje temperatūroje. Bandymas atliktas Los Andželo prietaisu pagal LST EN 1097-2:2020 „Bandymai užpildų mechaninėms ir fizikinėms savybėms nustatyti. 2 dalis. Atsparumo trupinimui nustatymo metodai“, todėl prieš įdedant į Los Andželo būgną, atliktas pirminis bandymo masės (W_1) nustatymas. Įdėjus bandinį į Los Andželo būgną, buvo išimti metaliniai rutuliukai bei nustatytas sukimosi greitis 30–33 kartus per minutę. Bandymas atliktas kol nebuvo pasiekta 300 apsisukimo ciklų. Tuomet bandinys atsargiai išimtas iš būgno, nuvalytas ir pasvertas galutinei bandinio masei (W_2). Bandymo rezultatai buvo užrašyti ir apskaičiuotas kiekvieno bandinio dalelių (masės) nuostoliai pagal 17 formulę:

$$PL = 100 \cdot \frac{(W_1 - W_2)}{W_1}, \quad (17)$$

čia PL – masės (dalelių) nuostoliai, %; W_1 – pirminė bandinio masė, g; W_2 – galutinė bandinio masė, g.

2.3. Eksperimentinio tyrimo rezultatai

Atliekant eksperimentinį tyrimą buvo nustatyta suprojektuotų poringojo asfalto mišinių faktinė granuliometrinė sudėtis pagal LST EN 933-1:2012 „Bandymai užpildų geometrinėms savybėms nustatyti. 1 dalis. Granuliometrinės sudėties nustatymas. Sijojimo metodas“ standartą. Patikslinta granuliometrinė sudėtis su rišiklio kiekių mišinyje pateikta 2.18 lentelėje, kuri neatitinka projektinei poringųjų asfalto mišinių granuliometrinei sudėčiai ir rišiklio kiekiui, kuri pateikta 2.1 poskyryje.

2.18 lentelė. Patikslinta granuliometrinė sudėtis su rišiklio kiekių mišinyje

PA mišinys	Rišiklio kiekis mišinyje, %	Išbiros per atitinkamą akučių dydžio sietą, %											
		0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	5,6	8	11,2	16	22,4	31,5
PA 16	4,56	3,9	3,9	3,9	4,0	4,0	4,0	4,0	4,1	12,4	94,6	100,0	100,0
PA 16 M1	4,40	4,5	5,0	5,4	5,9	6,7	8,1	12,0	19,0	34,9	97,2	100,0	100,0
PA 16 M2	4,94	5,1	6,2	7,1	8,2	10,1	13,2	22,7	30,8	45,2	99,1	100,0	100,0
PA 16 M3	5,37	6,0	7,7	9,3	11,1	14,1	18,2	18,6	18,6	26,6	97,2	100,0	100,0
PA 11	4,89	3,3	3,5	3,5	3,6	3,6	3,6	4,0	17,2	93,6	100,0	100,0	100,0
PA 11 M1	6,75	5,0	5,9	6,6	7,3	8,4	10,1	16,3	28,6	94,4	100,0	100,0	100,0
PA 11 M2	5,53	4,9	5,9	6,7	7,7	9,2	11,9	22,5	43,0	94,6	100,0	100,0	100,0
PA 8	5,50	3,4	3,6	3,7	3,7	3,7	3,8	20,6	93,7	100,0	100,0	100,0	100,0
PA 8 M1	5,67	4,7	5,7	6,6	7,8	9,6	12,1	22,6	91,8	100,0	100,0	100,0	100,0
PA 8 M2	6,34	6,1	7,8	9,5	11,6	15,1	19,9	30,9	94,4	100,0	100,0	100,0	100,0

Ištirtų suprojektuotų poringojo asfalto mišinių eksperimentinio tyrimo rezultatai pateikti 2.19 lentelėje. Pateiktos charakteristikos aptariamose tolimesniuose skyriaus skirsniuose.

2.19 lentelė. Eksperimentinio tyrimo rezultatai

Charakteristika	Tiriamieji asfalto mišiniai									
	PA16	PA 16_M1	PA 16_M2	PA 16_M3	PA11	PA 11_M1	PA 11_M2	PA 8	PA 8_M1	PA 8_M2
Oro tuštymių kiekis, %	27,4	19,9	13,7	16,0	27,0	19,1	14,5	23,3	17,1	11,5
Tariamasis tankis, Mg/m ³	1,867	2,036	2,183	2,114	1,890	2,038	2,159	1,943	2,075	2,205
Mišinio didžiausias tankis, Mg/m ³	2,573	2,542	2,530	2,516	2,589	2,521	2,526	2,532	2,505	2,493
Jautrumas vandeniui, %	91,51	88,09	89,32	103,10	76,24	79,78	80,98	95,35	87,78	77,49
Dalelių (masės) nuostolis, %	97,9	32,1	19,6	26,9	72,8	27,2	27,1	39,1	25,9	21,1
Pralaidumas vandeniui:										
Horizontalusis, ·10 ⁻³ m/s	3,9	0,8	0,6	0,7	2,3	1,0	0,6	1,4	0,5	0,2
Vertikalusis, ·10 ⁻³ m/s	1,6	0,6	0,1	0,2	1,8	0,2	0,2	0,6	0,3	0,2

Charakteristika	Tiriamieji asfalto mišiniai									
	PA16	PA 16_M1	PA 16_M2	PA 16_M3	PA11	PA 11_M1	PA 11_M2	PA 8	PA 8_M1	PA 8_M2
Netiesioginis tempiamasis stipris:										
sausieji bandiniai	450	761	1071	766	437	611	822	511	700	962
drėgnieji bandiniai	411	671	957	790	333	487	666	487	615	746
Netiesioginis tempiamasis stipris po UVA spinduliuotės poveikio ir po mirkymo vandenyje:										
sausieji bandiniai	495	773	1110	842	473	664	837	538	878	989
drėgnieji bandiniai	446	711	969	854	422	616	747	504	747	758

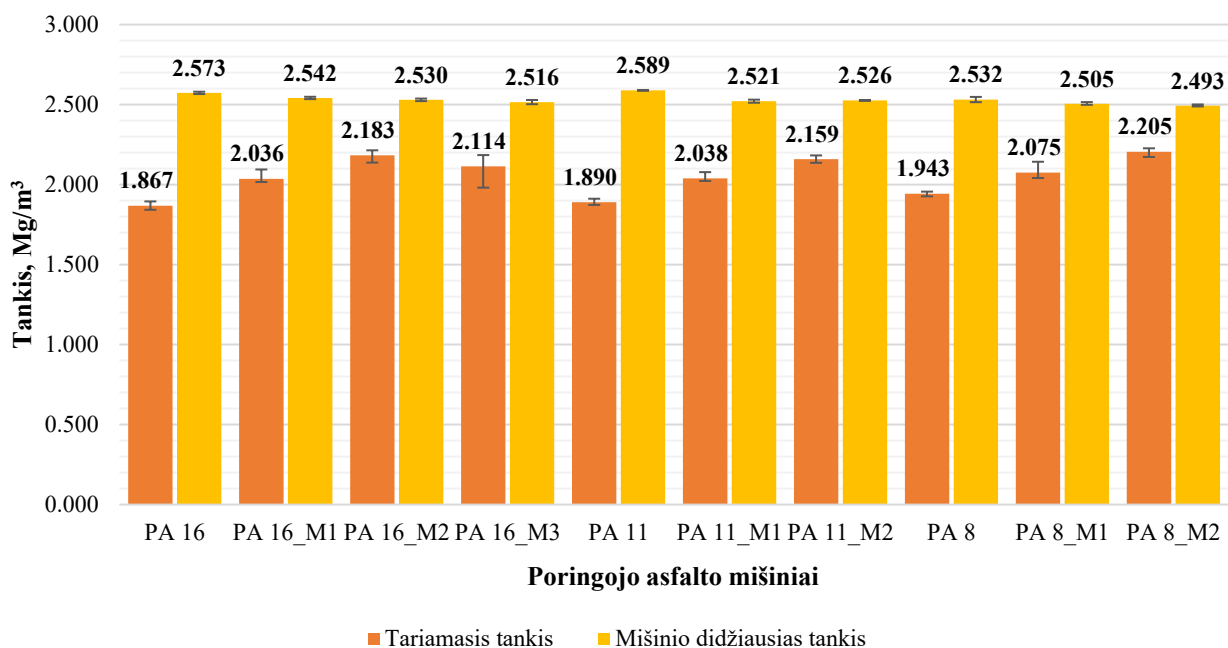
2.3.1. Oro tuštymų kiekis

Oro tuštymų kiekis nustatytas 10-iai skirtingų suprojektuotų poringojo asfalto mišinių. Bandymo rezultatai pateikti 2.27 paveiksle. Tačiau prieš nustatant oro tuštymų kiekį, atlikti tariamojo tankio ir mišinio didžiausio tankio nustatymo bandymai, kurių rezultatai su minimaliomis ir maksimaliomis bandinio rezultatais paklaidų juostoje pateikti 2.26 paveiksle.

Pastebėta, kad mažiausios tariamojo tankio vidurkio vertės gautos PA 16, PA 11 ir PA 8 mišiniams, kurios buvo suprojektuotos pagal TRA ASFALTAS 08, o tariamojo tankio vidurkio vertės siekiančios virš $\geq 2,000 \text{ Mg/m}^3$ bandymo metu gautos visiems PA 16, PA 11 ir PA 8 modifikuotiems mišiniams. Mažiausia vertė nustatyta PA 16 mišiniui – $1,867 \text{ Mg/m}^3$, o didžiausios vertės nustatytos modifikuotam PA 8 mišiniui Nr. 2 – $2,205 \text{ Mg/m}^3$ ir modifikuotam PA 16 mišiniui Nr. 2 – $2,183 \text{ Mg/m}^3$. Nustatyta, jog didžiausias bandinių kitimas buvo modifikuoto PA 16 mišinio Nr. 3, kuris kito nuo $1,981 \text{ Mg/m}^3$ iki $2,185 \text{ Mg/m}^3$, o mažiausias bandinių kitimas buvo pastebėtas PA 8 mišiniui, kuris kito nuo $1,926 \text{ Mg/m}^3$ iki $1,956 \text{ Mg/m}^3$.

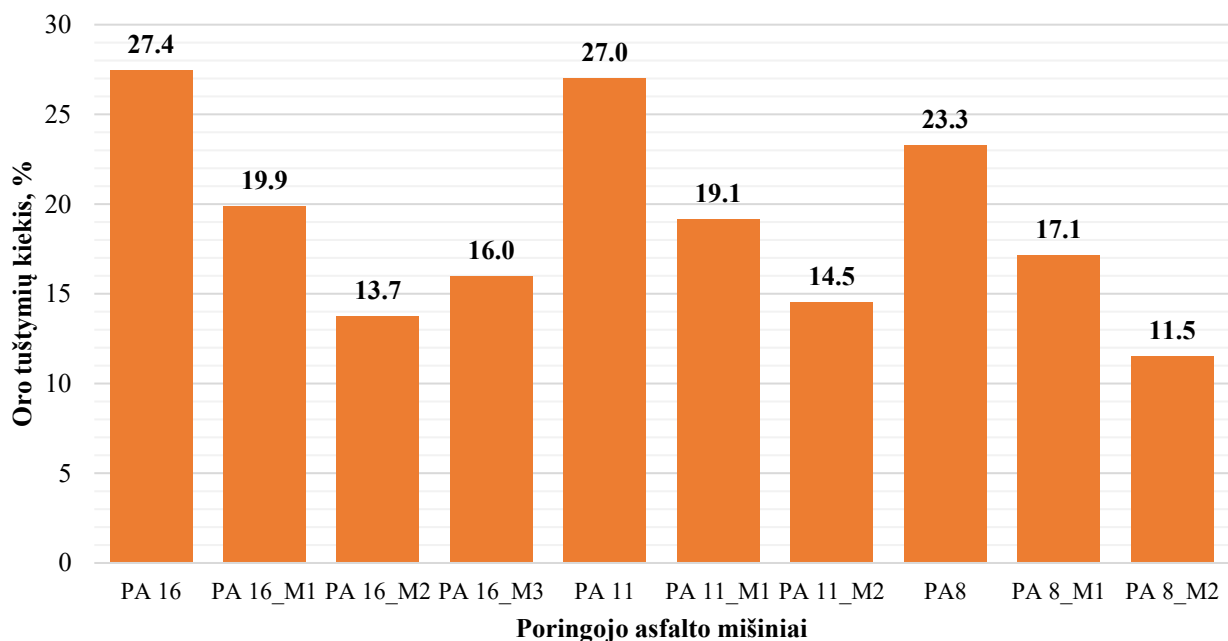
Mišinių didžiausio tankio vidurkiai nagrinėjamuose mišiniuose bandymo metu nustatyti $2,493 \div 2,589 \text{ Mg/m}^3$ ribose (žr. 2.26 pav.). Mažiausia vertė nustatyta modifikuotam PA 8 mišiniui Nr. 2 – $2,493 \text{ Mg/m}^3$, o didžiausios vertės nustatytos PA 11 mišiniui – $2,589 \text{ Mg/m}^3$ ir PA 16 mišiniui – $2,573 \text{ Mg/m}^3$. Nustatyta, jog didžiausias bandinių kitimas buvo PA 8 mišiniui, kuris kito nuo $2,515 \text{ Mg/m}^3$ iki $2,548 \text{ Mg/m}^3$, o mažiausias bandinių kitimas buvo pastebėtas modifikuoto PA 11 mišinio Nr. 2, kuris kito nuo $2,523 \text{ Mg/m}^3$ iki $2,529 \text{ Mg/m}^3$.

Kaip matyti iš 2.27 paveikslo, oro tuštymų kiekis kinta nuo 11,5 % iki 27,4 %. Didžiausios oro tuštymų kiekio vertės gautos PA 16 – 27,4 %, PA 11 – 27,0 % ir PA 8 – 23,3 % mišiniams. Bandymo rezultatai pavaizduoti 2.8 paveiksle taip pat parodo mažiausius oro tuštymų kiekius gautus bandymo metu, tokius kaip: modifikuoto PA 8 mišinio Nr. 2, kurio oro tuštymų kiekis 11,5 %, modifikuoto PA 16 mišinio Nr. 2 – 13,7 % ir modifikuoto PA 11 mišinio Nr. 2 – 14,5 %.



2.26 pav. Tariamojo tankio ir mišinio didžiausio tankio vidurkių bandymo rezultatai

Visų PA 16, PA 11 ir PA 8 modifikuotų mišinių oro tuštymių kiekis nustatytas mažesnis nei 20 %. Didžiausios modifikuotų mišinių oro tuštymių kiekio vertės gautos: modifikuoto PA 16 mišinio Nr. 1 – 19,9 %, modifikuoto PA 11 mišinio Nr. 1 – 19,1 % ir modifikuoto PA 8 mišinio Nr. 1 – 17,1 %.

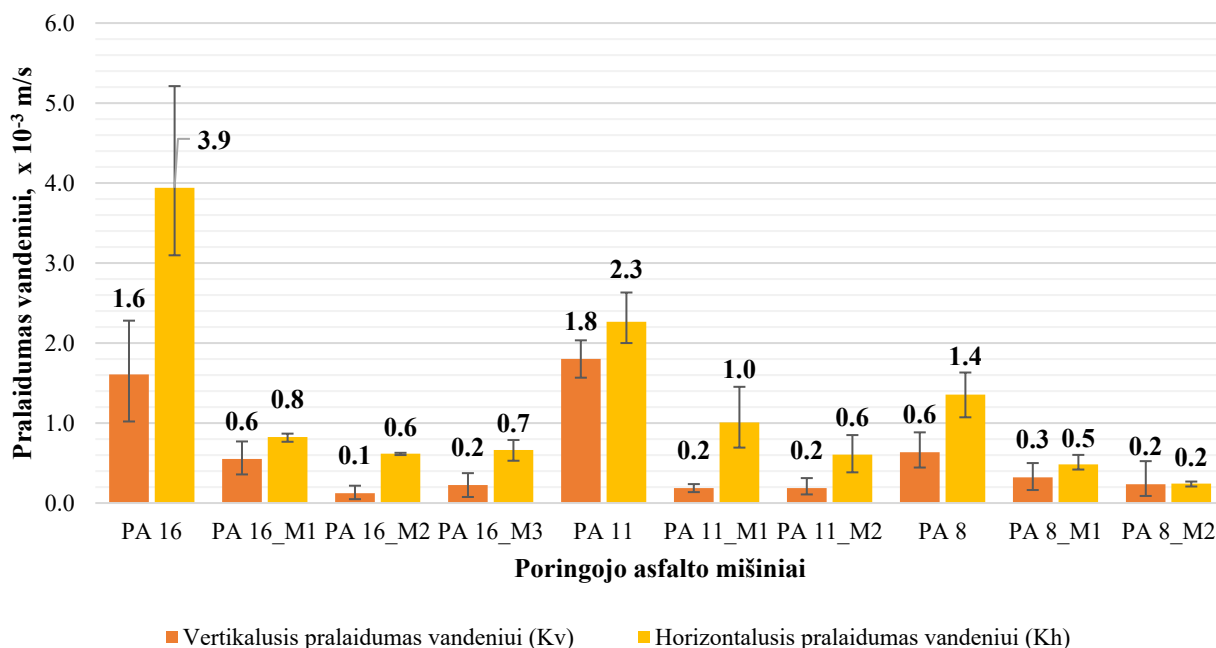


2.27 pav. Oro tuštymių kiekio bandymo rezultatai

2.3.2. Pralaidumas vandeniui

Vertikalusis ir horizontalusis pralaidumas vandeniui nustatytas 10-iai skirtingų suprojektuotų poringojo asfalto mišinių. Bandymo rezultatai su minimaliomis ir maksimaliomis bandinio rezultatais paklaidų juostoje pateikti 2.28 paveiksle. Bandymo rezultatai rodo, kad vertikaliojo pralaidumo vandeniui vidurkiai nagrinėjamuose mišiniuose bandymo metu nustatyti $0,1 \cdot 10^{-3} \div 1,8 \cdot 10^{-3}$ m/s ribose. Didžiausios vertikaliojo pralaidumo vandeniui vidurkio vertės gautos mišiniams: PA 11 – $1,8 \cdot 10^{-3}$ m/s, PA 16 – $1,6 \cdot 10^{-3}$ m/s, PA 8 ir modifikuoto PA 16 mišiniui Nr. 1, kurių gautos vertės buvo identiškios – $0,6 \cdot 10^{-3}$ m/s. Bandymo rezultatai pavaizduoti 2.28 paveiksle taip pat parodo mažiausius vertikaliojo pralaidumo vandeniui vidurkio vertes gautus bandymo metu, tokius kaip: modifikuoto PA 16 mišinio Nr. 2 – $0,1 \cdot 10^{-3}$ m/s, modifikuoto PA 16 mišinio Nr. 3, modifikuotų PA 11 mišinių Nr. 1 ir Nr. 2 ir modifikuoto PA 8 mišinio Nr. 2, kurių vertės buvo vienodos – $0,2 \cdot 10^{-3}$ m/s ir modifikuoto PA 8 mišinio Nr. 1 – $0,3 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Nustatyta, jog didžiausias bandinių kitimas buvo PA 16 mišiniui, kuris kito nuo $1,02 \cdot 10^{-3}$ m/s iki $2,28 \cdot 10^{-3}$ m/s, o mažiausias bandinių kitimas buvo pastebėtas modifikuoto PA 11 mišinio Nr. 1, kuris kito nuo $0,14 \cdot 10^{-3}$ m/s iki $0,24 \cdot 10^{-3}$ m/s.



2.28 pav. Pralaidumo vandeniui, bandymo rezultatai

Horizontalaus pralaidumo vandeniui vidurkiai nagrinėjamuose mišiniuose bandymo metu nustatyti $0,2 \cdot 10^{-3} \div 3,9 \cdot 10^{-3}$ m/s ribose. Didžiausios vertikaliojo pralaidumo vandeniui vidurkio vertės gautos mišiniams: PA 11 – $3,9 \cdot 10^{-3}$ m/s, PA 16 – $2,3 \cdot 10^{-3}$ m/s, PA 8 – $1,4 \cdot 10^{-3}$ m/s. Bandymo rezultatai pavaizduoti 2.28 paveiksle taip pat parodo mažiausius horizontaliojo pralaidumo

vandeniui vidurkio vertes gautus bandymo metu, tokius kaip: modifikuoto PA 8 mišinio Nr. 2 – $0,2 \cdot 10^{-3}$ m/s, modifikuoto PA 8 mišinio Nr. 1 – $0,5 \cdot 10^{-3}$ m/s, modifikuoto PA 16 mišinio Nr. 2 ir modifikuoto PA 11 mišinio Nr. 2, kurių gautos vertės buvo identiškios – $0,6 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Nustatyta, jog didžiausias bandinių kitimas buvo PA 16 mišiniui, kuris kito nuo $3,10 \cdot 10^{-3}$ m/s iki $5,21 \cdot 10^{-3}$ m/s, o mažiausias bandinių kitimas buvo pastebėtas modifikuoto PA 16 mišinio Nr. 2, kuris kito nuo $0,60 \cdot 10^{-3}$ m/s iki $0,63 \cdot 10^{-3}$ m/s.

2.3.3. Jautrumas vandeniui

Jautrumas vandeniui pagal netiesioginį tempiamąjį stiprio santykį (ITSR) nustatytas 10-iai skirtingų suprojektuotų poringojo asfalto mišinių. Bandymo rezultatai su minimaliomis ir maksimaliomis bandinio rezultatais paklaidų juostoje pateikti 2.29 paveiksle. Atsižvelgus į tai, kad netiesioginio tempiamojo stiprio santykis nustatomas iš drėgnų ir sausų todėl pradžioje nustatyti bandymo rezultatai bus vertinami drėgniems ir sausiems bandiniams.

Sausų bandinių netiesioginio tempiamojo stiprio vidurkis kinta nuo 437 kPa iki 1071 kPa. Didžiausios sausų bandinių netiesioginio tempiamojo stiprio vidurkiu reikšmės nustatytos: modifikuotam PA 16 mišiniui Nr. 2 – 1071 kPa, modifikuotam PA 8 mišiniui Nr. 2 – 962 kPa ir modifikuotam PA 11 mišiniui Nr. 2 – 822 kPa. Mažiausi bandymo rezultatai sausų bandinių netiesioginio stiprio vidurkio buvo ištirti šiems mišinių bandiniams: PA 11 – 437 kPa, PA 16 – 450 kPa ir PA 8 – 511 kPa.

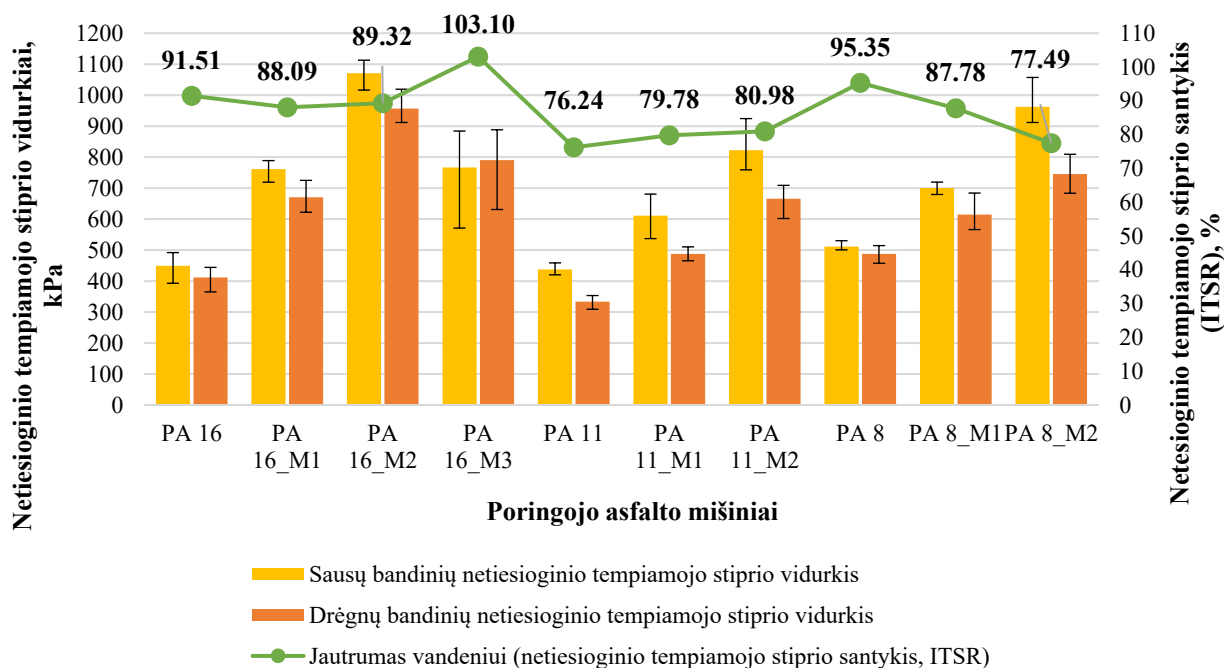
Nustatyta, jog didžiausias bandinių kitimas buvo modifikuoto PA 16 mišinio Nr. 3, kuris kito nuo 571 kPa iki 884 kPa, o mažiausias bandinių kitimas buvo pastebėtas PA 8 mišiniui, kuris kito nuo 501 kPa iki 530 kPa.

Drėgnų bandinių netiesioginio tempiamojo stiprio vidurkis kinta nuo 333 kPa iki 957 kPa. Didžiausios drėgnų bandinių netiesioginio tempiamojo stiprio vidurkiu reikšmės nustatytos: modifikuotam PA 16 mišiniui Nr. 2 – 957 kPa, modifikuotam PA 16 mišiniui Nr. 3 – 790 kPa ir modifikuotam PA 8 mišiniui Nr. 2 – 746 kPa. Mažiausi bandymo rezultatai drėgnų bandinių netiesioginio stiprio vidurkio buvo ištirti mišinių bandiniams: PA 11 – 333 kPa, PA 16 – 411 kPa, modifikuotam PA 11 mišiniui Nr. 1 ir PA 8, kurių gautos vertės buvo vienodos – 487 kPa.

Nustatyta, jog didžiausias bandinių kitimas buvo modifikuoto PA 16 mišinio Nr. 3, kuris kito nuo 631 kPa iki 888 kPa, o mažiausias bandinių kitimas buvo pastebėtas PA 11 mišiniui, kuris kito nuo 309 kPa iki 353 kPa.

Netiesioginio tempiamojo stiprio santykis kinta nuo 76,24 iki 103,10 %. Mažiausios netiesioginio tempiamojo stiprio santykio reikšmės gautos mišinių: PA 11 – 76,24 %, modifikuotui PA 8 mišiniui Nr. 2 – 77,49 % ir modifikuoto PA 11 mišinio Nr. 1 – 79,78 %. Didžiausios netiesioginio tempiamojo stiprio santykio reikšmės gautos mišiniams: modifikuotui PA 16 mišiniui

Nr. 3 – 103,10 %, PA 8 mišiniui – 95,35 % ir PA 16 mišiniui – 91,51 %. Skirtumas tarp didžiausios ir mažiausios nustatytos netiesioginio tempiamojo stiprio santykio reikšmės – 26,86 %.



2.29 pav. Jautrumo vandeniui bandymo rezultatai

2.3.4. Skeliamasis stipris po UVA spinduliuotės poveikio ir po mirkymo vandenyje

Skeliamasis stipris po UVA spinduliuotės poveikio ir po mirkymo vandenyje apskaičiuotą pagal netiesioginį tempiamąjį stiprį, kuris nustatytas 10-iai skirtingų suprojektuotų poringojo asfalto mišinių. Bandymo rezultatai su minimaliomis ir maksimaliomis bandinio rezultatais paklaidų juostoje pateikti 2.30 paveiksle.

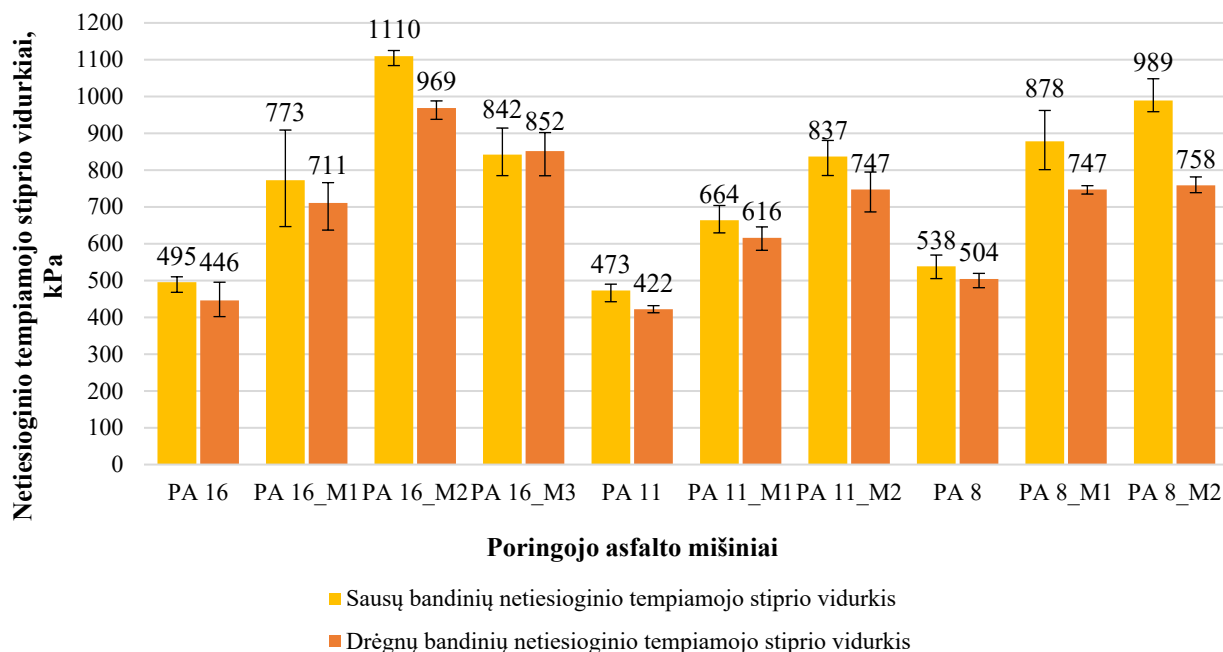
Sausų bandinių netiesioginio tempiamojo stiprio vidurkis kinta nuo 473 kPa iki 1100 kPa. Didžiausios sausų bandinių netiesioginio tempiamojo stiprio vidurkiu reikšmės nustatytos: modifikuoto PA 16 mišinio Nr. 2 – 1100 kPa, modifikuoto PA 8 mišinio Nr. 2 – 989 kPa ir modifikuoto PA 11 mišinio Nr. 2 – 878 kPa mišiniams. Mažiausi bandymo rezultatai sausų bandinių netiesioginio stiprio vidurkio buvo ištirti šiems mišinių bandiniams: PA 11 – 473 kPa, PA 16 – 495 kPa ir PA 8 – 538 kPa.

Nustatyta, jog didžiausias bandinių kitimas buvo modifikuoto PA 16 mišinio Nr. 1, kuris kito nuo 647 kPa iki 909 kPa, o mažiausias bandinių kitimas buvo pastebėtas modifikuoto PA 16 mišinio Nr. 2, kuris kito nuo 1084 kPa iki 1125 kPa.

Drėgnų bandinių netiesioginio tempiamojo stiprio vidurkis kinta nuo 422 kPa iki 969 kPa. Didžiausios drėgnų bandinių netiesioginio tempiamojo stiprio vidurkiu reikšmės nustatytos: modifikuoto PA 16 mišinio Nr. 2 – 969 kPa, modifikuoto PA 16 mišinio Nr. 3 – 852 kPa ir modifikuoto PA 8 mišinio Nr. 2 – 758 kPa. Mažiausi bandymo rezultatai drėgnų bandinių

netiesioginio stiprio vidurkio buvo ištirti šiems mišinių bandiniams: PA 11 – 422 kPa, PA 16 – 446 kPa, PA 8 – 504 kPa.

Nustatyta, jog didžiausias bandinių kitimas buvo modifikuoto PA 16 mišinio Nr. 1, kuris kito nuo 637 kPa iki 766 kPa, o mažiausias bandinių kitimas buvo pastebėtas PA 11 mišiniui, kuris kito nuo 412 kPa iki 432 kPa.



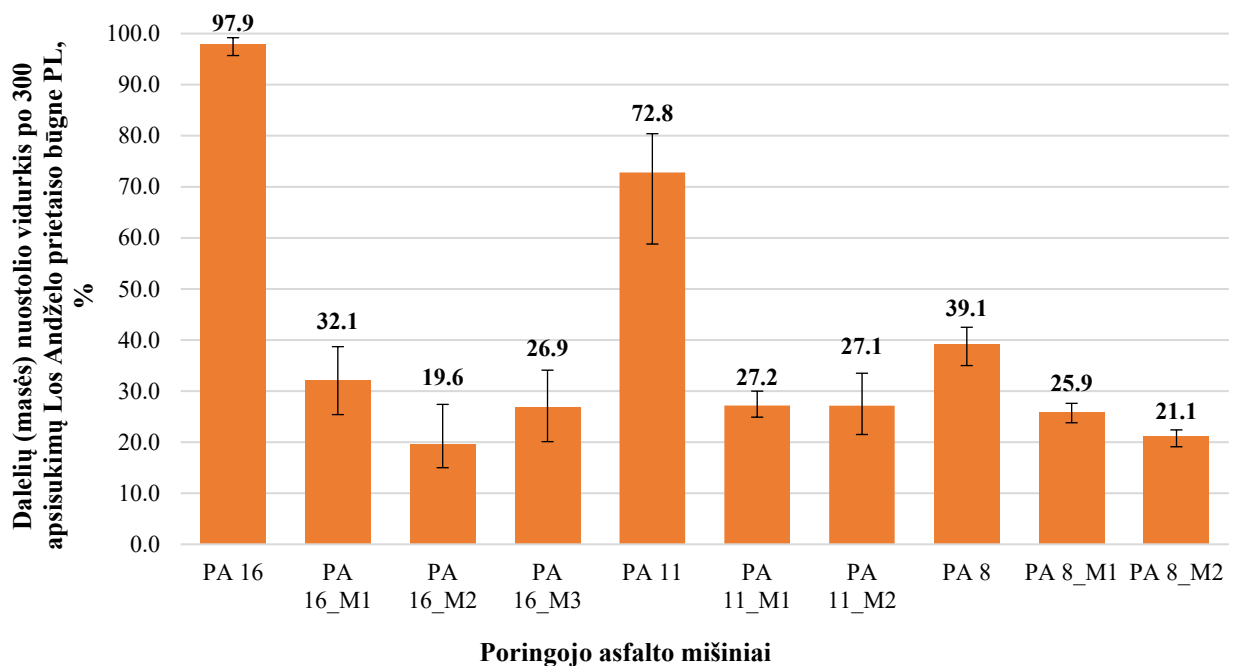
2.30 pav. Skeliamojo stiprio po UVA spinduliuotės poveikio ir po mirkymo vandenyje bandymo rezultatai

2.3.5. Dalelių (masės) nuostoliai

Dalelių (masės) nuostolis po 300 apsisukimų Los Andželo prietaiso būgnu nustatytas 10-iai skirtingų suprojektuotų poringojo asfalto mišinių. Bandymo rezultatai su minimaliomis ir maksimaliomis bandinio rezultatais paklaidų juostoje pateikti 2.31 paveiksle.

Dalelių (masės) nuostolio vidurkis po 300 apsisukimų Los Andželo prietaiso būgne kinta nuo 19,6 % iki 97,9 %. Didžiausios dalelių (masės) nuostolių vidurkių reikšmės nustatytos mišiniams: PA 16 – 97,9 %, PA 11 – 72,8 % ir PA 8 – 39,1 %. Bandymo rezultatai pavaizduoti 2.31 paveiksle taip pat parodo mažiausius dalelių (masės) nuostolio vidurkio vertes gautus bandymo metu, tokius kaip: modifikuoto PA 16 mišinio Nr. 2 – 19,6 %, modifikuoto PA 8 mišinio Nr. 2, kurio dalelių (masės) nuostolis 21,1 % ir modifikuoto PA 8 mišinio Nr. 1 – 25,9 %.

Nustatyta, jog didžiausias bandinių kitimas buvo PA 11 mišinio, kuris kito nuo 58,8 % iki 80,4 %, o mažiausias bandinių kitimas buvo pastebėtas modifikuoto PA 8 mišinio Nr. 2, kuris kito nuo 19,1 % iki 22,4 %.



2.31 pav. Dalelių (masės) nuostolių bandymo rezultatai

2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Siekiant nustatyti asfalto mišinių funkcinių savybių ribines sąlygas, užtikrinančias asfalto dangų pralaidumą vandeniui, sudarytas eksperimentinis tyrimas, apimantis dešimties skirtingų poringojo asfalto mišinių oro tuštymių kiekio, pralaidumo vandeniui, jautrumo vandeniui, skeliamojo stiprio po UVA spinduliuotės poveikio ir po mirkymo vandenyje, dalelių (masės) nuostolių tyrimus. Trys tiriamieji asfalto mišiniai (PA 16, PA 11 ir PA 8) suprojektuoti pagal techninių reikalavimų aprašo TRA ASFALTAS 08 reikalavimus, o kiti septyni mišiniai (PA 16 modifikuotas Nr. 1, PA 16 modifikuotas Nr. 2, PA 16 modifikuotas Nr. 3, PA 11 modifikuotas Nr. 1, PA 11 modifikuotas Nr. 2, PA 8 modifikuotas Nr. 1, PA 8 modifikuotas Nr. 2) – mažinant oro tuštymių kiekį.

2. Nustačius suprojektuotų asfalto mišinių oro tuštymių kiekį gauta, kad PA 16 mišinys, suprojektuotas pagal techninių reikalavimų aprašo TRA ASFALTAS 08 reikalavimus, pasižymi didžiausiu oro tuštymių kiekiu (27,4 %), o mažiausiu (11,5 %) - modifikuotas PA 8 mišinys Nr. 2. Pažymėtina, kad visi poringojo asfalto mišiniai, suprojektuoti pagal techninių reikalavimų aprašo TRA ASFALTAS 08 reikalavimus, pasižymėjo 3,4–7,5 % didesniu oro tuštymių kiekiu nei kiti tirtieji asfalto mišiniai.

3. Nustatyta, kad PA 11 mišinys, suprojektuotas pagal techninių reikalavimų aprašo TRA ASFALTAS 08 reikalavimus, turi didžiausią vertikalųjį pralaidumą vandeniui ($1,8 \cdot 10^{-3}$ m/s), o didžiausią horizontalųjį pralaidumą vandeniui turi PA 16 mišinys ($3,9 \cdot 10^{-3}$ m/s), suprojektuotas pagal techninių reikalavimų aprašo TRA ASFALTAS 08 reikalavimus. Tuo tarpu mažiausiu vertikaliuoju

pralaidumu vandeniui pasižymėjo modifikuotas PA 16 mišinys Nr. 2 ($0,1 \cdot 10^{-3}$ m/s), o mažiausiu horizontaliuoju pralaidumu vandeniui – modifikuotas PA 8 mišinys Nr. 2 ($0,2 \cdot 10^{-3}$ m/s).

4. Nustatyta, kad, modifikuotas PA mišinys Nr. 2 turi didžiausią sausų ir drėgnų bandinių netiesioginį tempiamąjį stiprį (atitinkamai 1071 kPa ir 957 kPa). Tuo tarpu PA 11 mišinys, suprojektuotas pagal techninių reikalavimų aprašo TRA ASFALTAS 08 reikalavimus, pasižymėjo mažiausiu sausų ir drėgnų bandinių netiesioginiu tempiamuoju stipriu (atitinkamai 437 kPa ir 333 kPa).

5. Išanalizavus suprojektuotų asfalto mišinių jautrumo vandeniui rezultatus nustatyta, kad netiesioginio tempiamojo stiprio santykis kinta nuo 76,24 % (PA 11 mišinys) iki 103,10 % (modifikuotas PA 16 mišinys Nr. 3).

6. Išanalizavus skeliamąjį stiprį po UVA spinduliuotės poveikio rezultatus, nustatyta, kad poringojo asfalto mišinių bandiniams suteikus 152600 mW/m^2 UVA spindulių apšvitą, bandinių skeliamasis stipris padidėja nepriklausomai nuo to ar bandiniai mirkomi vandenyje ar ne. Galima to priežastis – dėl oksidacijos ir UVA spinduliuotės poveikio sukietėjęs bitumas. Atkreiptinas dėmesys, kad bandiniams suteikta UVA apšvita (152600 mW/m^2) atitinka Kauno rajone dangos konstrukcijų projektiniu 20 metų laikotarpiu dangas pasiekiantį UVA spindulių kiekį.

7. Nustačius suprojektuotų asfalto mišinių dalelių (masės) nuostolį, gauta, kad PA 16 mišinys, suprojektuotas pagal techninių reikalavimų aprašo TRA ASFALTAS 08 reikalavimus, pasižymi didžiausiu dalelių (masės) nuostoliu (97,9 %), o mažiausiu (19,6 %) – modifikuotas PA 16 mišinys Nr. 2.

3. VANDENIUI PRALAIIDŽIŲ ASFALTO DANGŲ TAIKYMAS

3.1. Eksperimentiniu tyrimu pagrįstos funkcinių savybių ribinės sąlygos, užtikrinančios asfalto dangos pralaidumą vandeniui

Remiantis 1.3 poskyryje, 1.4 lentelėje surinktai hidrometeorologijos duomenimis yra išskiriamas 2021 metais maksimalus Kaune iškritusių kritulių kiekis per valandą – 14,4 mm, kuris buvo užfiksuotas 2021 m. birželio 23 d. Siekiant patikrinti išskirtą reikšmę, 2021 metų iškritusių kritulių kiekiai yra išrūšiuoti nuo didžiausio iškritusių kritulių kiekio, kuris iškrito per valandą iki mažiausio. Todėl 3.20 lentelėje pateikiami dvidešimt didžiausių iškritusių kritulių kiekio reikšmių užfiksuotų per valandą 2021 metais.

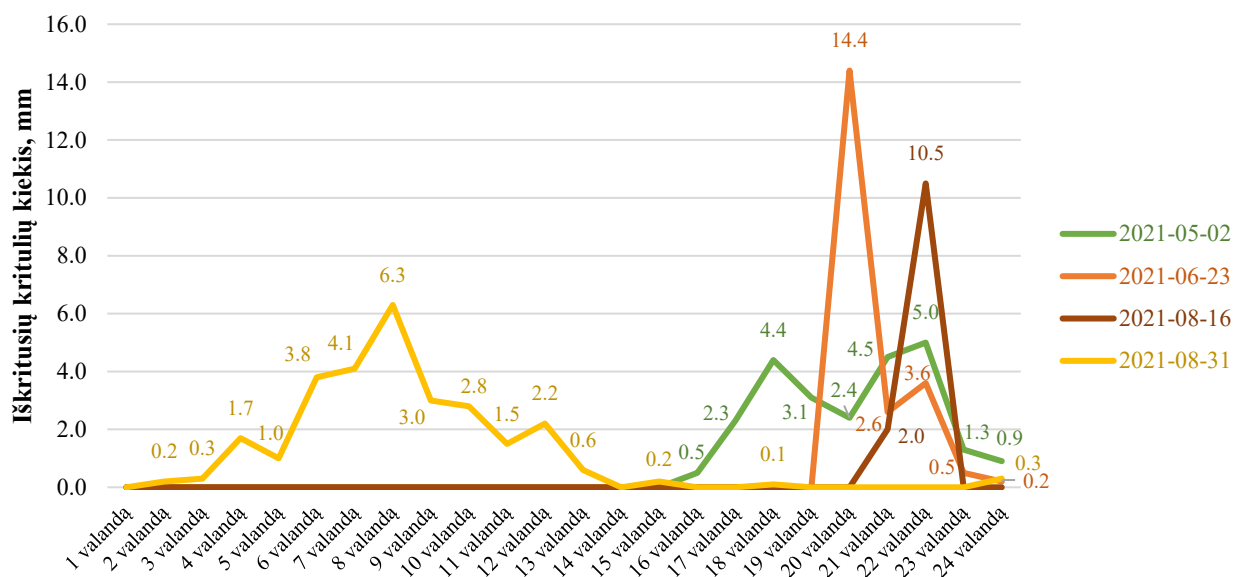
3.20 lentelė. 2021 metų didžiausi iškritusių kritulių kiekis per valandą

Eil. Nr.	Data	Iškritusių kritulių kiekis per valandą, mm
1.	2021-06-23	14,4
2.	2021-08-16	10,5
3.	2021-08-09	8,6
4.	2021-05-14	7,5
5.	2021-07-31	7,2
6.	2021-07-02	6,7
7.	2021-08-31	6,3
8.	2021-07-31	5,7
9.	2021-05-13	5,1
10.	2021-08-06	5,1
11.	2021-05-02	5,0
12.	2021-05-02	4,5
13.	2021-05-02	4,4
14.	2021-05-22	4,3
15.	2021-06-11	4,3
16.	2021-06-28	4,3
17.	2021-07-01	4,3
18.	2021-07-06	4,3
19.	2021-08-31	4,1
20.	2021-08-31	3,8

Atsižvelgus į 3.20 lentelę, sudaryta diagrama, kuri parodo 2021 metų didžiausius iškritusių kritulių kiekius per parą atsitiktinai pasirinktomis dienomis (žr. 3.32 pav.). Pagal 3.32 paveikslą matoma, kad nustatytas Kaune iškritusių kritulių kiekis (14,4 mm) yra didžiausias palyginus su kitomis pavaizduotomis 2021 metų dienomis: 2021-05-02, 2021-08-16, 2021-08-31. Todėl daroma išvada, kad priimtas maksimalus iškritusių kritulių kiekis per valandą yra kritinis.

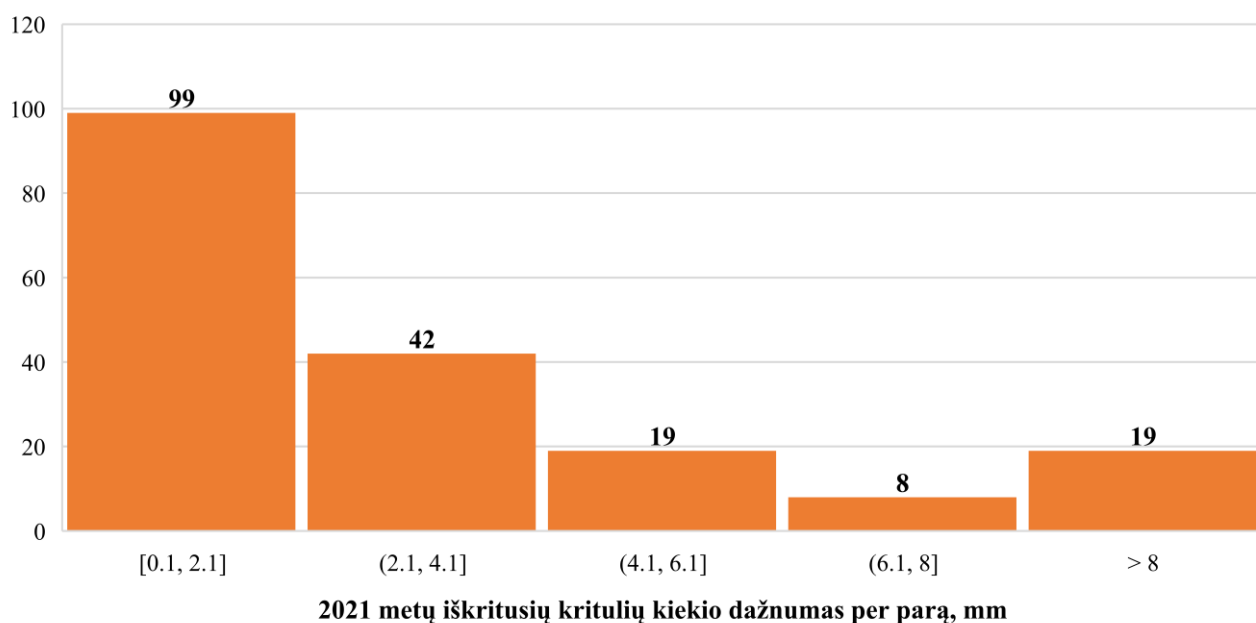
Siekiant pritaikyti gautus tyrimo rezultatus Lietuvos klimatinėms sąlygoms, didžiausias 2021 metų Kaune iškritusių kritulių kiekis konvertuotas į $0,004 \cdot 10^{-3}$ m/s, kad paviršinės nuotekos pratekėtų per vandeniui pralaidžią dangą. Daroma prielaida, kad asfalto sluoksnis iš poringojo mišinio

turintis tokį pralaidumą užtikrins Kauno rajone iškrentančio maksimalaus lietaus kiekio akumuliaciją ir pralaidumą į pagrindo sluoksnius.



3.32 pav. 2021 metų Kaune didžiausias iškritusių kritulių kiekis per parą

3.33 paveiksle pateiktas 2021 metais Kaune iškritusių kritulių kiekio dažnumas per parą. Pastebėta, kad iš viso 2021 metais Kaune iškrito kritulių 187 dienas. 99 dienų iškritusių kritulių kiekis per parą svyravo nuo 0,1 mm iki 2,1 mm, 42 dienų iškritusių kritulių kiekis per parą buvo intervale nuo 2,1 mm iki 4,1 mm. Pažymėtina, kad 19 dienų 2021 metais iškritusių kritulių kiekis per parą buvo didesnis nei 8,1 mm.



3.33 pav. 2021 metų Kaune iškritusių kritulių kiekio dažnumas per parą

3.21 lentelė. Eksperimentinio tyrimo rezultatai su teorinėmis ir faktinėmis asfalto dangos pralaidumą užtikrinančiomis funkcinėmis savybėmis ribinėmis vertėmis

Charakteristika	Tiriamieji asfalto mišiniai										Teorinės asfalto dangos pralaidumą vandeniui užtikrinančios funkcinės savybės ribinės vertės	Faktinės funkcinės savybės ribinės vertės
	PA 16	PA 16_M1	PA 16_M2	PA 16_M3	PA 11	PA 11_M1	PA 11_M2	PA 8	PA 8_M1	PA 8_M2		
Oro tuštymų kiekis, %	27,4	19,9	13,7	16,0	27,0	19,1	14,5	23,3	17,1	11,5	19–21	-
Tariamasis tankis, Mg/m ³	1,867	2,036	2,183	2,114	1,890	2,038	2,159	1,943	2,075	2,205	-	-
Mišinio didžiausias tankis, Mg/m ³	2,573	2,542	2,530	2,516	2,589	2,521	2,526	2,532	2,505	2,493	-	-
Jautrumas vandeniui, %	91,51	88,09	89,32	103,10	76,24	79,78	80,98	95,35	87,78	77,49	≥ 70	-
Dalelių (masės) nuostolis, %	97,9	32,1	19,6	26,9	72,8	27,2	27,1	39,1	25,9	21,1	≤ 20	-
Pralaidumas vandeniui:												
Horizontalusis, ·10-3 m/s	3,9	0,8	0,6	0,7	2,3	1,0	0,6	1,4	0,5	0,2	≥ 0,5	≥ 0,004
Vertikalusis, ·10-3 m/s	1,6	0,6	0,1	0,2	1,8	0,2	0,2	0,6	0,3	0,2	≥ 0,5	≥ 0,004
Netiesioginis tempiamasis stipris:												
sausieji bandiniai	450	761	1071	766	437	611	822	511	700	962	≥ 780	-
drėgnieji bandiniai	411	671	957	790	333	487	666	487	615	746	≥ 480	-
Netiesioginis tempiamasis stipris po UVA spinduliuotės poveikio ir po mirkymo vandenyje:												
sausieji bandiniai	495	773	1110	842	473	664	837	538	878	989	-	-
drėgnieji bandiniai	446	711	969	852	422	616	747	504	747	758	-	-

Atsižvelgus į eksperimentinio tyrimo metu gautus rezultatus, kurie pateikti 3.21 lentelėje ir lentelėje nurodytas teorines ir faktines asfalto dangos pralaidumą vandeniui užtikrinančias vertes, daroma prielaida, kad didžioji dalis suprojektuotų asfalto mišinių dalinai tenkino teoriniu lygmeniu nustatytas vertes.

Remiantis literatūros apžvalga nustatytą oro tuštymų kiekį (19–21 %) tenkino du iš dešimties suprojektuotų mišinių, t. y. modifikuotas PA 16 mišinys Nr. 1 ir modifikuotas PA 11 mišinys Nr. 1. Verta pažymėti, jog visi modifikuoti mišiniai buvo projektuojami su mažesniu oro tuštymų kiekiu negu mišiniai, kurie suprojektuoti pagal techninių reikalavimų aprašą TRA ASFALTAS 08. Pagal techninių reikalavimų aprašą TRA ASFALTAS 08 PA 16, PA 11 ir PA 8 mišinių oro tuštymų kiekis turi būti nuo 24 % iki 28 %. Šį reikalavimą tenkino PA 16 mišinys (oro tuštymų

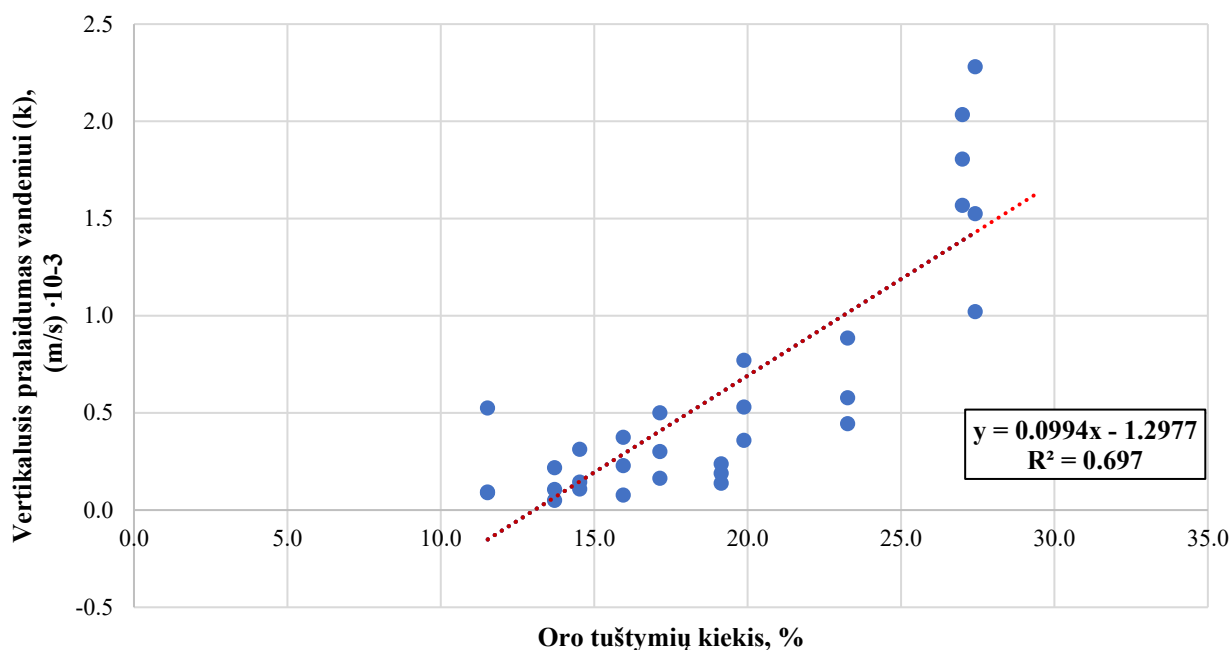
kiekis – 27,4 %) ir PA 11 mišinys (oro tuštymių kiekis – 27,0 %), o PA 8 mišinio oro tuštymių kiekis siekė tik 23,3 %. Pagal techninių reikalavimų aprašo TRA ASFALTAS 23 projektą, PA 16 mišiniui reikalaujamas nuo 18 % iki 24 % oro tuštymių kiekis. Tirtasis PA 16 mišinys netenkino šio reikalavimo. Tuo tarpu PA 11 mišiniui techninių reikalavimų aprašo TRA ASFALTAS 23 projekte keliamas 24 %–28 % oro tuštymių kiekio reikalavimas. Suprojektuotas PA 11 mišinys tenkino minimą reikalavimą. Tie patys reikalavimai keliami PA 8 mišiniui, tačiau suprojektuotas PA 8 mišinys netenkino numatyto reikalavimo.

Visi suprojektuoti mišiniai tenkino minimalią teoriniame lygmenyje nustatytą jautrumo vandeniui vertę ≥ 70 %. Pažymėtina, jog mišiniai buvo projektuojami naudojant standartinę adheziją gerinančio priedo kiekį 0,017 %–0,020 %. Pagal techninių reikalavimų aprašo TRA ASFALTAS 08 reikalavimus poringiesiems asfalto mišiniams nėra keliamas jautrumo vandeniui reikalavimas. Vadovaujantis atnaujinamu techninių reikalavimų aprašu TRA ASFALTAS 23 projektu poringiesiems asfalto mišiniams bus keliami jautrumo vandeniui. Pagal šį aprašą PA 16 mišiniui mažiausias jautrumas vandeniui numatytas nuo 80 %, todėl atsižvelgus į 3.21 lentelę, nustatyta, kad PA 16 mišinys tenkina nustatytą vertę. Minimali PA 16 ir modifikuotų mišinių vertė gauta modifikuoto PA 16 mišinio Nr. 1 – 88,09 %, o didžiausią vertę modifikuoto PA 16 mišinio Nr. 3 – 103,10 %. PA 11 mišiniui ir PA 8 mišiniui mažiausias jautrumo vandeniui reikalavimas numatytas nuo 90 %. Eksperimentinio tyrimo metu gauti rezultatai rodo, jog šio reikalavimo netenkino PA 11 mišinys, tačiau šią vertę tenkino PA 8 mišinys, kurio nustatytas jautrumas vandeniui – 95,35 %.

Dalelių (masės) nuostolio ribinę vertę, nustatytą literatūros apžvalgoje (≤ 20 %), tenkino vienas iš dešimties suprojektuotų mišinių – modifikuotas PA 16 mišinys Nr. 2, kurio nustatyta vertė – 19,6 %. Visų kitų dalelių (masės) nuostolio vertės viršijo teorinę asfalto dangos pralaidumą vandeniui užtikrinančios ribinę vertę nuo 1,1 % iki 77,9 %. Mažiausias viršijęs nustatytą ribinę vertę modifikuotas PA 8 mišinys Nr. 2, kurio dalelių (masės) nuostolis siekė 21,1 %, o didžiausias viršijęs ribinę vertę nustatytas PA 16 mišiniui – 97,9 %. Techniniuose reikalavimų aprašuose TRA ASFALTAS 08 ir TRA ASFALTAS 23 projekte nėra pateiktos poringojo asfalto dalelių (masės) nuostolio ribinės vertės.

Vertikalųjį ir horizontalųjį pralaidumą vandeniui, pagal nustatytas teorines asfalto dangos pralaidumą vandeniui užtikrinančias ribines vertes, tenkino keturi iš dešimties suprojektuotų mišinių – PA 16, modifikuotas PA 16 mišinys Nr. 1, PA 11 ir PA 8. Minėti mišiniai tenkino teoriniu lygmeniu nustatytą minimalią vertę – $0,5 \cdot 10^{-3}$ m/s. Pažymėtina, kad eksperimentinio tyrimo metu gautos vertės buvo didžiausios PA 16 mišinio ($1,6 \cdot 10^{-3}$ m/s ir $3,9 \cdot 10^{-3}$ m/s) ir PA 11 mišinio ($1,8 \cdot 10^{-3}$ m/s ir $2,3 \cdot 10^{-3}$ m/s). Nagrinėjant eksperimentinio tyrimo metu gautus rezultatus su konvertuotą 2021 metais maksimalią iškritusių kritulių kiekio faktine reikšme ($0,004 \cdot 10^{-3}$ m/s), visi suprojektuoti mišiniai tenkino vertikalaus ir horizontalaus pralaidumo vandeniui vertę.

Minimali vertikalųjį pralaidumą vandeniui tenkinantį vertę nustatyta modifikuotam PA 16 mišiniui Nr. 1 ir PA 8 mišiniui, kurių vertikalusis pralaidumas vandeniui siekia $0,6 \cdot 10^{-3}$ m/s, o maksimali vertė nustatyta PA 11 mišiniui ($1,8 \cdot 10^{-3}$ m/s). Kitų vertikalaus pralaidumo vandeniui vertės netenkinusių teorinę asfalto dangos pralaidumą vandeniui užtikrinančios minimalią vertę nustatytos nuo $0,1 \cdot 10^{-3}$ m/s iki $0,3 \cdot 10^{-3}$ m/s. Pažymėtina, jog modifikuotam PA 8 mišiniui Nr. 1 trūko $0,2 \cdot 10^{-3}$ m/s, jog tenkintų minimalią vertę.

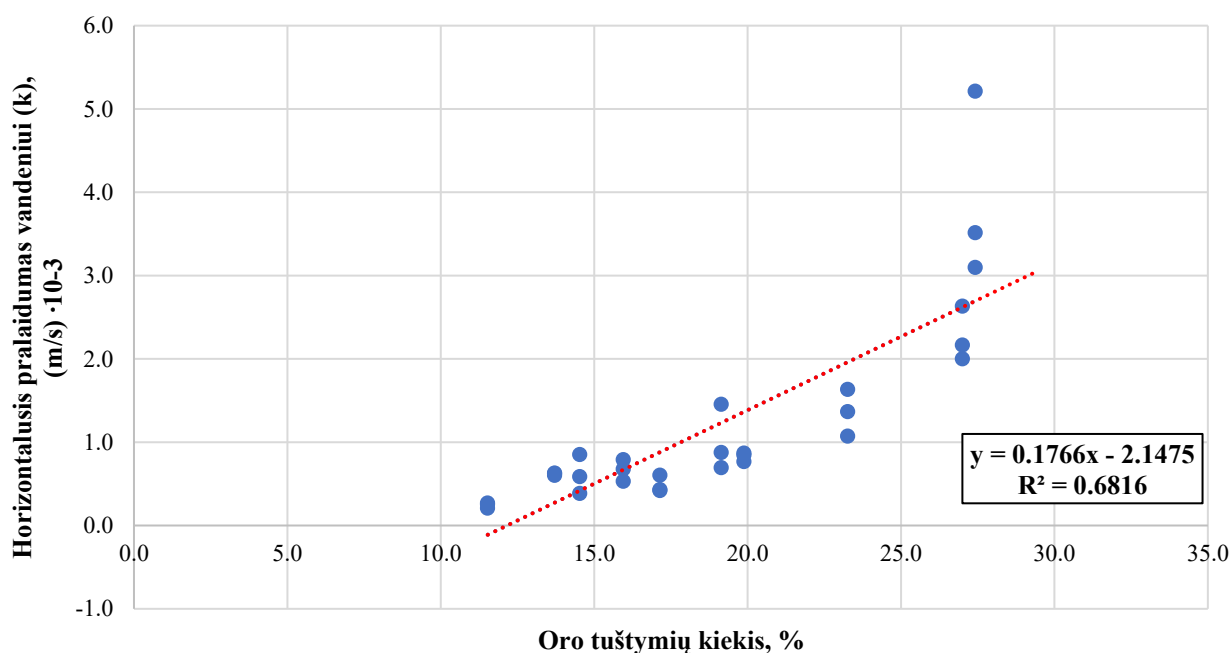


3.34 pav. Sklaidos diagrama tarp asfalto bandinių vertikalaus pralaidumo vandeniui ir oro tuštymių kiekiu

Siekiant nustatyti asfalto bandinių vertikalaus pralaidumo vandeniui priklausomybę nuo oro tuštymių kiekio sudarytas paprastosios tiesinės regresijos modelis. Duomenys pavaizduoti sklaidos diagramoje 3.34 paveiksle. Siekiant nustatyti ar nagrinėjamus kintamuosius sieja tiesinė priklausomybė programavimo programa *Matlab* nustatytas empirinis koreliacijos koeficientas tarp asfalto bandinių vertikalaus pralaidumo vandeniui ir oro tuštymių kiekio yra lygus $r = 0,8349$. Kadangi koreliacijos koeficientas pakankamai artimas 1, todėl galima sakyti, kad tarp minėtų kintamųjų yra stipri teigiama tiesinė priklausomybė. Asfalto bandinių vertikalaus pralaidumo vandeniui priklausomybė nuo oro tuštymių kiekio užrašoma tiesinės regresijos lygtimi: $\hat{y}(x) = 0,0994x - 1,2977$. Paprastosios tiesinės regresijos atveju determinacijos koeficientas lygus empirinio koreliacijos koeficiento kvadratui, kuris yra $R^2 = 0,697$. Jis rodo, kad matematinis modelis paaiškina tik 69,7 % asfalto bandinių vertikalaus pralaidumo vandeniui reikšmių kitimą asfalto bandinių oro tuštymių kiekio kitimui.

Horizontalųjį pralaidumą vandeniui tenkino devyni iš dešimties suprojektuotų mišinių. Tik modifikuotas PA 8 mišinys Nr. 2 netenkino nustatytos minimalios vertės, kurio horizontalusis pralaidumas vandeniui eksperimentinio tyrimo metu siekė $0,2 \cdot 10^{-3}$ m/s. Visų kitų tenkinančių minimalią vertę rezultatas kito nuo $0,5 \cdot 10^{-3}$ m/s iki $3,9 \cdot 10^{-3}$ m/s. Didžiausia horizontalaus pralaidumo vandeniui reikšmė gauta PA 16 mišinio – $3,9 \cdot 10^{-3}$ m/s, o mažiausia reikšmė, kurį tenkina nustatyta minimalią reikšmę – modifikuotas PA 8 mišinys Nr. 1, šio mišinio horizontalusis pralaidumas vandeniui siekia $0,5 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Siekiant nustatyti nuo asfalto bandinių horizontalaus pralaidumo vandeniui priklausomybę oro tuštymų kiekio sudarytas paprastosios tiesinės regresijos modelis. Duomenys pavaizduoti sklaidos diagramoje 3.35 paveiksle. Siekiant nustatyti ar nagrinėjamus kintamuosius sieja tiesinė priklausomybė *Matlab* programa nustatytas tiesinio ryšio stiprumas tarp kintamųjų nusakomas koreliacijos koeficientu. Empirinis koreliacijos koeficientas tarp asfalto bandinių horizontalaus pralaidumo vandeniui ir oro tuštymų kiekio yra lygus $r = 0,8256$. Kadangi koreliacijos koeficientas pakankamai artimas 1, todėl galima sakyti, kad tarp minėtų kintamųjų yra stipri teigiama tiesinė priklausomybė. Horizontalaus pralaidumo vandeniui priklausomybė nuo asfalto bandinių oro tuštymų kiekio užrašoma tiesinės regresijos lygtimi: $\hat{y}(x) = 0,1766x - 2,1475$. Paprastosios tiesinės regresijos atveju determinacijos koeficientas lygus empirinio koreliacijos koeficiento kvadratui, kuris yra $R^2 = 0,6816$. Jis rodo, kad matematinis modelis paaiškina tik 68,16 % asfalto bandinių horizontalaus pralaidumo vandeniui reikšmių kitimą asfalto bandinių oro tuštymų kiekio kitimui.



3.35 pav. Sklaidos diagrama tarp horizontalaus pralaidumo vandeniui ir asfalto bandinių oro tuštymų kiekio

Sausų bandinių netiesioginis tempiamasis stipris kinta nuo 437 kPa iki 1071 kPa. Pagal 3.21 lentelę priimtą minimalią vertę sausiems bandiniams, nustatyta, kad trys iš dešimties bandymo metu nustatytų mišinių reikšmių tenkina ribinę vertę. Rezultatai rodo, kad sausiems bandiniams nustatytą ribinę vertę tenkina mišinių bandiniai: modifikuotas PA 16 mišinys Nr. 2 – 1071 kPa, modifikuotas PA 11 mišinys Nr. 2 – 822 kPa ir modifikuotas PA 8 mišinys Nr. 2, kurio gauta reikšmė 962 kPa. Pažymėtina, kad modifikuotam PA 16 mišiniui Nr. 3 trūko 14 kPa, o modifikuotam PA 16 mišiniui Nr. 1 – 19 kPa, jog tenkintų nustatytą minimalią vertę.

Drėgnų bandinių netiesioginio tempiamojo stipris kinta nuo 411 kPa iki 957 kPa. Pagal 3.21 lentelę priimtą minimalią vertę drėgniems bandiniams, nustatyta, kad du iš dešimties bandymo metu nustatytų mišinių vidurkių reikšmių netenkino šios vertės. Mišiniai, kurie netenkino minimalios vertės: PA 16 – 411 kPa ir PA 11 – 333 kPa.

Pastebėta, kad remiantis literatūros apžvalgoje nustatytomis teorinėmis asfalto dangos pralaidumą vandeniui užtikrinančiomis ribinėmis vertėmis su eksperimentinio tyrimo metu gautais rezultatais geriausias rezultatus pasiekė – modifikuotas PA 16 mišinys Nr. 1, modifikuotas PA 16 mišinys Nr. 2, modifikuotas PA 11 mišinys Nr. 1, modifikuotas PA 11 mišinys Nr. 2 ir PA 8 mišinys.

Naudojant daugiakriterinio sprendimo priėmimo metodais SAW (angl. *Simple Additive Weighting*) ir TOPSIS (angl. *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) numatyta išreitinguoti suprojektuotus poringojo asfalto mišinius. Suprojektuotiems poringiesiems asfalto mišiniams (alternatyvoms) priskiriamas reikšmingumas remiantis išanalizuota literatūros analizę ir ekspertų nuomonę, todėl priimti šie reikšmingumo rodikliai: vertikalus pralaidumas vandeniui, dalelių (masės) nuostolis ir jautrumas vandeniui (žr. 3.22 lentelė).

3.22 lentelė. Rodiklių reikšmingumas

MIN / MAX	Reikšmingumas, %	Rodikliai	Pavadinimas
MAX	0,5	X ₁	Vertikalusis pralaidumas vandeniui (k), (m/s)·10 ⁻³
MIN	0,3	X ₂	Dalelių (masės) nuostolis, %
MAX	0,2	X ₃	Jautrumas vandeniui (ITSR), %

TOPSIS metodas vadinamas variantų racionalumo nustatymu artumo idealiajam taškui metodu, o SAW metodas dar vadinamas paprastuoju adityviu svorių metodu, kadangi yra vienas iš paprasčiausių ir plačiausiai taikomų. Atlikus skaičiavimus alternatyvų įverčiai ir rangai pateikti 3.23 lentelėje ir 3.36 paveiksle.

3.23 lentelė. Poringojo asfalto mišinių (alternatyvų) įverčiai ir rangai

Rangavimas	SAW metodas		TOPSIS metodas	
	Mišinys	Alternatyvų įverčiai	Mišinys	Alternatyvų įverčiai
1	PA 11	0,73	PA 11	0,74
2	PA 16	0,68	PA 16	0,63

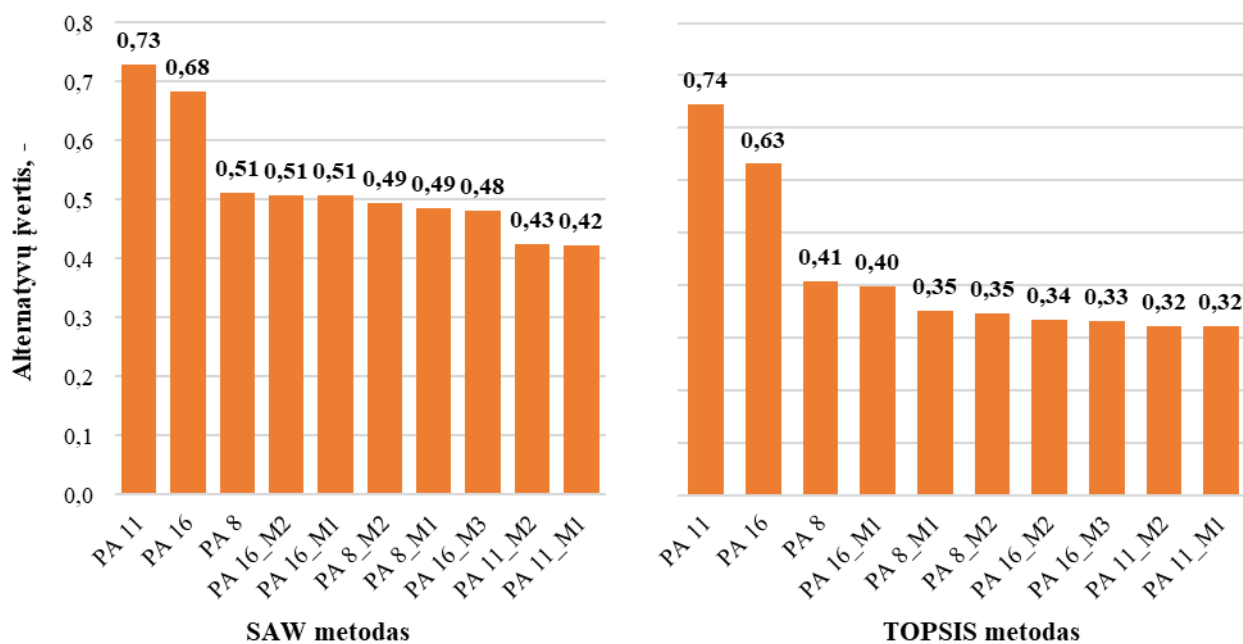
Rangavimas	SAW metodas		TOPSIS metodas	
	Mišinys	Alternatyvų įverčiai	Mišinys	Alternatyvų įverčiai
3	PA 8	0,51	PA 8	0,41
4	PA 16 M2	0,51	PA 16 M1	0,40
5	PA 16 M1	0,51	PA 8 M1	0,35
6	PA 8 M2	0,49	PA 8 M2	0,35
7	PA 8 M1	0,49	PA 16 M2	0,34
8	PA 16 M3	0,48	PA 16 M3	0,33
9	PA 11 M2	0,43	PA 11 M2	0,32
10	PA 11 M1	0,42	PA 11 M1	0,32

Skaičiavimo rezultatai parodė, kad pagal pateiktus rodiklius, kurie apibūdina poringojo asfalto mišinio savybes, geriausius rezultatus pasiekė PA 11 mišinys, PA 16 mišinys ir PA 8 mišinys. Remiantis alternatyvų rangavimu, pagal SAW metodą, poringojo asfaltų mišinių (alternatyvų) prioritentinė eilutė yra:

$$PA\ 11 > PA\ 16 > PA\ 8 > PA\ 16_M2 > PA\ 16_M1 > PA\ 8_M2 > PA\ 8_M1 > PA\ 16_M3 > PA\ 11_M2 > PA\ 11_M1.$$

Remiantis metodo TOPSIS rezultatais, gautas poringojo asfaltų mišinių (alternatyvų) rangavimas yra:

$$PA\ 16 > PA\ 11 > PA\ 8 > PA\ 16_M1 > PA\ 8_M1 > PA\ 8_M2 > PA\ 16_M2 > PA\ 11_M3 > PA\ 11_M2 > PA\ 16_M1.$$



3.36 pav. Poringojo asfalto mišinių (alternatyvų) įverčiai gauti taikant metodus SAW ir TOPSIS

Atsižvelgiant į tai, kad literatūros analizėje nustatyta, jog pralaidumas vandeniui turėtų būti ne mažesnis kaip $0,5 \cdot 10^{-3}$ m/s ir į tai, kad 2021 metų Kaune iškritusių kritulių kiekį – $0,004 \cdot 10^{-3}$ m/s, todėl nematomas poreikis pralaidumo vandeniui didesniu nei $0,5 \cdot 10^{-3}$ m/s nagrinėjama Lietuvos sąlygomis Kauno regionui. Atsižvelgus į tai, rekomenduojama plėsti tyrimą, kadangi šiame tyrime nagrinėjamas Kauno meteorologijos stoties pateikti duomenys, todėl siūloma atlikti meteorologinių duomenų analizę Lietuvos mastu, išanalizuoti 10 metų istorinius duomenis ir atlikti papildomus matavimus, kuomet kritulių kiekis fiksuojamas ne rečiau kaip kas 10 min, nustatyti kokie kritulių kiekiai vyrauja kitose regionuose ir atitinkamai pasiūlyti vandeniui pralaidžių asfalto mišinių sudėtis.

Pagal atlikto eksperimentinio tyrimo analizę lyginant teoriniu lygmeniu nustatytas ribines reikšmes ir gautus daugiakriterijinius SAW ir TOPSIS metodų rezultatus, išrinkti šie vandeniui pralaidus asfalto mišiniai: PA 11 mišinys, PA 16 mišinys, PA 8 mišinys, modifikuotas PA 16 mišinys Nr. 1 ir modifikuotas PA 16 mišinys Nr. 2.

3.24 lentelė. Patikslintos asfalto dangos pralaidumą vandeniui užtikrinančios funkcinių savybių ribinės vertės

Savybė	Standartas	Teorinė ribinė vertė	Patikslinta ribinė vertė
Oro tuštymių kiekis	LST EN 12697-8:2019	19–21 %	19–28 %
Jautrumas vandeniui	LST EN 12697-12:2018 / SN 640	≥ 70 %	PA 8 ir PA 11 – ≥ 80 %; PA 16 – ≥ 90 %
Pralaidumas vandeniui	LST EN 12697-19:2020	$\geq 0,5 \cdot 10^{-3}$ m/s	$\geq 0,5 \cdot 10^{-3}$ m/s

3.25 lentelė. Pavyzdinės asfalto mišinių sudėtis, užtikrinančios asfalto dangos pralaidumą vandeniui

Asfalto mišinio sudėtis	Mato vienetas	PA 16	PA 11	PA 8
Granulimetrinė sudėtis: išbiros pro sietus				
22,4 mm	%	100		
16 mm	%	90–100	100	
11,2 mm	%	10–50	90–100	100
8 mm	%		15–20	90–100
5,6 mm	%			20–25
2 mm	%	4–15	3–5	3–5
0,063 mm	%	3–5	3–5	3–5
Mažiausias rišiklio kiekis	%	4,4	4,8	5,5
Rišiklį stabilizuojantis priedas	%	$\geq 0,3$	$\geq 0,4$	$\geq 0,5$

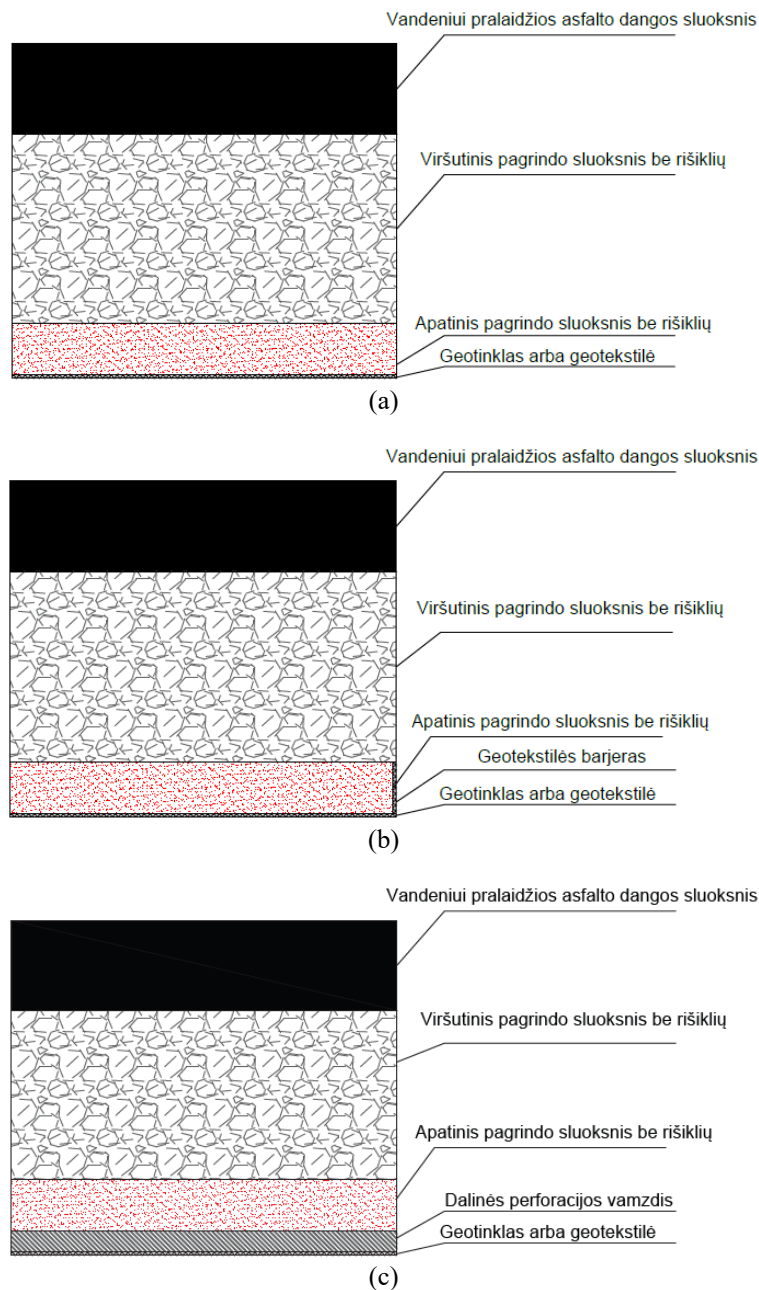
Siekiant suprojektuoti vandeniui pralaidžias asfalto dangas oro tuštymių kiekis turi būti 19–28 %. Rekomenduojama, jog jautrumas vandeniui PA 8 mišiniui ir PA 11 mišiniui būtų ne mažesnis nei 90 %, o PA 16 mišiniui ne mažesnis nei 80 % (žr. 3.24 lentelę). 3.25 lentelėje pateikta pavyzdinės asfalto mišinių sudėtis su kuriomis užtikrinamas asfalto dangos pralaidumas vandeniui.

3.2. Rekomendacijos vandeniui pralaidžių asfalto dangų projektavimui ir taikymui

Remiantis išanalizuota kitų šalių praktika taikant vandeniui pralaidžias asfalto dangas, kuri plačiau aprašyta 1 skyriuje, nustatyta, jog šio vandeniui pralaidžios dangos naudojamos lengvųjų automobilių ir mažo sunkiojo transporto intensyvumo keliuose bei stovėjimo aikštelėse. Vadovaujantis projektavimo taisyklėmis KPT SDK 19 priimta, kad vandeniui pralaidžios asfalto dangos galėtų būti taikomos dangos konstrukcijos klasėms DK 0,1–DK 1 (nedideliame sunkiojo transporto eismui). Siekiant vandeniui pralaidžias asfalto dangas taikyti dangos konstrukcijų klasėms DK 1–DK 2, turi būti atlikti papildomi natūriniai matavimai, kurie patvirtintų šių dangų naudojimą projektinei apkrovai siekiant 1-2 mln. ekvivalentinių standartinių (10 t svorio) ašių bendrą sumą. Taikant tokias dangos konstrukcijos klases vandeniui pralaidžios asfalto dangos būtų naudojamos poilsio aikštelėms (stovėjimo vietoms bei transporto priemonių važiavimo juostoms), automobilių stovėjimo aikštelėms, pagalbinei (D, D_s) gatvių kategorijai, kurios yra urbanizuotos ir tankiai užstatytos teritorijos. Pažymėtina, jog statybos techniniame reglamente STR 2.06.04:2014 „Gatvės ir vietinės reikšmės keliai. Bendrieji reikalavimai“ (toliau – STR 2.06.04:2014) nurodoma, kad D ir D_s gatvių kategorijoms galima lengvųjų (iki 5 t bendrosios masės) automobilių, krovininių automobilių ir aptarnaujančiojo transporto eismas (išskyrus pramonės, logistikos ir sandėliavimo teritorijas). Atsižvelgus į KPT SDK 19 ir STR 2.06.04:2014, sudaryta 3.26 lentelė, kurioje nurodytas vandeniui pralaidžių asfalto dangų naudojimas pagal įrengimo vietą ir transporto rūšis priskiriant dangos konstrukcijos klasę.

3.26 lentelė. Rekomenduojamos dangos konstrukcijų su vandeniui pralaidžia danga klasės priklausomai nuo taikymo paskirties

Eil. Nr.	Taikymo paskirtis		Transporto rūšis	Dangų konstrukcijų klasės
1.	Gatvėse	Pagalbinė gatvė (D, D _s)	Lengvųjų automobilių eismas (galimas priežiūros transporto eismas)	DK 0,3 DK 0,1
2.	Automobilių stovėjimo aikštelė		Lengvieji automobiliai ir nedidelis sunkiojo transporto eismas	DK 1
			Lengvieji automobiliai (galimas priežiūros transporto eismas)	DK 0,3 DK 0,1
3.	Poilsio aikštelės transporto priemonių važiavimo juostoms		Lengvųjų automobilių eismas ir nedidelis sunkiojo transporto eismas	DK 1
			Lengvieji automobiliai (galimas priežiūros transporto eismas)	DK 0,3 DK 0,1
4.	Poilsio aikštelės transporto priemonių stovėjimo vietoms		Lengvieji automobiliai ir nedidelis sunkiojo transporto eismas	DK 1
			Lengvieji automobiliai (galimas priežiūros transporto eismas)	DK 0,3 DK 0,1




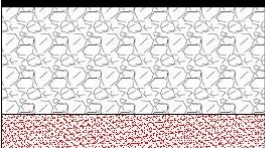
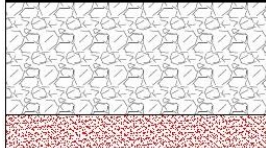
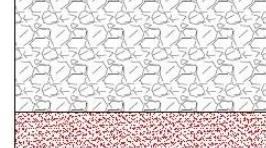



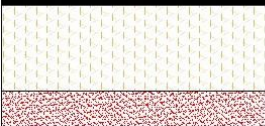





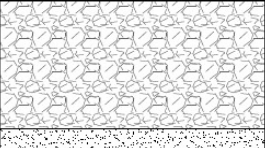
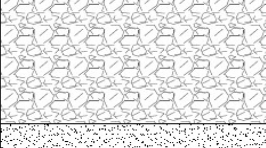
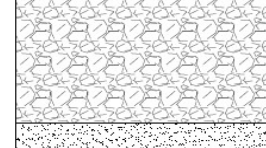



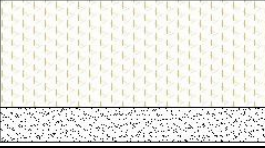
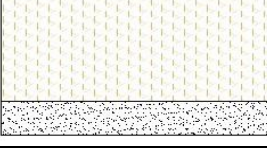
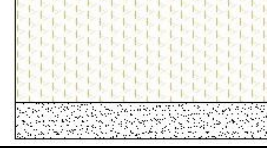


3.37 pav. Rekomenduojamos alternatyvios vandeniui pralaidžios dangos konstrukcijos

Atsižvelgus į 1.1 poskyryje apžvelgtas vandeniui pralaidžias dangos konstrukcijas, 3.37 paveiksle pateikiamos rekomenduojamos alternatyvios vandeniui pralaidžias dangos konstrukcijos. Pagal 3.37 paveikslo, (a) konstrukcijoje siūloma įrengti geotekstilę arba geotinklą po apatiniu pagrindo sluoksniu be rišiklių. Konstrukcijoje (b) siūloma įrengti geotekstilę arba geotinklą po apatiniu pagrindo sluoksniu be rišiklių ir naudoti geotekstilės barjerinę sienelę, kuri leistu įrengiant dvi skirtingas konstrukcijas perskirstyti ir neleisti paviršinėms nuotekoms tekėti ta kryptimi, kuria projektavimo metu nebuvo numatyti. Taip pat siūlomoje konstrukcijoje (c) įrengti dalinį perforacijos vamzdį po apatiniu pagrindo sluoksniu be rišiklių, kuris leistu išleisti perpildytą paviršinę vandenį į centralizuotas paviršinių nuotekų tvarkymo sistemas, po juo geotekstilę arba geotinklą.

Išskirsčius vandeniui pralaidžių asfalto dangų įrengimo vietas ir joms priskirtinas dangų konstrukcijų klases, sumodeliuotas rekomenduotinas vandeniui pralaidžių asfalto dangų konstrukcijos (žr. 3.27 lentelę) pagal literatūros analizėje išanalizuotas kitų šalių patirtis bei siūlomas dangos konstrukcijas. Pagal 3.27 lentelę nurodoma, kad dangos konstrukciją sudaro trys sluoksniai: vandeniui pralaidi asfalto danga, žvyro arba skaldos pagrindo sluoksnis ir apsauginis šalčiui atsparus sluoksnis. Pažymėtina, jog dangos konstrukcija gali būti pritaikyta ir suprojektuota šalčiui nejautrių medžiagų sluoksniui. Žvyro arba skaldos pagrindo sluoksniui siūloma naudoti didesnės frakcijos nesurištusius mišinius. Taip pat rekomenduojama atlikti tyrimus dėl siauresnės frakcijos mišinių, kuomet mažiausias dalelių dydis yra ≥ 4 mm, taikymo žvyro arba skaldos pagrindo sluoksnių įrengimui siekiant užtikrinti didesnę visos dangos konstrukcijos pralaidumą vandeniui. 3.27 lentelėje pateikiami žvyro ir skaldos pagrindo sluoksniui įrengti siūlomi siauresnių frakcijų variantai.

3.27 lentelė. Rekomenduojamos vandeniui pralaidžių asfalto dangų konstrukcijos pagal dangų konstrukcijų klasę

Vandeniui pralaidžių asfalto dangų konstrukcijos	Dangų konstrukcijų klasė		DK 1	DK 0,3	DK 0,1
	Projektinė apkrova A (ESAs), mln.	A	> 0,3–1,0	> 0,1–0,3	≤ 0,1
1.	Vandeniui pralaidi asfalto dangos sl.	Apsauginis šalčiui atsparus sluoksnis	 14	 12	 10 ¹⁾
	Žvyro pagrindo sl., fr. 0/45, fr. 0/56 arba fr. 4/32, fr. 16/45 ²⁾		 25	 25	 25
2.	Vandeniui pralaidi asfalto dangos sl.	Apsauginis šalčiui atsparus sluoksnis	 14	 12	 10 ¹⁾
	Skaldos pagrindo sl., fr. 4/16, fr. 4/25 ²⁾		 20	 20	 20
3.	Vandeniui pralaidi asfalto dangos sl.	Šalčiui nejautrių medžiagų sluoksnis	 14	 12	 10 ¹⁾
	Žvyro pagrindo sl., fr. 0/45, fr. 0/56 arba fr. 4/32, fr. 16/45 ²⁾		 30	 30	 30
4.	Vandeniui pralaidi asfalto dangos sl.	Šalčiui nejautrių medžiagų sluoksnis	 14	 12	 10 ¹⁾
	Skaldos pagrindo sl., fr. 4/16, fr. 4/25 ²⁾		 25	 25	 25

Pastabos:

¹⁾ – jeigu ESAs < 0,05 mln., tai vandeniui pralaidus asfalto dangos sluoksnis gali būti rengiamas 8 cm storio;

²⁾ – turi būti papildomai nustatytas naudojimo tinkamumas.

Pagal suprojektuotas dangos konstrukcijas numatomas vandeniui pralaidžios asfalto dangos sluoksnis svyruoja nuo 10,00 cm iki 14,00 cm, todėl pagal atliktą eksperimentinį tyrimą bei gautus jo rezultatus, 3.28 lentelėje pateiktos rekomenduotinos vandeniui pralaidžių asfalto dangų sluoksnių (viensluoksniai ir dvisluoksniai) asfalto mišinių tipai ir storiai priklausomai nuo dangos konstrukcijos klasės. Asfalto mišiniai rekomenduoti atsižvelgiant į daugiakriterijinių SAW ir TOPSIS metodų rezultatus, kuomet svoriniai koeficientai suteikti jautrumui vandeniui (0,2 %), vertikaliajam pralaidumui vandeniui (0,5 %) bei dalelių (masės) nuostoliui (0,3 %).

Pažymėtina, kad rekomenduojamoms dangos konstrukcijoms su siūlomais mišiniais turi būti atliktas papildomas tyrimas, kuris patvirtintų, kad siūlomos dangos konstrukcijos su atitinkamais vandeniui pralaidžiais poringaisiais asfalto mišiniais užtikrins projektinį naudojimo laikotarpį be dangos struktūros pažeidimų, ekonominį pagrįstumą ir tvarumą.

3.28 lentelė. Rekomenduojamos dangos konstrukcijų su vandeniui pralaidžia danga klasės priklausomai nuo taikymo paskirties

Dangų konstrukcijų klasė		DK 1		DK 0,3		DK 0,1	
Projektinė apkrova A (ESAs), mln.	A	> 0,3–1,0		> 0,1–0,3		≤ 0,1	
Eil. Nr.	Mišinio pavadinimas	Sluoksnio storis, cm	Mišinio pavadinimas	Sluoksnio storis, cm	Mišinio pavadinimas	Sluoksnio storis, cm	
1.	PA 11	6,0	PA 11	4,0	PA 11	10	
	PA 16	8,0	PA 16	8,0			
2.	PA 8	6,0	PA 8	4,0	PA 8	10	
	PA 16	8,0	PA 16	8,0			
3.	PA 8	6,0	PA 8	4,0	-	-	
	PA 16 M1	8,0	PA 16 M1	8,0			
4.	PA 11	6,0	PA 11	4,0	-	-	
	PA 16 M1	8,0	PA 16 M1	8,0			
5.	PA 8	6,0	PA 8	4,0	-	-	
	PA 16 M2	8,0	PA 16 M2	8,0			
6.	PA 11	6,0	PA 11	4,0	-	-	
	PA 16 M2	8,0	PA 16 M2	8,0			

Rekomenduojama plėsti tyrimą, kadangi tam tikrą regioną šiuo metu, rekomenduojama atlikti meteorologinių duomenų analizę visos Lietuvos mastu ir nustatyti kokie kritulių kiekiai vyrauja kitose vietovėse bei atitinkamai pasiūlyti vandeniui pralaidžių mišinių sudėtis ar rūšis.

3.3. Trečiojo skyriaus išvados

1. Kadangi atlikto tyrimo metu analizuoti tik 2021 m. Kauno rajone iškritusių kritulių duomenys, rekomenduojama plėsti meteorologinių duomenų analizę, apimant visoje Lietuvoje esančias meteorologinių stebėjimų stotis ir jose per ne mažiau kaip 10 paskutiniųjų metų užfiksuotus kritulių kiekius, ir nustatyti skirtinguose Lietuvos rajonuose iškrintančių kritulių didžiausius kiekius bei atsižvelgiant į tai parinkti tuose rajonuose taikytinų vandeniui pralaidžių asfalto mišinių sudėtis.

2. Pritaikius paprastosios tiesinės regresijos modelį asfalto bandinių vertikalaus ir horizontalaus pralaidumo vandens priklausomybės nuo oro tuštymų kiekio analizei, nustatyta vidutinė koreliacija tarp asfalto bandinių pralaidumo vandeniui ir oro tuštymų kiekio nepriklausomai nuo vandens tekėjimo krypties (determinacijos koeficientas tarp asfalto bandinių vertikalaus pralaidumo vandeniui ir oro tuštymų kiekio – $R^2 = 0,697$, tarp horizontalaus pralaidumo vandeniui ir oro tuštymų kiekio – $R^2 = 0,6816$).

3. Siekiant iš visų suprojektuotų poringojo asfalto mišinių nustatyti racionalią vandeniui pralaidžioms dangoms įrengti taikytiną asfalto mišinį, panaudoti du daugiakriterinio sprendimo priėmimo metodai: SAW ir TOPSIS. Vertinimas atliktas atsižvelgiant į tris asfalto mišinių savybes:

- vertikalųjį pralaidumą vandeniui, kuriam suteiktas 0,5 % svoris (reikšmingumas)
- dalelių (masės) nuostolį, kuriam suteiktas 0,3 % svoris (reikšmingumas);
- jautrumą vandeniui (ITSR), kuriam suteiktas 0,2 % svoris (reikšmingumas).

4. Naudojant daugiakriterinio sprendimo priėmimo metodus SAW ir TOPSIS nustatyti racionaliausi vandeniui pralaidžioms asfalto dangoms taikytini poringojo asfalto mišiniai. Pagal SAW metodą vandeniui pralaidžioms asfalto dangoms rekomenduojama taikyti šiuos mišinius: PA 11 mišinį (0,729), PA 16 mišinį (0,684), PA 8 mišinį (0,512) ir modifikuotą PA 16 mišinį Nr. 2 (0,508). Tuo tarpu pagal TOPSIS metodą projektuojant vandeniui pralaidžias asfalto dangas rekomenduojama taikyti šiuos metodus: PA 11 mišinį (0,745), PA 16 mišinį (0,631), PA 8 mišinį (0,408) ir modifikuotą PA 16 mišinį Nr. 1 (0,398).

5. Rekomenduojama vandeniui pralaidžias asfalto dangas taikyti dangos konstrukcijoms, atitinkančioms DK 0,1 ir DK 0,3 dangos konstrukcijų klasę ir atlikti papildomus natūrinius tyrimus dėl vandeniui pralaidžių asfalto dangų taikymo dangos konstrukcijoms, atitinkančioms DK 1 – DK 2 dangos konstrukcijų klases.

6. Rekomenduojama vandeniui pralaidžias asfalto dangas taikyti: pagalbinėse gatvėse (D, D_s), automobilių stovėjimo aikštelėse ir poilsio aikštelių transporto priemonių važiavimo juostose ir stovėjimo vietose. Visose iš minėtųjų taikymo paskirčių leidžiamas lengvųjų transporto priemonių eismas su nedideliu sunkiasvorio transporto priemonių eismu.

7. Rekomenduojama vandeniui pralaidžiose dangos konstrukcijose numatyti 10–14 cm storio vandeniui pralaidžią asfalto dangą priklausomai nuo dangos konstrukcijos klasės. Taip pat rekomenduojama pagrindo sluoksnių be rišiklių įrengimui naudoti siauresnės frakcijos nesurištuosius mišinius, kurių mažiausias grudelių dydis yra ≥ 4 mm.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Atlikus literatūros analizę nustatytos pagrindinės vandeniui pralaidžių dangų rūšys: poringojo asfalto danga, poringojo betono danga, trinkelų arba plokščių danga ir geokorio danga (užpildyto stambiuoju užpildu). Nepriklausomai nuo dangos rūšies dangos konstrukcijos skirstomos į: vandenį nuvedančias dangos konstrukcijas, pusiau vandeniui pralaidžias dangos konstrukcijas bei vandeniui pralaidžias dangos konstrukcijas.

2. Remiantis atlikta literatūros analize nustatyta, kad neatliekant vandeniui pralaidžios asfalto dangos priežiūros (porų valymo), poringojo asfalto danga per 10 metų visiškai užsikemša, todėl būtina vandeniui pralaidžias asfalto dangas atlikti priežiūrą 2–4 kartus per metus.

3. Atlikus 2021 m. Kauno hidrometeorologijos stotyje iškritusių kritulių analizę, nustatyta, jog Kauno rajone didžiausias kritulių kiekis per valandą (14,4 mm) iškrito birželio 23 d. Tokiam iškritusių kritulių kiekiui absorbuoti asfalto dangos pralaidumas vandeniui turi būti ne mažesnis kaip $0,004 \cdot 10^{-3}$ m/s. Pabrėžtina, jog hidrometeorologijos stotyse iškritusių kritulių kiekis registruojamas kas valandą, tačiau itin stiprios liūtys gali trukti 15 min. ir mažiau ir per šį laikotarpį gali iškristi visos valandos kritulių kiekis. Todėl projektuojant vandeniui pralaidžias dangas kitose šalyse reikalaujamas ženkliai didesnis dangos pralaidumas vandeniui.

4. Naudojant daugiakriterinio sprendimo priėmimo metodus SAW ir TOPSIS išskirti šie prioritetiniai eksperimentiniame tyrime tirti vandeniui pralaidžioms dangoms įrengti taikytini poringojo asfalto mišiniai: PA 11 (atitinkamai 0,729 ir 0,745), PA 16 (atitinkamai 0,684 ir 0,631), PA 8 (atitinkamai 0,512 ir 0,408), modifikuotas PA 16 Nr. 1 (atitinkamai 0,508 ir 0,398) ir modifikuotas PA 16 Nr. 2 (atitinkamai 0,508 ir 0,351). Pažymėtina, kad modifikuotas PA 16 mišinys Nr. 1 ir modifikuotas PA 16 mišinys Nr. 2 suprojektuoti sumažinant oro tuštymių kiekį nuo 4,10 % iki 10,30 % lyginant su techninių reikalavimų aprašo TRA ASFALTAS 08 reikalavimais, kuomet minimalus oro tuštymių kiekis turi būti ≥ 24 %.

5. Atlikus eksperimentinį tyrimą patikslintos teoriniame lygmenyje nustatytos funkcinių savybių ribinės sąlygos, užtikrinančios asfalto dangos pralaidumą vandeniui. Nustatyta, kad asfalto dangos yra pralaidžios vandeniui, kai:

- oro tuštymių kiekis yra 19–28 %;
- vertikalusis ir horizontalusis pralaidumas vandeniui yra ne mažesnis kaip $0,5 \cdot 10^{-3}$ m/s;
- jautrumas vandeniui poringojo asfalto PA 8 ir PA 11 mišiniams yra ne mažesnis kaip 90 %, o PA 16 mišiniui – ne mažesnis kaip 80 %.

6. Išanalizavus kitų šalių vandeniui pralaidžių asfalto dangų taikymo praktiką ir atsižvelgiant į projektavimo taisyklių KPT SDK 19 nuostatas vandeniui pralaidžios asfalto dangos

gali būti taikomos įrengiant DK 0,1–DK 1 klasės dangos konstrukcijas pagalbinėse gatvėse, automobilių stovėjimo aikštelėse ir poilsio aikštelėse, kur vyrauja lengvųjų transporto priemonių eismas ir pasitaiko nedidelis sunkiasvorių transporto priemonių eismas (≤ 10 aut./parą).

7. Išanalizavus kitose šalyse taikomas vandeniui pralaidžių dangų konstrukcijų sudėtis ir sluoksnių storius bei projektavimo taisyklėse KPT SDK 19 pateikiamas standartizuotas dangų konstrukcijas nustatyta, jog vandeniui pralaidžias asfalto dangos konstrukcijas turi sudaryti šie konstrukciniai sluoksniai:

- viensluksnė (8-10 cm storio) arba dvisluksnė (12-14 cm storio) poringojo asfalto danga. Faktinis dangos storis parenkamas atsižvelgiant į dangos konstrukcijos klasę;
- skaldos pagrindo sluoksnis ne mažesnis kaip 20 cm, o žvyro pagrindo sluoksnis turi būti ne mažesnis kaip 25 cm, priklausomai nuo žemiau esančių konstrukcinių sluoksnių sudėties;
- apsauginis šalčiui atsparus sluoksnis arba šalčiui nejautrių medžiagų sluoksnis. Sluoksnio storis parenkamas toks, kad būtų užtikrintas dangos atsparumas šalčio poveikiui;
- priklausomai nuo geologinių sąlygų turi būti įvertintas atskiriamosios geotekstilės ir armavimo geotinklo poreikis.

REKOMENDACIJOS

1. Siekiant užtikrinti vandeniui pralaidžių dangų ilgalaikį pralaidumą vandeniui, rekomenduojama 2–4 kartus per metus dangą valyti vakuuminio arba regeneraciniu būdu. Taip pat rekomenduojama žiemos metu nenaudoti smėlio ir vietoje jo taikyti ledą tirpdančias chemines medžiagas.

2. Kadangi atliktas eksperimentinis tyrimas yra apribotas tik 2021 m. Kauno meteorologijos stotyje užfiksuotais duomenimis, rekomenduojama plėsti meteorologinių duomenų analizę, apimant visoje Lietuvoje esančias meteorologines stotis ir analizuojant bent 10 metų istorinius kritulių kiekio duomenis, ir esant poreikiui patikslinti ribinę pralaidumo vandeniui vertę bei atitinkamai pasiūlyti vandeniui pralaidžius asfalto mišinius.

3. Atsižvelgiant į tai, kad meteorologijos stotyse iškritusių kritulių kiekis registruojamas vieną kartą per valandą ir į tai, kad dažnai pasitaiko trumpalaikių liūčių, kurių trukmė gali siekti 15 minučių ir mažiau ir per šį laikotarpį gali iškristi visas per valandą meteorologijos stotyse fiksuojamas didžiausias kritulių kiekis, rekomenduojama tikslinti iškritusių kritulių kiekio nustatymą ir metodiką trumpinant fiksuojamų kritulių laiko intervalą.. Patikslinta metodika leis tiksliau nustatyti mažiausią reikalaujamą asfalto dangų pralaidumą vandeniui.

4. Rekomenduojama atlikti natūrinius tyrimus dėl vandeniui pralaidžių asfalto dangų taikymo DK 1 ir DK 2 klasės dangos konstrukcijoms.

5. Rekomenduojama įrengti eksperimentinius vandeniui pralaidžių asfalto dangų ruožus miestų ir rajonų savivaldybių administracijos valdomoje infrastruktūroje. Tai leis įvertinti šių dangų gebėjimą akumuliuoti iškrintančius kritulius ir ilgaamžiškumą (atsparumą transporto priemonių apkrovų bei klimatinių veiksnių poveikiui).

6. Siūloma ateityje atlikti papildomus tyrimus, kurių metu būtų nustatytas vandeniui pralaidžios asfalto dangos sluoksnių atsparumas ultravioletinei spinduliuotei, tokiu būdu nustatant šio tipo dangų patvarumą aplinkos poveikio aspektu.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Aboufoul, M., & Garcia, A. (2017). Factors affecting hydraulic conductivity of asphalt mixture. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 50(2), 1–16. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0982-6>

Afonso, M. L., Dinis-Almeida, M., & Fael, C. S. (2017). Study of the porous asphalt performance with cellulosic fibres. *Construction and Building Materials*, 135, 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.222>

Al-Rubaei, A. M., Stenglein, A. L., Viklander, M., & Blecken, G.-T. (2013). Long-term hydraulic performance of porous asphalt pavements in northern Sweden. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(6), 499–505. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ir.1943-4774.0000569](https://doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000569)

American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *AASHTO guide for design of pavement structures, 1993*. The Association.

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2021). *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage (AASHTO T 283-21)*.

American Society for Testing and Materials. (2021). *Standard Specification for Concrete Grid Paving Units (ASTM C1319-21)*.

Amirjani, M. (2010). *Clogging of permeable pavements in semi-arid areas* [master thesis]. Delf University of Technology. <https://doi.org/10.4121/UUID:FC054477-E113-45A6-BCA4-8A21116641BE>

Auckland Council. (2015). *Permeable Pavement Operation & Maintenance Guide- Stormwater device information series*.

Bruinsma, J., Smith, K., Peshkin, D., Ballou, L., Eisenberg, B., Lurie, C., Costa, M., Ung, C., Nassiri, S., Shi, X., & Haselbach, L. (2017). *Guidance for usage of permeable pavement at airports*. Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/24852>

Chatfield, A. G., Reynolds, A. K., & Food, D. J. (1979). *Waterspray from heavy goods vehicles: an assessment of some vehicle modifications*. <https://trid.trb.org/view/148820>

Chen, J., Yin, X., Wang, H., & Ding, Y. (2018). Evaluation of durability and functional performance of porous polyurethane mixture in porous pavement. *Journal of Cleaner Production*, 188, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.297>

Chen, S., Lin, X., Zheng, C., Guo, X., & Chen, W. (2021). Evaluation of siltation degree of permeable asphalt pavement and detection of noise reduction degree. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/app11010349>

Chen, X., Wang, H., Li, C., Zhang, W., & Xu, G. (2022). Computational investigation on surface water distribution and permeability of porous asphalt pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(4), 1226–1238. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1797734>

Chopra, M., Kakuturu, S., Ballock, C., Spence, J., & Wanielista, M. (2010). Effect of rejuvenation methods on the infiltration rates of pervious concrete pavements. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(6), 426–433. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0000117](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000117)

Chu, L., Wang, R., Qin, C., & Fwa, T. F. (2021). Laboratory study of cleaning effects of clogged porous asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 23(8), 1762–1777. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1924234>

Dougherty, M., Hein, M., Martina, B. A., & Ferguson, B. K. (2011). Quick surface Infiltration Test to Assess Maintenance Needs on Small Pervious Concrete Sites. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137(8), 553–563. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ir.1943-4774.0000324](https://doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000324)

Drake, Jennifer A.P., Bradford, A., & Marsalek, J. (2013). Review of environmental performance of permeable pavement systems: State of the knowledge. *Water Quality Research Journal of Canada*, 48(3), 203–222. <https://doi.org/10.2166/wqrjc.2013.055>

Drake, Jennifer Anne Pauline. (2013). *Performance and operation of partial infiltration permeable pavement systems in the Ontario climate* [doctoral thesis]. The University of Guelph.

Eisenberg, B., Lindow, K. C., & Smith, D. R. (2015). *Permeable pavements*. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784413784>

Fan, L.-F., Wang, S.-F., Chen, C.-P., Hsieh, H.-L., Chen, J.-W., Chen, T.-H., & Chao, W.-L. (2014). Microbial community structure and activity under various pervious pavements. *Journal of Environmental Engineering*, 140(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0000798](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0000798)

Ge, N., Li, H., Yang, B., Fu, K., Yu, B., & Zhu, Y. (2022). Mechanical responses analysis and modulus inverse calculation of permeable asphalt pavement under dynamic load. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 11(2), 243–254. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2021.03.007>

Giunta, S., Ciriminna, D., Battista Ferreri, G., Valerio Noto, L., & Celauro, C. (2022). Numerical comparison of the hydrological response of different permeable pavements in urban area. *Sustainability (Switzerland)*, 14(9), 5704. <https://doi.org/10.3390/SU14095704>

Golroo, A., & Tighe, S. L. (2012). Pervious concrete pavement performance modeling: An empirical approach in cold climates. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(10), 1100–1112. <https://doi.org/10.1139/L2012-088>

Guan, X., Wang, J., & Xiao, F. (2021). Sponge city strategy and application of pavement materials in sponge city. *Journal of Cleaner Production*, 303, 127022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127022>

Hein, D. K., Strecker, E., Poresky, A., Roseen, R., & Venner, M. (2013). *Permeable Shoulders with Stone Reservoirs*. NCHRP Report.

Hein, M. F., Dougherty, M., & Hobbs, T. (2013). Cleaning methods for pervious concrete pavements. *International Journal of Construction Education and Research*, 9(2), 102–116. <https://doi.org/10.1080/15578771.2011.649886>

Henderson, V., & Tighe, S. (2012). Evaluation of pervious concrete pavement performance in cold weather climates. *International Journal of Pavement Engineering*, 13(3), 197–208. <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.572970>

Henderson, V., & Tighe, S. L. (2011). Evaluation of pervious concrete pavement permeability renewal maintenance methods at field sites in Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38(12), 1404–1413. <https://doi.org/10.1139/L11-105>

Hu, J., Ma, T., Zhu, Y., Huang, X., Xu, J., & Chen, L. (2021). High-viscosity modified asphalt mixtures for double-layer porous asphalt pavement: Design optimization and evaluation metrics. *Construction and Building Materials*, 271. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121893>

Hu, M., Zhang, X., Siu, Y. L., Li, Y., Tanaka, K., Yang, H., & Xu, Y. (2018). Flood mitigation by permeable pavements in Chinese sponge city construction. *Water (Switzerland)*, 10(2), 172. <https://doi.org/10.3390/w10020172>

Huang, J., Valeo, C., He, J., & Chu, A. (2012). Winter performance of inter-locking pavers-stormwater quantity and quality. *Water (Switzerland)*, 4(4), 995–1008. <https://doi.org/10.3390/W4040995>

Huang, W., Cai, X., Li, X., Cui, W., & Wu, K. (2020). Influence of nominal maximum aggregate size and aggregate gradation on pore characteristics of porous asphalt concrete. *Materials*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/ma13061355>

icpi. (2020). Concrete Grid Pavements .

Jia, J., Ma, B., Tian, Y., Mao, W., & Wang, X. (2023). Experimental analysis of water-holding behavior of permeable asphalt mixture. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 16(1), 138–148. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00120-3>

Jiang, W., Sha, A., Xiao, J., Li, Y., & Huang, Y. (2015). Experimental study on filtration effect and mechanism of pavement runoff in permeable asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 100, 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.055>

Jones, D., Harvey, J., Li, H., Wang, T., Wu, R., & Campbell, B. (2010). Laboratory testing and modeling for structural performance of fully permeable pavements: Final report. *UC Davis: Institute of Transportation Studies*. <https://escholarship.org/uc/item/784252zg>

Kayhanian, M., Li, H., Harvey, J. T., & Liang, X. (2019). Application of permeable pavements in highways for stormwater runoff management and pollution prevention: California research experiences. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 8(4), 358–372. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2019.01.001>

Kumar, K. H. (2014). Review on permeable pavement systems. *Transportation Planning and Methodologies for Developing Countries TPMDC* (vol. 11, pp. 1–8).

Kuruppu, U., Rahman, A., & Rahman, M. A. (2019). Permeable pavement as a stormwater best management practice: a review and discussion. *Environmental Earth Sciences*, 78 327. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8312-2>

Leming, M. L., Malcom, H. R., & Tennis, P. D. (2007). *Hydrologic Design of Pervious Concrete*. Portland Cement Association. <https://trid.trb.org/view/836914>

Leonovič, I., Laurinavičius, A., & Čygas, D. (2014). *Keliai ir klimatas*. Vilniaus Gedimino technikos universitetas: Technika. <https://doi.org/10.3846/1418-s>

Li, Hengzhen, Xu, H., Chen, F., Liu, K., Tan, Y., & Leng, B. (2022). Evolution of water migration in porous asphalt due to clogging. *Journal of Cleaner Production*, 330. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129823>

Li, Hui, Jones, D., & Harvey, J. (2012). Development of mechanistic-empirical design procedure for fully permeable pavement under heavy traffic. *Transportation Research Record*, (2305), 83–94. <https://doi.org/10.3141/2305-09>

Liu, H., Hao, P., & Xu, J. (2017). Effects of nominal maximum aggregate size on the performance of stone matrix asphalt. *Applied Sciences (Switzerland)*, 7(2). <https://doi.org/10.3390/app7020126>

Liu, Q., Liu, S., Hu, G., Yang, T., Du, C., & Oeser, M. (2021). Infiltration capacity and structural analysis of permeable pavements for sustainable urban: A full-scale case study. *Journal of Cleaner Production*, 288. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125111>

Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija. (2011). *Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2011 m. gruodžio 2 d. įsakymas „Dėl statybos techninio reglamento STR 2.06.04:2014 „Gatvės ir vietinės reikšmės keliai. Bendrieji reikalavimai“ patvirtinimo“* (Nr. D1-933). <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.413395/asr>

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2012). *Bandymai užpildų geometrinėms savybėms nustatyti. 1 dalis. Granuliometrinės sudėties nustatymas. Sijojimo metodas* (LST EN 933-1:2012).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2020). *Bandymai užpildų mechaninėms ir fizikinėms savybėms nustatyti. 2 dalis. Atsparumo trupinimui nustatymo metodai* (LST EN 1097-2:2020).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2019). *Bituminiai mišiniai. Bandyimo metodai. 5 dalis. Didžiausio tankio nustatymas* (LST EN 12697-5:2019).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2020). *Bituminiai mišiniai. Bandyimo metodai. 6 dalis. Bituminių bandinių tariamojo tankio nustatymas* (LST EN 12697-6:2020).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2019). *Bituminiai mišiniai. Bandyimo metodai. 8 dalis. Bituminių bandinių tuštymėtumo rodiklių nustatymas* (LST EN 12697-8:2019).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2018). *Bituminiai mišiniai. Bandyimo metodai. 12 dalis. Bituminių bandinių jautrio vandeniui nustatymas* (LST EN 12697-12:2018).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2017). *Bituminiai mišiniai. Bandyimo metodai. 17 dalis. Akytojo asfalto bandinių dalelių nuostoliai* (LST EN 12697-17:2017).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2017). *Bituminiai mišiniai. Bandyimo metodai. 18 dalis. Rišiklio nutekėjimas* (LST EN 12697-18:2017).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2020). *Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 19 dalis. Bandinio pralaidumas* (LST EN 12697-19:2020).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2018). *Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 23 dalis. Bituminių bandinių netiesioginio tempimo stiprio nustatymas* (LST EN 12697-23:2018).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2018). *Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 26 dalis. Standis* (LST EN 12697-26:2018).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2017). *Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 27 dalis. Ėminių ėmimas* (LST EN 12697-27:2017).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2019). *Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 30 dalis. Bandinio paruošimas smūginiu tankintuvu* (LST EN 12697-30:2019).

Lu, G., Liu, P., Wang, Y., Faßbender, S., Wang, D., & Oeser, M. (2019). Development of a sustainable pervious pavement material using recycled ceramic aggregate and bio-based polyurethane binder. *Journal of Cleaner Production*, 220, 1052–1060. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.184>

Lu, R., Jiang, W., Xiao, J., Xing, C., Ruan, C., Li, Y., & Wu, W. (2022). Temperature characteristics of permeable asphalt pavement: Field research. *Construction and Building Materials*, 332. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127379>

Ma, X., Li, Q., Cui, Y. C., & Ni, A. Q. (2018). Performance of porous asphalt mixture with various additives. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(4), 355–361. <https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1175560>

Masy, T., Bertrand, C., Xavier, P. M., Vreuls, C., Wilmot, A., Cludts, M., Renard, P., Mawet, P., Smets, S., Dethy, B., Thonart, P., Jacques, P., & Hiligsmann, S. (2016). Stable biofilms of *Rhodococcus erythropolis* T902.1 in draining pavement structures for runoff water decontamination. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 112, 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.04.038>

Mata, L. A., & Leming, M. L. (2012). Vertical distribution of sediments in pervious concrete pavement systems. *Materials Journal*, 109(2), 149–155. <https://doi.org/10.14359/51683701>

Mbanaso, F. U., Coupe, S. J., Charlesworth, S. M., & Nnadi, E. O. (2013). Laboratory-based experiments to investigate the impact of glyphosate-containing herbicide on pollution attenuation and biodegradation in a model pervious paving system. *Chemosphere*, 90(2), 737–746. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.09.058>

Meng, A., Tan, Y., Xing, C., Lv, H., & Xiao, S. (2020). Investigation on preferential path of fluid flow by using topological network model of permeable asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118163>

Meng, A., Xing, C., Tan, Y., Xiao, S., Li, J., & Li, G. (2020). Investigation on clogging characteristics of permeable asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120273>

Mohd Shukry, N. A., Abdul Hassan, N., Hainin, M. R., Abdullah, M. E., Mohamed Abdullah, N. A., Mahmud, M. Z. H., Putrajaya, R., & Mashros, N. (2016). Experimental evaluation of antistripping additives on porous asphalt mixtures. *Jurnal Teknologi*, 78(7–2), 113–119. <https://doi.org/10.11113/jt.v78.9502>

Mullaney, J., & Lucke, T. (2014). Practical review of pervious pavement designs. *Clean - Soil, Air, Water*, 44(2), 111–124. <https://doi.org/10.1002/clen.201300118>

NAPA. (2008). *Design, construction and maintenance guide for porous asphalt pavements*. National Asphalt Pavement Association.

Newman, A. P., Pratt, C. J., Coupe, S. J., & Cresswell, N. (2002). Oil bio-degradation in permeable pavements by microbial communities. *Water Science and Technology*, 45(7), 51–56. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0116>

Nnadi, E. O., Newman, A. P., & Coupe, S. J. (2014). Geotextile incorporated permeable pavement system as potential source of irrigation water: Effects of re-used water on the soil, plant growth and development. *Clean - Soil, Air, Water*, 42(2), 125–132. <https://doi.org/10.1002/clen.201300165>

Novo, A. V., Bayon, J. R., Castro-Fresno, D., & Rodriguez-Hernandez, J. (2013). Temperature Performance of Different Pervious Pavements: Rainwater Harvesting for Energy Recovery Purposes. *Water Resources Management*, 27(15), 5003–5016. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0270-y>

Roseen, R. M., Ballesteros, T. P., Houle, K. M., Heath, D., & Houle, J. J. (2014). Assessment of winter maintenance of porous asphalt and its function for chloride source control. *Journal of Transportation Engineering*, 140(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000618](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000618)

Saadeh, S., Ralla, A., Al-Zubi, Y., Wu, R., & Harvey, J. (2019). Application of fully permeable pavements as a sustainable approach for mitigation of stormwater runoff. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 8(4), 338–350. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2019.02.001>

Sangiorgi, C., Eskandarsefat, S., Tataranni, P., Simone, A., Vignali, V., Lantieri, C., & Dondi, G. (2017). A complete laboratory assessment of crumb rubber porous asphalt. *Construction and Building Materials*, 132, 500–507. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.016>

Sañudo-Fontaneda, L. A., Andres-Valeri, V. C., Costales-Campa, C., Cabezon-Jimenez, I., & Cadenas-Fernandez, F. (2018). The long-term hydrological performance of permeable pavement systems in northern Spain: An approach to the “end-of-life” concept. *Water (Switzerland)*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/w10040497>

Sanz Garcia, J. M., Romana Garcia, M., & Ramos Garcia, J. A. (2021). Influence of texture on drainability, splash and spray in flexible pavements. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 16(3), 1–30. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2021-16.530>

Selbig, W. (2019). *Evaluating the potential benefits of permeable pavement on the quantity and quality of stormwater runoff*. Upper Midwest Water Science Center. <https://www.usgs.gov/centers/upper-midwest-water-science-center/science/evaluating-potential-benefits-permeable-pavement#overview>

Selbig, W. R., & Buer, N. (2018). *Hydraulic, water-quality, and temperature performance of three types of permeable pavement under high sediment loading conditions: U.S. geological survey scientific investigations report 2018–5037*. USGS Numbered Series. <https://doi.org/https://doi.org/10.3133/sir20185037>

Shirini, B., & Imaninasab, R. (2016). Performance evaluation of rubberized and SBS modified porous asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 107, 165–171. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.006>

Smith, D.R., 2011. *Permeable interlocking concrete pavements*. 4th ed. Herndon, VA: Interlocking Concrete Pavement Institute.

Sophie Rhéaume. (2018). *Porous asphalt vs segmental permeable pavement*. Techno-Bloc. <https://pros.techo-bloc.com/porous-asphalt-vs-segmental-permeable-pavement>

TYMCO. (n.d.). *How the regenerative system works*. TYMCO Street Sweepers. <https://www.tymco.com/sweepers/regenerative-air-system/>

Valstybės įmonė Lietuvos automobilių kelių direkcija. (2009). *Dėl Automobilių kelių asfalto mišinių techninių reikalavimų aprašo TRA ASFALTAS 08 patvirtinimo*. (2009-01-12, Nr. V-15). <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.335942/asr>

Valstybės įmonė Lietuvos automobilių kelių direkcija. (2019). *Dėl Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklių KPT SDK 19 patvirtinimo*. (2019-01-25, Nr. V-16). <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/d292d45020dd11e9b246d9cc49389932/asr>

Weiss, P. T., Kayhanian, M., Gulliver, J. S., & Khazanovich, L. (2019). Permeable pavement in northern North American urban areas: research review and knowledge gaps. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(2), 143–162. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1279482>

Xu, G., Fan, J., Ma, T., Zhao, W., Ding, X., & Wang, Z. (2021). Research on application feasibility of limestone in sublayer of Double-Layer permeable asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 287. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123051>

Xu, S., Lu, G., Hong, B., Jiang, X., Peng, G., Wang, D., & Oeser, M. (2020). Experimental investigation on the development of pore clogging in novel porous pavement based on polyurethane. *Construction and Building Materials*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120378>

Yu, M. M., Zhu, J. W., Gao, W. F., Xu, D. P., & Zhao, M. (2017). Urban permeable pavement system design based on “sponge city” concept. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP (Vol. 82, pp. 1–9). Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/82/1/012027>

Zhang, K., & Kevern, J. (2021). Review of porous asphalt pavements in cold regions: the state of practice and case study repository in design, construction, and maintenance. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 2(1). <https://doi.org/10.1186/s43065-021-00017-2>

Zhang, S., & Guo, Y. (2015). Analytical Equation for Estimating the Stormwater Capture Efficiency of Permeable Pavement Systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(4). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ir.1943-4774.0000810](https://doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000810)

Zhu, Y., Li, H., Yang, B., Zhang, X., Mahmud, S., Zhang, X., Yu, B., & Zhu, Y. (2021). Permeable pavement design framework for urban stormwater management considering multiple criteria and uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 293. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126114>

PRIEDAI