



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Saulius Butkevičius

**SUNKIASVORIO TRANSPORTO ĮTAKA
AUTOMOBILIŲ KELIŲ ASFALTBETONIO DANGOS
FUNKCIONAVIMO TRUKMEI**

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, statybos inžinerija (02 T)

Vilnius, 2007

Disertacija rengta 2000–2007 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Ipolitas Zenonas Kamaitis (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02 T).

Mokslinis konsultantas

doc. dr. Kazys Petkevičius (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02 T).

TURINYS

IVADAS	5
1. NAGRINĖJAMOS PROBLEMOS SAMPRATA IR TYRIMŲ TIKSLAS	9
1.1. Lietuvos automobilių keliai ir transporto eismas	9
1.2. Sunkiasvorio transporto veiksnių įtaka kelių dangos suirčiai	13
1.3. Kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių suirties modeliai	21
1.4. Kelių dangos likutinis stipris	24
1.5. Automobilių kelių dangos projektavimo metodikų apžvalga	26
1.6. Kompensuoti nuostoliai dėl sunkiasvorio transporto eismo	28
1.7. Sunkiasvorio transporto apkrovų sezoninis ribojimas	32
1.8. Išvados	34
2. SUNKIASVORIO TRANSPORTO ARDANČIOJO POVEIKIO MODELIAVIMAS	36
2.1. Kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių irties modelis	36
2.2. Parametrai kelių dangos funkcionavimo trukmės modeliui pagrįsti	41
2.3. Kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo trukmės modelis	47
2.4. Kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo trukmės ir likutinio stiprio nustatymo metodika	54
2.5. Išvados	65
3. KELIŲ DANGOS LIKUTINIO STIPRIO NUSTATYMO EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI	67
3.1. Asfaltbetonio laboratoriniai tyrimai	67
3.1.1. Tyrimų eigos aprašas	67
3.1.2. Asfaltbetonio mišinių projektinės sudėties parinkimas	67
3.1.3. Asfaltbetonio bandinių savybių tyrimai	70
3.1.4. Siūlomo suirties masto modelio įvertinimas laboratorinėmis sąlygomis	75
3.2. Automobilių kelių būklės natūriniai tyrimai	79
3.2.1. Tyrimų ruožų parinkimas ir tyrimų metodika	79
3.2.2. Kelių dangos vizualieji tyrimai	79
3.2.3. Kelių dangos instrumentiniai tyrimai	81
3.3. Išvados	84
4. KELIŲ DANGOS ASFALTBETONIO SLUOKSNIŲ FUNKCIONAVIMO TRUKMĖS BEI LIKUTINIO STIPRIO SKAITINĖ ANALIZĖ	86

4.1. Kelių dangos funkcionavimo trukmę nulemiantys sezoniniai veiksniai	86
4.2. Kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių stipris	99
4.3. Kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių racionali funkcionavimo trukmė	103
4.4. Išvados	109
5. SIŪLOMOS KONCEPCIJOS SUNKIASVORIO TRANSPORTO EISMUI IR APKROVOMS APRIBOTI	110
5.1. Konceptija sunkiasvorio transporto eismo sukeltiems kompensuotiniams nuostoliams apskaičiuoti	110
5.2. Konceptija sunkiasvorio transporto eismo apribojimui nepalankiuoju metų laikotarpiu nustatyti	117
5.3. Išvados	120
BENDROSIOS IŠVADOS	122
NAUDOTOS LITERATŪROS SĄRAŠAS	124
AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	136
PRIEDAI	138
I. Eismo kokybės koeficiento nustatymas	139
II. Sunkiasvorio transporto ardančiojo poveikio kelių dangai įvertinimas	144
III. Asfaltbetonio laboratorinių tyrimų metodika ir rezultatai	146
IV. Kelių dangos vizualiųjų tyrimų metodika ir rezultatai	151
V. Kelių dangos instrumentinių tyrimų metodika ir rezultatai	155
VI. Kelių dangos matavimų žurnalas	162

IVADAS

Tiriamoji problema

Pastaraisiais metais kelių priežiūros didžiausios problemos yra susijusios su vežimų sunkiasvoriais automobiliais skaičiaus augimu ir kelių ūkio nepakankamu finansavimu. Lietuvos keliai dėl kai kurių savybių (dangos pločio ir lygumo, dangos konstrukcijos stiprio ir kt.) negali atlaikyti labai sparčiai didėjančių sunkiasvorio transporto apkrovų. Trūkstant lėšų, mažėja kelių dangos taisymo ir stiprinimo darbų apimtys bei blogėja jų kokybė, o kelių dangos priežiūros žiemą ir remonto pavasarį išlaidos didėja bei blogėja dangos būklė.

Lietuvai įstojus į Europos Sąjungą, susidarė neatitiktis tarp šalies kelių transporto sektoriuje gaunamo pelno ir patiriamų nuostolių keliuose. Daugelyje Vakarų Europos šalių projektinė ašies apkrova yra 11–13 t, o Lietuvoje dauguma kelių buvo suprojektuota ir nutiesta tuo laikotarpiu, kai galiojo 10 t projektinė apkrova, todėl pastaruoju metu, vykdant tarptautinius tranzito krovinių vežimus, mūsų kelių dangos patiria pernelyg didelį ardymo poveikį net kai visų automobilių sraute santykinai yra nedaug sunkiasvorio transporto.

Lietuvoje keliai pagal savo parametrus (dangos plotį ir lygumą, dangos konstrukcijos stiprį ir kt.) nėra pritaikyti atlaikyti labai sparčiai didėjančias automobilių ašių apkrovas ir ženkliai padidėjusį sunkiasvorio transporto eismą. Didėjant eismo intensyvumui, daugelio kelių ar jų ruožų techninė kategorija tapo per žema, todėl juos būtina skubiai rekonstruoti, nes didžiojoje dalyje IV ir V kategorijų valstybinės reikšmės kelių, esant intensyviame sunkiasvorio transporto eismui, jau nepakanka nei jų konstrukcijos stiprio, nei jų dangos pločio.

Kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių įvairaus pobūdžio suirtis ir pažaidos (nuovargio plyšiai, provėžos, įdubos, pralaužos, skersiniai plyšiai ir kt.) atsiranda dėl transporto priemonių apkrovų ir/ar klimato bei aplinkos veiksnių (temperatūros, saulės, oro, taip pat vandens, sniego, ledo) daugkartinio poveikio. Akivaizdu, kad įvertinant kelių dangos suirties mastą, reikia nustatyti kelių tiesybos medžiagų ir gruntų funkcionavimo kelio dangos konstrukcijoje, kai veikia pasikartojančios apkrovos, dėsniumus.

Stiprinant kelių dangą, dažnai būtina įvertinti jos likutinį stiprį bei nustatyti atskirų jos sluoksnių bei grunto stiprio rodiklius. Šie uždaviniai tampa vis aktualesni tose šalyse, kurių kelių tinklas jau yra suformuotas (Lietuvoje ir daugelyje kitų ES šalių) ir didžiausia darbų apimtis siejama su kelių racionalios būklės laidavimu. Todėl vis platesnį mastą įgauna sąlyginai nebrangūs kelių tyrinėjimo darbai, skubios patikros bei tam reikalingų mechanizmų įdiegimas, naujos medžiagų gamybos technologijos, nauji kelių dangos stiprinimo projektavimo metodai. Riboto finansavimo sąlygomis (su tuo jau seniai susidūrė užsienio šalys ir tai aiškiai juntama Lietuvoje) prioritetiniais tampa medžiagų ilgaamžiškumo rodikliai bei šių medžiagų kaina, taip

pat racionalus bei diferencijuotas požūris į kelių dangos stiprinimą, įvertinant vietovės (regiono) klimato bei hidrologines savybes, kelių dangos sluoksnių likutinį stiprį, automobilių ašinių apkrovas.

Iki šiol dar nesukurta metodika, kurią taikant būtų galima pakankamai tiksliai įvertinti sunkiasvorio transporto eismo poveikį kelių dangoms, todėl pagal jo eismo pokyčius yra sunku racionaliai planuoti bei vykdyti kelių remonto darbus. Lietuvoje pastaraisiais metais norminiu dokumentu „STR 2.06.03:2001 Automobilių keliai“ yra įteisinta tik metodika kelių dangoms pagal krovininio eismo rodiklį VB parinkti, o būtiniosios metodikos kelių dangai projektuoti nėra. Kelių dangos įtempiams ir deformacijoms (dėl sunkiasvorio transporto ratų apkrovų poveikio) įvertinti ir jai projektuoti metodika (aprašyta ODN 218.046-01, VSN 46-83, VSN 42-87 ir VSN 52-89) negali būti pilnai taikytina ir tiksli Lietuvos sąlygomis, todėl ją taikant negalima pakankamai tiksliai prognozuoti kelių dangos stiprio kitėjimo ir dangos funkcionavimo trukmės, suirties masto asfaltbetonio sluoksniuose didėjimo ir jos likutinio stiprio, taip pat apskaičiuoti sunkiasvorio transporto leistinąjį eismo intensyvumą, atsižvelgiant į dabartinę kelių dangos būklę bei eismo sezoniškumą. Lietuvoje naudojami HDM-III ir HDM-IV modeliai bei kelių dangos būklės valdymo sistema „Davasema“ yra universalūs modeliai (vienodai taikytini įvairių šalių kelių dangai), todėl, norint juos pritaikyti Lietuvos sąlygoms, reikia nuolat tikslinti įvairius koeficientus.

Šiandienai yra ypač aktualu optimizuoti bei modernizuoti sunkiasvorio transporto ardančiojo poveikio kelių dangai įvertinimo metodus ir pasiūlyti būdus bei priemones kaip išvengti jos ankstyvos suirties. Pagal tai būtų galima objektyviai planuoti bei organizuoti sunkiasvorio transporto eismą silpnesnės kelių dangos keliais ar jų ruožais ir numatyti jų remonto darbus ar, jeigu būtina, visiškai apriboti sunkiasvorio transporto eismą metų nepalankiais sezonais.

Mokslinis naujumas ir aktualumas

Pirmą kartą sukurta metodika sunkiasvorio transporto eismo ir apkrovų ardančio poveikio Lietuvos kelių dangai, priklausomai nuo eismo sezoniškumo, jos stiprio, asfaltbetonio sluoksnių likutinio stiprio bei kelių dangos įtempio-deformuoto būvio kitėjimo, įvertinti.

Pasiūlytas kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių likutinio stiprio ir funkcionavimo trukmės likutinio resurso modelis. Modelis įvertina apkrovos parametrus bei jos poveikio intensyvumą, automobilių srauto sudėtį, kelių dangos sluoksnių medžiagų bei jai stiprinti naudojamų medžiagų projektines savybes, kelių dangos sluoksnio medžiagos stiprio kitėjimą, atsižvelgiant į jos suirties mastą, kelių dangos darbą, esant įvairioms vietovės klimato sąlygoms, skirtingiems žemės sankasos gruntams ir vietovės hidroterminiams režimams, remonto darbų kainą bei

ekonominį efektą stiprinant dangą. Pagal pasiūlytą modelį galima apskaičiuoti kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo racionalius tarpremontinius laikotarpius bei nustatyti jos stiprinimo sluoksnio racionalų storį. Naudojant šį modelį galima pasiūlyti kelių dangos stiprinimo su mažiausiomis sąnaudomis strategiją.

Konkrečiu pavyzdžiu Lietuvos sąlygoms nustatyta sunkiasvorio transporto eismo sezoniškumo bei kelių dangos stiprio įtaka projektinės apkrovos eismo leistinajam intensyvumui per metus. Nustatyta, kad, analizuojant asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo trukmę, vertinimo kriterijumi turi būti ne tik kelių dangos sluoksnio medžiagos stiprio kaita funkcionavimo laikotarpiu, bet ir nuovargio atsargos koeficientas, kuris įvertina asfaltbetonio sluoksnio įtempto-deformuoto būvio kitėjimą įvairiais metų laikotarpiais.

Pasiūlyta metodika sunkiasvorio transporto eismo daromiems nuostoliams Lietuvos keliams kompensuoti. Pagal šią metodiką galima tiksliau ir labiau diferencijuotai nustatyti įvairių sunkiasvorio transporto eismo Lietuvos keliais mokesčius, kai įvairios vietovės klimato sąlygos, skirtingi žemės sankasos gruntai, vietovės hidroterminiai režimai, skirtinga ekonominė situacija kelių ir transporto ūkyje.

Disertacinio darbo tikslas

Disertacinio darbo tikslas – ištirti sunkiasvorio transporto eismo ardomojo poveikio, įvertinant Lietuvos klimato sąlygas, įtaką kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių stipriui ir funkcionavimo trukmei, nustatant kelių dangai leistinas apkrovas bei pateikti metodiką dėl sunkiasvorio transporto eismo patirtiems materialiesiems nuostoliams įvertinti bei jiems kompensuoti.

Svarbiausi disertacinio darbo uždaviniai

1. Sukurti kelių asfaltbetonio dangos suirties, likutinio stiprio ir funkcionavimo trukmės, veikiant automobilių ratų pasikartojančioms apkrovoms, modelį, taikytiną Lietuvos sąlygomis, įvertinant vietovės gruntų, hidrologines ir klimato sąlygas.
2. Nustatyti kelių dangai sunkiasvorio transporto eismo leistinąjį intensyvumą bei leistinąją ašies apkrovą, įvertinant kelių dangos, kelių dangos konstrukcijos nerišlių sluoksnių bei žemės sankasos grunto įtempių-deformacijų būvį ir jų atsparumą.
3. Pasiūlyti metodiką kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių tarpremontiniams laikotarpiams bei stiprinimo sluoksnių parametrams nustatyti.
4. Parinktos sudėties asfaltbetonio eksperimentiniais laboratoriniais tyrimais bei parinktų Lietuvos kelio ruožų natūriniais vizualiais ir instrumentiniais būklės tyrimais patikrinti asfaltbetonio suirties ir likutinio stiprio nustatymo metodiką.
5. Pasiūlyti būdus sunkiasvorio transporto eismo ardančiajam poveikiui, tenkančiam

Lietuvos kelių asfaltbetonio dangai, sumažinti, ribojant eismo intensyvumą bei kompensuojant patiriamus nuostolius.

Ginamieji disertacijos teiginiai

1. Kelių asfaltbetonio dangos suirties, likutinio stiprio ir funkcionavimo trukmės modelis leis nustatyti jos suirties mastą, racionalią funkcionavimo trukmę bei likutinį stiprį, kuriais remiantis leis apskaičiuoti dangos asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo trukmės racionalius tarpremontinius laikotarpius, nustatyti jos sustiprinimo sluoksnio racionalų storį ir pasiūlyti mažiausių sąnaudų jos sustiprinimo strategiją.

2. Šį modelį yra tikslinga naudoti Lietuvoje ir šalyse, kuriose klimatinės sąlygos yra panašios.

Mokslo darbo aprobavimas

Disertacijos tema paskelbti 2 straipsniai recenzuojamuose periodiniuose mokslo leidiniuose, 6 straipsniai konferencijų medžiagą publikuojančiuose mokslo leidiniuose, 1 straipsnis kituose mokslo ir technikos leidiniuose (žr. literatūros sąrašą). Tarptautinėse ir respublikinėse mokslo konferencijose disertacijos tema skaityti šie moksliniai pranešimai:

1. „Evaluation of Condition of Flexible Road Pavement“. 7-oji tarptautinė (europinė) jaunųjų tyrėjų ir jų mokslinių vadovų konferencija „Transcom 2007“ (Slovakija: Žilina, 2007).

2. „Назначение вида ремонта нежестких дорожных одежд с монолитными слоями асфальтобетона на основе объективной оценке их состояния по предлагаемой методике“. 46-asis tarptautinis kompozitų modeliavimo ir optimizavimo seminaras „MOK‘46“ (Ukraina: Odesa, 2007).

3. „Воздействие нагрузок транспортных средств и климатических факторов на ровность асфальтобетонных покрытий“. 45-asis tarptautinis kompozitų modeliavimo ir optimizavimo seminaras „MOK‘45“ (Ukraina: Odesa, 2006).

4. „Conception of compensation for damage caused by traffic of heavy weight vehicles on roads with flexible pavement construction“. 6-oji tarptautinė konferencija „Environmental Engineering“ (Lietuva: Vilnius, 2005).

5. „Rational service life of solid layers in flexible road pavement construction and main principles that determine it“. 8-oji tarptautinė konferencija „Modern Building Materials, Structures and Techniques“ (Lietuva: Vilnius, 2004).

6. „Įvairių apkrovos parametrų įtaka nestandžios kelių dangos suirimiui“. Respublikinė konferencija „Civilinė inžinerija ir statyba“ (Lietuva: Vilnius, 2003).

1. NAGRINĖJAMOS PROBLEMOS SAMPRATA IR TYRIMŲ TIKSLAS

1.1. Lietuvos automobilių keliai ir transporto eismas

Lietuva turi gerai išplėtotą automobilių kelių tinklą, kurį reikia gerai prižiūrėti ir tobulinti. Lietuvos valstybinės reikšmės automobilių kelių bendras ilgis 21324,85 km (1.1 lentelė). Kelių tinklo tankumas 2007-ųjų metų pradžioje 1000-iui gyventojų sudarė 6,3 km, o 1000-iui km² – 326,6 km. Lietuvoje yra 558 km valstybinės reikšmės automobilių kelių su keturiomis eismo juostomis, iš jų 417 km automagistralių. Lietuvos valstybinės reikšmės automobilių keliuose (daugiau kaip 60 % jų ilgio) paklota asfaltbetonio ar kita asfaltinė danga [1] (1.1 lentelė).

Mūsų kraštą kerta 6-ios europinės magistralės: E67 VIA BALTICA (Helsinkis–Talinas–Ryga–Panevėžys–Kaunas–Varšuva–Vroclavas–Praha), E28 (Berlynas–Gdanskas–Karaliaučius–Marijampolė–Prienai–Vilnius–Minskas), E77 (Pskovas–Ryga–Šiauliai–Karaliaučius–Varšuva–Krokuva–Budapeštas), E85 (Klaipėda–Kaunas–Vilnius–Lyda–Černovcai–Bukareštas–Aleksandropolis), E262 (Kaunas–Utena–Daugpilis–Rezeknė–Ostravas), E272 (Vilnius–Panevėžys–Šiauliai–Palanga–Klaipėda). Lietuvos automobilių keliai atlieka svarbų vaidmenį, jungdami transporto koridorius.

1.1 lentelė. Lietuvos valstybinės reikšmės automobilių kelių tinklo struktūra (2007.01.01 duomenys) [1].

Dangos	Keliai			
	Magistraliniai	Krašto	Rajoniniai	Iš viso:
Asfalto dangos	1666,54	4947,90	6258,12	12872,56
Cementbetonio dangos	83,13	–	1,27	84,40
Žvyro dangos	–	–	8360,21	8360,21
Grindinys	0,38	–	7,30	7,68
Iš viso:	1750,05	4947,90	14626,90	21324,85

Kelių tinklo modernizavimas ir infrastruktūros plėtra užtikrina efektyvų autotransporto darbą bei susisiekimą šalyje. Panaudojant Kelių priežiūros ir plėtros programos ir ES paramos lėšas, modernizuojami Lietuvą kertantys automobilių transporto koridoriai. 2006 metais prioritetas buvo skirtas tarptautinių transporto koridorių plėtrai, įdiegiant saugaus eismo priemones. Didžiausias dėmesys buvo skirtas I ir IX transporto koridoriams, kuriuose eismo intensyvumas yra pats didžiausias [1]. Šiais keliais vyksta ir intensyvus tranzitinis eismas.

Kiekvienais metais daugėja Lietuvos keliais važiuojančių transporto priemonių skaičius, todėl yra būtina nuolat užtikrinti gerą kelių būklę bei nuosekliai gerinti susisiekimo sąlygas. 2006 m. transporto priemonių rida Lietuvos magistraliniuose ir krašto keliuose siekė 7430 mln. aut. km, o 2002 m. – 5737 mln. aut. km [1]. 2000 m. Lietuvoje buvo 1,29 mln. automobilių, o 2007 m. balandžio mėn. jau siekė 2,0 mln. Didžiausias eismo intensyvumas yra magistraliniuose keliuose (Vilnius–Kaunas–Klaipėda, Vilnius–Panevėžys, Kaunas–Marijampolė, Panevėžys–Šiauliai ir kt.) – jis kinta nuo 1 iki 39 tūkstančių aut./parą, krašto keliuose siekia 13 tūkstančių aut./parą, o rajonų keliuose dažniausiai neviršija 400 aut./parą.

Labai sparčiai pradėjo didėti eismo intensyvumas šalies svarbiausiuose (magistraliniuose) keliuose Lietuvai įstojus į ES. Kiekvienais metais didėja valstybės sieną kirtusių transporto priemonių, daugiausia sunkiasvorio transporto (čia ir toliau sunkiasvoriu transportu vadinsime automobilius, kurių keliamoji geba $>3,5$ t), skaičius. Atlikti tyrimai [2] rodo, kad 2006 m. magistraliniuose keliuose sunkiasvoris transportas sudarė 18,57 % bendrojo transporto priemonių srauto (2005 m. – 18,02 %). Išaugo ir standartinės ašies apkrovos ESA80 (kelio ruožo vidutinis metinis paros standartinių ašių ekvivalentas, kai 80 kN laikoma standartine apkrova) – 12,22 % (sunkiasvorio transporto – 12,22 %), ESA100 (kelio ruožo vidutinis metinis paros standartinių ašių ekvivalentas, kai 100 kN laikoma standartine apkrova) – 15,0 % (sunkiasvorio transporto – 12,88 %).

Šiuo metu (2007.01.01 duomenimis) didžiausias eismo intensyvumo pokytis nustatytas kelyje A5 Kaunas–Marijampolė–Suvalkai ties 88,02 km esančiame poste (6 km nuo Lietuvos ir Lenkijos sienos) [1, 2]. Palyginus 2003 m. ir 2006 m. duomenis, sunkiasvorio transporto eismo intensyvumas šiame kelyje padidėjo 1,5 karto – tai reiškia, kad jo neigiamas poveikis kelių dangai padidėjo 5 kartus. Dėl padidėjusio sunkiasvorio transporto eismo intensyvumo šiuo metu reikia rekonstruoti apie 40 % magistralinių ir krašto kelių.

Atliktais tyrimais [2] nustatyta, kad magistraliniuose keliuose transporto priemonių rida buvo 1,38 karto didesnė nei krašto keliuose. Pavyzdžiui, keliams A1 Vilnius–Klaipėda ir A2 Vilnius–Panevėžys teko 44,50 % visos magistralinių kelių ridos. 1.2 lentelėje pateikti duomenys apie transporto priemonių metinę ridą ir jos pasikeitimus magistraliniuose ir krašto keliuose, o 1.3 lentelėje parodyti 2006 m. transporto priemonių srauto sudėties pokyčiai magistraliniuose keliuose lyginant juos su 2005 m. transporto priemonių srauto sudėtimi.

Šie duomenys rodo, kad per paskutiniuosius ketverius metus (2003–2006 m.) eismo intensyvumas rajoniniuose keliuose išaugo 10,8 %. Daugiausiai sunkiasvorio transporto bendrajame transporto sraute važiavo kelių grupėje A3–A18 (čia sunkiasvorio transporto sudarė 19,9 % nuo bendrojo transporto priemonių srauto), mažiausiai – krašto keliuose (čia sunkiasvorio transporto sudarė 12,8 % nuo bendrojo transporto priemonių srauto). 2006 metais

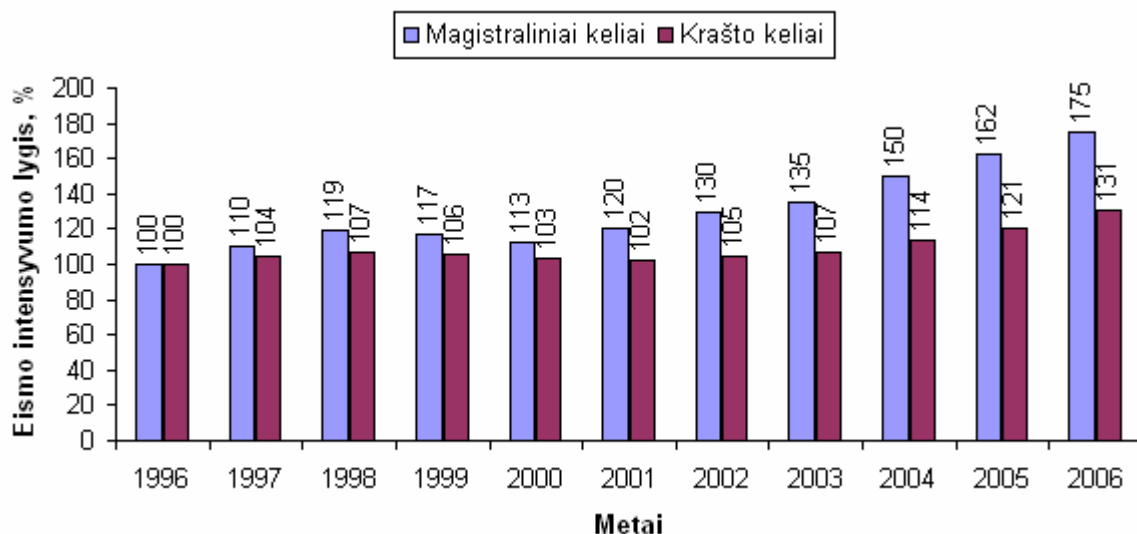
eismo intensyvumas, lyginant su 1996 m., išaugo: magistraliniuose keliuose – 175 %, krašto keliuose – 131 % (1.1 pav.). 2006 m. eismo intensyvumas šiuose keliuose bendrai, lyginant su 1996 m., išaugo 163 % (1.2 pav.).

1.2 lentelė. Transporto priemonių rida ir jos pokytis magistraliniuose ir krašto keliuose

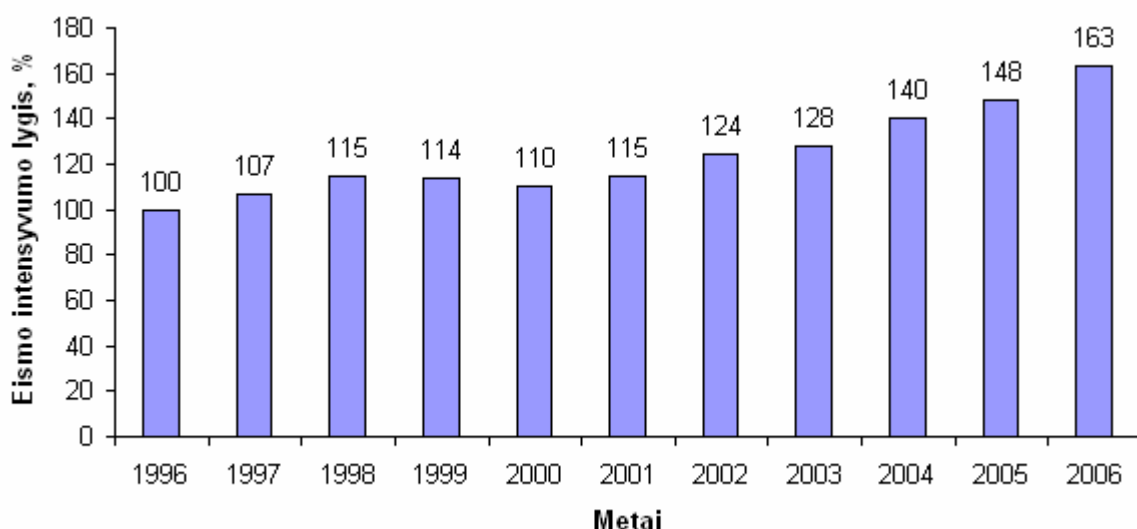
Kelių grupės	Suminė transporto priemonių rida per metus, 10 ⁶ aut.km					
	2002 m.	2003 m.	2004 m.	2005 m.	2006 m.	Pokytis 2006 m./2005 m.
Magistraliniai keliai	3247	3361	3709	4017	4302	7,09 %
Magistraliniai keliai A1–A2	1447	1511	1653	1768	1913	8,20 %
Magistraliniai keliai A3–A18	1800	1850	2057	2249	2389	6,22 %
Krašto keliai	2490	2652	2724	2863	3129	9,29 %
Magistraliniai ir krašto keliai	5737	6013	6438	6880	7430	7,99 %

1.3 lentelė. Transporto priemonių srauto sudėties 2006 m., lyginant su 2005 m., pokyčiai

Kelių grupės	Vidutinio metinio paros eismo intensyvumo pokytis 2006 m./2005 m.			
	Bendrojo transporto	Lengvojo transporto	Krovininio transporto	Autotraukinių (krovumas > 12 t)
A1–A2	7,9 %	6,7 %	14,13 %	8,07 %
A3–A18	8,48 %	7,12 %	14,25 %	15,06 %
Magistraliniai keliai	8,21 %	6,93 %	14,19 %	12,45 %



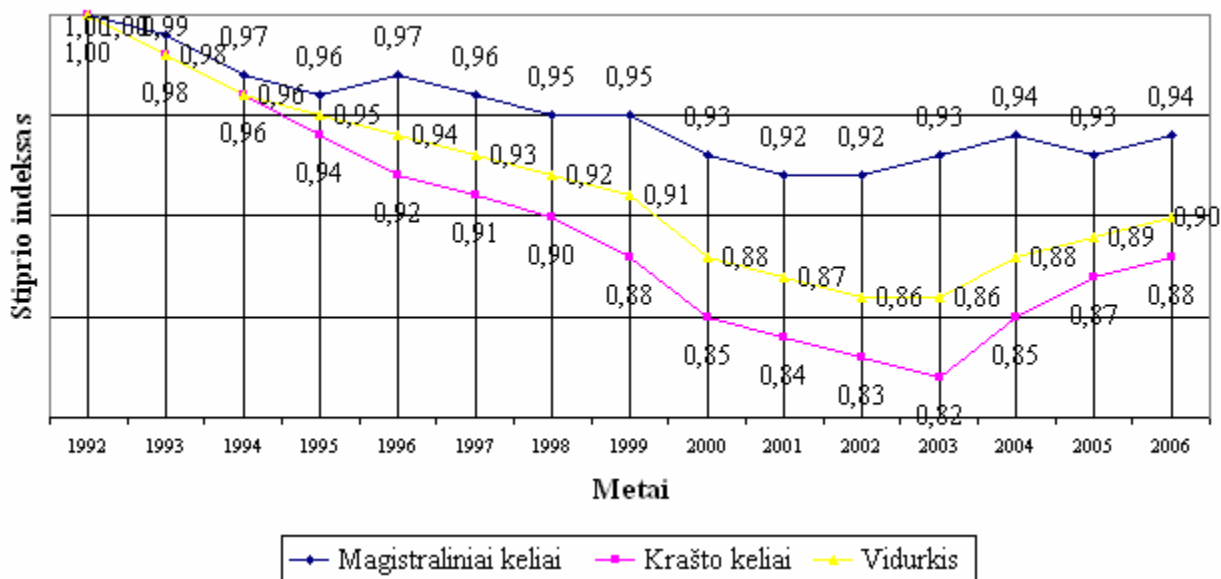
1.1 pav. Eismo intensyvumo kitėjimas magistraliniuose ir krašto keliuose atskirai 1996–2006 m.



1.2 pav. Eismo intensyvumo kitėjimas magistraliniuose ir krašto keliuose kartu 1996–2006 m.

Pagal 2002–2006 m. transporto priemonių apskaitos duomenis [2], VMPEI (čia ir toliau – vidutinis metinis paros intensyvumas) rajoniniuose keliuose 2006 m. buvo 373 aut./parą. Iš jų sunkiasvoris transportas sudarė 45 aut./parą (12,1 %). Išanalizavus duomenis nustatyta, kad vidutinis eismo intensyvumo augimas 2005–2006 m. buvo 4,4 %, o per paskutiniuosius ketverius metus (2003–2006 m.) eismo intensyvumas išaugo 10,8 %.

Lietuvoje keliai pagal savo parametrus (dangos plotį ir lygumą, dangos konstrukcijos stiprį) nėra pritaikyti atlaikyti labai sparčiai didėjančias automobilių ašių apkrovas ir ženkliai padidėjusį sunkiasvorio transporto eismą. Sumažėjus kelių dangos tobulinimo, taisymo ir stiprinimo darbų apimtims, sparčiai ėmė blogėti jos būklė, didėti jos duobėtumas ir vėžtumas bei mažėti kelių dangos konstrukcijos stipris (1.3 pav.). Išaugo kelių dangos priežiūros žiemą ir remonto pavasarį išlaidos.



1.3 pav. Magistralinių ir krašto kelių stiprio indekso kitėjimas

Be to, dauguma šalies automobilių kelių buvo suprojektuota ir nutiesta tuo laikotarpiu, kai galiojo 10 t projektinė ašies apkrova, todėl pastaruoju metu vykstant tarptautiniam tranzito krovinių eismui su sunkiasvorio transporto 11–13 t ašies apkrova, mūsų kelių danga ir jos konstrukcija patiria pernelyg didelį ardymo poveikį. Vėžės, bangos, duobės bei plyšiai rodo, kad nuo sunkiasvorio transporto apkrovų yra ne tik kelių danga, bet ir jos pagrindo sluoksnis. Kelių danga pažeidos blogina sunkiasvorio transporto eismo sąlygas – mažina saugumą, važiavimo komfortiškumą (kartais ir važiavimo greitį) bei gadina sunkiasvorį transportą.

Esant ribotiems finansiniams ištekliams, kelių taisymo ir tobulinimo darbų kokybė nebūna pakankamo lygio, o jų apimtys neatitinka poreikio, todėl kelių dangos būklė neišvengiamai blogėja.

Kadangi dėl sunkiasvorio transporto poveikio kelių dangai šios būklė neišvengiamai blogėja, reikia atlikti tyrimus, kad būtų galima pakankamai tiksliai įvertinti sunkiasvorio transporto eismo poveikį kelių dangai bei pagal jo eismo pokyčius racionaliai planuoti ir vykdyti kelių remonto darbus.

1.2. Sunkiasvorio transporto veiksmų įtaka kelių dangos suirčiai

Pažaidų intensyvumą kelio dangoje sąlygoja kelių dangos tipas, tiesybos medžiagos bei jų kokybės ir savybių tam tikrame laikotarpyje kityjimas, įrengimo technologijos, aplinkos agresyvumas, sunkiasvorio transporto eismo intensyvumas bei jo sudėtis, kelių dangos stiprio ir ilgaamžiškumo nuostoliai, ankstyvas jos stiprinimas ir remontas.

Charakteringos kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių pažaidos dažniausiai yra šlyties ir plastinės deformacijos, skersiniai temperatūros įtakos ir nuovargio plyšiai, įdubos bei provėžos ir išdaužos. Didžiausią jų dalį sudaro plyšiai dėl sunkiasvorio transporto eismo poveikio. Kiekvienos pažaidos rūšies dalis suirusioje dangoje priklauso nuo kelio kategorijos, kelių dangos pagrindo sluoksnio storio h_{pagr} , sunkiasvorio transporto eismo faktinio intensyvumo $N_p^{(f)}$ bei vietovės klimato sąlygų.

Veiksniai, sukeliantys kelių dangos suirčių, yra tarpusavyje susiję, todėl pagal pažaidos faktą sunku nustatyti, kokia buvo suirties priežastis bei kas turėjo įtaką pažaidai susidaryti ir jai plisti. Galima išskirti tris svarbiausius rodiklius, kurie paaiškina pažaidų susidarymo kelių dangoje priežastis – per silpna kelių dangos konstrukcija, per didelis ardančiosios apkrovos poveikis, nepalankios klimato sąlygos.

Automobilių keliais važiuoja įvairios transporto priemonės: lengvieji automobiliai, sunkvežimiai, autobusai, troleibusai, vilkikai su priekabomis ir kt., todėl projektuojant kelio

geometrinius elementus bei kelių dangas reikia gerai išnagrinėti šių transporto priemonių (ypač sunkiasvorio transporto) savybes ir jų sąveiką su keliu bei jo danga.

Darbų [3–5] analizė rodo, kad daugelį metų tiesiant automobilių kelius buvo taikomas struktūrinis projektavimas, kuris užtikrino atitinkamą kelių dangos keliamąją gebą augančiam sunkiasvorio transporto eismo poveikiui. Tai buvo pasiekama įrengiant ne tik aukštos kokybės asfaltbetonio dangas, bet ir didelį dėmesį teikiant pagrindo sluoksnio medžiagai ir jos stipriui.

Mokslo darbe [4] nurodyta, kad laikui bėgant kelių dangos suirtis plinta bei didėja ir pareina į vis gilesnius jos sluoksnius, kartu apimdama vis didesnę jos plotą. Charakteringos kelių dangos pažaidos: išilginiai plyšiai, skersiniai ir įstrižieji plyšiai, krokodilo odą primenantys plyšiai, plauko pavidalo įtrūkiai, plyšių tinklas, vėžės, bangos, dėmės, duobės, įlūžos.

Literatūros šaltinių [3–7] analizė rodo, kad apibūdinant kelių dangos būklę, būtina žinoti jos eksploatacinius rodiklius. Svarbiausi kelių dangos eksploatacinės kokybės rodikliai:

- a) kelių dangos stipris;
- b) kelių dangos konstrukcijos sluoksnių atsparumas tempimui lenkiant ir šlyčiai;
- c) dangos lygumas ir nusidėvėjimo (nuodytos) laipsnis;
- d) automobilio ratų sankiba su kelio danga;
- e) eismo saugumas;
- f) kelių dangos apkrovos lygis.

Tyrimai [3–8] rodo, kad kelių dangos naudojimo trukmė gali kisti nuo eismo sudėties ir intensyvumo, klimato sąlygų, jos stiprio ir jos sluoksnių storio, dangai įrengti naudojamų medžiagų kokybės ir daugelio kitų veiksnių. Apie kelių dangos naudojimo trukmės ir funkcionalumo išnaudojimą sprendžiama pagal jos eksploatacinių rodiklių atitikimą automobilių eismo poreikiams.

Išanalizavę [3–11] darbus galime teigti, kad žemės sankasos gruntas yra slegiamas kelių dangos ir automobilių, todėl šio grunto atsparumas apkrovoms ir nulemia kelių dangos stabilumą bei lygumą. Grunto stipris priklauso nuo grunto granulimetrinės sudėties, drėgnio, tankio bei temperatūros. Įvairiais metų laikotarpiais kinta žemės sankasos hidroterminis režimas, vietovės oro temperatūra, dėl kurių poveikio žemės sankasos, o tuo pačiu ir kelių dangos stabilumas gali smarkiai kisti (susidaryti iškylos ar kitos žemės sankasos bei kelių dangos liekamosios deformacijos). Vasarą, kai sausa, bei žiemą, kai gruntas išała, žemės sankasos tampros modulis būna ganėtinai aukštas, todėl tada keliu gali važiuoti žymiai sunkesnis sunkiasvoris transportas. Pavasario polaidžio metu keliuose, kuriuose ypač nepalankus sankasos hidroterminis režimas, sunkiasvorio transporto eismas gali būti ribojamas ar net uždraustas.

Išanalizavus [7, 8, 12] tyrimus nustatėme, kad dėl kai kurių kelių dangos konstrukcijos sluoksnių medžiagų ir žemės sankasos grunto tūsumo kelių dangos deformacijos vyksta

sulėtintai. Kelių dangos įlinkis, atitinkantis pridėtąją apkrovą, pasiekiamas tik po kelių minučių. Kai sunkiasvorio transporto riedantis ratas trumpai liečia dangą, dėl sulėtintos deformacijos ir inercinio pasipriešinimo danga įlinksta mažiau, nei veikiant tokio paties dydžio statinei apkrovai, todėl žemės sankasos grunto dinaminis koeficientas būna mažesnis už vienetą. Kai dangos paviršius yra nelygus, dinaminis koeficientas būna didesnis už vienetą, tačiau jis būna mažesnis už koeficientą, nustatytą išmatavus konkretų smūginį apkrovos poveikį į kelių dangos paviršių. Projektuojant kelių dangą dinaminio koeficiento vertės, priklausomai nuo jos medžiagų, taikomos nuo 1,3 iki 1,6.

Tyrimai [3–9, 12] rodo, kad automobilių ratų perduodamas slėgis į kelių dangą yra svarbiausia apkrova, kuri įvertinama jas projektuojant. Jeigu keliu važiuoja automobilis, kurio apkrova viršija projektinę apkrovą, atsiranda nežymios plastinės deformacijos, o kai šių deformacijų sankaupa didžiausio dangos susilpnėjimo laikotarpiu viršija tam tikrą leistinąją deformaciją – kelių danga pradeda irti. Automobilio rato apkrovai veikiant kelių dangą, susidaro jos įlinkis, apibūdinantis jos atsparumą deformacijoms (apibūdina jos tamprą ir stiprį). Kuo didesnis kelių dangos tampros modulis, tuo, kai kitos sąlygos vienodos, mažesnis jos tamprusis įlinkis ir tuo tolygiau automobilių ratų apkrova ir dėl jos susidarę įtempiai pasiskirsto jos sluoksniuose. Kai susidaro tokios sąlygos kelių dangos apatiniuose pagrindo sluoksniuose bei žemės sankasos grunte, veikia mažesni įtempiai ir sumažėja šių mažai rišlių sluoksnių medžiagų ir grunto galimo poslinkio tikimybė.

Griežtos linijinės (tiesinės) priklausomybės tarp tampraus įlinkio, medžiagos pasipriešinimo poslinkiui ir jos atsparumo nuosėdžiams nėra, todėl, neįvertinus nors vieno iš šių rodiklių, neįmanoma suprojektuoti racionalios kelių dangos. Reikia prognozuoti galimą kelių dangos suirtį ateityje, didinant jos funkcionavimo trukmę, o svarbiausias jos savybes būtina visapusiškai įvertinti.

Tyrimai [13] rodo, kad sunkiasvorio transporto ardantįjį poveikį tikslinga įvertinti taikant asfaltbetonio sluoksnių atsparumo plyšiams susidaryti kriterijų, nes, važiuojant sunkiasvoriu transportu, kelių dangoje labiausiai pasireiškia nuovargio plyšiai. Šiame darbe nurodoma, kad asfaltbetonio sluoksnių įvairaus pobūdžio suirtis ir pažaidos (nuovargio plyšiai, provėžos, įdubos, pralaužos, skersiniai plyšiai ir kt.) atsiranda dėl daugkartinio išorės jėgų ir/ar temperatūros, saulės spinduliuotės, taip pat – vandens, sniego, ledo poveikio, todėl, įvertinant kelių dangos suirties lygį, tikslinga nustatyti kelių tiesybės medžiagų ir/ar gruntų funkcionavimo dangoje, kai veikia pasikartojančios apkrovos, dėsniumus.

Tyrimai [7, 12, 14, 15] rodo, kad automobiliui važiuojant keliu, jo ratų apkrovos sukelia horizontaliąsias ir vertikaląsias jėgas. Vertikaliosios jėgos poveikis priklauso nuo automobilio masės, t.y. nuo jo ašies apkrovos, o horizontaliosios (tangentinės) – nuo automobilių važiavimo

greičio, pagreičio, ratų padangų sankibos su danga, kelio nuolydžio bei automobilio stabdymo būdo. Vertikaliosios ir horizontaliosios jėgos dangą veikia automobilių ratų padangų ir dangos lietimosi plote. Veikiant automobilių ratų daugkartinei vertikaliajai apkrovai, kelių dangos sluoksniuose ir žemės sankasos grunte atsiranda šlyties įtempiai. Jeigu šie įtempiai viršija kelių dangos sluoksnių mažai rišlios medžiagos ar grunto pasipriešinimą poslinkiui, jos sluoksnyje (ar sluoksniuose) pradeda kauptis likutinės deformacijos ir ji pradeda irti. Taip dažniausiai atsitinka pavasarį, kai žemės sankasos gruntas ir kelių dangos pagrindo sluoksniai būna susilpnėję (jų drėgnis būna padidėjęs, o tankis – sumažėjęs), o oro temperatūra dar sąlyginai žema.

Veikiant automobilio rato norminei apkrovai kelių dangos apkrauto ploto centre ties asfaltbetonio sluoksnio padu susidaro tempimo įtempiai. Asfaltbetonio (bitumo-mineralinių mišinių) sluoksniai, veikiant važiuojančio automobilio rato apkrovai, skersine kryptimi yra ištempiami labiau nei išilgine, todėl, po daugkartinio pasikartojančio automobilių ratų poveikio, pirminiai išilginiai plyšiai atsiranda kelių dangos intensyvaus dėvėjimosi juostoje. Veikiant automobilio rato apkrovai sąlygos plyšiams susidaryti asfaltbetonio sluoksniuose bei kelių dangos paviršiuje ir leidžiamas tų plyšių išplitimo greitis apibūdinamas vienu jos stiprio kriterijumi [9] – asfaltbetonio sluoksnių atsparumu tempimui lenkiant.

Tyrimų [16, 17–19] duomenimis spręsti apie automobilio rato apkrovos poveikį kelių dangos naudojimo laikotarpiui galima tada, jeigu žinomas ciklinių apkrovų, kurį tas asfaltbetonio bandinys atlaiko iki suirties, skaičius N ir jo ryšio su įtempių amplitude σ arba santykinė deformacija ε . Pagal asfaltbetonio bandymus nuovargiui šis poveikis buvo atvaizduotas tiesine priklausomybe logaritminėse koordinatėse.

Tyrimai [6, 7, 12] rodo, kad kelių dangos lygumo rodikliai labai priklauso nuo jos pagrindo tipo, jo storio ir būklės. Jeigu kelių dangos viršutinių dangos sluoksnių sankiba būna nepakankama, jos funkcionavimo trukmė sumažėja 30 %.

Centrinėje ir pietinėje Vakarų Europos dalyje dažniausiai pastebimos šios kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių pažaidos: vėžės, bangos, slinktytys ir bitumo dėmės, o nuo sunkiasvorio transporto apkrovų gali susidaryti 1,5–3,0 cm gylio vėžės [20, 21].

JAV [20] tarp kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių pažaidų dominuoja temperatūros ir nuovargio plyšiai, tik pietinėse valstijose vyrauja plastinės pažaidos.

Tyrimai Rusijoje [22] rodo, kad jos II-ios ir III-ios kelių ir klimato zonų kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių 75–80 % atvejų suyra atsiradus plyšiams.

Baltarusijoje [13] buvo tyrinėta kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių lygumo mažėjimo ir suirties kinetika. Nustatyta, kad nežiūrint sunkiasvorio transporto eismo intensyvumo, plyšiai kelių dangoje atsiranda antraisiais arba trečiaisiais jos funkcionavimo metais. Praėjus 9–11-kai

metų atsiranda duobės ir kelių dangos lygumas jau tampa nepatenkinamas. Danga masiškai pradeda irti 11–14-siais jos funkcionavimo metais.

Tyrimai [3, 9, 23] rodo, kad asfaltbetonio kokybę reikia vertinti pagal požymius, modeliuojančius jo būklę kelių dangą eksploatuojant. Asfaltbetonis turi tenkinti reikalavimus, keliamus jo fiziniams ir mechaniniams rodikliams (nuo kurių dalinai priklauso jo funkcionavimo sąlygos kelių dangoje) ir atitikti jo tampros modulio E bei atsparumo tempimui lenkiant R_l projektinius rodiklius.

Tyrimais [3, 6, 9] nustatyta, kad asfaltbetonio funkcionavimo sąlygas kelių dangoje, kai skirtingos temperatūros, modeliuoja mechaniniai ir deformaciniai jos rodikliai: atsparumas gniuždant R_{50}, R_0, R_{10} (kai $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūra), tampros modulis E ir atsparumas tempimui lenkiant R_l , energijos nuostolių koeficientas K_n bei kinetinis rodiklis P_1/P_2 (kai $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūra). Asfaltbetonio atsparumą erozijai (t.y. jo atsparumą šalčio ir vandens poveikiui) dalinai modeliuoja [9] vandens įgertis W , brinkimo rodiklis H , atsparumas gniuždant R_{20} (kai temperatūra $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Tyrimai [3, 5, 8, 12] rodo, kad svarbiausi automobilių kelių dangos būklę ir funkcionavimo trukmę apibūdinantys rodikliai yra asfaltbetonio atsparumas tempimui lenkiant R_l , kelių dangos konstrukcijos sluoksnių (asfaltbetonio ir kitų) tampros modulis E bei asfaltbetonio atsparumas nuovargiui N .

Labai svarbus kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių kokybės rodiklis yra asfaltbetonio mišinių vienodumas pagal sudėtį ir fizinius-mechaninius rodiklius. Įrodyta [3, 12], kad užtikrinus reikiamą asfaltbetonio sluoksnių vienodumą pagal sudėtį, taip pat užtikrinamas ir reikiamas jos vienodumas pagal fizinius bei mechaninius rodiklius. Nuo asfaltbetonio sudėties ir struktūros priklauso ne tik rodikliai E ir R_l , bet ir N .

Nustatyta [3, 5, 12], kad išlaikant optimalius asfaltbetonio sudėtį, tankio koeficientą K_s bei užtikrinant kelių dangos reikalingus stiprį K_{st} ir pradinį dangos lygumą Y_{pr} , bus užtikrintas reikiamas asfaltbetonio atsparumas tempimui lenkiant R_l ir tinkamas dangos lygumas ją eksploatuojant iki vidutiniojo jos remonto.

Tyrimai [24] patvirtina, kad pastaruoju dešimtmečiu padidėjus gabenamų krovinių apimčiai bei sunkiasvorio transporto keliamajai gebai, pagrindinę įtaką kelių dangos funkcionavimo trukmei turi būtent sunkiasvorio transporto eismas.

JAV [25] 1980 m. 14-oje kelių ruožų (išdėstytų penkiose valstijose) buvo tiriama, kas dominuoja kelių dangos suirties procese – aplinkos veiksniai ar sunkiasvorio transporto eismo apkrovos. Kiekviename tyrimų ruože vienoje atkarpoje buvo leidžiamas projektinis sunkiasvorio

transporto eismas, o kitoje – jo eismo nebuvo (nuo įrengimo darbų pabaigos). Tyrimų ruožai buvo išdėstyti taip, kad būtų skirtingo klimato (drėgno ir sauso) vietovių rajonuose – kelių danga neperšąla, yra jos ciklinis peršalimas, atšilimo, stipraus išalo ir pavasarinio atitirpimo sąlygos. Kelių dangos būvio vizualūs tyrimai tuose kelių ruožuose parodė, kad sunkiasvorio transporto eismo apkrova turi žymiai didesnę įtaką jos suirčiai, nei supanti aplinka.

Darbų [7, 14, 24, 25–29] analizė rodo, kad išvardytų veiksnių įtaka kelių dangoms yra sudėtinga, nes vieni veiksniai turi įtaką kitiems: sunkiasvorio transporto ratų dinaminė apkrova išauga padidėjus jo važiavimo greičiui ir pablogėjus dangos lygumui, įtempiai kelių dangoje gali padidėti, padidėjus dangos šiurkštumui ir kt. Projektuojant kelių dangas visi šie rodikliai apjungiami automobilių ratų projektine apkrova. Jos nustatymo metodika yra aprašyta [9, 30].

Pagal įvairių tyrimų rezultatų apie kelių dangos suirtį dėl sunkiasvorio transporto ratų apkrovų poveikio analizę [7, 9, 14, 24, 30, 31], sunkiasvorio transporto apkrovų rodiklius suskirstėme jų ardomojo poveikio mažėjimo eile. Nurodyta eile suskirstyti šie rodikliai:

- 1) ašies apkrovos;
- 2) atstumas tarp ašių; atstumas tarp ratų;
- 3) padangų skaičius ratuose; oro slėgis padangose;
- 4) padangų ir pakabų tipai;
- 5) sunkiasvorio transporto važiavimo greitis.

Remiantis [7, 14, 24, 26, 31] tyrimų duomenimis, galime teigti, kad važiuojant sunkiasvorio transporto rato slėgis į kelių dangos paviršių padidėja dėl keleto veiksnių: rato padangos įkaitimo ir dėl to jos viduje padidėjusio oro slėgio; dėl protektorių ištempiančios centrinės jėgos įtakos padidėjusio rato padangos kietumo; dėl trumpalaikio rato padangos kontakto su kiekviena dangos atkarpa, kai rato padanga nespėja susispausti iki matmenų, atitinkančių faktiškai veikiančių apkrovų statistinius vidurkius, t. y. tampa lyg ir kietesnė. Kelių danga niekada nebūna idealiai lygi. Kai nelygi danga, ratui pašokus, slėgis į kelių dangą labai sumažėja arba visai išnyksta, o ratui krintant jo slėgis gali padidėti dvigubai ir daugiau kartų. Kuo kelių danga lygesnė, tuo didesniu greičiu gali važiuoti sunkiasvoris transportas, mažiau dyla jų ratų padangos ir mažiau sunaudojama degalų, padidėja sunkiasvorio transporto tarpremontinis laikotarpis bei jų našumas, būna mažesnės transporto išlaidos, saugesnis ir patogesnis eismas.

Išanalizavus [7, 14, 24] darbus tampa akivaizdu, kad anksčiau vyravę požiūriai, jog kai vienodas slėgis į dangą, automobiliai su įvairia ratų apkrova sukelia vienodą ardymo poveikį ir kelių dangos funkcionavimo trukmė yra atvirkščiai proporcinga automobilių rato apkrovai (padidinus apkrovą du kartus, dangos funkcionavimo trukmė sumažėja du kartus), yra neteisingi. Tyrimai [7, 14, 24] rodo, kad kelių dangos funkcionavimo trukmė mažėja daug greičiau, nei didėja automobilių ratų apkrova.

Tyrimai [32, 33] patvirtina, kad, veikiant sunkiasvorio transporto ratui (kai pastovi apkrova), dėl kelių dangos paviršiaus paskirstomųjų savybių įtempiai žemės sankasos grunte mažai skiriasi. Nustatyta, kad žemės sankasos grunte aktyvus šlyties įtempis τ_i beveik tiesiškai priklauso nuo apkrovos į kelių dangą, o nuo oro slėgio rato padangoje priklauso labai mažai – jam padidėjus du kartus, τ_i sumažėja tik 7 %.

Tyrimais [34–36] nustatyta, kad sunkiasvorio transporto rato padangos slėgio (kai pastovi apkrova) į kelių dangą kaitos įtaka įtempiams joje apibūdinama žinomu Sen-Venano principu – įtempių būvis taškuose, pakankamai nutolusiuose nuo apkrovos pridėjimo vietos, priklauso ne nuo jo pasiskirstymo po ribotą plokštumą pobūdžio, o nuo tolygiai veikiančios apkrovos dydžio bei krypties. Padidintas oro slėgis sunkiasvorio transporto rato padangoje turi mažą įtaką žemės sankasos grunto įtemptam-deformuotam būviui, tačiau lemia didesnius įtempius asfaltbetonio sluoksniuose. Tyrimų rezultatai rodo, kad didinant slėgį sunkiasvorio transporto rato padangoje du kartus, santykinis kelių dangos įlinkis padidėja 5,4 %.

Tyrimų [37, 38] duomenimis, jeigu asfaltbetonio sluoksnių storis yra $H = 22$ cm, tai oro slėgio sunkiasvorio transporto rato padangose didėjimas nuo $p_0 = 0,6$ MPa iki $p_0 = 0,7$ MPa (kai pastovi rato apkrova) nulemia kelių dangos funkcionavimo laikotarpio iki kapitalaus remonto sumažėjimą 15 %, o oro slėgio sunkiasvorio transporto rato padangose didėjimas nuo $p_0 = 0,7$ MPa iki $p_0 = 0,9$ MPa laikytinas lygiaverčiu apkrovos didinimui 10 % ir jos funkcionavimo laikotarpio sutrumpėjimui 1,5 karto.

JAV [35, 39, 40] tyrimais nustatyta sunkiasvorio transporto rato slėgio pasiskirstymo epiūra nepaslankaus ir paslankaus to rato kontakte su kelių dangos paviršiumi bei, remiantis plastinės puserdvės tampros teorija, atlikti skaičiavimai. Rezultatai rodo, kad oro slėgio sunkiasvorio transporto rato padangose didėjimas nuo $p_0 = 0,517$ MPa (norminis slėgis projektinei kelių dangai JAV) iki $p_0 = 0,862$ MPa (faktiškai nustatytas oro slėgis ratų padangose 85 % sunkiasvorio transporto Tehaso valstijoje, JAV) nulemia kelių asfaltbetonio dangos įlinkio santykinės deformacijos padidėjimą: $H = 2,5$ cm storio dangai – 20–30 %, o $H = 10,0$ cm storio dangai – 10 %. Norminiam slėgiui tolygiai pasiskirstant sunkiasvorio transporto rato padangos pėdsako plote, kelių dangos santykinė deformacija sumažėja maždaug du kartus, jeigu lyginti ją su santykinė deformacija, kai faktinis slėgio pasiskirstymas netolygus [40].

Tyrimai [18] rodo, kad, padidinus sunkiasvorio transporto rato slėgį į kelių dangą nuo $p_i = 0,5$ MPa iki $p_j = 0,6$ MPa, ašies apkrova padidės $f_j = (0,6/0,5)^{1/3} = 1,06$ karto. Pagal tai galima spręsti, kad sunkiasvorio transporto rato apkrovos ardantysis poveikis kelių dangai padidėja apytikriai $1,06^{4,4} = 1,3$ karto.

Tyrimai [41–42] rodo, kad apskaičiavus kelių dangoje susidarančius horizontaliuosius santykinius pailgėjimus (remiantis Mainerio hipoteze apie nuovargio pažaidas) bei įvertinus dinaminės rato apkrovos įtaką jos funkcionavimo trukmei iš penkių tirtų sunkiasvorio transporto pakabų tipų didžiausią įtaką kelių dangai turi vienašė jo pakaba, o mažiausią – triašė ir keturašė jo pakabos. Nustatyta [42], kad sunkiasvorio transporto rato apkrovos dinaminės dalies dažnių svyravimų amplitudei didžiausią įtaką turi sistemos „automobilis-pakaba“ saviti svyravimų dažniai.

Ukrainoje [14] tyrimų rezultatai rodo, kad vertikalūs įtempiai ir poslinkiai kelių dangoje už sunkiasvorio transporto pavienės ašies judančio rato yra didesni, nei prieš jį. Dėl kelių dangos medžiagų rišančiųjų savybių, važiuojant sunkiasvorio transporto su suporintomis ašimis (išdėstytomis viena šalia kitos), jos vertikalūs poslinkiai nuo priekinių (pagal eismo kryptį) ratų apkrovų poveikio nespėja atsistatyti iki po jos sekančios apkrovos priartėjimo momento, t.y. tuo metu ji nespėja atsistatyti pirminis nedeformuotas būvis, nors joje atsirandantys įtempiai bei įlinkiai praktiškai yra visiškai grįžtantys. Kai apkrovos į sunkiasvorio transporto suporintų ašių ratus vienodos, kelių dangos didžiausi vertikalūs įtempiai ir poslinkiai po jo galiniais ratais yra didesni nei po priekiniais. Tyrimais [14, 18] nustatyta, kad daugiaašiam sunkiasvoriui transportui, kurio atstumas tarp ratų ašių yra 1,2–1,8 m, toks kelių dangos įtempių-deformacijų būvio lygių skirtumas vidutiniškai sudaro 10–20 %. Daugiaašio sunkiasvorio transporto poveikį kelių dangos įtempių-deformacijų būviui galima įvertinti pagal jo pavienės ašies poveikį įtemptam-deformuotam būviui.

Sunkiasvorio transporto eismo įtaka kelių dangai priklauso [14, 18, 19, 32, 34, 37–40, 42–45] ne tik nuo jo rato ašies apkrovų, sunkiasvorio transporto ašių kiekio bei jų išdėstymo, bet ir nuo ratų skaičiaus ašyje. Tyrimų [37] duomenimis, vertikalūs įtempiai nuo vienodų apkrovų į kelių dangą jos pagrindo sluoksnyje ir žemės sankasos paviršiuje, kai ją veikia sunkiasvoris transportas su suporintais ratais ašyje (ratų pėdsakų centrai yra įprastiniame 32–38 cm atstume vienas nuo kito), vidutiniškai yra 20–25 % mažesni, nei kelių dangą veikiant sunkiasvoriui transportui su pavieniais ratais ašyje. Sunkiasvoriame transporte vietoje pavienių ratų ašyje naudojant suporintus ratus (kai atstumas tarp ašies ratų padangų pėdsakų centrų yra 350 mm), galima 24 % sumažinti jo ratų apkrovos įtaką asfaltbetonio sluoksniui bei apie 2,6 karto pailginti kelių dangos funkcionavimą iki suirties. Įvertinus sunkiasvorio transporto oro slėgio suporintų ratų padangose skirtumą bei kelių dangos paviršiaus nelygumus (ypač važiuojant kreivėse), galima sunkiasvorio transporto ašių su suporintais ratais poveikį vertinti taip pat, kaip ir jo ašių su pavieniais ratais poveikį kelių dangai, tik 10 % sumažinta projektine ašies apkrova.

Tyrimų [46] rezultatai rodo, kad leistinoji ašies apkrova sunkiasvoriui transportui su suporintais ratais gali būti 40–50 % didesnė, nei apkrova jam su pavieniais ašies ratais, tuo

nebloginant kelių dangos funkcionavimo sąlygų, o sunkiasvorio transporto ratų suporinimo ašyje efektas tuo labiau pastebimas, kuo mažesnis jos sluoksnių storis ir jų standumas. Sunkiasvorio transporto ašyje greta išdėstytų ratų poveikiui kelių dangos įtemptam-deformuotam būviui įvertinti, reikia tų ratų poveikį pakeisti jam ekvivalentiniu pavienio rato poveikiu.

Išanalizavus [47–49] nustatėme, kad sunkiasvorio transporto ekvivalentinei rato apkrovai apskaičiuoti didelę įtaką turi taikomi projektinių rodiklių (kelių dangos tamprusis įlinkis, asfaltbetonio sluoksnių deformacija, šlyties įtempiai žemės sankasos grunte) parametrai.

Atlikus analizę gavome, kad, norint pratęsti kelių dangos naudojimo trukmę, galima riboti sunkiasvorio transporto ašies apkrovą, važiuojančio sunkiasvorio transporto skaičių (ypač – karštomis dienomis) bei didinti leistiną atstumą tarp jų. Visgi šias priemones įgyvendinti yra sunku, nes, nukreipus tranzitinio sunkiasvorio transporto eismą į dar silpnesnės kelių dangos konstrukcijos krašto ar rajonų kelius, jų kelių dangos pradėtų dar intensyviau irti ir tektų ją skubiai remontuoti. Todėl reikia išanalizuoti esamus sunkiasvorio transporto ardančiojo poveikio kelių dangai įvertinimo metodus ir pasiūlyti būdus bei priemones kaip išvengti jos pirmalaikės suirties. Pagal tai būtų galima objektyviai planuoti bei organizuoti sunkiasvorio transporto eismą silpnesnės kelių dangos konstrukcijos keliais ar jų ruožais bei numatyti jų remonto darbus ar, jeigu būtina, visiškai apriboti jo eismą atskirų metų nepalankių sezonų metu.

1.3. Kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių suirties modeliai

Asfaltbetonis yra kompozicinė medžiaga [4, 50], kurioje pasireiškia tamprios, klampios ir plastiškos savybės, jis apibūdinamas stipriu. Kompozitai [50–52] – medžiagos, sudarytos iš dviejų ir daugiau įvairios kilmės medžiagų, kurios pasižymi savybėmis, skirtingomis nei pradinės medžiagos. Kompozitus sudaro kaupiklis (dispersinė fazė) ir rišiklis (matrica). Įtempių-deformacijų būvio tyrimai rodo, kad kompozitų savybės gali būti įvairios – jie gali būti ir trapiomis, ir plastiškomis ir rišančiomis medžiagomis. Matrica priima apkrovą, o dispersinė fazė trukdo susidaryti deformacijai bei suteikia tvirtumo. Platų kompozicinių medžiagų paplitimą sąlygoja jų pranašumas prieš tradiciškai daugelyje sričių, įskaitant ir kelius, naudojamas medžiagas. Pranašumas yra tas, kad nors kompozito (asfaltbetonio) stipris gali būti mažesnis už, pavyzdžiui, mineralinio užpildo stiprį, tačiau vertinant tamprumą bei ilgaamžiškumą kompozicinė medžiaga yra žymiai pranašesnė.

Tyrimai [14, 50–53] rodo, kad asfaltbetonio tšios ir tamprios savybės ryškiausiai pasireiškia žiemą. Pavasarį ir rudenį asfaltbetonis daugiausia reiškiasi kaip tamprus ir plastiškas kūnas, o vasarą – kaip klampus, tamprus ir plastiškas. Asfaltbetonio savybių kaita per metus pirmiausia priklauso nuo hidroterminio režimo ir tik po to nuo automobilių ratų apkrovos, nes kai didesnis nei 10–15 km/h automobilių greitis, rišančiosios asfaltbetonio savybės pasireiškia

neženkliai. Atsižvelgiant į vienų ar kitų medžiagų savybių raiškos lygį ir vyksta įvairūs kelių dangos suirties procesai.

Tyrimais [54] nustatyta, kad visumoje kelių dangos stiprio netektis yra pakankamai sudėtingas procesas, kuris gali būti atvaizduotas įvairiais determinuotais fizikiniais suirties modeliais. Suirties modelio sukūrimas priklauso nuo kelių dangos bei jos konstrukcijos sluoksnių medžiagų būsenos funkcionavimo laikotarpiu ir apibūdinamas keturiomis pagrindinėmis reologinėmis savybėmis: tampra, plastiškumu, tūsumu ir stipriu. Pastaruoju metu kelių dangos stiprio netekties procesas įvertinamas pagal jos funkcionavimo rodiklių, nuo kurių priklauso automobilių eismo greitis, saugumas bei patogumas, kitėjimą. Kelių dangos stiprio kitėjimas nustatomas pagal jos standumą (kelių dangos tamprusis įlinkis) – tai yra ganėtinai bendras apibūdinimas, o jos storis įvertinamas tik projektiniu metų laikotarpiu.

Suirties modeliai – medžiagos savybės, apkrovos parametrus ir medžiagos konstrukcijos ilgaamžiškumą tarpusavyje siejantys santykiai. Darbų [50–52] analizė rodo, kad suirties modeliai skiriasi, vertinant juos:

- 1) fizine prasme – žiūrint apkrovos pridėjimo sąlygų (statinė, dinaminė) ir medžiagos savybių (plastiškumas, tamprumas, klampumas, trapumas);
- 2) matematine prasme – determinantine ir statistine formomis.

Praktiškai dažniau taikomi determinantiniai modeliai [50–52].

Pagal daugelyje užsienio šalių taikomą kelių dangos valdymo, kelių plėtros ir planavimo sistemos modelį HDM jos suirties modeliai skiriami į šias grupes:

- 1) absoliutūs modeliai, kuriais galima prognozuoti kelių dangos būklę (ar jos būklės parametą, pavyzdžiui, plyšių plotą) tam tikru laiko momentu ateityje;
- 2) didėjimo arba priaugio modeliai, kuriais galima prognozuoti kelių dangos būklės kitėjimą (ar jos būklės parametro kitėjimą, pavyzdžiui, kiek padidės plyšių plotas) per tam tikrą laikotarpį.

Dauguma kelių dangos suirties modelių yra didėjimo arba priaugio modeliai. Šie modeliai yra universalūs, lengvai apibūdinami matematinėmis išraiškomis, juose taikomos empirinės kelių dangos irties priklausomybės. Jie sukurti remiantis kelių dangos tyrimų metu surinktų duomenų apie įvairiausių jos irties parametų ir pažaidų plėtros bei kitimo tendencijas statistinės analizės rezultatais. HDM–IV modeliuojamos šios kelių dangos pažaidos ir irties parametrai: struktūriniai plyšiai; temperatūriniai plyšiai; atsikartojantys plyšiai; išdaužos; provėžos; kelių dangos išretėjimas, jos lygumas bei stipris. Jie tarpusavyje yra susiję. Kelių dangos pažaidos turi įtaką dangos lygumui, o jos stipris – beveik visų pažaidų plėtrai.

Išanalizavus [58] nustatėme, kad kintančios temperatūros ir trumpalaikės (momentinės) rato apkrovos sąlygoms geriausiai tinka kvazistatistiniai (ilgai veikiantys) ir varginančiosios

irties, kai nestacionari apkrova, modeliai. Vienas paprasčiausių, tačiau dažniausiai suirčiai įvertinti taikomų modelių, yra pažaidų linijinių (tiesinių) sumavimų taisyklė – medžiaga nuo pridėtos apkrovos suirs, jei pažaidų suma $\sum d_i$ bus lygi 1. Ši taisyklė gali būti taikoma tiek kvazistatistinei, tiek ir varginančiai suirčiai. Pažaida d_i laikoma dalinis medžiagos resurso nuostolis po numatyto apkrovų pridėjimo lygio $d_i = n_i(\sigma) / N_i(\sigma)$ (čia: $n_i(\sigma)$ – i -ojo lygio apkrovų pridėjimo skaičius; $N_i(\sigma)$ – didžiausias i -ojo lygio apkrovų, kurias medžiaga gali atlaikyti nesuirusi, skaičius).

Darbe [52] nurodyta, kad nepertraukiamai kintant i -tiesiems apkrovos režimams galima taikyti Beilio kriterijų ir, remiantis medžiagos ilgaamžiškumo resursu, įvertinti pažaidas.

Daugiaciklį nuovargį, kaip kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių ilgaamžiškumo funkciją, galima aprašyti Sall-Pell lygtimis [16, 17].

Pagal [59–61] galime teigti, kad ilgalaikį medžiagos stiprį σ_{st} ir laikotarpį iki jos suirties t_d , apjungia laipsninė priklausomybė medžiagos ilgaamžiškumui nustatyti. Pagal tai nustatomas apkrovos ciklų skaičius iki medžiagos suirties N_d .

Darbų [58, 62] analizė rodo, kad ilgaamžiškumo funkcijai apskaičiuoti praktikoje dažnai naudojama empirinė Mensono priklausomybė, kuri apjungia apkrovos ciklo visų deformacijų (plastinių ir tamprių) amplitudę ε_a , kai apkrovų ciklų skaičius iki suirties N_d .

Pažaidų linijinio (tiesinio) sumavimo taisyklė [58] neįvertina didelių ir mažų įtempių kaitos poveikio medžiagai eiliškumo – skirtingo dydžio įtempių poveikio eiliškumas turi įtaką ilgaamžiškumui, todėl, kai skirtingos apkrovos sąlygos, medžiagos suirtis gali įvykti, jeigu pažaidų suma vietoje 1,0 būtų ribose nuo 0,6 iki 1,6. Darbe [14] teigiama, kad dažniausiai medžiagų suirtį atitinkanti pažaidų suma yra nuo 0,8 iki 1,3. Remiantis tuo galime teigti, kad kuo labiau atsitiktinai kinta dideli bei maži įtempiai, tuo labiau pažaidų suma (suirties momentu) yra artima vienetui, todėl galime daryti išvadą, kad pažaidų linijinio (tiesinio) sumavimo taisyklė [58] gali būti taikoma kelių dangos ilgaamžiškumo prognozei.

Darbuose [47, 54] teigiama, kad remiantis nuovargio pažaidų linijiniu (tiesiniu) sumavimu [14, 26–28, 52, 58, 60, 62] galima gauti Palmgren–Mainer pažaidų sumavimo taisyklę. Darbe [63] nurodyta, kad be pažaidų linijinio (tiesinio) sumavimo taisyklės taip pat yra ir kiti pažaidų kaupimo dėsniai:

1) laipsninė priklausomybė, kuri numato nuovargio pažaidų kaupimo greičio priklausomybę, žiūrint kiek kartų pridedama apkrova;

2) Freidentalio laipsninė priklausomybė, įvertinanti pridedamos apkrovos ciklų skaičiaus ribą N_r , žemiau kurios nuovargio pažaidos nesikaupia.

Atlikę analizę tolimesniems tyrimams naudosime nuovargio pažaidų linijinio (tiesinio) sumavimo taisyklę [58]. Pagal įvairių kelių dangos suirties modelių [16, 17, 25, 50–53, 55–62, 63] analizę galime teigti, kad medžiagos ilgaamžiškumas apibūdinamas medžiagos funkcionavimo trukme arba apkrovų pridėjimo skaičiumi iki suirties dėl nuovargio. Kadangi užsibrėžėme tikslą įvertinti kelių dangos funkcionavimo likutinę trukmę bei nutarėme įvertinti jos likutinį stiprį, nagrinėjome, kaip pastaruoju metu įvertinamas kelių dangos stipris.

1.4. Kelių dangos likutinis stipris

Pagal [7, 14, 24, 53, 55–57, 64–68], nagrinėjančių kelių dangos stiprį, nustatėme, kad jos suirties mastui mažinti taikoma daug įvairių būdų: dangos lygumo didinimas, savalaikių jos remontų planavimas, eismo intensyvumo bei apkrovų sezoninis ribojimas, dangos ir kitų jos konstrukcijos sluoksnių reikalingo storio nustatymas bei kelių dangos sukūrimas ir kt. Projektuojant kelių dangas vis dažniau tenka įvertinti jos likutinį stiprį.

Stiprinant kelių dangas, dažnai susiduriama su būtinybe patikslinti jų likutinį stiprį, nustatyti jos konstrukcijos sluoksnių bei grunto stiprio rodiklius. Šie klausimai tampa vis aktualesni tose šalyse (pavyzdžiui, Lietuvoje), kuriose kelių tinklas jau suformuotas ir didžiausia darbų apimtis siejama su kelių priežiūra ir išlaikymu.

Vakarų valstybėse kelių dangų būklei valdyti yra sukurtos specialios sistemos. Žinomiausios yra HDM (Pasaulio bankas), Belman (Danija), Quantum (JAV) ir kt. [7, 55, 56, 67]. Šios sistemos sukurtos panaudojus įvairiose šalyse vykdytų kelių dangų būklės ilgalaikių tyrimų duomenis. Jos įvertina investicijų į automobilių kelius ekonomines pasekmes. Daugelyje Vakarų Europos šalių (ir Lietuvoje) kelių dangų būklei valdyti naudojami HDM–III ir HDM–IV modeliai.

Prancūzijoje [69], pagal automobilių kelių bandymų ruožų stebėjimo rezultatus yra pasiūlytas kelių dangos būklės pokyčių prognozės empirinis modelis. Jame yra taikomas metodas, pagal kurį, žiūrint kelių dangos (ar jos viršutinio sluoksnio) funkcionavimo trukmės, dangos tipo, eismo intensyvumo, jos sluoksnių storio ir kitų rodiklių, nustatoma įvairių pažaidų susidarymo tikimybė.

Kinijoje [70] kelių dangos likutinis stipris prognozuojamas ir remontai planuojami pasinaudojant jos storio ir jos pažaidų (taip pat – nuovargio pažaidų) matavimų faktinėmis vertėmis ir modeliuojant automobilių faktinį bei perspektyvinį eismo intensyvumą.

Vokietijoje remontų planavimo ir kelių dangos stiprinimo uždavinius siūloma spręsti įvertinant jos likutinį stiprį [71, 72]. Likutinis kelių dangos stipris nustatomas naudojant Benkelmano siją, dinaminiu ar kitais būdais bei naudojant atrinktus jos ėminius (išgrąžas) ir tikslinant jos konstrukcijos sluoksnių storį, asfaltbetonio būklę sluoksniuose ir bitumo bei kitų

asfaltbetonio komponentų kokybę, jų procentinę dalį ir kitus rodiklius. Žinant kelių dangos stiprį kelio tiesybos metu, šie duomenys naudojami jos būtino stiprinimo momentui nustatyti. Taip pat nustatomi šie rodikliai: kelių dangos laikomoji geba, jos likutinis tamprusis įlinkis, lygumas, provėžų gylis, automobilių ratų sankibos su danga rodiklis ir kt. Taip pat yra analizuojamos pažaidų atsiradimo priežastys, kelio tiesybos ir eksploatavimo ypatumai, naudotini kelių dangos remonto būdai bei priemonės, apkrovų dydis ir kt. [64, 69]. Pagal analizės duomenis bei stebėjimų rezultatus nustatomos (įvertinant kelių dangos likutinę funkcionavimo trukmę) būtinos priemonės kelio priežiūrai bei modernizavimui, taip pat įvertinama kelio ar jo ruožo svarba eismui regione, transporto koridoriuje ir kt.

Darbuose [73, 74] nurodyta, kad, siekiant nustatyti asfaltbetonio sluoksniuose nuovargio pažaidų plėtos greitį, tikslinga ištirti asfaltbetonio, naudotino kelių dangos stiprinimo sluoksniams, bandinių, kai skirtingos temperatūros ir veikia pasikartojanti kintama daugkartinė apkrovai, atsparumą tempimui lenkiant.

Rusijoje kelių dangos funkcionavimo likutinė trukmė yra siejama su jos faktiniu tampros moduliu E ir projektinių automobilių leistinuoju eismo intensyvumu N_f [12, 53, 54, 75–77].

Pastaruoju metu svarbiausiu kelių dangos remonto būtinumo kriterijumi [78–82] yra priimtos jos funkcionavimą apibūdinančios savybės, nuo kurių priklauso automobilių srauto greitis bei vežimų savikaina (darbe [81] tarpremontinius laikotarpius I–III bei, dalinai, IV kategorijų keliams, kuriuose paklotos asfaltbetonio dangos, siūloma apskaičiuoti pagal asfaltbetonio atsparumą tempimui lenkiant). Naudojant šiuos tarpremontinių laikotarpių nustatymo pastaruoju metu taikomus [82] ribinio kelių dangos būvio kriterijus (pagal tamprųjį įlinkį, šlytį, lenkimą) negalima pakankamai tiksliai prognozuoti jos funkcionavimo trukmės.

Tyrimais [80, 81] nustatyta norminė tarpremontinė kelių dangos funkcionavimo trukmė gali būti apskaičiuojama metų sezonų vidutinėms sąlygoms ir tuomet, remiantis projektinių transporto priemonių eismo intensyvumu, gali būti nustatoma kelio kategorija, dangos tipas bei patikimumo lygis, o pagal šiuos rodiklius – kelių danga bei jos funkcionavimo trukmė. Kai pagal šį metodą baigiantis kelių dangos funkcionavimo trukmei, jos funkcionavimo rodikliai žymiai pablogėja ir ekonominiu požiūriu dangą tikslinga (vertinant transporto priemonių srauto greitį ir vežimų savikainą) remontuoti. Šis vertinimas yra vienpusis, nes įvertinami tik ekonominiai, su vežimais susiję, rodikliai. Matomų pažaidų atsiradimas kelių dangoje byloja apie tai, kad jos stipris jau yra ganėtinai sumažėjęs ir ekonominiu požiūriu ją buvo tikslinga suremontuoti anksčiau. Tuo pačiu racionaliau būtų galima išnaudoti kelių dangos medžiagos stiprį.

Nustatėme, kad kelių dangos likutinio stiprio samprata yra pagrįsta įvairiais rodikliais, kurių dauguma (dėl jos irties proceso sudėtingumo) yra apibūdinama empirinėmis formulėmis, todėl pažaidų susidarymo ir plėtos prognozė dažniausiai taip pat apibūdinama empyriškai.

Tolesniems tyrimams naudosime kelių dangos likutiniotiprio rodiklį nes, žinant jos stiprį, galima ganėtinai tiksliai prognozuoti jos irties procesą konkrečioms regiono temperatūros bei hidrologinėms sąlygoms.

1.5. Automobilių kelių dangos projektavimo metodikų apžvalga

Lietuvos automobilių kelių dangos projektuojamos pagal krovinių automobilių eismo rodiklį VB [83] ir skiriamos į SV ir I–VI konstrukcijos klases. Apskaičiavus VB nustatoma, atsižvelgiant į kelio tipą bei eismo juostos paskirtį, kelių dangos klasė ir jos konstrukcija. Asfaltbetonio mišinys projektuojamas pagal [84] ir turi tenkinti tankiųjų mišinių reikalavimus. Jeigu tyrimų rezultatai neatitinka reikalavimų, tuomet sudaromas ir tiriamas kitos sudėties medžiagų mišinys, kol rezultatai tenkins reikalingus parametrus.

Rusijoje [9, 15, 81, 85] kelių dangoms projektuoti daug metų yra taikomas DORNII metodas, kuriame svarbiausias dangos konstrukcijos stiprio rodiklis yra jos leistinasis tamprusis įlinkis. Taip pat yra svarbu, kad būtų garantuotas kelių dangos konstrukcijos nerišlių medžiagų sluoksnių atsparumas šlyties deformacijoms ir jos asfaltbetonio sluoksnių būtinasis atsparumas tempimui lenkiant, o žiemos metu dangos iškylos turi neviršyti leistinųjų (turi būti laiduotas dangos būtinasis atsparumas šalčiui), taip pat turi būti laiduotas patikimas vandens nuleidimas iš dangos pagrindo porėtų sluoksnių.

Vokietijoje [3, 64, 65, 72] naudojamas standartų rinkinys DIN, kuriuo remiantis sprendžiami naujų automobilių kelių dangos projektavimo, stiprinimo ir remonto uždaviniai. Pradinėje stadijoje tiriami laikančiosios gebos, likutinių deformacijų, nelygumų, provėžų, rato sankibos su danga ir kt. rodikliai. Tada, remiantis tyrimų rezultatais, nustatomos būtinios priemonės kelių dangai įrengti, rekonstruoti ar remontuoti, įvertinant jos konstrukcijos likutines galimybes, o taip pat kelio vaidmenį regiono eismo procese, transporto koridoriuje ir kt.

JAV, Didžiojoje Britanijoje, Prancūzijoje, Danijoje, Lenkijoje taikomi kelių dangų projektavimo metodai yra labai panašūs ir vienas nuo kito skiriasi tik tuo, kaip yra apibūdinamas automobilių ratų apkrovos poveikis jos konstrukcijai [7]. Visi šie kelių dangos projektavimo metodai grindžiami prielaida, kad automobilių ratų apkrova nuo viršutinio dangos sluoksnio perduodama gilyn į kitus jos konstrukcijos sluoksnius bei į žemės sankasos gruntą, todėl šiuose projektavimo methoduose svarbią reikšmę turi grunto stipris. Kai kuriuose kelių dangos projektavimo methoduose, siekiant nustatyti gruntų rodiklius, reikalaujama papildomai tirti žemės sankasos gruntuos arba yra taikomi gruntų klasifikacijoje nurodyti jų rodikliai. Šiuose aptartuose kelių dangos projektavimo methoduose neatsižvelgiama į automobilių ratų apkrovų pasikartojantį poveikį jai. Juose nekreipiamas dėmesys į horizontaliąsias jėgas, kurios pasireiškia kelių dangos viršutiniuose sluoksniuose stabdant automobilius, keičiant jų važiavimo greitį, kryptį ar

važiuojant kreivių ruožais ir neįvertinama jos funkcionavimo trukmė, taip pat neįvertinama automobilių srauto struktūra.

Darbų [86–89] analizė rodo, kad šalyse, kuriose automobilių kelių tinklas pakankamai išplėtotas (JAV, Danija, Prancūzija, Vokietija, Švedija, Didžioji Britanija, Austrija, Vengrija, Australija ir kt.), yra sukurtos kelių dangos būklės jų funkcionavimo metu valdymo sistemos PMS (čia ir toliau – Pavement Management System). Visgi tyrimai rodo, kad universalios, tinkamos įvairioms aplinkybėms ir atvejams, strategijos dažniausiai neįmanoma sukurti. Kiekvienu konkrečiu atveju ir kiekvienam keliui yra optimali savita remonto strategija. Ji gali skirtis paisant kelio reikšmės, automobilių eismo intensyvumo, kelių dangos konstrukcijos, finansavimo galimybių ir kt. rodiklių.

Ukrainoje [90] ištirta, kad PMS struktūra bendrai apjungia: kelių dangos būklės duomenų bazę, reguliariai papildomą vizualių ir instrumentinių tyrimų rezultatais, kelių dangos funkcionavimo būklės kitėjimo tam tikrame laikotarpyje prognozavimo matematinį modelį, remonto darbų strategijos optimizavimo kriterijus, eiliškumą bei jų rūšies geriausio derinio matematinį modelį. Kelių dangos funkcionavimo modelis vertinamas kaip jos funkcionavimo trukmės arba eismo funkcija ir kiekvienu momentu gali būti apibūdinama daliniais modeliais: pagal jos tampros modulio kaitą, plyšių atsiradimą asfaltbetonio sluoksniuose, likutinių deformacijų sankaupą asfaltbetonio sluoksniuose ir žemės sankasos grunte, dangos paviršiaus lygumą, pagal automobilių srauto greitį ir kt. Optimizavimo kriterijumi laikytinas išlaidų, skirtų numatytos trukmės būtinai kelių dangos funkcionavimo būklei užtikrinti, sumažinimas planuojamu laikotarpiu.

Prancūzijoje [89], kai ženkliai ribojamas finansavimas, taikoma pasyvi strategija: nestabdant kelių dangos suirties proceso, turimomis priemonėmis siekiama išvengti jo greitėjimo (pavyzdžiui, remontuojant duobes ar atliekant dangos paviršiaus apdorojimą). Kaip parodė patirtis, ši strategija neparanki kelininkams, nes reikalauja nepertraukiamos kelių priežiūros, todėl ją galima taikyti žemesnės kategorijos keliams, kuriuose nedidelis eismo intensyvumas. Vidutinio eismo intensyvumo keliuose priimtinesnė yra laipsniško kelių dangos stiprinimo sluoksnių „priauginimo“ strategija – vidutiniškai kas $T = 5$ metai įrengiamas apie $H = 10$ cm storio asfaltbetonio sluoksnis. Šios strategijos taikymas reikalauja palyginti nedidelių kapitalo investicijų, o tai leidžia, kai stabilus finansavimas, greičiau atnaujinti kelių tinklą. Kai nepakankamas pradinis kelių dangos konstrukcijos stipris, po žiemos ji tampa ypač jautri automobilių apkrovoms, todėl tenka riboti sunkiasvorio transporto eismą gruntų atitirpimo pavasarį laikotarpiu. Kelių dangos konstrukcijos stiprinimo ir tolesnės jos priežiūros strategija reikalauja didelių pradinių investicijų, nes reikia sukurti projektinio stiprio jos, planuojamai funkcionavimo trukmei. Pagal šią strategiją kompensuoti pasikartojančiam (periodiniam) kelių

dangos nuovargiui numatoma įrengti paviršiaus apdorojimo ar įvairaus storio asfaltbetonio sluoksnius. Tinkama kelių priežiūra jų funkcionavimo trukmę pratęsia neribotam laikotarpiui. Ši strategija dabar taikoma Prancūzijos keliuose (kai jų sunkiasvorio transporto eismo intensyvumas $N_f^{(vid)} \geq 750$ aut./para). Pagal šią strategiją reikia tiksliai organizuoti ir paskirstyti priemones kelių dangos tinkamai būklei užtikrinti, todėl, kai ribotas ar nenuolatinis finansavimas, ji netinka.

Pastaraisiais metais buvo parengtos pakankamai racionalios metodikos kelių dangos įtempiams ir deformacijoms dėl automobilių ratų apkrovų poveikio įvertinti ir jos būtinajam stiprinimui nustatyti [9, 30, 76]. Tačiau taikant šias metodikas negalima pakankamai tiksliai nustatyti kelių dangos konstrukcijos būtiną stiprį bei prognozuoti jų funkcionavimo trukmės, taip pat negalima prognozuoti asfaltbetonio sluoksniuose susidarančių nuovargio pažaidų plėtos proceso ir įvertinti šių sluoksnių likutinio stiprio. Pagal [9] apskaičiuojant kelių dangos konstrukcijos būtiną stiprinimą, jos asfaltbetonio sluoksnių savybių blogėjimas apibūdinamas ganėtinai schematiškai ir neįvertinamas jos sluoksnių medžiagos stiprio mažėjimas dėl nuovargio pažaidų, todėl taikant negalima tiksliai numatyti kelių dangos suirties ir siūlyti efektyvias priemones jos plėtos mastui sumažinti.

Atlikus įvairių metodikų analizę nustatėme, kad projektuojant automobilių kelius kelių dangos konstrukcijos dažniausiai parenkamos atsižvelgiant tik į jų eksploatavimo patirtį, todėl jos dažniausiai nebūna efektingos ekonominiu požiūriu. Lietuvos sąlygomis tolesniems kelių dangos konstrukcijos stiprio kitėjimo tyrimams geriausiai tiktų [9] metodika, todėl toliau ja remsimės modeliuodami Lietuvos kelių asfaltbetonio sluoksniuose vykstančius pažaidų (suirties masto) procesus.

1.6. Kompensuotini nuostoliai dėl sunkiasvorio transporto eismo

Tyrimų [91, 92] analizė rodo, kad mokesčių dėl sunkiasvorio transporto eismo idėja, planuojant valdyti transporto priemonių srautus bei sumažinti automobilių spūstis keliuose, ekonomistų yra iškelta jau ganėtinai seniai.

Pripažinta [93–98], kad bet kurių transporto priemonių savininkai turi pilnai padengti išlaidas kelių tiesybai, remontui bei priežiūrai, o sunkiasvorio transporto savininkai, dėl per didelio ardančiojo poveikio kelių dangai, – padengti ir išlaidas priešlaikiui jos remontui. Transporto priemonių eismo mokestis turi būti renkamas kelių tinkamai būklei užtikrinti ir turi būti adekvatus nuostoliams, kurie susidaro (patiriami) transporto priemonių vienkartinio važiavimo keliais metu. Transporto priemonių eismo mokestis gali būti taikomas mokesčių, muitinės rinkliavos ar įvairių tarifų forma.

Tyrimai [95, 99–106] rodo, kad eismo mokesčiai yra valstybinė lėšų rinkliava, kuri gali būti vienkartinė (pavyzdžiui, registruojant tam tikro tipo automobilius su tam tikra mase, ašių skaičiumi, rida ir pan.) arba dalinai įtraukta į degalų kainą. Sunkiasvorio transporto eismo mokestis renkamas kelių priežiūrai ar būtinai kelių tinklo funkcionavimo būklei užtikrinti ir proporcingas nuostoliams, atsirandantiems dėl sunkiasvorio transporto vienkartinio važiavimo keliais. Muitinės rinkliava [107] yra ypatinga mokesčių rūšis, skirta užsienio šalių piliečių transporto priemonėms, įvažiuojančioms į šalies teritoriją nustatytam laikotarpiui ar važiuojančioms tranzitu, apmokestinti. Tarifas už važiavimą [108] yra imamas pagal oficialiai nustatytą mokesčių dydžių sąrašą už sunkiasvorio transporto važiavimą kelio ruožu, o mokesčio dydis priklauso nuo jo modelio ir kitų savitumų. Nustatėme, kad sunkiasvorio transporto eismo mokesčio dydis (kiekvienos kelių rinkliavos formos ribose) daugeliu atvejų proporcingas nuostoliams, kuriuos sukelia sunkiasvoris transportas (tarp jų ir nuostoliams dėl jo ardančiojo poveikio kelių dangai), tačiau lėšų rinkimas tarifo pavidalu yra labiau diferencijuotas (atsižvelgiant į veiksnius, pagal kuriuos sunkiasvoris transportas turi įtaką kelių dangai), lankstesnis ir tikslesnis.

Išanalizavus [109, 110], išskiriami šie svarbiausi mokesčių tarifų tipai:

- 1) tarifas už kelių ir tiltų pažaidas, susidarančias dėl važiuojančio sunkiasvorio transporto poveikio;
- 2) tarifas už kelių laidumo sumažėjimą dėl spūsčių, kurios dažniausiai susidaro dėl labai dažno lengvųjų automobilių eismo.

Pirmojo tipo kriterijumi mokesčių tarifams nustatyti yra kelių dangos stiprio atitiktis važiuojančio sunkiasvorio transporto masei, kad jos eksploatacinė būklė būtų tinkama per visą jos norminį ar nustatytą laikotarpį, o antrojo tipo – kelių ir transporto priemonių gabarito parametrų suderinamumas, laiduojant saugų eismą. Ši problema [111] dažniausiai sprendžiama racionaliai reguliuojant eismo mokesčių tarifus, t.y. kainų padidinimu "piko" metu, poilsio ir švenčių dienomis, populiariais atostogų mėnesiais ir kitais transporto priemonių masinio važiavimo atvejais. Pavyzdžiui, Prancūzijoje [112], automagistralėje A–1, jungiančioje Paryžių su Liliu, tarifų padidinimas 15–25 % nuo 16³⁰ val. iki 20³⁰ val. bei 15 % tarifų sumažinimas po 23³⁰ val. leido paros bėgyje ženkliai sumažinti eismo intensyvumo pokyčius.

Naujojoje Zelandijoje [113] iš sunkiasvorio transporto savininkų imamas eismo mokestis licencinių mokesčių pavidalu ir proporcingas važiavimo atstumui. Mokestis priklauso nuo sunkiasvorio transporto tipo, jo ašių skaičiaus bei išdėstymo, padangų ant rato kiekio. Išskirta 14-likų automobilių tipų. Kiekvienam sunkiasvoriui transportui eismo mokestis, paisant važiavimo atstumo, didėja, jo masei artėjant prie 30 t ribos. Virš šios ribos visam sunkiasvoriui transportui įvesta linijinė priemoka už kiekvieną papildomą toną skalė. Automobiliai bei

vilkikai su <3,5 t mase (kroviniu) neapmokestinami.

Italijoje [113, 114] automagistralių tiesybos bei eksploatavimo darbais užsiima koncesinės firmos (jos dažniausiai dirba mokamuose keliuose ir prižiūri daugiau nei 85 % visų šalies automagistralių ilgio), o eismo mokestis priklauso nuo sunkiasvorio transporto tipo ir periodiškai koreguojamas nustatyta formule. Surinktos lėšos padengia kelių tinklo valdymo bei priežiūros išlaidas.

Prancūzijoje [95, 115–118] automagistralių tiesybos bei priežiūros darbus mokamuose keliuose vykdo koncesinės firmos, tačiau eismo mokestį nustato vyriausybė, įvertindama finansinę kompanijos būklę, kelio įrengimo kainą bei eismo intensyvumą kelio ruože. Apskaičiuota (1985 metais), kad 30 santimų/km eismo mokestis sudarė 9–20 % automobilių kelio 1 km įrengimo savikainos (sunkiasvoriui transportui šis santykis mažesnis), kuri, paisant taikomo projekcinio automobilio tipo, būna nuo 1,5 iki 3,5 franko. Kasmet eismo mokestis keičiasi, atsižvelgiant į automagistralių tiesybos bei priežiūros kainų kitėjimą. Iš surinktų eismo mokesčių kelių priežiūrai skiriama apie 20 %.

Ukrainoje [119] eismo mokesčiams apskaičiuoti yra įvertinamas ardantysis sunkiasvorio transporto eismo poveikis kelių dangai. Eismo mokestis imamas proporcingas nuostoliams, patirtiems dėl sunkiasvorio transporto leistinosios 36 t masės bei norminės ašies apkrovos (vienašėms – virš 10 t, sudvejintoms – virš 16 t bei sutrejtoms – virš 22 t) viršijimo, taip pat įvertinamas ir jo gabarito parametrų viršijimas. Šis eismo mokesčio tarifų apskaičiavimo ir mokesčių surinkimo būdas panašus į analogiškus, taikomus daugelyje Europos šalių.

Baltarusijoje [120] sunkiasvorio transporto eismo bendrojo naudojimo keliais sukelti nuostoliai apskaičiuojami įvertinant kelių dangos, kitų jos sluoksnių ir žemės sankasos grunto stiprį bei jų deformacines savybes, atsižvelgiant į pasirinkto metų mėnesio bei vietovės klimato sąlygas. Nustatomas tiriamos kelių dangos atsparumas ekvivalentinei apkrovai pagal jos tamprųjį įlinkį bei asfaltbetonio sluoksnių tempimo įtempius [9]. Tada apskaičiuojami kelių dangos funkcionavimo trukmės sumažėjimas nuo sunkiasvorio transporto eismo ir, atitinkamai, jo eismo vertė. Taigi nuostoliai, kuriuos sukėlė sunkiasvorio transporto eismas, priklauso nuo laiko, kuris prarandamas aplenkiant sunkiasvorį transportą visame transporto priemonių sraute, transporto priemonių srauto greičio ir kelių dangos būklės.

Rusijoje [75, 121, 122] sunkiasvorio transporto eismo federaliniais automobilių keliais sukeltų nuostolių kompensavimo pagrindu priimtas vienas kelių dangos konstrukcijos ribinių stiprio kriterijų [9] – leistinasis tamprusis įlinkis, pagal kurį įvertinamas sunkiasvorio transporto eismo ardantysis poveikis, atsižvelgiant į eismo sezoniškumą bei jos faktinį stiprį. Pagal šią metodiką nustatomi nuostoliai, kuriuos kelių dangai nagrinėjamu metų laikotarpiu sukelia vienas *j-osios* markės sunkiasvorio transporto važiavimas vienu kelio kilometru.

Charkove (ChADI, Ukraina) parengta metodika [123] grindžiama kelių dangos konstrukcijos tampriuju įlinkiu. Kelių dangos konstrukcijos faktinis stipris įvertinamas stiprio koeficientu, o patirti nuostoliai apskaičiuojami pagal pateiktas formules.

Daugelyje šalių [124], nustatant eismo mokesčių tarifus, yra įvertinama sunkiasvorio transporto eismo įtaka kelių dangos funkcionavimo trukmei. Visgi eismo mokesčių tarifas kai kuriose Europos šalyse skiriasi net 13 kartų. Šį skirtumą galima paaiškinti skirtingomis pajamomis ir kelionių arba tranzito vežimų apmokestinimo esminiu skirtumu šalyse, esančiose kontinento „centre“, pavyzdžiui, Olandijoje [125], ar jo „pakraščiuose“. Vienoje šalyje eismo mokesčiai taip pat gali skirtis, žiūrint statinio (tiesinio) tipo (kelias, tiltas, tunelis) ar jo paskirties (tarptautinis ar miesto kelias, aplinkkelis).

Eismo mokestis vienos šalies ribose dažniausiai ženkliai skiriasi vietos ir užsienio transporto priemonių savininkams – vietos vežėjams būna mažesnis nei užsienio vežėjams [124]. Ši praktika laikytina teisinga, nes tarp vietos vežėjų ir valstybės yra nustatyti mokesčių santykiai, o mažesni mokesčiai vietos vežėjams rodo valstybės paramą jų ekonominiams santykiams su užsienio partneriais plėtoti.

Taigi galime teigti, kad sunkiasvorio transporto eismo mokesčiai sudarytų sąlygas geriau valdyti kelių būklę bei transporto priemonių eismo intensyvumą ir gauti papildomų lėšų keliams tiesti, remontuoti bei prižiūrėti, sumažintų transporto priemonių spūstis keliuose. Eismo mokesčių apimtys turėtų priklausyti nuo sunkiasvorio transporto vežimų sezoniškumo, jo parametrų neatitikties leistiniams parametrams, kelių kategorijos, atstumo tarp automobilių ašių diferenciacijos ir kitų veiksnių.

Lietuvos sąlygomis galėtų būti priimtinausia metodika [126], nes joje palyginamos faktinės ir leistinosios ašies apkrovos į dangą, sunkiasvorio transporto eismo sukelta kelių dangos suirtis bei priemonės, būtinos jos pažaidoms taisyti, todėl galima apskaičiuoti optimalius nuostolius, patiriamus dėl sunkiasvorio transporto eismo, kadangi įvertinama:

- 1) kelių dangos konstrukcija ir jos stipris;
- 2) žemės sankasos grunto ir kelių dangos konstrukcijos sluoksnių medžiagų stiprio bei deformatyvumo rodiklių priklausomybė nuo temperatūros, drėgnio bei apkrovos poveikio trukmės;
- 3) hidrologinės bei klimato sąlygos;
- 4) sunkiasvorio transporto eismo sezoniškumas;
- 5) sunkiasvorio transporto ašies apkrovos parametrai;
- 6) sunkiasvorio transporto ašių kiekis bei jų išdėstymo schema;
- 7) kelių dangos tarpremontinis laikotarpis;
- 8) remonto priemonių vertė.

Taip pat pagal [126] eismo mokesčio tarifo už sunkiasvorio transporto su viršnormine (neleistina) apkrova eismą nustatymo metodika suvedama į patiriamų dėl sunkiasvorio transporto su normine apkrova eismo (jeigu sumažėja jo vežimų greitis) nuostolių palyginimą su išlaidomis kelkraščiams stiprinti arba papildomai eismo juostai įrengti, kadangi įvertinama:

- kelio kategorija;
- kelių dangos konstrukcija;
- kelių dangos funkcionavimo trukmė;
- kelkraščių stiprinimas ar papildomos eismo juostos įrengimas;
- sunkiasvorio transporto eismo intensyvumas bei greitis;
- krovinių vežimo savikaina;
- eismo sąlygų gerinimo ekonominis tikslingumas.

Lietuvoje iki šiol nėra metodikos, kuria naudojant būtų galima apmokestinti tranzitinį ir vietinį sunkiasvorio transporto eismą šalies keliais, o esama jo eismo ir masės bei gabaritų kontrolė yra nepakankama ir nekompensuoja vis didėjančių nuostolių, kuriuos sukelia intensyvėjantis sunkiasvorio transporto eismas, todėl sunku planuoti ir laiku atlikti kelių dangos priežiūrą. Pagal siūlomos [126] metodikos pavyzdį parengta eismo mokesčių tarifų sistema leistų pakankamai tiksliai įvertinti sunkiasvorio transporto eismo poveikį Lietuvos kelių dangoms bei tinkamu lygiu apskaičiuoti dėl to patiriamus nuostolius ir nustatyti mokesčio už jo eismą Lietuvos keliais vertę.

Kaip alternatyvą panagrinėsime sunkiasvorio transporto apkrovų ribojimo nepalankiaisiais metų laikotarpiais pasaulinę praktiką ir taikomus sprendimo būdus.

1.7. Sunkiasvorio transporto apkrovų sezoninis ribojimas

Vežant krovinius tarptautiniais maršrutais ir dideliais atstumais pastebima tendencija [127] naudoti didelės keliamosios gebos sunkiasvorį transportą – tada galima sumažinti automobilių parką, jų eksploatavimo išlaidas, degalų sąnaudas, naudoti standartais sunormintus kontenerius. Visgi sunkiasvorio transporto apkrovų įtaka pagreitina kelių dangos irimą, ypač tos dangos, kurios laikomoji geba yra nepakankama, todėl sunkiasvorio transporto naudojimo ekonominis efektas nekompensuoja kelių remonto ir priežiūros išlaidų.

Kelio dangai apsaugoti nuo pernelyg greitos irties dažniausiai taikomi du būdai [75]:

- 1) sunkiasvorio transporto apkrovų mažinimas;
- 2) sudėtingesnės ir brangesnės kelių dangos, galinčios ilgiau išsaugoti savo stiprį, įrengimas.

Kad apsaugoti kelius ir racionaliai išnaudoti jų dangos stiprį, nepalankiaisiais (mažiausio

stiprio) laikotarpiais tikslinga riboti sunkiasvorio transporto eismą. Sunkiasvorio transporto apkrovų ribojimas žemės sankasos grunto atitirpimo laikotarpiu pavasarį, kad apsaugoti kelių dangas nuo pažeidimų, plačiai paplitęs JAV ir Europoje. Pirmiausiai (1802 metais) jis buvo įdiegtas Prancūzijoje [124].

Mažo eismo intensyvumo keliai sudaro didelę pasaulio kelių tinklo dalį (įskaitant JAV, kurioje keliai tarp valstijų sudaro mažiau nei 2 % šalies kelių ilgio) [128]. Trūkstant lėšų keliams tiesti, daugelyje valstijų (18 iš 33, kurios buvo tyrinėjamos) yra taikomi sunkiasvorio transporto ašies apkrovų apribojimai (dažniausiai vietinės reikšmės keliuose). Daugelyje valstijų priimta 8 t – 9 t ribinė apkrova pavienei ašiai ir 15,3 t – suporintai ašiai. Leistinosios ribinės apkrovos (atsižvelgiant į kelio kategoriją, eismo sudėtį, būklę ir kt.) pavasario laikotarpiu numatomos nuo 4,5 t iki 6,3 t pavienei ašiai ir nuo 8,1 t iki 12,6 t – suporintai ašiai. Šie apribojimai taikomi keliuose su nerišliaja, tobulesne lengvesniaja bei kapitalia (asfaltbetonio) danga, kurios funkcionavimo trukmė gali siekti 20 metų, kai žemės sankasa yra įrengta iš molingųjų ar dulkingųjų gruntų, ypač jautrių drėgnio kaitai [129]. Apkrovos gali būti sumažintos 40–50 % pavienėms ir 30–50 % suporintoms sunkiasvorio transporto ašims, paisant kelio būklės. Šis apkrovų ribojimas, įvertinus kelių dangos konstrukcijos sluoksnių storį ir jos funkcionavimo trukmę, žemės sankasos drėgnio kitėjimo tendenciją ir būklę bei kelio eksploatavimo vietinę patirtį, taikomas tada, kai (grunto atitirpimo laikotarpiu) kelių dangos įlinkiai 45–50 % viršija įlinkius, išmatuotus vasarą. Pagal kelių dangos įlinkių įverčius, leistinosios ašies apkrovos, atsižvelgiant į kelio kategoriją, eismo sudėtį, būklę ir kt., gali būti sumažintos 20–60 %.

Ukrainoje [130, 131], kad išvengti ankstyvos (priešlaikės) kelių dangos masinės suirties, rekomenduojama keliuose laikinai riboti sunkiasvorio transporto ašies apkrovas ir jų eismo intensyvumą tuo metų laikotarpiu, kai būna nepalankios žemės sankasos drėkimo sąlygos (grunto atitirpimo laikotarpiu). Apribojimo kriterijumi yra taikomos visos kelių dangos konstrukcijos tampros modulis E_f , o sunkiasvorio transporto eismas gali būti apribotas ar visai uždraustas. Ribojimų pradžios data nustatoma pagal žemės sankasos grunto atitirpimo temperatūrą: 2–4 °C – priemolio ir molio gruntams, o 0–2 °C – priemolio ir smėlio gruntams. Ribojimai galioja tokį laikotarpį, kol kelių dangos konstrukcijos įlinkis sumažėja tiek, kad tampa mažesnis už leistinąjį.

Visgi [54, 75] analizė parodė, kad šie apribojimai praktikoje taikomi ganėtinai retai, nes ne visose šalyse yra pakankamai išplėtotas kelių tinklas ir ne visur pakanka tinkamos kokybės automobilių kelių. Tik kai yra tinkamos sąlygos sunkiasvorio transporto eismą galima nukreipti alternatyviais maršrutais, kuriuose kelių dangos stipris yra pakankamas.

Norint sunkiasvorio transporto eismo neriboti visus metus, reikia sustiprinti kelių dangas. Pavyzdžiui, Vokietijoje [99, 100] buvo nustatyta, kad kelių dangas reikia sustiprinti tiek, jog

būtų galima sunkiasvorio transporto ašies leistinąją apkrovą padidinti nuo 100 kN iki 130 kN. Įtempiai ir deformacijos tipinėms kelių dangos konstrukcijoms buvo nustatomi pagal BISAR programą. Svarbiausiais kelių dangos stiprio kriterijais buvo taikomi santykinė deformacija, susidaranti dėl tempimo įtempių asfaltbetonyje ir santykinės deformacijos nerišliuose jos sluoksniuose. Didėjant sunkiasvorio transporto ašies apkrovai, išauga jų keliamoji geba, o važiavimų, reikalingų kroviniams vežti, kiekis sumažėja, todėl buvo žiūrėta, kad kelių dangos stiprio atsargos koeficientas būtų vienodas. Nustatyta, kad bitumu sutvirtintų mineralinių medžiagų kelių dangos sluoksnių storis turėtų būti padidintas taip: 30 cm storio sluoksnis – iki 35 cm, 22 cm – iki 26 cm, 14 cm – iki 17 cm. Taigi, padidinus apkrovą 1,3 karto, nurodytų kelių dangos sluoksnių storį būtina padidinti 3–5 cm.

Jei tarsime, kad įtempiai žemės sankasos grunte yra tiesiogiai proporcingi ašies apkrovai P ir atvirkščiai proporcingi kelių dangos storio H kvadratui ($\tau = f(P/H^2)$), tai nustatysime, kad jos storis (ir įrengimo kaina) atvirkščiai proporcinga apkrovos vertės ištrauktai kvadratinei šakniai (t.y. $\beta = 0,5$). Tačiau, jeigu kelių dangos nestiprinti, jos funkcionavimo trukmė, padidėjus apkrovai, smarkiai sumažėja [132], nes važiavimų kiekis iki asfaltbetonio sluoksnių suirties atvirkščiai proporcingas apkrovos dydžio ketvirtajam laipsniui.

1.8. Išvados

1. Lietuva turi gerai išplėtotą automobilių kelių tinklą, kurio bendras ilgis daugiau kaip 21 tūkst. km. Daugiau kaip 60 % jos ilgio paklota asfaltbetonio danga. Mūsų kraštą kerta 6 Europinės magistralės. Šiuose keliuose didžiausias eismo intensyvumas (kai kur siekia iki 40 tūkst. aut./parą), jų priežiūrai skiriamos didelės kelių priežiūros ir Europos Sąjungos paramos lėšos. Kelių priežiūros didžiausios problemos yra susijusios su vežimų sunkiasvoriu transportu augimu ir kelių ūkio nepakankamu finansavimu. Įstojus Lietuvai į Europos Sąjungą, sunkiasvorio transporto eismo intensyvumas keliuose išaugo iki 1,5 karto ir magistraliniuose keliuose jis sudaro iki 20 % bendro transporto priemonių srauto. Padidėjo ir standartinių ašių apkrovos ESA80 ir ESA100 (iki 12–13 %). Daugelyje Vakarų Europos šalių projektinė ašies apkrova yra 11–13 t, o Lietuvoje dauguma šalies kelių buvo suprojektuota ir nutiesta tuo laikotarpiu, kai galiojo 10 t projektinė apkrova.

2. Lietuvos keliai pagal savo savybes (dangos plotis ir lygumas, dangos stipris ir kt.) negali atlaikyti labai sparčiai didėjančių sunkiasvorio transporto apkrovų. Augant eismo intensyvumui, daugelio kelių ar jų ruožų techninė kategorija tapo per žema. Pervežant tarptautinio tranzito krovinius, mūsų kelių dangos patiria pernelyg didelį ardymo poveikį. Intensyvaus eismo kelių juostų vėžės, bangos, slinktyės, išdaužos bei plyšiai rodo, kad dėl sunkiasvorio transporto apkrovų bei klimato veiksnių kaitos daugkartinio poveikio sparčiai irsta

ne tik kelių dangos, bet ir pagrindai. Trūkstant lėšų, mažėja kelių dangos taisymo ir stiprinimo darbų apimtys bei blogėja jų kokybė, keliai ar pavieniai jų ruožai netenkina saugaus ir patogaus eismo reikalavimų.

3. Iki šiol Lietuvoje dar nėra metodikos, kurią taikant būtų galima pakankamai tiksliai įvertinti sunkiasvorio transporto poveikį kelių dangai, todėl sunku racionaliai planuoti bei vykdyti kelių remonto darbus. Lietuvos norminiame dokumente „STR 2.06.03:2001. Automobilių keliai“ yra įteisinta tik metodika kelių dangoms pagal krovinio eismo rodiklį VB parinkti, o būtinios metodikos joms projektuoti nėra. Kelių dangoms projektuoti metodika, pateikta ODN ir VSN instrukcijose, bei kelių dangų būklės valdymo sistema, aprašyta HDM modeliuose, nėra pakankamai objektyvios ir tikslios. Jas taikant negalima pakankamai tiksliai prognozuoti kelių dangos stiprio kitėjimo ir jos funkcionavimo realios trukmės bei apskaičiuoti sunkiasvorio transporto leistinąjį eismo intensyvumą, atsižvelgiant į dabartinę jos būklę bei eismo sezoniškumą.

4. Būtina tobulinti sunkiasvorio transporto ardančiojo poveikio kelių dangai įvertinimo metodus ir pasiūlyti būdus bei priemones kaip išvengti jos ankstyvos suirties. Pagal tai būtų galima objektyviai planuoti bei organizuoti sunkiasvorio transporto eismą silpnesnės dangos keliais ar jų ruožais ir numatyti jų remonto darbus ar, jeigu būtina, riboti ST eismą atskirų metų nepalankiais sezonais.

Remiantis šiame skyriuje atlikta literatūros šaltinių analize suformuluoti darbo tikslas ir uždaviniai, kurie pateikti šio darbo 7 puslapyje.

2. SUNKIASVORIO TRANSPORTO ARDANČIOJO POVEIKIO MODELIAVIMAS

Šio skyriaus medžiaga paskelbta autoriaus publikacijose [3a, 4a].

2.1. Kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių irties modelis

Pagal dabar taikomą metodiką [9] sunkiasvorio transporto ardantysis poveikis asfaltbetonio sluoksniams įvertinamas tik pavasarį, kai kelių dangos stipris būna mažiausias (projektinio laikotarpio metu), nes būtent per šį trumpą laikotarpį dangoje susikaupia iki 80 % metinių pažaidų. Ši nuomonė yra ginčytina. Kelių dangos irimas priklauso nuo šių veiksnių: nuo jos pagrindo stiprio, asfaltbetonio sluoksnių stiprio, atsparumo nuovargiui (ir kitų rodiklių) sezoninių pokyčių, kitų jos kokybės parametrų, apkrovų pobūdžio, taip pat nuo pažaidų, kurios susidaro kelių dangos funkcionavimo pradžioje, pobūdžio ir kiekio bei kt.

Kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo sąlygų analizei supaprastinti, nekreipėme dėmesio [14, 19, 52, 58–63] į šių sluoksnių medžiagų rišančiąsias savybes, antraip būtų tekę taikyti apkrovos judėjimo greičio rodiklį bei nuo jo priklausomus asfaltbetonio sluoksnių deformacijos kintamus rodiklius. Taip pat rėmėmės [16] darbe pateiktomis nuostatomis ir taikėme šias teorines prielaidas:

1) medžiagos funkcionavimo trukmę (nuovargį), kai veikia pasikartojančios apkrovos, apibūdinantis rodiklis N su medžiagos stipriu R bei joje atsirandančiais įtempiais σ yra susietas Sall–Pell laipsnine priklausomybe [14, 19]:

$$N = \left(\frac{R}{\sigma} \right)^b, \quad (2.1)$$

čia: b – parametras, apibūdinantis asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo trukmės nuovargį esant apkrovos lygiui σ/R ; R – asfaltbetonio sluoksnių stipris, MPa; σ – asfaltbetonio sluoksnių tempimo įtempiai, MPa.

2) asfaltbetonio sluoksnis suirs tada [14, 58], kai pagal Palmgren–Mainer linijinio (tiesinio) sumavimo taisyklę [58] pažaidų visuma bus lygi vienetui:

$$\frac{N_1}{N_1^*} + \frac{N_2}{N_2^*} + \dots + \frac{N_k}{N_k^*} = 1, \quad (2.2)$$

čia: $N_1^*, N_2^*, \dots, N_k^*$ – apkrovos ciklų ribinis skaičius, esant įtempiams, atitinkamai,

$\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k$; $N_1, N_2, \dots, N_k$ – apkrovos pridėjimo iki asfaltbetonio sluoksnio dalinės suirties ciklų skaičius.

Ilgamžiškumo (funkcionavimo trukmės) rodikliu priėmėme apkrovos, po kurios asfaltbetonio sluoksnis suyra, ciklinių pridėjimų skaičių, o suirtimi – asfaltbetonio sluoksnio paviršiaus sutrūkinėjimą (sueižėjimą). Modeliui sudaryti numatėme, kad nagrinėsime bandinį (asfaltbetonio sluoksnio medžiagos), kurio matmenys a , b ir h , o pradinis atsparumas tempimui lenkiant R_0 . Bandinys apkraunamas koncentruotos jėgos P cikline apkrova, todėl jo apatinėje zonoje atsiranda tempimo lenkiant įtempiai σ . Priėmėme, kad per pirmą apkrovų pridėjimo seriją apkrova P_1 buvo pridedama N_1 kartų, bet $N_1 < N_1^*$, todėl bandinio pažaidų laipsnis d nepasiekė suirties ribos:

$$d_1 = \frac{N_1}{N_1^*} < 1, \quad (2.3)$$

čia: N_1 – pridėtų apkrovų, kai įtempiai σ_1 , skaičius; N_1^* – pridėtų apkrovų, kai įtempiai σ_1 , ribinis (iki bandinio suirties) skaičius ir apskaičiuojamas taip:

$$N_1^* = \left(\frac{R_0}{\sigma_1} \right)^b, \quad (2.4)$$

čia: R_0 – bandinio pradinis stipris, MPa; σ_1 – bandinio tempimo įtempiai po pirmos apkrovų pridėjimo serijos, MPa.

Bandinio likutiniam stipriui po pirmos apkrovų serijos nustatyti, antrojoje apkrovų serijoje pridėsime jėgą P_2 , kad bandinys suirtų antros apkrovų serijos viename apkrovos cikle $N_2 = 1$. Pažaidos dydis šiuo atveju bus:

$$d_2 = \left(\frac{N_2}{N_2^*} \right) = \frac{1}{\left(\frac{R_0}{\sigma_2} \right)^b} < 1, \quad (2.5)$$

čia: N_2 – pridėtų apkrovų, kai įtempiai σ_2 , skaičius; N_2^* – pridėtų apkrovų, kai įtempiai σ_2 , ribinis (iki bandinio suirties) skaičius; σ_2 – bandinio tempimo įtempiai po antros apkrovų pridėjimo serijos, MPa.

Pasinaudoję [14] darbu ir pažaidų linijinio (tiesinio) sumavimo taisykle [58], visiškai suirusio bandinio pažaidos bus:

$$\frac{N_1}{\left(\frac{R_0}{\sigma_1}\right)^b} + \frac{1}{\left(\frac{R_0}{\sigma_2}\right)^b} = 1. \quad (2.6)$$

Pagal (2.6) priklausomybę nustatėme ribinį įtempį lenkiant antroje apkrovų pridėjimo serijoje, kuris parodė bandinio likutinį stiprį, paveikus bandinį pirmąją apkrovų seriją:

$$\sigma_2 = R_0 \left[1 - N_1 \left(\frac{\sigma_1}{R_0} \right)^b \right]^{\frac{1}{b}}, \text{ MPa.} \quad (2.7)$$

Formulę (2.7) galima užrašyti bendresne forma:

$$R_i = R_0 \left[1 - N_i \left(\frac{\sigma_i}{R_0} \right)^{b_i} \right]^{\frac{1}{b_i}}, \text{ MPa,} \quad (2.8)$$

arba

$$R_i = R_{i-1} \left[1 - N_i \left(\frac{\sigma_i}{R_{i-1}} \right)^{b_i} \right]^{\frac{1}{b_i}}, \text{ MPa,} \quad (2.9)$$

čia: R_i – i -tojo sluoksnio medžiagos bandinio, paveikus šį bandinį N_i kartų, su įtempiais σ_i , pridėta apkrova arba sluoksnio medžiagai funkcionavus T_i metų laikotarpį, likutinis stipris, MPa; i – pridėtų apkrovų serija, kai $\sigma_i = \text{const}$.

Formulės (2.8) ir (2.9) parodo bandinio pažaidų susidarymo (nuo pasikartojančių apkrovų) proceso matematinį modelį. Jų adekvatiškumą apibūdina [14, 19] šios sąlygos:

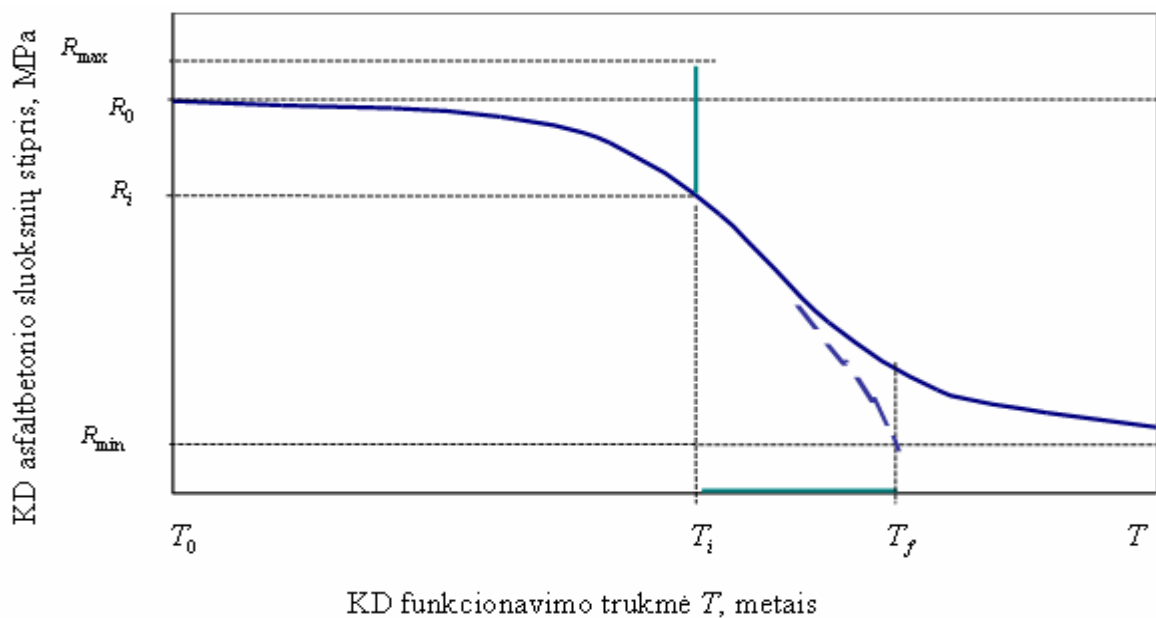
- 1) Palmgren–Mainer taisyklės, pagal kurią statistiškai nustatomas bandinio pažaidų mastas, tikslumas;
- 2) Sall–Pell priklausomybės, skirtos bandinio ekvivalentiniam įtempiui bei jo ilgaamžiškumui nustatyti, tikslumas;
- 3) sprendinio, apjungiančio bandinio ekvivalentinį įtempį ir apkrovos pridėjimo charakterį bei sąlygas, taikymas.

Pagal formules (2.8) ir (2.9) galima įvertinti asfaltbetonio sluoksnio likutinį stiprį.

Modeliui sudaryti (2.8) formulėje taikėme faktinius įtempius σ_i , kurie, veikiant ratų apkrovai, atsiranda asfaltbetonio sluoksniuose, bei faktinį nuovargio rodiklį b_i , todėl šiuo atveju rodiklis R_i apsprendžia asfaltbetonio sluoksnio likutinį stiprį iki suirties. Priėmėme, kad rodikliai R , σ ir b nuolat kinta – paros, metų bėgyje ir per visą kelių dangos funkcionavimo laikotarpį, o asfaltbetonio sluoksnio stipris R_i *i-uojų* metų laikotarpiu priklauso nuo sluoksnio medžiagos temperatūros t_i bei pridėdamų apkrovų skaičiaus N_i . Priėmėme, kad per asfaltbetonio dangos funkcionavimo pradinį laikotarpį rodiklis R_0 atitinka didžiausią asfaltbetonio sluoksnio medžiagos atsparumą tempimui lenkiant visų temperatūrų, kurioms esant funkcionuoja tiriamoji kelių danga, intervale. Priėmėme, kad įtempiai σ_i priklauso nuo išorinės apkrovos dydžio bei kelių dangos konstrukcijos standumo ir kiekvienu reikiamu laikotarpiu gali būti įvertinti, žinant jos sluoksnių medžiagos drėgnį W_i ir temperatūrą t_i .

Pasinaudoję (2.1) formule nustatėme, kad asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo trukmės (likutinio ilgaamžiškumo) rodiklis yra kintamas dydis (2.1 pav.):

$$N_1^* = \left(\frac{R_i}{\sigma_i} \right)^{b_i}, \quad (2.10)$$



2.1 pav. Kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių stiprio R (MPa) mažėjimas jos funkcionavimo laikotarpiu T (metais)

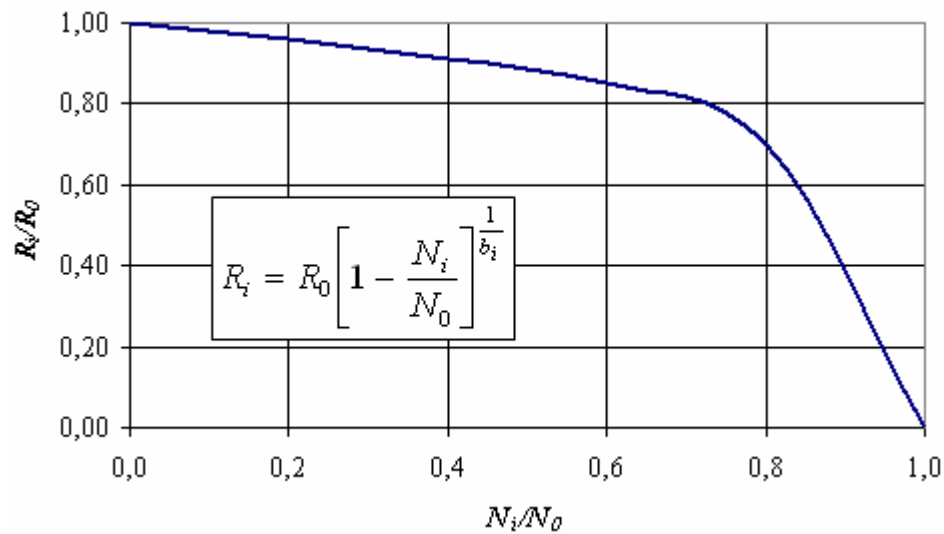
Pagal (2.9) formulę nustatėme, kaip intensyviai kelių dangos funkcionavimo laikotarpiu keisis jos asfaltbetonio sluoksnių stipris R :

$$R_{i+1} = R_i \left[1 - \frac{N_i}{N_i^*} \right]^{\frac{1}{b_i}}, \text{ MPa}, \quad (2.11)$$

arba

$$R_i = R_0 \left[1 - \frac{N_i}{N_0^*} \right]^{\frac{1}{b_i}}, \text{ MPa}, \quad (2.12)$$

Asfaltbetonio sluoksnių suirties masto grafinė išraiška pagal (2.12) formulėje pateiktą modelį rodo kelių dangos stiprio mažėjimą jai funkcionuojant iki suirties (2.2 pav.).



2.2 pav. Kelių dangos asfaltbetonio sluoksnio stiprio kitėjimas (veikiant apkrovoms): R_i / R_0 – santykinis stipris (MPa), N_i / N_0^* – santykinis pridedamų apkrovų skaičius

Tolesniam modeliavimui taikėme [17] darbe panaudotas išraiškas $N_i = 365kN_p T_i$ arba $N_0 = 365kN_p T_0$ (k – proporcingumo koeficientas, įvertinantis automobilių masės parametrus eismo sraute; N_p – projektinių automobilių eismo intensyvumas, aut./parą) ir nustatėme, kad asfaltbetonio sluoksnių stiprio priklausomybę nuo jų funkcionavimo trukmės galima apskaičiuoti iš šios formulės:

$$R_i = R_0 \left[1 - \frac{T_i}{T_0} \right]^{\frac{1}{b_i}}, \text{ MPa}, \quad (2.13)$$

čia: T_i – asfaltbetonio sluoksnio funkcionavimo trukmė *i-uoju* laikotarpiu, metais; T_0 – asfaltbetonio sluoksnio funkcionavimo trukmė iki kelių dangos suirties momento, metais.

Kelių dangos asfaltbetonio sluoksnio likutiniam stipriui nustatyti bei įvertinti, šio sluoksnio likutinį stiprį (žr. (2.8) formulę) išreiškėme taip:

$$R_i = (N_i^*)^{\frac{1}{b_i}} \sigma_i \left[1 - \frac{N_i}{N_i^*} \right]^{\frac{1}{b_i}}, \text{ MPa}, \quad (2.14)$$

arba

$$R_i = \frac{R_0}{(N_i^*)^{\frac{1}{b_i}}} (\Delta N_i)^{\frac{1}{b_i}}, \text{ MPa}, \quad (2.15)$$

čia: ΔN_i – asfaltbetonio sluoksnio likutinė funkcionavimo trukmė, paveikus dangą automobilių ratų apkrovomis N_i kartų:

$$\Delta N_i = N_i^* - N_i = N_i^* \left(\frac{R_i}{R_0} \right)^{b_i}. \quad (2.16)$$

Palyginus (2.14) ir (2.16) lygtis, nustatėme, kad asfaltbetonio sluoksnių medžiagos likutinė funkcionavimo trukmė, paveikus dangą N_i kartų automobilių ratų apkrovomis ir kai pradinė dangos funkcionavimo trukmė yra N_i^* yra tokia:

$$\Delta N_i = N_i^* (N_i^* - N_i) \left(\frac{\sigma_i}{R_0} \right)^{b_i}. \quad (2.17)$$

Planuojant siūlomu modeliu (žr. (2.12) formulę) apibūdinti kelių dangos stiprio faktinį kitėjimą, įvertinome, kaip, paisant asfaltbetonio sluoksnių suirusių (supleišėjusių) plotų dydžio, kinta tempimo įtempiai σ_i . Pagal mūsų pasiūlytą asfaltbetonio sluoksnių suirties masto modelį (žr. (2.12) formulę) nustatėme, kaip keičiasi kelių dangos funkcionavimo trukmės likutinis resursas pagal bet kuri jos konstrukcijos stiprio kriterijų.

2.2. Parametrai kelių dangos funkcionavimo trukmės modeliui pagrįsti

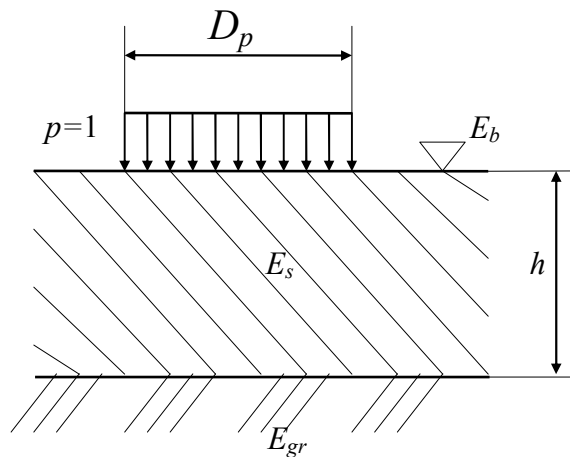
Dabar projektuojant kelių dangas [9] taikomi trys ribinio būvio kriterijai: asfaltbetonio sluoksnių atsparumas tempimui lenkiant, žemės sankasos grunto atsparumas šlyčiai ir kelių dangos konstrukcijos tamprusis įlinkis. 1-ame skyriuje aptarties rodikliams optimizuoti taikėme [9] darbe priimtas nuostatas, kad labiausiai priimtinas yra kelių dangos stipris pagal

bendrojo tampros modulio kriterijų, kai dangos paviršiaus temperatūra $t_{pav} = +10\text{ }^{\circ}\text{C}$, o gruntai atitinka jų pavasarinę būklę. Tada, pagal tampraus įlinkio sąlygą, projektinių automobilių leistinąjį eismo intensyvumą $N_{pE}^{(l)}$, kurios tampros modulis E_b , apskaičiuojame taip:

$$N_{pE}^{(l)} = 10^{\frac{1}{A} \left(\frac{E_b}{K_{st}} - B \right)}, \text{ aut./parą.} \quad (2.18)$$

čia: E_b – kelių dangos konstrukcijos bendrasis tampros modulis, MPa; K_{st} – kelių dangos konstrukcijos stiprio koeficientas; A ir B – koeficientai (A ir B grupių automobilių apkrovoms: $A = 70$ MPa; $B_A = 56$ MPa ir $B_B = 0$ MPa).

Schema tampros moduliui E_b nustatyti yra pateikta 2.3 paveiksle.



2.3 pav. Schema dvisluoksnės sistemos tampros moduliui E_b nustatyti: D_p – projekcinio automobilio rato pėdsako plotą atitinkančio apskritimo skersmuo, cm; E_s – kelių dangos konstrukcijos sluoksnių medžiagų ekvivalentinis tampros modulis, MPa; h – kelių dangos sluoksnių storis, cm; p – rato slėgis į kelio dangą, MPa

Pagal grunto lyginamosios sankibos sąlygas [9] leistinuosius šlyties įtempius τ_{gr} apskaičiuojame taip:

$$\tau_{gr} \geq K_{st} \tau, \text{ MPa,} \quad (2.19)$$

$$\tau_{gr} = C_{gr} k_1 k_2 k_3, \text{ MPa,} \quad (2.20)$$

čia: τ_{gr} – leistinieji šlyties įtempiai, priklausantys nuo grunto lyginamosios sankibos C_{gr} , MPa;

τ – aktyvūs šlyties įtempiai žemės sankasos grunte, veikiant trumpalaikiai apkrovai, MPa; C_{gr} – grunto lyginamoji sankiba, MPa; k_1 – koeficientas, įvertinantis kartotinių trumpalaikių apkrovų ardantįjį poveikį, $k_1 = 0,6$; k_2 – atsargos koeficientas, apibūdinantis kartotinių apkrovų vyksmą ir priklausantis nuo projektinių automobilių eismo intensyvumo, nustatomas taip:

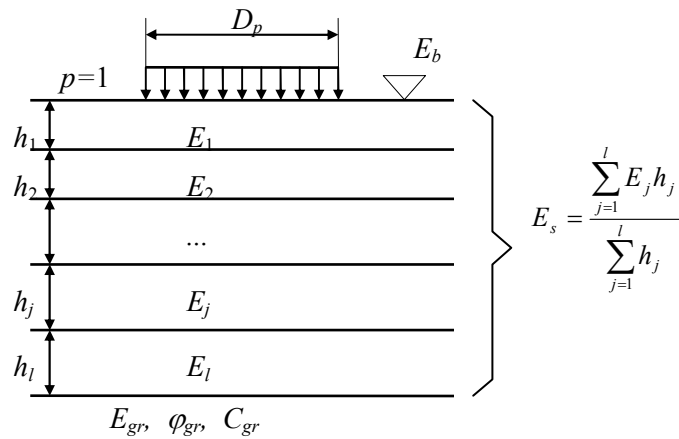
$$k_2 = 2,45 \cdot N_p^{-\frac{1}{6}} \quad (2.21)$$

N_p – projektinių automobilių eismo intensyvumas, aut./parą; k_3 – koeficientas, apibūdinantis grunto funkcionavimo sąlygas, nustatomas pagal [9].

Taikydami formules (2.19), (2.20) ir (2.21), įvertinus poslinkio kriterijų τ , nustatėme projektinių automobilių leistinąjį eismo intensyvumą $N_{p\tau}^{(l)}$:

$$N_{p\tau}^{(l)} = \left(2,45 \frac{k_1 k_3}{K_{st}} \cdot \frac{C_{gr}}{\tau} \right)^b, \text{ aut./parą.} \quad (2.22)$$

Schema žemės sankasos grunto lyginamajai sankibai apskaičiuoti pateikta 2.4 paveiksle.



2.4 pav. Schema daugiasluoksnei kelių dangos konstrukcijai redukuoti į dvisluoksnę (nustatant žemės sankasos grunto poslinkį): $1, 2, \dots, j, l$ – kelių dangos konstrukcijos sluoksnio (skaičiuojat iš viršaus į apačią), numeris; E_s – kelių dangos konstrukcijos sluoksnių medžiagų ekvivalentinis tampros modulis, MPa; E_j – kelių dangos konstrukcijos j -tojo sluoksnio medžiagos tampros modulis, MPa; h_j – kelių dangos konstrukcijos j -tojo sluoksnio storis, cm; l – kelių dangos konstrukcijos sluoksnių, esančių virš grunto, skaičius; E_{gr} – žemės sankasos grunto tampros modulis, MPa; φ_{gr} – žemės sankasos grunto vidinės trinties kampas, laipsniais

Iš kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių leistinojo įtempio lenkiant sąlygų [14], įvertinus tempimo įtempius σ ir atsižvelgus į nuovargio suirtį, dvisluoksnei dangai nustatėme projektinių automobilių leistinąjį eismo intensyvumą $N_{p\sigma}^{(I)}$:

$$N_{p\sigma}^{(I)} = \frac{k_n^b \cdot \beta_{sk}}{365 \cdot T_f} (1 - t_\alpha V)^b, \text{ aut./para}, \quad (2.23)$$

čia: V – stiprio variacijos koeficientas; t_α – pagal projektinį patikimumo lygį taikomas nuokrypio norminis koeficientas; 365 – parų (metuose) skaičius; T_f – kelių dangos funkcionavimo racionali trukmė, metais; b – parametras, apibūdinantis asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo trukmės nuovargį esant apkrovos lygiui σ/R ; k_n – atsparumo nuovargiui atsargos koeficientas, nustatomas analogiškai kelių dangos vieno asfaltbetonio sluoksnio stipriui (stiprio koeficientui K_{st}):

$$k_n = \frac{[\sigma_{ti}]}{\sigma_{ti}}, \quad (2.24)$$

čia: $[\sigma_{ti}]$ – asfaltbetonio sluoksnių leistinasis tempimo įtempis, MPa; σ_{ti} – H_1 storio asfaltbetonio sluoksniuose atsirandantys (žr. 2.5 pav.) amplitudiniai tempimo įtempiai, MPa; β_{sk} – koeficientas automobilių ratų važiavimo nuokrypiui nuo labiausiai tikėtinos vietos apibūdinti (pasiskirstęs pagal normalųjį dėsnį):

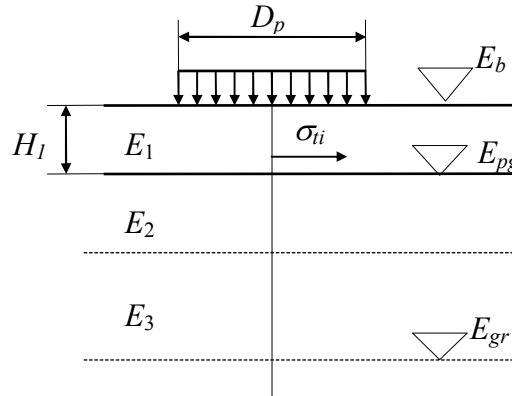
$$\beta_{sk} = \pi k S_n \sqrt{b}, \quad (2.25)$$

čia: S_n – rato pėdsako centro vidutinis kvadratinis nuokrypis, cm; b – parametras, apibūdinantis medžiagos pasipriešinimą nuovargio suirčiai (kai ciklinė apkrova), tas pats kaip (2.23) formulėje; k – dvisluoksnės dangos konstrukcijos parametras (pagal [85]):

$$k = \frac{2}{D_p \sqrt{\pi}} \arctg \left(\frac{D_p}{2H_1} \sqrt[3]{\frac{6E_2(1-\nu_1^2)}{E_1(1-\nu_2^2)}} \right), \quad (2.26)$$

čia: ν_1, ν_2 – 1-ojo ir 2-ojo asfaltbetonio sluoksnių deformacijos skersine kryptimi koeficientai; E_1, E_2 – 1-ojo ir 2-ojo asfaltbetonio sluoksnių tampros moduliai, MPa.

Schema kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių tempimo įtempiams lenkiant nustatyti pateikta 2.5 paveiksle.



2.5 pav. Schema kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių tempimo įtempiams lenkiant nustatyti:
 H_1 – asfaltbetonio sluoksnių likutinis storis, cm; σ_i – įtempiai nuo pridėtų apkrovų, MPa; E_{pg} – pagrindo sluoksnių medžiagų tampros modulis, MPa; E_{gr} – žemės sankasos grunto tampros modulis, MPa

Koeficientai A , B , K_{st} , k_1 , k_2 , t_α , V formulėse (2.18), (2.22) ir (2.23) buvo taikomi pagal [9, 85] rekomendacijas. Taikant šias formules galima su reikiamu patikimumo lygiu nustatyti projekcinės apkrovos leistinąjį eismo intensyvumą bet kuriam kelių dangos stiprio projekciniam kriterijui.

Sunkiasvorio transporto eismo įtaką kelių dangai įvairiu metų laikotarpiu įvertinome pagal [133], taikydami projekcinio laikotarpio eismo kokybės koeficientą $\beta^{(i)}$ (žr. I priedą). Jis parodo, kiek vieno projekcinės apkrovos važiavimo įtaka i -uoju metų laikotarpiu skiriasi nuo važiavimo įtakos esant vidutinėms gruntų bei geologinėms, klimato ir kitoms metinėms sąlygoms.

Nustatėme (žr. I priedą), kad projekcinių automobilių eismo kokybės koeficientas $\beta^{(i)}$ nagrinėjamuoju i -uoju metų laikotarpiu, prilyginant jį vidutinėms metų sąlygoms, naudojant tris kelių dangos konstrukcijos ribinio būvio kriterijus, nustatomas taip [9]:

$$\beta_{E,\tau,\sigma}^{(i)} = \frac{F_{E,\tau,\sigma}^{(i)}}{\sum_{i=0}^l \left(\gamma^{(i)} t^{(i)} F_{E,\tau,\sigma}^{(i)} \right)}, \quad (2.27)$$

čia: $F_{E,\tau,\sigma}^{(i)}$ – automobilių eismo i -uoju metų laikotarpiu redukavimo labiausiai nepalankiam projekciniam laikotarpiui, pagal naudojamus E , τ ir σ rodiklius, koeficientas, priklausantis nuo

kelių dangos konstrukcijos stiprio ir jos funkcionavimo trukmės likutinio resurso; $\gamma^{(i)}$ – eismo intensyvumo sezoninio kitėjimo koeficientas; $t^{(i)}$ – atskirų metų laikotarpių santykinė trukmė; l – kelių dangos konstrukcijos sluoksnių skaičius (žr. 2.4 pav.).

Faktinį sunkiasvorio transporto ardantįjį poveikį kelių dangai nagrinėjamoju *i-uojų* metų laikotarpiu išanalizavome pasinaudoję [14, 19, 46, 51, 52] darbais. Išanalizavus, kaip eksploatuojant kelią kinta kelių dangos konstrukcijos įtemptas-deformuotas būvis, nustatėme (žr. II priedą) ekvivalentinę (leistinąją) *i-jo* rato apkrovą $P^{(l)}$ šiems kelių dangos ribinio būvio kriterijams [9]:

1) pagal atsparumo šlyčiai žemės sankasos grunte τ (arba silpnai rišliuose kelių dangos konstrukcijos sluoksniuose) kriterijų:

$$P_{\tau(ij,t)}^{(l)} = P_i + \sum_{j=1}^{n-1} P_j \frac{\tau_{ij,t} \left(\frac{x_{ij}}{D_j}, \frac{y_{ij}}{D_j} \right)}{\tau_{ij,t}(0,0)}, \text{ MPa}, \quad (2.28)$$

čia: P_i – *i-jo* rato ašies apkrova, MPa; i ir j – ratai ašyje, vnt.; n – kelių dangos konstrukcijos sluoksnių, gulinčių virš sluoksnio, kuriam apskaičiuojami šlyties įtempiai, skaičius; x_{ij} ir y_{ij} – atstumas tarp i ir j ratų ašyje, cm; D_j – *j-jo* rato pėdsako skersmuo, cm; $\tau_{ij,t}$ – šlyties įtempiai žemės sankasos grunte, MPa; t – *i-tasis* laikotarpis metuose, paromis;

2) pagal asfaltbetonio sluoksnių atsparumo tempimui lenkiant σ kriterijų:

$$P_{\sigma(ij,t)}^{(l)} = P_i + \sum_{j=1}^{m-1} P_j \frac{\sigma_{ij,t} \left(\frac{x_{ij}}{D_j}, \frac{y_{ij}}{D_j} \right)}{\sigma_{ij,t}(0,0)}, \text{ MPa} \quad (2.29)$$

čia: m – asfaltbetonio sluoksnių skaičius, $\sigma_{ij,t}$ – įtempių kelių dangos konstrukcijos būvis, MPa.

Nustatėme, kad ašies apkrovos P_i redukavimo į ekvivalentinę (leistinąją) $P^{(l)}$ koeficientas S kinta priklausomai nuo kelių dangos konstrukcijos ribinio būvio kriterijaus, metų laikotarpio ir kelių dangos suirties lygio.

Išanalizavus eksperimentinių tyrimų [51] rezultatus galima teigti, kad padidinus kelių dangos konstrukcijos stiprį, automobilio ratų įtaka įtempių bei įlinkių kitėjimui išauga. Pridėjus ciklinę apkrovą, kelių dangos konstrukcijos stipris pradeda palaipsniui mažėti, taip pat mažėja ir

jos apkrovų paskirstomoji geba, todėl jos sluoksnių įtempiai ir įlinkiai išauga. Tada atsiranda kelių dangos pažaidos ir pradeda didėti jos suirtis, o jos įtempių-deformacijų būvis kitėja, kartu keisdamas ir ekvivalentinės (leistinosios) apkrovos $P^{(l)}$ vertę. Pagal tai, pasinaudojus [9] darbu, ašies apkrovos P_i redukavimo į projektinę ašies apkrovą P_p *i-uojų* metų laikotarpiu t koeficientai S nustatomi taip:

1) pagal atsparumo šlyčiai žemės sankasos grunte τ (arba silpnai rišliuose kelių dangos konstrukcijos sluoksniuose):

$$S_{\tau,t} = \left(\frac{P_{\tau,t}^{(l)}}{P_p} \right)^{b_\tau}; \quad (2.30)$$

2) pagal asfaltbetonio sluoksnių atsparumo tempimui lenkiant σ kriterijų:

$$S_{\sigma,t} = \left(\frac{P_{\sigma,t}^{(l)}}{P_p} \right)^{b_\sigma}, \quad (2.31)$$

čia: $S_{\tau,t}$ ir $S_{\sigma,t}$ – redukavimo į projektinės ašies apkrovą P_p koeficientai pagal, atitinkamai, šlytį τ ir asfaltbetonio sluoksnių atsparumą tempimui lenkiant σ ; b_τ ir b_σ – parametrai, apibūdinantys medžiagos pasipriešinimą nuovargio suirčiai (kai ciklinė apkrova).

Žinant eismo sezoniškumą, kelių dangos konstrukcijos stiprį bei projektinę ašies apkrovą, galima įvertinti važiuojančio sunkiasvorio transporto ardantįjį poveikį kelių dangai.

2.3. Kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo trukmės modelis

Kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių stiprio ir funkcionavimo trukmės pokyčiams eksploatuojant dangą prognozuoti nagrinėjome, kaip galima tarpusavyje optimizuoti jos suirties masto lygio D_l ir jos funkcionavimo racionalios trukmės T_f , automobilių eismo leistinojo intensyvumo $N_p^{(l)}$ ir automobilių srauto pobūdžio (ar sraute dominuoja lengvieji automobiliai, ar sunkvežimiai), asfaltbetonio sluoksnių stiprio K_{st} rodiklius, mažinant išlaidas kelių dangai stiprinti.

Išanalizavę tyrimus [23, 54, 77], pasirinkime tokias projektines A arba B grupės automobilių normines ašies apkrovas, esant vidutiniam metiniam paros eismo intensyvumui N_p , kad joms veikiant kelių dangos konstrukcijos įlinkis ir asfaltbetonio sluoksnių tempimo lenkiant įtempiai liktų normos ribose, o aktyvūs šlyties įtempiai žemės sankasos grunte didžiausio jo

drėgnio laikotarpiu neviršytų projekcinio grunto pasipriešinimo šlyčiai. Pagal tai apskaičiuotas projektinių automobilių eismo intensyvumas $N_p^{(i)}$ tenkins i -iems projektiniams metų laikotarpiams bet kurį stiprio kriterijų [9]:

$$N_{pE} = \min N_{pE}^{(i)}, N_{p\sigma} = \min N_{p\sigma}^{(i)}, N_{p\tau} = \min N_{p\tau}^{(i)}. \quad (2.32)$$

Nustatant kelių dangos funkcionavimo trukmę T_f , kai svarbiausiu kriterijumi yra priimtas asfaltbetonio sluoksnių atsparumas tempimui lenkiant, asfaltbetonio sluoksnio storį H_1 galima nustatyti pagal (2.23-2.26) formules (žr. 2.5 pav.):

$$H_1 = \frac{D_p}{2} \sqrt[3]{\frac{6E_2(1-\nu_1^2)}{E_1(1-\nu_2^2)}} \arctg \left[365 N_p T_f \left(\frac{\sigma_{ii}}{[\sigma_{ii}](1-t_a V)} \right)^b \frac{D_p}{2S_N \sqrt{\pi b}} \right], \text{ cm}, \quad (2.33)$$

čia: t_a – pagal projektinį patikimumo lygį priimtas σ_{ii} nuokrypio norminis koeficientas.

Formulė (2.33) išvesta pasinaudojus [85] darbo nuorodomis, o įtempiai σ_{ii} nustatomi pasinaudojus [134-137] darbuose pateiktomis nuorodomis.

Tam tikru laiko momentu T stiprinant kelių dangą, asfaltbetonio sluoksnio ir stiprinimo sluoksnio stipriai skiriasi – $R_v(H_v) < R_0(H_1^{(0)})$, todėl likusį nenusidėvėjusį $H_1^{(1)}$ storio dangos sluoksnį pakeitėme likutiniu ekvivalentiniu $H_1^{(ekv)}$ storio sluoksniu, kurio stipris toks pat, kaip ir stiprinimo sluoksnio. Tada nustatėme, kaip pridėjus apkrovą sumažėja ekvivalentinis sluoksnio storis. Dangos likutinį ekvivalentinį storį $H_1^{(ekv)}$, pridėjus n_1 apkrovų, kurių įtempiai σ_i , nustatėme taikydami [16] darbe pateiktas nuorodas:

$$H_1^{(ekv)} = H_1^{(1)} \sqrt[1/b]{1 - n_1 \left(\frac{\sigma_i}{R_0} \right)^b}, \text{ cm}, \quad (2.34)$$

čia: R_0 – asfaltbetonio sluoksnio pradinis atsparumas tempimui lenkiant, MPa; n_1 – $H_1^{(1)}$ storio sluoksniui pridedamų apkrovų skaičius.

Eksploatuojant kelią, asfaltbetonio sluoksnių pradinis tempimo įtempis $[\sigma_{ii}]$ dėl kelių dangos suirties, praėjus tam tikram laikotarpiui T , gali būti sumažintas ir tapti $[\sigma_{ii}]^{(T)}$. Kelių

dangos sluoksnį, kurio pradinis tempimo įtempis $[\sigma_{ii}]^{(T)}$, galima, pasinaudojus (2.34) formule, pakeisti ekvivalentiniu sluoksniu, kurio pradinis stipris R_0 ir storis $H_1^{(T)}$:

$$H_1^{(T)} = H_1^{(0)} \left(1 - \frac{T}{T_f} \right)^{\frac{1}{2b}}, \text{ cm}, \quad (2.35)$$

čia: $H_1^{(0)}$ – kelių dangos stiprinimo sluoksnio storis su analogiškais viršutiniam (1-ajam asfaltbetonio) sluoksniui E_1 , ν_1 , b parametrais, laiduojančiais asfaltbetonio sluoksnių priimtina viso T_f laikotarpio metu funkcionavimą, esant projektinių automobilių eismo intensyvumui N_p (aut./parą).

Formule (2.35) nustatomas kelių dangos sluoksnio likutinio ekvivalentinio storio, šį sluoksnį eksploatuojant, kitėjimas. Kiekvienu laiko momentu T galima nustatyti kelių dangos stiprinimo sluoksnio reikalingą storį $\Delta H^{(T)}$, kad ji įgytų savo pradinį stiprį R_0 :

$$\Delta H^{(T)} = H_1^{(0)} - H_1^{(T)} = H_1^{(0)} \left[1 - \left(1 - \frac{T}{T_f} \right)^{\frac{1}{2b}} \right], \text{ cm}. \quad (2.36)$$

Formulę (2.36) siūlome kelių dangos stiprinimo sluoksnio storiui apskaičiuoti. Ji įvertina kelių dangos pradinį storį $H_1^{(T)}$ ir jos asfaltbetonio sluoksnių faktinį storį $H_1^{(ekv)}$ ((2.34) formulė) bei rodo šių rodiklių kitėjimą laikui bėgant.

Žinant kelių dangos stiprinimo sluoksnio reikalingą storį ΣH ir įrengimo kainą ΣC bei įvertinus būtinų remontams lėšų naudojimo ekonominį efektyvumą, nustatomas jos stiprinimo optimalus (su mažiausiomis išlaidomis) momentas [134–138]:

$$T_{rem}^{(opt)} = f(\Sigma H \rightarrow \min, \Sigma C \rightarrow \min, \Delta h \rightarrow opt), \text{ metų}, \quad (2.37)$$

čia: ΣH ir ΣC – atitinkamai, santykinis stiprinimo sluoksnių storis ir santykinė sluoksnių remonto kaina, atitinkamai, išlaidų laikotarpiui T_Σ (T_Σ – 35–40 metų laikotarpis, per kurį kokybiškai pakeičiami transporto priemonių parkas, jų masė ir gabaritai, sunkiasvorio transporto gamybos technologija ir jų kaina, taip pat pakinta kelių dangos konstrukcijos projektavimo ir konstravimo metodai); Δh – stiprinimo sluoksnio storis ($H_1^{(0)}$), priklausantis nuo asfaltbetonio

sluoksnių likutinio stiprio ir stiprinimo sluoksnių įrengimo technologijos, cm.

Rodiklis ΣH nustatomas taip:

$$\Sigma H = \frac{\Sigma H_T}{\Sigma H_0} = \frac{T_f}{T} \left(\frac{T}{T_\Sigma} + \frac{\Delta H^{(T)}}{H_0} \right), \text{ kai } T \leq T_f, \text{ cm}, \quad (2.38)$$

čia: ΣH_T ir ΣH_0 – stiprinimo sluoksnių storis, cm, T_Σ laikotarpis, kai tarpremontiniai laikotarpiai, atitinkamai, $T < T_f$ ir T_f , metų; H_0 – asfaltbetonio sluoksnių pradinis storis, cm.

Nustačius tam tikram momentui prilygintas įvairialaikės kelių dangos remonto išlaidas (analogiškai kaip (2.38) formulėje), apskaičiuojama visų remontų kaina ΣC :

$$\Sigma C = \frac{\Sigma C_T}{\Sigma C_o}, \quad (2.39)$$

čia:

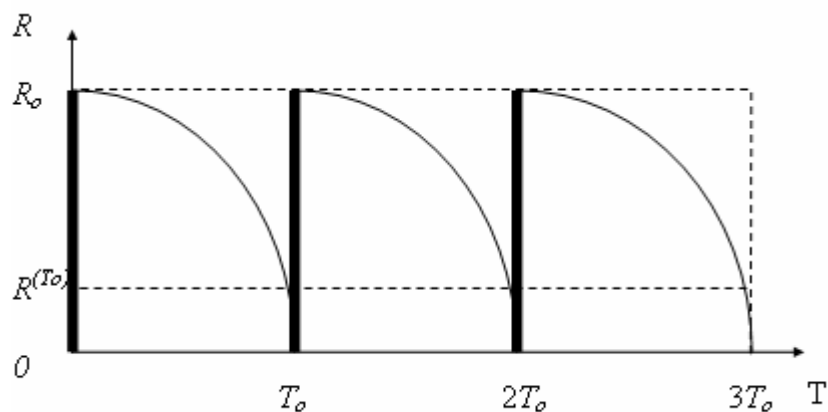
$$\Sigma C_T = C_o + \sum_i^{T_\Sigma} \frac{\Delta C^{(T)}}{(1+e)^i}, \quad i = T, 2T, 3T, \dots, T_\Sigma; \quad T \leq T_f, \quad (2.40)$$

$$\Sigma C_o = C_o + \sum_i^{T_\Sigma} \frac{C_o}{(1+e)^i}, \quad i = T_f, 2T_f, 3T_f, \dots, T_\Sigma, \quad (2.41)$$

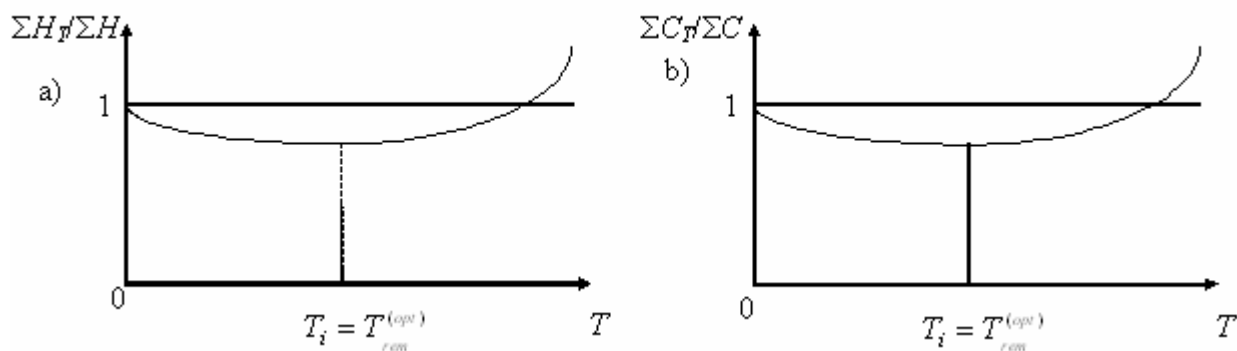
čia: ΣC_T ir ΣC_o – išlaidos per laiko tarpsnį T_Σ , skirtos dangos remontams, kai kelių dangos tarpremontiniai laikotarpiai yra, atitinkamai, $T < T_f$ ir T_f , metų; C_o – sluoksnio, kurio storis H_0 , kaina; $\Delta C^{(T)} = \Delta H^{(T)}$ storio kelių dangos stiprinimo sluoksnio laikotarpiu T kaina; e – įvairialaikės išlaidų įvertinimo vienu (tuo pačiu) laiko momentu norminis koeficientas.

Asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo trukmės likutinio resurso ir kelių dangos stiprinimo optimalaus momento nustatymo teorinė interpretacija pateikta 2.6 ir 2.7 paveiksluose.

Priėmėme, kad kelių dangos konstrukcija tradiciškai yra stiprinama vizualiai įvertinus dangos suirties mastą pažaidų tipo ir suirties masto idealiam atvejui – kai projektinių automobilių eismo intensyvumas $N_p = \text{const}$, o asfaltbetonio danga yra pažeista (dangos paviršiuje atsiranda plyšiai dėl medžiagos nuovargio). Laikui T bėgant, dėl suirties, asfaltbetonio sluoksnio stipris R sumažėja nuo R_0 iki $R^{(T_0)}$, tada asfaltbetonio dangos funkcionavimo trukmė tampa T_0 ir yra įrengiamas $H_1^{(0)}$ storio kelių dangos stiprinimo naujas asfaltbetonio sluoksnis, kurio stipris R_0 , o kaina $C_1^{(0)}$.



2.6 pav. Grafikas kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių stiprio mažėjimui pavaizduoti ir jo stiprinimo naujo sluoksnio įrengimo momentui parodyti



2.7 pav. Grafikai kelių dangos stiprinimo optimaliam momentui nustatyti: a) kelių dangos dangos storių santykio atžvilgiu, b) planuojamų išlaidų santykio atžvilgiu

Taikant šį požiūrį, kelių dangos konstrukciją stiprinti tikslinga ankstėliau (žr. 2.7 pav.). Tada tarpremontiniai laikotarpiai būna trumpesni už tradiciškai taikomus laikotarpius $T_i < T_0 = T_f$, atitinkamai būna mažesnis ir dangos stiprinimo reikalingas storis $H_i < H_0$ (dangos stipris prilyginamas funkcionavimo pradžioje buvusiam jos stipriui, įvertinus jos pradinės būklės sąlygas), mažesnės būna ir išlaidos kelių dangos remontui (stiprinimo sluoksniui įrengti) $C_i < C_0$.

Per tam tikrą laikotarpį T_Σ , lygų keleriems (n) kelių dangos tarpremontiniams laikotarpiams $T_\Sigma = nT_0$, jos konstrukcijos stiprinimo sluoksnių storis ΣH_0 ir ΣH_T bei visos išlaidos dangai stiprinti ΣC_0 ir ΣC_T gali būti pateikti pradiniam laiko momentui T_0 . Tada, įvertinus nustatytų suminių storių ir planuojamų išlaidų santykius, atitinkamai, $\Sigma H_T / \Sigma H_0$ ir $\Sigma C_T / \Sigma C_0$, galima rasti tokius dangos numatomo stiprinimo momentus (tarpremontinį laikotarpį

$T_{rem}^{(opt)}$), kad visos išlaidos stiprinimo sluoksniams įrengti būtų mažiausios.

Nustatant T_0 , galima rasti tokį $T_i = T_{rem}^{(opt)}$, kai reikalingas kelių dangos stiprinimo sluoksnio storis Δh bus artimas arba lygus optimaliam $\Delta h \rightarrow \Delta h(opt)$.

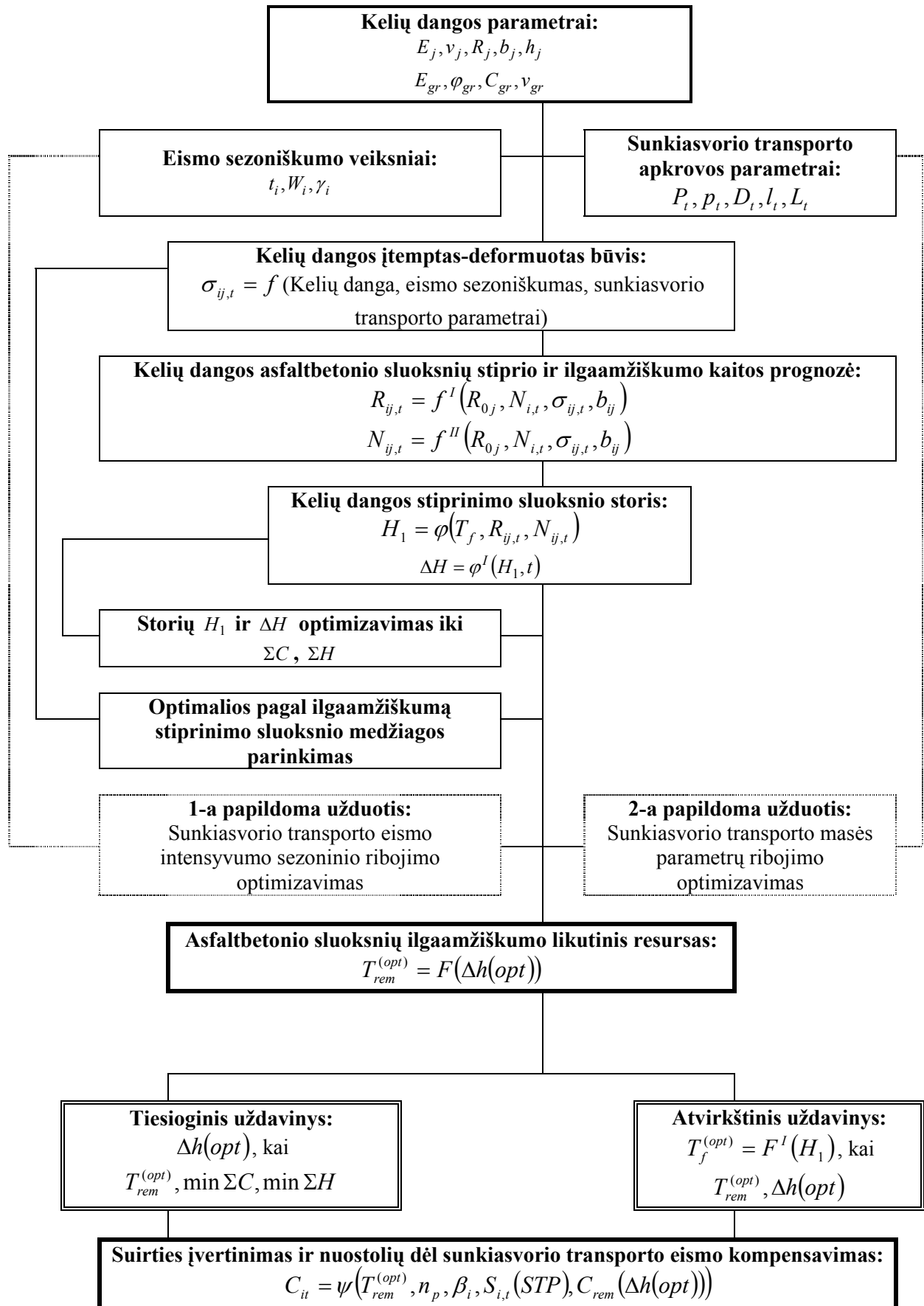
Pagal (2.37) formulę, įvertinus transporto priemonių eismo intensyvumą ir sudėtį, dangos remonto darbų kainą, kapitalo investicijų efektyvumą, kelių dangos stiprio ir suirties rodiklius bei jos sluoksnių medžiagų nuovargio rodiklį bei jos viršutinio sluoksnio, skirto dangai stiprinti, savybes, galima nustatyti kelių dangos optimalų tarpremontinį laikotarpį. Žinant rodiklį $T_{rem}^{(opt)}$, galima nustatyti asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo (būtinų remonto darbų tam tikram momentui) likutinį resursą. Taikant šį likutinio resurso rodiklį, galima įvertinti kelių dangos likutinį stiprį, asfaltbetonio sluoksnių storį ir prognozuoti jų pokyčius laikui bėgant.

Panaudojus mūsų tyrimus galima teigti, kad kelių dangos konstrukcijos funkcionavimo trukmės likutinis resursas gali būti apibūdintas vienu iš šių parametrų: asfaltbetonio sluoksnių likutiniu stipriu – atsparumu tempimui lenkiant, apkrovos, kurią asfaltbetonio sluoksniai gali atlaikyti iki suirties, poveikių (pridėjimų) skaičiumi, asfaltbetonio sluoksnių likutiniu (savo stipriu ekvivalentiniu pirminiam storiui) storiu, funkcionavimo trukme nuo nagrinėjamo momento iki momento, kai būtina stiprinti kelių dangos konstrukciją. Visi šie parametrai yra glaudžiai tarpusavyje susiję, tačiau sąvokoje “likutinis resursas” prioritetą tenka stipriui, nes kiti rodikliai (funkcionavimo trukmė, ekvivalentinis storis, apkrovos pridėjimų skaičius) priklauso nuo kelių dangos konstrukcijos stiprio.

Naudojant svarbiausius parametrus – kelių dangos konstrukcijos realią funkcionavimo trukmę nulemiančius veiksnius (jos stiprį, eismo sezoniškumą, sunkiasvorio transporto ratų apkrovą ir pridėtų apkrovų skaičių), išsprendėme asfaltbetonio racionalios funkcionavimo trukmės įvertinimo uždavinį. Jis pagrįstas asfaltbetonio sluoksnių medžiagų funkcionavimo trukmės bei stiprio pokyčių prognoze ir yra orientuotas į dangos ženklios suirties, nulemiančios dangos eksploatacinių savybių blogėjimą, prevenciją. Pagal šį sprendinį sudarėme sunkiasvorio transporto ardančiojo poveikio asfaltbetonio sluoksniams įvertinti modelį (žr. 2.8 pav.). Pasiūlytu modeliu numatomi du galimi asfaltbetonio sluoksnių suirties nustatymo variantai:

- 1) tiesioginis uždavinys – asfaltbetonio stiprinimo sluoksnio storio bei būsimos funkcionavimo trukmės parinkimas projektuojant (konstruojant) kelių dangos konstrukcijas;
- 2) atvirkštinis uždavinys – asfaltbetonio stiprinimo sluoksnio storio parinkimas asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo metu.

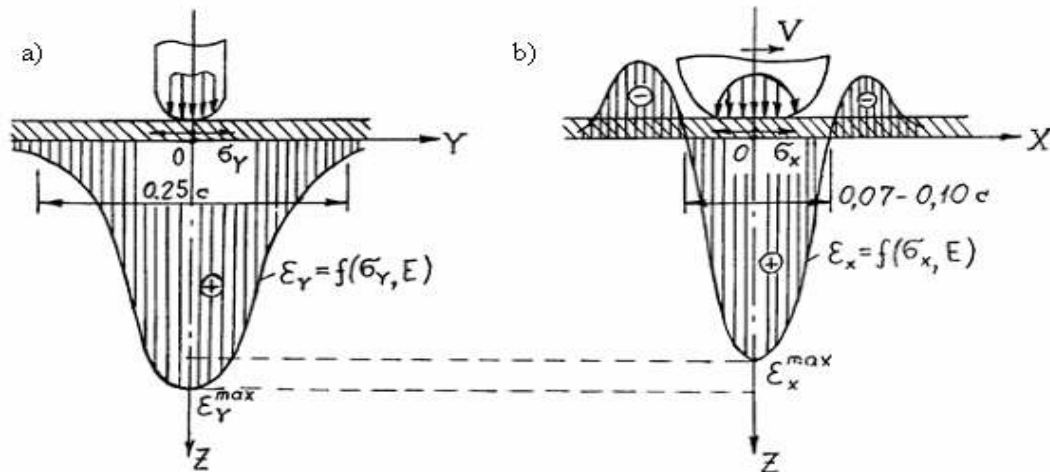
Naudojant šį modelį pasiūlėme kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo trukmės ir stiprio likutinės vertės nustatymo metodiką (žr. 2.4 skirsnį).



2.8 pav. Sunkiasvorio transporto eismo ardančiojo poveikio kelių dangos asfaltbetonio sluoksniams įvertinti modelis

2.4. Kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo trukmės ir likutinio stiprio nustatymo metodika

Pasinaudoję tyrimais [14, 16, 139], kelių dangos konstrukcijai projektuoti taikėme 2.9 paveiksle pateiktą schemą.



2.9 pav. Kelių dangos konstrukcijos norminių santykinų deformacijų epiūrų schema:

a) skersine eismo kryptimi; b) išilgine eismo kryptimi

Pasinaudoję [9] darbu nustatėme, kad tikimybė nuo pridėtos apkrovos asfaltbetonio sluoksniuose susidaryti plyšiams bei jiems didėti leistinu greičiu gali būti įvertinama naudojant kelių dangos stiprio kriterijų – asfaltbetonio sluoksnių atsparumą tempimui lenkiant.

Kelių dangos sluoksnio funkcionavimo sąlygų ir galimybių analizei supaprastinti įvertinome medžiagų rišančiąsias savybes ir pagal [16] darbo nuostatas priėmėme, kad (žr. 2.9 pav.):

- sąlyginis apkrovos veikimo laikas, kai automobilių važiavimo greitis yra 50–70 km/h, trunka 0,07–0,10 s;
- veikiant trumpalaikiai apkrovai asfaltbetonio sluoksniuose susidarančios tampriosios deformacijos yra grįžtamosios;
- santykinės horizontaliosios pailgėjimo ir suspaudimo deformacijos, susidarančios kelių dangos apatiniuose ir viršutiniuose asfaltbetonio sluoksniuose, plinta vienodai ir tarpusavyje bet kuriuo momentu būna lygios (tapačios);
- esant vienodai apkrovos trukmei, ryšys tarp deformacijų ir įtempių būna linijinis (tiesinis).

Pagal [14, 16, 17, 25, 52, 58–63] darbuose išdėstytas nuorodas nustatant įtempius asfaltbetonio sluoksnyje, taikome šias sąlygas:

1) asfaltbetonio sluoksnis suirs, kai pažaidų visuma bus lygi vienetui (Palmgren–Mainer taisyklė);

2) tarp sluoksnio medžiagos stiprio R , pridedamos apkrovos P ir jos poveikio intensyvumo N yra laipsninė priklausomybė;

3) apkrovos pridėjimo momentu susidarančioms pažaidoms taikoma linijinė (tiesinė) sumavimo taisyklė.

Įvertiname, kokią įtaką i -tasis laikotarpis T_i , kurio metu kelių dangos konstrukcija stiprinama, turi visai kelių dangos funkcionavimo trukmei. Nustatėme, kad tam tikro etaloninio storio H_0 bandinys pridedamą apkrovą P iki suirties gali atlaikyti N_0 kartų (žr. (2.1) bei (2.10) formules ir 2.1 pav.):

$$N_0 = \left(\frac{R_0}{\sigma_0} \right)^b = k R_0^b H_0^{2b}, \text{ vnt.}, \quad (2.42)$$

čia: R_0 – bandinio pradinis (projektinis) stipris, MPa; σ_0 – H_0 storio bandinio tempimo įtempiai, MPa; b – parametras, apibūdinantis asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo trukmės nuovargį esant apkrovos lygiui σ / R ;

$$k = \left(\frac{4B}{6Pl} \right)^b \quad (2.43)$$

B – bandinio plotis, cm; l – atstumas tarp lenkiamo bandinio atramos vietų, cm.

Priėmėme, kad nagrinėjamas etaloninio storio H_0 bandinys būtų modeliuojamas taip: pradinis mažesnio storio H_I bandinys ($H_I < H_0$) apkraunamas apkrova P $N_I < N_0$ kartų ir jame susidaro tempimo įtempiai σ_I , tada įrengiamas H_{II} storio stiprinimo sluoksnis, kad visas bandinio storis būtų pastovus ir lygus pradiniam (etaloniniam) storiui H_0 ($H_I + H_{II} = H_0$), bandinys vėl apkraunamas apkrova P N_0 kartų iki visiškos jo suirties.

Apskaičiavome (pasinaudodami (2.12) formule), kiek ciklų $N_I^*(\sigma_I)$ pridedamą apkrovą P atlaikys iki visiškos suirties H_I storio bandinio apatinis sluoksnis:

$$N_I^*(\sigma_I) = \left(\frac{R_I}{\sigma_I} \right)^b = \left(R_0 \left[1 - N_I \left(\frac{\sigma_I}{R_0} \right)^b \right]^{\frac{1}{b}} \frac{1}{\sigma_I} \right)^b, \text{ vnt.}, \quad (2.44)$$

čia: R_0 – bandinio pradinis (projektinis) stipris, MPa; R_I – H_I storio bandinio apatinio sluoksnio stipris, MPa; N_I – apkrovos P pridėjimo į H_I storio bandinio apatinį sluoksnį ciklų skaičius, vnt.; b – parametras, apibūdinantis asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo trukmės nuovargį esant apkrovos lygiui σ/R ; σ_I – tempimo įtempiai H_I storio bandinio apatiniame sluoksnyje:

$$\sigma_I = \frac{1}{k^{\frac{1}{b}} H_I^2}, \text{ MPa.} \quad (2.45)$$

(2.44) formulę pertvarkome taip:

$$N_I^*(\sigma_I) = N_0 \left(1 - \frac{N_I}{N_0} \left(\frac{H_0}{H_I} \right)^{2b} \right), \text{ vnt.} \quad (2.46)$$

Nustatėme tiriamojo H_{II} storio bandinio viršutinio sluoksnio funkcionavimo likutinį resursą, t.y. kiek ciklų $N_{II}(\sigma_{II})$ pridėdamą apkrovą P gali atlaikyti H_{II} storio bandinio viršutinis sluoksnis (kai apkrova P buvo pridėta $N_{II}(\sigma_{II}) = N_I^*(\sigma_I)$ kartu):

$$N_{II}(\sigma_{II}) = \left(\frac{R_0 - R_I}{\sigma_{III}} \right)^b, \text{ vnt.} \quad (2.47)$$

čia: σ_{III} – tempimo įtempiai H_{II} storio bandinio viršutiniame sluoksnyje, MPa, nustatomi pagal žinomas formules [16, 17, 62]:

$$\sigma_{III} = \frac{Pl}{4} \frac{12}{B(H_I + H_{II})^3} y_n, \text{ MPa,} \quad (2.48)$$

y_n – atstumas nuo neutralios plokštumos iki taško, kuriame būtina nustatyti įtempius σ_{III} , cm:

$$y_n = \frac{H_0}{2} - H_I, \text{ cm.} \quad (2.49)$$

Apskaičiavę $N_{II}(\sigma_{II})$, nustatėme H_{II} storio bandinio viršutinio sluoksnio likutinį stiprį:

$$R_I = R_0 - (N_{II})^{\frac{1}{b}} \sigma_{III} = R_0 - (N_I^*)^{\frac{1}{b}} \sigma_{III}, \text{ MPa.} \quad (2.50)$$

Tolesniems skaičiavimams taikėme [16] darbo nuostatas, kad iš visų pusių suslėgtam asfaltbetonio bandiniui funkcionuojant, pažaidos jame nesikaupia (t.y. kai $y_n \leq 0$, $R_I = R_0$). Asfaltbetonio bandinį lenkiant, jis tempiamas ir slegiamas funkcionuoja taip pat (t.y. $\sigma^{(+)} = \sigma^{(-)}$). Taigi:

$$\begin{cases} R_I = R_0, & y_n \leq 0 \\ R_I = R_0 - \left(\frac{N_I^*}{k} \right)^{\frac{1}{b}} \frac{H_0 - 2H_I}{H_0^3}, & y_n > 0 \end{cases}, \text{ MPa.} \quad (2.51)$$

Pasinaudoję (2.12) formule nustatėme, kiek ciklą $N_{II}(\sigma_{II})$ pridedamą apkrovą P gali atlaikyti H_{II} storio bandinio viršutinis sluoksniš:

$$\begin{cases} N_{II}^*(\sigma_{II}) = \left(\frac{R_I}{\sigma_{II}} \right)^b, & y_n \leq 0 \\ N_{II}^*(\sigma_{II}) = \left(\frac{R_0}{\sigma_{II}} \right)^b = N_0 \left(1 - \frac{H_I}{H_0} \right)^{2b}, & y_n > 0 \end{cases}, \text{ vnt.} \quad (2.52)$$

čia: σ_{II} – tempimo įtempiai H_{II} storio bandinio viršutiniame sluoksnyje:

$$\sigma_{II} = \frac{1}{k^{\frac{1}{b}} H_{II}^2}, \text{ MPa.} \quad (2.53)$$

Įvertinus (2.46) ir (2.51) lygtis, formulę (2.52) užrašėme taip:

$$N_{II}^*(\sigma_{II}) = N_0 \left\{ \left(1 - \frac{H_I}{H_0} \right)^2 - \left[1 - \frac{N_I}{N_0} \left(\frac{H_0}{H_I} \right)^{2b} \right]^{\frac{1}{b}} \left[\frac{H_I}{H_0} - 3 \left(\frac{H_I}{H_0} \right)^2 + \left(\frac{H_I}{H_0} \right)^3 \right] \right\}^b, \text{ vnt.} \quad (2.54)$$

Nustatėme, kad apatiniame (H_I) ir viršutiniame (H_{II}) bandinio sluoksniuose susidarys skirtingi pagal vertę bei kryptį tempimo įtempiai σ , nuo kurių priklauso ribinis apkrovų, kurias

sustiprintas bandinys gali atlaikyti iki visiškos suirties, ciklas:

a) apatiniame sluoksnyje

$$N_{\Sigma I} = N_I(\sigma_I) + N_I^*(\sigma_I), \text{ vnt.}; \quad (2.55)$$

b) viršutiniame sluoksnyje

$$N_{\Sigma II} = N_{II}(\sigma_{II}) + N_{II}^*(\sigma_{II}), \text{ vnt.}, \quad (2.56)$$

čia: $N_I(\sigma_I)$ – pradinis į H_I storio bandinį pridedamos apkrovos P ciklų skaičius, vnt.; $N_I^*(\sigma_I)$ ir $N_{II}^*(\sigma_{II})$ – į $H_I + H_{II}$ storio (sustiprintą) bandinį pridedamos apkrovos P , po kurios poveikio H_I storio apatiniame jo sluoksnyje nebelieka stiprio R_{H_I} ($R_{H_I} = 0$), ciklų skaičius, vnt.; $N_{II}^*(\sigma_{II})$ – į $H_I + H_{II}$ storio (sustiprintą) bandinį pridedamos apkrovos P , iki visiškos jo suirties R_{H_I+II} ($R_{H_I+II} = 0$), ciklų skaičius, vnt.

Sustiprinto bandinio funkcionavimo trukmė yra visų bandinio sluoksnių funkcionavimo trukmių visuma N_{Σ} :

$$N_{\Sigma} = N_I(\sigma_I) + N_I^*(\sigma_I) + N_{II}^*(\sigma_{II}), \text{ vnt.}, \quad (2.57)$$

arba

$$N_{\Sigma} = N_I(\sigma_I) + N_{II}(\sigma_{II}) + N_{II}^*(\sigma_{II}), \text{ vnt.} \quad (2.58)$$

Įvertinę (2.46), (2.54), (2.57) ir (2.58) lygtis, pridedamos apkrovos P , kurią stiprintas bandinys gali atlaikyti iki suirties, ciklų skaičių N_{Σ} nustatėme taip:

$$\begin{cases} N_{\Sigma} = N_I(\sigma_I) + N_0 \left[1 - \frac{N_I \left(\frac{H_0}{H_I} \right)^{2b}}{N_0 \left(\frac{H_0}{H_I} \right)} \right] + N_0 \left\{ \left(1 - \frac{H_I}{H_0} \right)^2 - \left[1 - \frac{N_I \left(\frac{H_0}{H_I} \right)^{2b}}{N_0 \left(\frac{H_0}{H_I} \right)} \right]^{\frac{1}{b}} \left[\frac{H_I}{H_0} - 3 \left(\frac{H_I}{H_0} \right)^2 + 3 \left(\frac{H_I}{H_0} \right)^3 \right] \right\}, & y_n > 0, \\ N_{\Sigma} = N_I(\sigma_I) + N_0 \left(1 - \frac{N_I \left(\frac{H_0}{H_I} \right)^{2b}}{N_0 \left(\frac{H_0}{H_I} \right)} \right) + N_0 \left(1 - \frac{H_I}{H_0} \right)^{2b}, & y_n \leq 0. \end{cases} \quad \text{vnt.}, \quad (2.59)$$

Formulėse (2.59) rodiklių H_0 ir H_I bei N_I ir N_0 santykį pakeitėme santykiniais dydžiais x ir y :

$$\frac{H_I}{H_0} = x \quad \text{ir} \quad \frac{N_I}{N_0} = y, \quad (2.60)$$

Tada į (2.59) lygtis įstatėme (2.60) formulės santykinius dydžius ir abi šių lygčių puses padalinome iš N_0^* :

$$\begin{cases} \frac{N_\Sigma}{N_0} = 1 - y \left(\frac{1}{x^{2b}} - 1 - \frac{1}{y} \left((1-x^2) - \left(1 - \frac{y}{x^{2b}} \right)^{\frac{1}{b}} (x - 3x^2 + 3x^3) \right) \right)^b, & y_n > 0, \\ \frac{N_\Sigma}{N_0} = y + 1 - y \frac{1}{x^{2b}} + (1-x)^{2b} = 1 - y \left(\frac{1}{x^{2b}} - 1 \right) + (1-x)^{2b}, & y_n \leq 0. \end{cases} \quad (2.61)$$

Taigi sąlyginę sustiprinto bandinio funkcionavimo trukmę, žiūrint jo sluoksnio pradinio H_I storio bei sluoksnio stiprinimo H_{II} storio, gali būti nustatyta taip:

$$\begin{cases} \frac{N_\Sigma}{N_0} = 1 - y \left[\frac{1}{x^{2b}} - 1 - \frac{1}{y} \left((1-x)^2 - \left(1 - \frac{y}{x^{2b}} \right)^{\frac{1}{b}} (x - 3x^2 + 3x^3) \right) \right]^b, & 0 < x < 0,5, \end{cases} \quad (2.62)$$

$$\begin{cases} \frac{N_\Sigma}{N_0} = 1 - y \left(\frac{1}{x^{2b}} - 1 \right) + (1-x^2), & 0,5 \leq x \leq 1. \end{cases} \quad (2.63)$$

Žinant bandinio apatinio sluoksnio storį bei likutinį stiprį pagal formules (2.62) ir (2.63) galima nustatyti sustiprinto bandinio santykinę funkcionavimo trukmę (stiprinimo sluoksniai visada yra plonesni nei visas asfaltbetonio sluoksnių storis ar jų projektinis storis). Tolesniems skaičiavimams taikėme (2.63) formulę, nes ji yra paprastesnė.

Formulės (2.63) išraišką $(1-x^2)$, dėl jos mažos vertės, atmetame:

$$\frac{N_\Sigma}{N_0} = 1 - y \left(\frac{1}{x^{2b}} - 1 \right). \quad (2.64)$$

Priėmėme, kad $0,5 \leq x \leq 1,0$ (žr. (2.63) formulę), todėl formulė (2.64) visada yra teigiama ir didesnė už vienetą, išskyrus atvejį, kai $x=1$. Pagal tai, esant bet kokiam pirminiam storiui ($H_I < H_0$), santykinė kelių dangos funkcionavimo trukmė bus mažesnė už vienetą ($N_\Sigma < N_0$), išskyrus atvejus, kai $H_I = H_0$ ir $H_{II} = 0$. Formulė (2.64) grindžiama prielaida, kurią taikėme nuo pat pradžios – etaloninio ir sustiprinto bandinių storiai yra lygūs.

Nagrinėjome atvirkštinį uždavinį, kuriame bandinių funkcionavimo trukmė yra žinoma

(žr. (2.65) formulę), o bandinio storis nežinomas (žr. (2.66) formulę):

$$N_0 = N_\Sigma = N_I + N_{II}^* = \text{const}, \quad (2.65)$$

ir

$$H_\Sigma = H_I + H_{II} \neq H_0. \quad (2.66)$$

Tada, pertvarkius lygtį (2.64), sustiprinto bandinio funkcionavimo trukmė N_Σ :

$$N_\Sigma = N_I + kR_0^b H_0^{2b} \left(1 - \frac{N_I}{kR_0^b H_I^{2b}} \right), \text{ MPa}. \quad (2.67)$$

Jeigu pakeisime dydžius $N_\Sigma = N_0$ ir $H_0 = H_\Sigma$, tada formulė (2.67) tenkins (2.65) lygties sąlygą:

$$N_0 = N_I + kR_0^b H_\Sigma^{2b} \left(1 - \frac{N_I}{kR_0^b H_I^{2b}} \right), \text{ MPa}. \quad (2.68)$$

Pagal (2.68) lygtį nustatysime bandinio, galinčio atlaikyti $N_0 = \text{const}$ kartų pridėdamas apkrovas, storį H_Σ arba bandinio storį H_Σ , išreikštą santykiniais dydžiais:

$$H_\Sigma = H_0 \left(\frac{1 - \frac{N_I}{N_0}}{1 - \left(\frac{H_0}{H_I} \right)^{2b} \frac{N_I}{N_0}} \right)^{\frac{1}{2b}}, \text{ cm} \quad (2.69)$$

$$\frac{H_\Sigma}{H_0} = \left(\frac{1 - y}{1 - \left(\frac{1}{x} \right)^{2b} y} \right)^{\frac{1}{2b}}. \quad (2.70)$$

Kadangi $0,5 \leq x \leq 1,0$ (žr. (2.63) formulę), todėl (2.70) formulės dešinės pusės vardiklis visada bus mažesnis už skaitiklį, išskyrus atvejį, kai $x = 1$. Pagal tai, pridėjus bet kokią pradinę

apkrovos P ciklų skaičių N_I ($N_I < N_0$), santykinis bandinio storis visada bus didesnis už vienetą ($H_I + H_{II} > H_0$), išskyrus atvejus, kai $N_I = N_0$ ir $N_{II} = 0$.

Pagal formulę (2.48) priimtina, kad viso bandinio stipris yra vienodas. Jeigu bandinį tam tikru momentu t stiprinsime, tai viršutinio ir apatinio jo sluoksnių stipris skirsis – $R_0(H_I) < R_0(H_{II})$. Pasinaudoję šia prielaida, bandinio H_I storio apatinį sluoksnį pakeitėme savo likutine funkcionavimo trukme jam tapačiu H_I^{ekv} storio ekvivalentiniu sluoksniu, kurio stipris toks pat, kaip ir H_{II} storio viršutinio stiprinimo sluoksnio stipris $R_0(H_I^{ekv}) < R_0(H_{II})$. Tada, pasinaudoję [14] darbu, apskaičiavome, kaip pridėjus apkrovą P sumažėja ekvivalentinis bandinio sluoksnio storis H_I^{ekv} :

a) kai pradinis stipris R_0 kinta R_0^k , o bandinio apatinio sluoksnio storis H_I nesikeičia (σ_I pastovus) H_I^p :

$$N = \left(\frac{R_0}{\sigma} \right)^b = \left[R_0^k \left(1 - N_I \left(\frac{\sigma_I}{R_0^k} \right)^b \right)^{\frac{1}{b}} \frac{(H_I^p)^2}{k} \right]^b, \text{ vnt.} \quad (2.71)$$

b) kai pradinis stipris R_0 pastovus R_0^p , o bandinio apatinio sluoksnio storis H_I kinta (σ_I kinta) H_I^k :

$$N = \left(\frac{R_0}{\sigma} \right)^b = \left[R_0^p \frac{(H_I^k)^2}{k} \right]^b, \text{ vnt.} \quad (2.72)$$

Formules (2.71) ir (2.72) tarpusavyje sulyginome ir priėmėme, kad $R_0^k = R_0^p$:

$$(H_I^k)^2 = (H_I^p)^2 \left[1 - N_I \left(\frac{\sigma_I}{R_0^k} \right)^b \right]^{\frac{1}{b}} \quad (2.73)$$

ir

$$H_{i+1} = H_i \sqrt[1]{1 - N_i \left(\frac{\sigma_i}{R_i} \right)^b}. \quad (2.74)$$

Nustatėme bandinio, kuris N_I kartų apkraunamas apkrova P , ekvivalentinį likutinį storį:

$$H_I^{ekv} = H_I \sqrt{\left[1 - N_I \left(\frac{\sigma_I}{R_0} \right)^b \right]^{\frac{1}{b}}} . \quad (2.75)$$

Tada palyginame sustiprinto ir etaloninio bandinių, kai jų funkcionavimo trukmė stabili ir vienoda ($T_\Sigma = T_0$), storį ($H_\Sigma = H_0$). Nustatėme, kad sustiprinto bandinio storis H_Σ visada bus didesnis už jo etaloninį storį H_0 , todėl sutaupyti medžiagas ar pratęsti bandinio funkcionavimo trukmę, mažinant bandinio pradinį storį ($H_I < H_0$), nepavyks. Sustiprinto bandinio storis H_Σ / H_0 ženkliai priklauso nuo bandinio pradinio storio H_I / H_0 ir pridėtų apkrovos P ciklų pradinio skaičiaus N_I / N_0 .

Taikydami [16] darbe nurodytas apkrovos P ciklų pradinio skaičiaus N_I / N_0 kitėjimo ribas $0,75 \leq N_I / N_0 \leq 1,0$, didžiausią sustiprinto bandinio storio H_Σ / H_0 vertę galima laikyti stabilia, tariant, kad bandinio medžiagos nuovargio rodiklis b yra pastovus:

- a) kai $b = 4$, $H_\Sigma / H_0 \approx 2,0 \div 2,1$;
- b) kai $b = 5$, $H_\Sigma / H_0 \approx 1,7$;
- c) kai $b = 6$, $H_\Sigma / H_0 \approx 1,6$.

Taigi, didėjant nuovargio rodikliui b (b vertės priklauso nuo asfaltbetonyje esančio bitumo markės (klampos)), mažėja sustiprinto dangos sluoksnio storis H_Σ , tačiau, tuo pačiu, mažėja apkrovos P pridėjimo leistinasis skaičius N_I / N_0 sustiprinto bandinio apatiniam sluoksniui H_I / H_0 . Pagal tai nustatėme, kad bandinio stiprinimo sluoksnio įrengimas yra netikslingas, kai $H_I / H_0 < 0,9$, o į bandinio H_I storio pradinį sluoksnį apkrovos P pridėjimo pradinis leistinasis skaičius turi būti $N_I / N_0 \leq 0,3 \div 0,5$.

Kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo trukmę bei sluoksnių likutinį stiprį siūlome nustatyti šia seka:

I. Nustatome šiuos pradinius parametrus:

N_f – transporto priemonių faktinį eismo intensyvumą viena eismo juosta nagrinėjamuoju laikotarpiu (vidutinis metinis paros intensyvumas, redukuojamas į projektinę apkrovą), aut./parą;
 t – kelių dangos konstrukcijos funkcionavimo trukmę nuo jos įrengimo (paskutinio kapitaliojo remonto) iki nagrinėjamojo momento, metais;

E_i – kelių dangos konstrukcijos sluoksnių medžiagų tampros moduliai, MPa;
 ν_i – kelių dangos konstrukcijos sluoksnių medžiagų Puasono koeficientus [9];
 h_i – kelių dangos konstrukcijos sluoksnių storius, cm;
 R_i – asfaltbetonio sluoksnių medžiagų stipriųjų funkcionavimo pradžioje, MPa;
 b_i – asfaltbetonio sluoksnių medžiagų nuovargio rodiklius jų funkcionavimo pradžioje;
 E_{gr} – žemės sankasos grunto tampros modulis, MPa;
 φ_{gr} – žemės sankasos grunto vidinės trinties kampą, laipsniais;
 C_{gr} – žemės sankasos grunto lyginamąją sankibą, MPa.

II. Apskaičiuojame asfaltbetonio sluoksnių tempimo lenkiant įtempius σ_{l_0} (veikiant projektinei D_{p_0} parametro apkrovai P_0) šių sluoksnių funkcionavimo pradžioje (jų įrengimo pabaigoje ar po paskutiniojo kapitaliojo remonto) pagal tamprumo teoriją [9, 16, 30]:

$$\sigma_{l_0} = f(P_0, D_{p_0}, E_{i_0}, \nu_{i_0}, h_{i_0}, R_{i_0}), \text{ MPa} \quad (2.76)$$

čia: P_0 – rato slėgis į kelių dangą, MPa; D_{p_0} – projekcinio automobilio rato pėdsako plotą atitinkančio skritulio skersmuo, cm.

III. Apskaičiuojame, kiek kartų (ciklų) N_0 gali būti pridėta apkrova P_0 (su įtempiais σ_{l_0}), kurią (jos pradinis stipris R_0 ir nuovargio rodiklis b_0) gali atlaikyti kelių danga iki jos viršutiniame asfaltbetonio sluoksnyje (per visą jo storį) susidarys vertikalūs plyšys:

$$N_0 = \left(\frac{R_{i_0}}{\sigma_{l_0}} \right)^{b_0}, \text{ vnt.} \quad (2.77)$$

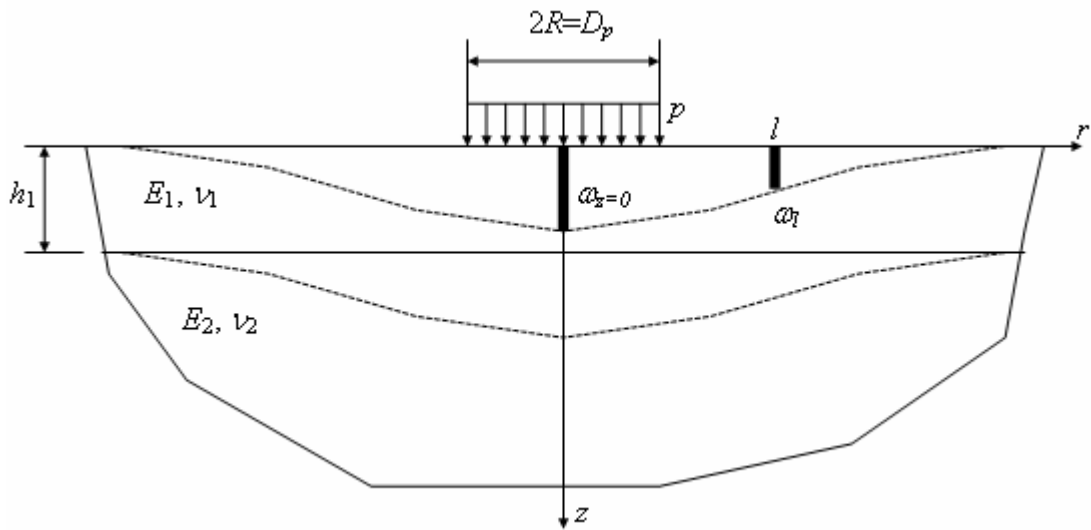
IV. Instrumentiniais matavimais nustatome kelių dangos tampriojo įlinkio l (apkrovos P veikimo $\omega_{z=0}$ kryptimi) vertes (2.10 pav.).

V. Pasinaudoję [81, 134–137] darbais dvisluoksnei sistemai apskaičiuojame kelių dangos faktinius tampros moduliai (žr. 2.10 pav.):

$$\frac{E_2}{E_1} = \left[\frac{h_1}{D_p} \operatorname{tg} \left(1,22 \frac{R}{l} \sqrt{\frac{\omega_{z=0}}{\omega_l} - 1} \right) \right]^3, \quad (2.78)$$

$$E_1 = \frac{3}{4} \frac{PD_p}{\omega_{z=0}} \left(\frac{\frac{E_1}{E_2} - 1}{\sqrt{4 \left(\frac{h_1}{D_p} \right)^2 \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{\frac{2}{3}} + 1}} + 1 \right), \text{ MPa}, \quad (2.79)$$

$$E_2 = \frac{E_2}{E_1} E_1, \text{ MPa}. \quad (2.80)$$



2.10 pav. Schema kelių dangos sluoksnių tampros moduliams apskaičiuoti

VI. Pasinaudoję [9] darbo rekomendacijomis, atliekame tyrimus laboratorijoje ir nustatome asfaltbetonio bandinių atsparumą tempimui lenkiant R_l bei jų nuovargio rodiklį b_l . Bandiniai parenkami pagal asfaltbetonio tiriamų sluoksnių medžiagas kelių dangos likutinio stiprio tyrimo momentui.

VII. Apskaičiuojame asfaltbetonio sluoksnių tempimo lenkiant įtempius σ_{l_t} (veikiant D_{p_0} parametro projektinei apkrovai P_0) kelių dangos funkcionavimo momentui t :

$$\sigma_{l_t} = f(P_0, D_{p_0}, E_{l_t}, \nu_{l_t}, h_{l_t}, R_{l_t}), \text{ MPa}. \quad (2.81)$$

VIII. Apskaičiuojame, kiek kartų (ciklų) N_t gali būti pridėta apkrova P_0 (su įtempiais σ_{l_0}), kurią kelių danga (jos likutinis stipris R_{l_t} ir nuovargio rodiklis b_l) gali atlaikyti iki momento, kai jos asfaltbetonio sluoksnyje (per visą jo storį) susidarys vertikalus plyšys:

$$N_t = \left(\frac{R_{lt}}{\sigma_{lt}} \right)^{b_t}, \text{ vnt.} \quad (2.82)$$

IX. Apskaičiuojame kelių dangos funkcionavimo trukmės resurso netektį:

$$R_N = \frac{N_0 - N_t}{N_0} 100\%, \text{ MPa.} \quad (2.83)$$

X. Apskaičiuojame kelių dangos stiprio netektį:

$$R_R = \frac{R_0 - R_t}{R_0} 100\%, \text{ MPa.} \quad (2.84)$$

XI. Apskaičiuojame laikotarpį, kurio metu asfaltbetonio sluoksnis suirs (kai per visą kelių dangos asfaltbetonio sluoksnio storį susidarys vertikalūs plyšys):

$$T = \frac{N_t}{365N_f}, \text{ metais.} \quad (2.85)$$

2.5. Išvados

1. Pasiūlytas metodas kelių dangos funkcionavimo racionaliai trukmei nustatyti (žr. (2.12) formulę ir 2.8 pav.). Jis pagrįstas asfaltbetonio sluoksnių medžiagų funkcionavimo trukmės bei stiprio pokyčių prognoze ir orientuotas į kelių dangos ženklios suirties prevenciją. Taikant šį metodą, galima nustatyti asfaltbetonio sluoksnio optimalų storį (projektuojant arba stiprinant kelių dangas) ir numatyti šio sluoksnio savybių išsaugojimo racionalią strategiją. Pateiktas modelis (žr. 2.8 pav.) sunkiasvorio transporto ardančiojo poveikio kelių dangos asfaltbetonio sluoksniams įvertinti. Modelis įvertina asfaltbetonio sluoksnio medžiagos stiprio kitėjimą, pagal kurį galima prognozuoti kelių dangos būklę jos funkcionavimo laikotarpiu.

2. Pasiūlytas kelių dangos funkcionavimo trukmės modelis (žr. 2.8 pav.) įvertina apkrovos parametrus (jos vertės bei poveikių skaičių, t.y. transporto priemonių srauto sudėtį), asfaltbetonio sluoksnių bei kelių dangai sustiprinti naudojamų medžiagų savybes bei dangos stiprio kitėjimą didėjant jos suirties mastui, priklausomai nuo vietinių sąlygų (gruntų ir hidrologinių bei klimato veiksnių), remonto darbų kainą bei ekonominį efektą stiprinant kelių

dangą.

3. Nustatytas projektinių automobilių leistinasis eismo intensyvumas (per metus) bet kuriam kelių dangos konstrukcijos ribinio būvio kriterijui (žr. (2.18), (2.22) ir (2.23) formules). Leistinasis eismo intensyvumas priklauso nuo kelių dangos konstrukcijos sluoksnių medžiagų ir žemės sankasos grunto savybių, jos įtempto ir deformuoto būvio, kelių dangos stiprio atsargos koeficiento ir kinta priklausomai nuo vietovės klimato ir gruntų bei hidrologinių sąlygų.

4. Išanalizavus kelių dangos įtemptąjį-deformuotąjį būvį, nustatėme ekvivalentinę (leistinąją) i -jo rato apkrovą $P^{(l)}$ šiems jos ribinio būvio kriterijams: šlyčiai žemės sankasos grunte τ bei asfaltbetonio sluoksnių atsparumui tempimui lenkiant σ (žr. (2.28) ir (2.29) formules) ir apkrovos $P^{(l)}$ redukavimo į projektinę ašies apkrovą P_p i -uoju metų laikotarpiu t koeficientus S (žr. (2.30) ir (2.31) formules). Žinant eismo sezoniškumą, kelių dangos stiprį bei projektinę ašies apkrovą, gautomis formulėmis galima įvertinti sunkiasvorio transporto ardantįjį poveikį kelių dangai.

5. Taikant pasiūlytas (2.33–2.37) formules ir nustačius automobilių eismo intensyvumą bei sudėtį, taip pat – kelių dangos remonto darbų kainą, kapitalo investicijų efektyvumą, jos stiprio ir suirties rodiklius bei asfaltbetonio sluoksnių medžiagų nuovargio rodiklius ir asfaltbetonio sluoksnio, skirto dangai sustiprinti, savybes, galima nustatyti kelių dangos optimalų tarpremontinį laikotarpį $T_{rem}^{(opt)}$. Žinant $T_{rem}^{(opt)}$, galima nustatyti asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo (būtinų remonto darbų momentui) likutinį resursą. Lietuvoje šis požiūris į kelių dangos remonto darbus yra naujas. Pagal siūlomą metodą galima nustatyti optimalų santykį tarp asfaltbetonio sluoksnio storio ir jo racionalios būklės išlaikymo strategijos.

6. Taikant pasiūlytą požiūrį (žr. 2.7 pav.), tikslinga atlikti kelių dangos prevencinius remontus. Tada tarpremontiniai laikotarpiai būtų trumpesni už tradiciškai taikomus laikotarpius $T_i < T_0 = T_f$, atitinkamai būtų mažesnis ir reikalingas kelių dangos stiprinimo storis $H_i < H_0$ (dangos patvarumas prilyginamas funkcionavimo pradžioje buvusiam jos patvarumui, įvertinus jos pradinės būklės sąlygas), mažesnės būtų ir kelių dangos remontų išlaidos $C_i < C_0$. Tada, įvertinus nustatytą dangos storio ir planuojamų išlaidų santykius, atitinkamai, $\Sigma H_T / \Sigma H_0$ ir $\Sigma C_T / \Sigma C_0$, galima rasti tokius kelių dangos numatomo stiprinimo momentus (tarpremontinį laikotarpį $T_{rem}^{(opt)}$), kada išlaidos jos stiprinimo sluoksniams įrengti būtų mažiausios.

7. Pasiūlyta kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo trukmės ir likutinio stiprio nustatymo metodika (žr. 2.4 skyrių) yra pagrįsta asfaltbetonio sluoksnių atsparumo tempimui lenkiant (esant ciklinei apkrova) kitėjimo analize. Suirties momentu laikomas asfaltbetonio sluoksnių supleišėjimo momentas.

3. KELIŲ DANGOS LIKUTINIO STIPRIO NUSTATYMO EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

Šio skyriaus medžiaga paskelbta autoriaus publikacijose [2a, 8a, 9a].

3.1. Asfaltbetonio laboratoriniai tyrimai

3.1.1. Tyrimų eigos aprašas

2002–2003 m. laboratorijoje buvo atlikti tyrimai pasiūlyto (žr. 2.12 formulę) kelių dangos suirties masto modelio tinkamumui įvertinti ir asfaltbetonio sluoksnių medžiagų funkcionavimo trukmės rodiklių parametrus nustatyti bei kelių dangos stiprinimo sluoksniui įrengti reikalingo asfaltbetonio mišinio optimaliai sudėčiai nustatyti.

Laboratoriniai tyrimai buvo atliekami trimis etapais. Pirmajame tyrimų etape buvo suprojektuota asfaltbetonio mišinio sudėtis: pagal norminių dokumentų [83, 84] reikalavimus buvo sudaryti kelių dangos viršutinio sluoksnio karšto asfaltbetonio mišiniai (pagal viršutinę, vidurinę ir apatinę granulometrijos kreivių ribas, naudojant, atitinkamai, didžiausią, vidutinę ir mažiausią leistinąjį projektinį bitumo kiekius, masės %). Tyrimai buvo atlikti pagal [9] darbo nurodymus ir buvo parinkti labiausiai kelių dangos stiprinimo sluoksniui tinkami (atsižvelgiant į 2 skyriaus teorinius tyrimus) asfaltbetonio mišiniai. Pagal šių tyrimų rezultatus ir [140] darbo nurodymus buvo parinkta asfaltbetonio mišinio racionali (remiantis 2 skyriaus teoriniais tyrimais) projektinė sudėtis, atitinkanti [9, 83, 84] darbų reikalavimus (žr. 3.1 lent.).

Antrame tyrimų etape pagal pasirinktą asfaltbetonio mišinio projektinę sudėtį (žr. 3.2 lent.) buvo suformuoti asfaltbetonio bandiniai. Šie bandiniai buvo tiriami pagal [9] darbe pateiktas nuorodas – buvo nustatomi optimalūs apkrovos parametrai (dydis ir poveikio trukmė).

Trečiame tyrimų etape buvo nustatytas pasirinktos projektinės sudėties (žr. 3.2 lent.) asfaltbetonio funkcionavimo trukmės rodiklis.

3.1.2. Asfaltbetonio mišinių projektinės sudėties parinkimas

Kelių dangos viršutiniams asfaltbetonio sluoksniams įrengti dažniausiai Lietuvoje naudojamų asfaltbetonio mišinių tampros moduliui bei asfaltbetonio atsparumui tempimui lenkiant patikrinti ir parinkti kelių dangos stiprinimui labiausiai tinkamą asfaltbetonio mišinį, šie mišiniai pagal [9] darbo nuorodas buvo tiriami laboratorijoje. Visos tyrimams reikalingos medžiagos – tai asfaltbetonio mišiniams gaminti Lietuvoje faktiškai naudojamos medžiagos. Medžiagų masė bei pagamintų bandinių skaičius ir tyrimų rezultatai (bandinių atsparumas tempimui lenkiant ir tampros modulis) pateikti 3.1 lentelėje.

Bandinių projektinis atsparumas tempimui lenkiant ir tampros modulis buvo nustatomi pagal [9] darbo metodiką, pateiktą šio darbo III priedo III.1 ir III.2 skirsniuose.

3.1 lentelė. Asfaltbetonio mišiniams pagaminti reikalingų medžiagų masė ir bandinių skaičius bei gautų stiprio rodiklių vertės

Asfaltbetonio tipas	B 70/100 markės bitumo komponentinė dalis, masės %	Pasirinktas bandinių skaičius		Panaudotų medžiagų masė, kg		Stiprio rodikliai		
		Atsparumui (tempimui lenkiant) matuoti	Tampros moduliui matuoti	Mineralinių medžiagų	Bitumo	R_{lenk} , esant 0 °C, MPa	E_p , esant 0 °C, MPa	E_p , esant +10 °C, MPa
0/11S– V_{max}	7,2	6	12	5,4	0,389	2,7	4967	3641
0/11S– V_{vid}	6,6	6	12	5,4	0,356	3,2	6209	4435
0/11S– V_{min}	5,9	6	12	5,4	0,319	2,8	4881	3886
0/11– V_{max}	7,5	6	12	5,4	0,405	2,6	4351	3663
0/11– V_{vid}	6,9	6	12	5,4	0,373	3,0	4840	4053
0/11– V_{min}	6,2	6	12	5,4	0,335	2,7	4593	3866
0/8– V_{max}	7,7	6	12	5,4	0,416	2,6	4278	3290
0/8– V_{vid}	7,1	6	12	5,4	0,383	2,9	4342	3605
0/8– V_{min}	6,4	6	12	5,4	0,346	2,8	4230	3557

Pastaba. 0/11 S–V, 0/8–V – asfaltbetonio mišinio tipai; *max*, *vid*, *min* – atitinkamai, viršutinė, vidurinė ir apatinė granulometrijos kreivių ribos.

Lygindami 0/8–V tipo asfaltbetonio mūsų tyrimų (žr. 3.2 lentelę) stiprio rodiklius su G tipo asfaltbetonio, kuriame yra 7,0 % masės BND 60/90 markės bitumo, stiprio rodikliais [5, 9, 13, 14, 16, 24, 28, 29, 51] (atsparumo tempimui lenkiant – 2,8 MPa, tampros modulio, esant 0 °C temperatūrai – 4403 MPa), galime tvirtinti, kad Lietuvoje kelių dangos viršutiniams sluoksniams įrengti naudojamų 0/8–V tipo asfaltbetonio mišinių atsparumas tempimui lenkiant bei tampros modulis yra pakankami automobilių kelių dangos stiprinimo sluoksniui įrengti.

Tolesniems tyrimams, nustatydami kelių dangos stiprinimo sluoksniui įrengti numatomo asfaltbetonio mišinio tipą bei jo projekcinę sudėtį (žr. III priedo III.3 skyrių), naudojome programą ASPHALT [140]. Programa ASPHALT [140] sukurta Ukrainos Transporto Universiteto (UTU) Kelių statybinių medžiagų ir chemijos katedros specialistų ir skirta asfaltbetonio mišinių sudėčiai apskaičiuoti. Pagal šią programą galima įvertinti asfaltbetonio tampros modulį ir jo atsparumą tempimui lenkiant, kuris yra būtinas nustatant kelių dangos stiprį bei asfaltbetonio sluoksnio storį.

Naudojant programą ASPHALT [140] buvo suprojektuotas 0/8–V tipo kelių dangos viršutinio sluoksnio asfaltbetonio mišinys (3.2 lentelė ir III priedo III.3 poskyris), tinkantis stiprinti kelių dangą (atitinkantis [9, 83, 84] reikalavimus).

3.2 lentelė. Medžiagų, naudotų asfaltbetonio mišinio projektui parengti, savybių rodikliai

Medžiagos pavadinimas	Fiziniai bei mechaniniai rodikliai	Rodiklio vertė
Bitumas B 100/150	Penetracija, 10 ⁻¹ mm	104
	tąsumas, cm	> 100
Granitinės atsijos	tikrasis tankis, g/cm ³	2,66
	piltinis tankis, g/cm ³	1,49
granuliometrinė sudėtis, masės %:		
	frakcija >5 mm	5
	frakcija 2,5 mm – 5,0 mm	25
	frakcija 1,25 mm – 2,5 mm	27
	frakcija 0,63 mm – 1,25 mm	20
	frakcija 0,315 mm – 0,063 mm	15
	frakcija 0,14 mm – 0,315 mm	8
Mineraliniai milteliai	tikrasis tankis, g/cm ³	2,64
(aktyvintieji)	piltinis tankis, g/cm ³	1,51
granuliometrinė sudėtis, masės %:		
	frakcija 1,25 mm – 2,5 mm	0,6
	frakcija 0,63 mm – 1,25 mm	0,4
	frakcija 0,315 mm – 0,63 mm	1,7
	frakcija 0,14 mm – 0,315 mm	0,1
	frakcija 0,071 mm – 0,14 mm	17,3
	frakcija <0,071 mm	79,9

3.1.3. Asfaltbetonio bandinių savybių tyrimai

Optimaliems apkrovos parametrams (dydis ir poveikio trukmė) nustatyti iš parinkto asfaltbetonio mišinio (žr. 3.2 lent.) laboratorijoje buvo pagaminti ir ištirti 35 cilindro formos 50,5 mm (skersmens ir aukščio) kelių dangos viršutiniam sluoksniui skirti 0/8–V tipo asfaltbetonio mišinio bandiniai. Ištyrus šių bandinių fizines bei mechanines savybes (žr. III priedo III.1 lent.) – vidutinį tankį, vandens įgertį, stiprį gniuždant, kai temperatūra +20 °C, nustatyta asfaltbetonio kokybė.

Nustatėme, kad bandomojo asfaltbetonio fizinės savybės labiau priklauso nuo apkrovos dydžio bandinių formavimo metu, nei nuo apkrovos poveikio trukmės (žr. III priedo III.1 lent. ir III.1 pav.).

Projektuojant asfaltbetonį nustatėme, kad reikalingas 2,22 g/cm³ tankis (pagal [9] darbo reikalavimus) pasiekiamas esant 20 MPa ir laiduojamas esant 30 MPa apkrovai (3.1 pav. ir III priedo III.1 lent.).

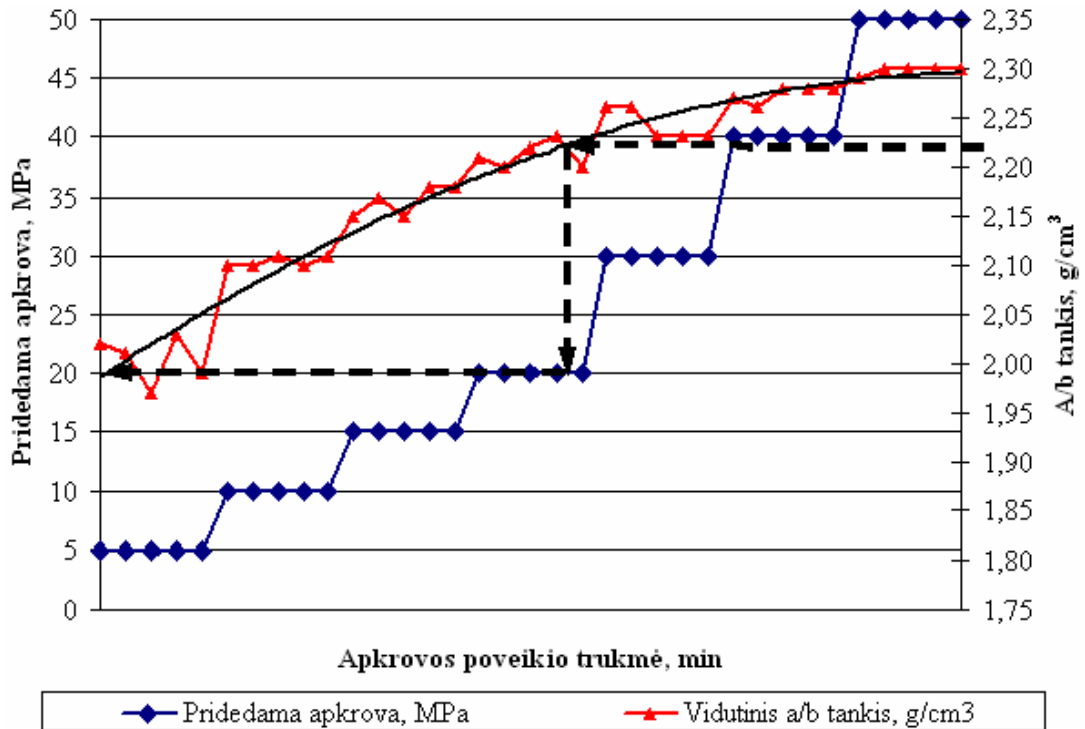
Bandymų metu nustatėme, kad asfaltbetonio mineralinio mišinio projektinis akytumas 23,05 % pasiekiamas esant 20 MPa ir laiduojamas esant 30 MPa apkrovai (3.2 pav. ir III priedo III.1 lent.), o asfaltbetonio projektinis liekamas akytumas 4,98 % (pagal [9] darbo reikalavimus) pasiekiamas esant 30 MPa ir laiduojamas esant 40 MPa apkrovai (3.3 pav. ir III priedo III.1 lent.). Kai veikia 50 MPa apkrova, vandens įgerties praktiškai nėra – visos poros medžiagoje uždarytos ir tolesnis tankinimas nereikalingas (3.4 pav. ir III priedo III.1 lent.).

Tyrimais taip pat nustatėme, kad asfaltbetonio mechaninės savybės (vandens prisotintų bandinių atsparumas gniuždant, esant +20 °C temperatūrai) nuo apkrovos dydžio ir jos poveikio trukmės priklauso maždaug vienodai (3.5 pav. ir III priedo III.1 lent. bei III.1 pav.). Iš 3.5 pav. galima nustatyti, kad tankinančiai apkrovai padidėjus 0,5 MPa, medžiagos atsparumas tempimui lenkiant padidėja 0,1 MPa.

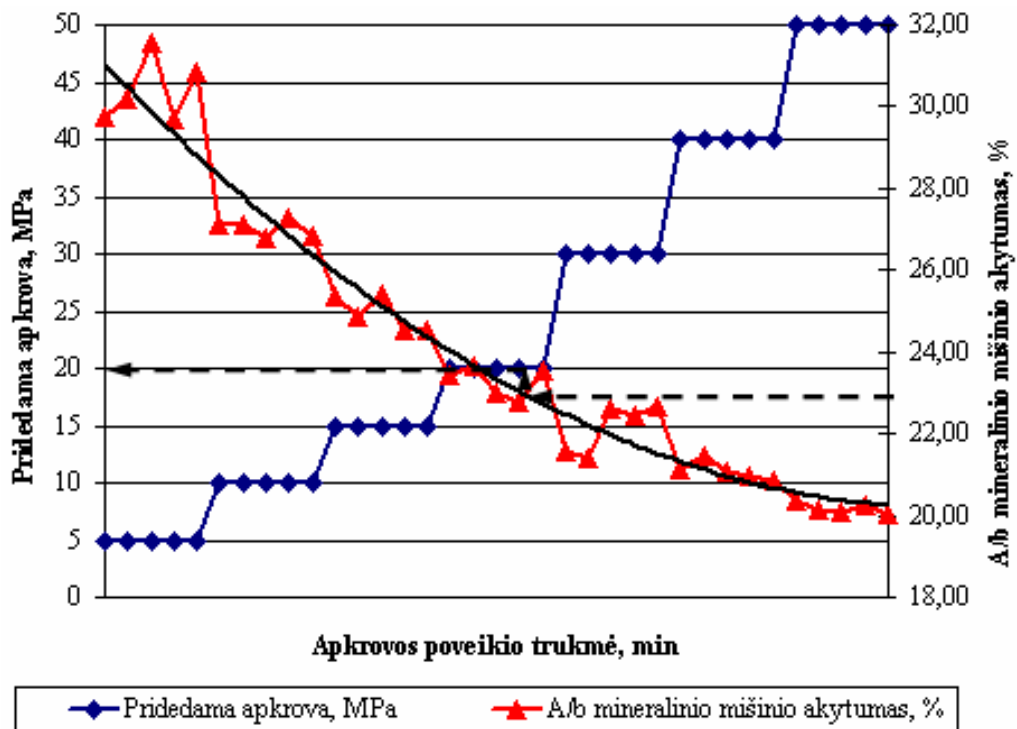
Pasinaudoję mūsų atliktais laboratoriniais tyrimais nustatėme, kad asfaltbetonio bandiniams optimalūs yra 30 MPa apkrova bei 3 minučių apkrovos poveikio trukmė. Taikydami šiuos parametrus ir suformavome bandinius asfaltbetonio funkcionavimo trukmei nustatyti bei įvertinti jo likutinį stiprį.

Asfaltbetonio bandinių funkcionavimo trukmės rodiklis buvo nustatytas lenkimo, pastoviu greičiu didėjant apkrovai, bandymais. Bandymai buvo atlikti, esant 0 °C ir +25 °C temperatūrai bei apkrovos greičio prieaugiui $0,00265 \leq V_{\sigma} \leq 0,252$ MPa/s (3.6 pav. ir III priedo III.2 lent.). Asfaltbetonio funkcionavimo trukmės rodiklis buvo nustatytas taip [14, 16] (3.6 pav. ir III priedo III.2 lent.):

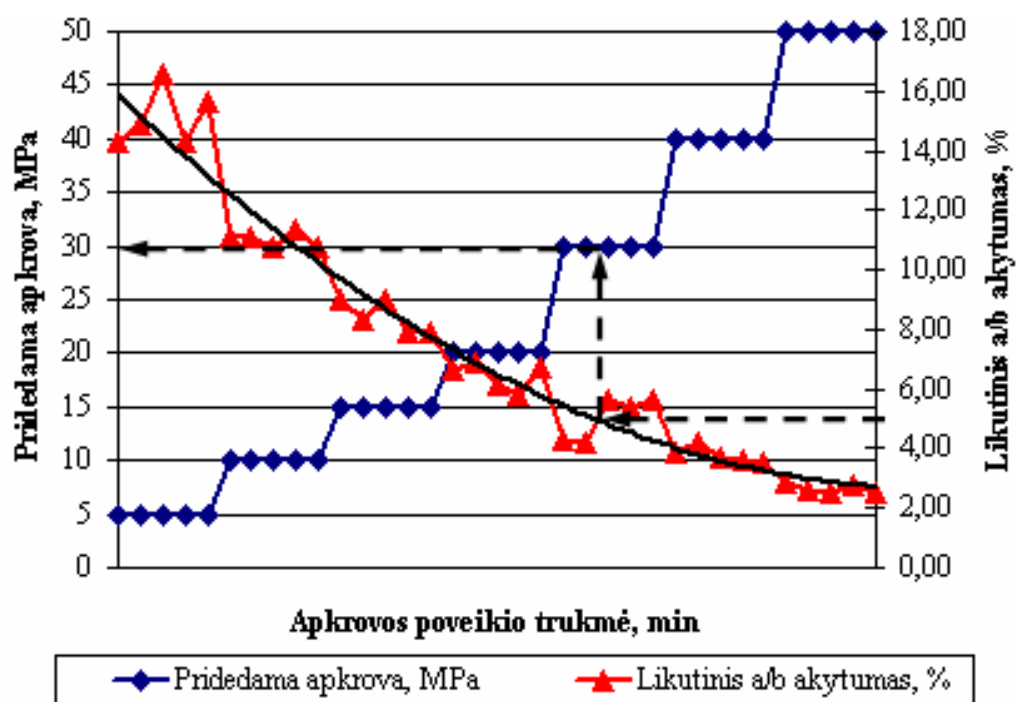
- a) kai $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\lg_{\sigma(0)} = -0,2834 \lg t + 2,3493$;
- b) kai $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\lg_{\sigma(+25)} = -0,311 \lg t + 1,7349$.



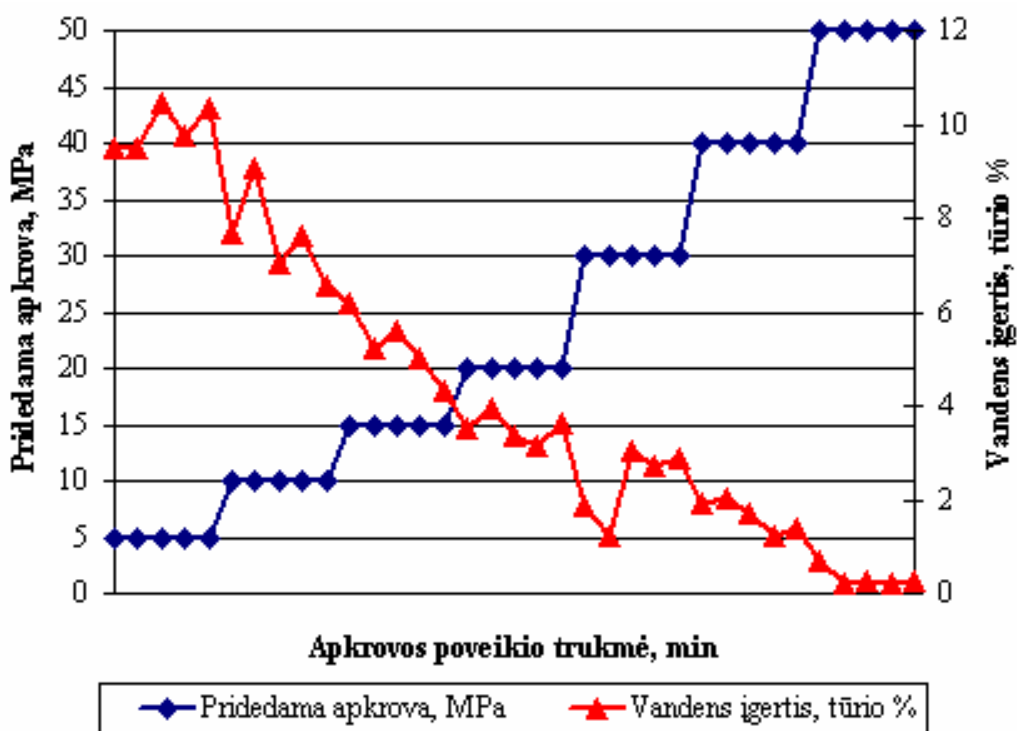
3.1 pav. Asfaltbetonio bandinių tankio ir pridedamos apkrovos dydžio bei jos poveikio trukmės tarpusavio sietis



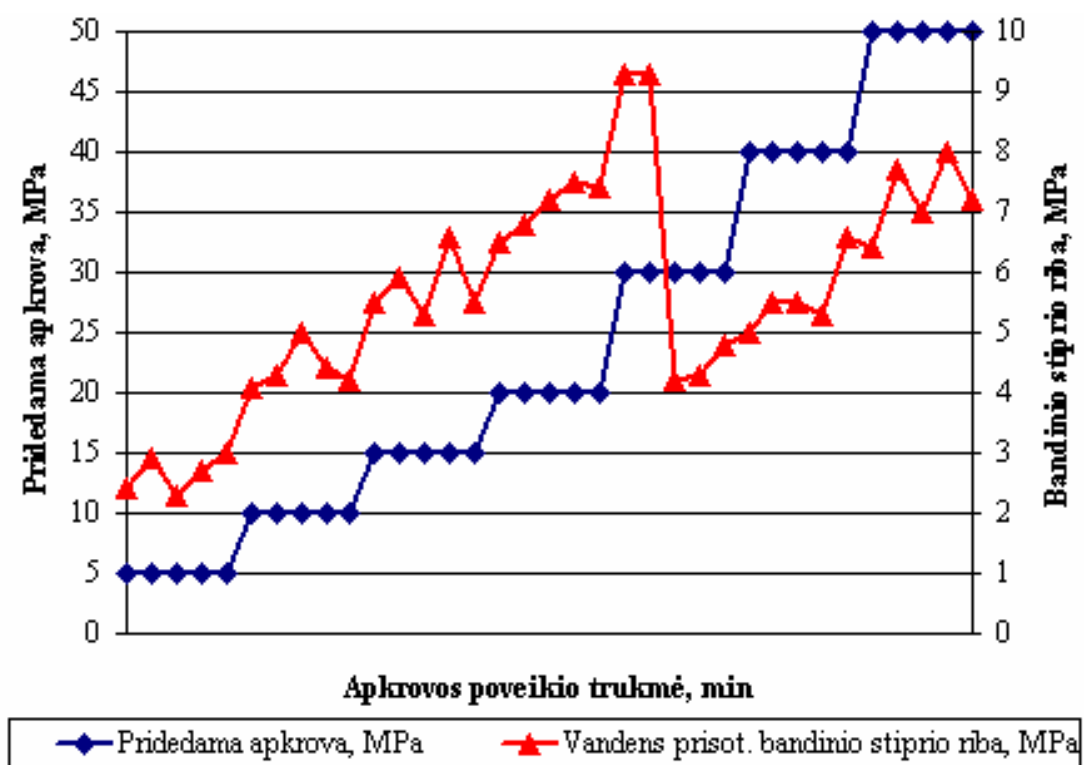
3.2 pav. Asfaltbetonio bandinių mineralinio mišinio aktyumo ir pridedamos apkrovos dydžio bei jos poveikio trukmės tarpusavio sietis



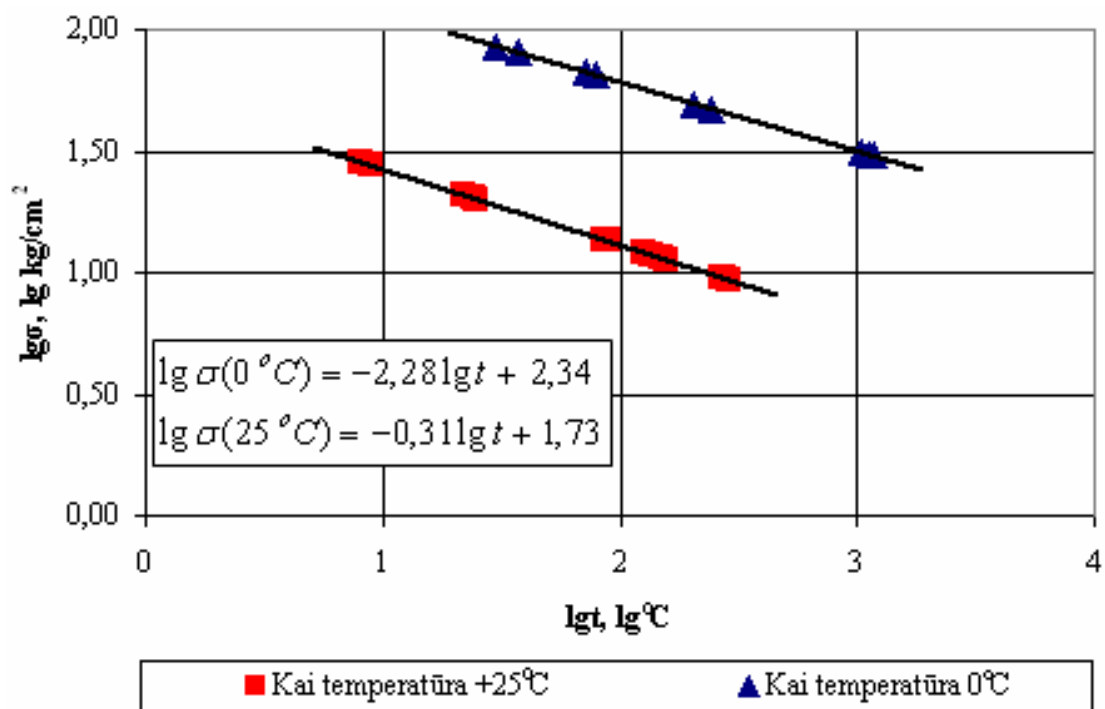
3.3 pav. Asfaltbetonio bandinių likutinio akytumo ir pridedamos apkrovos dydžio bei jos poveikio trukmės tarpusavio sietis



3.4 pav. Asfaltbetonio bandinių vandens įgerties ir pridedamos apkrovos dydžio bei jos poveikio trukmės tarpusavio sietis



3.5 pav. Asfaltbetonio bandinių atsparumo gniuždant ir pridedamos apkrovos dydžio bei jos poveikio trukmės tarpusavio sietis



3.6 pav. Grafikas asfaltbetonio funkcionavimo trukmės rodiklio vertėms lenkimo bandymais nustatyti, kai apkrova didėja pastoviu greičiu

Tyrimų metu buvo nustoma bandinio irties iki jo suirties trukmė t_s ir ribinis tempimo lenkiant įtempis σ_s . Jų sietis, išreiškiama G.M.Bartenjev ilgalaikio stiprio tiesine funkcija logaritminėse koordinatėse [141, 142]:

$$t_s = B_\tau \sigma_s^{-b_\tau}, \text{ s} \quad (3.1)$$

Rodiklis B_τ yra konstanta ir, esant dvejopam apkrovos prieaugio greičiui, nustatoma taip [141, 142]:

$$B_\tau = t_{s_1} \sigma_1^{b_\tau} \text{ arba } B_\tau = t_{s_2} \sigma_2^{b_\tau} \quad (3.2)$$

čia: b_τ – bandinio nuovargio rodiklis, veikiant stacionariai apkrovai, t_{s_1}, t_{s_2} – laikotarpis iki bandinio suirties, kai yra dvejopas apkrovos prieaugio greitis, s; σ_1, σ_2 – bandinių stipris, MPa.

Rodiklis b_τ parodo ilgaamžiškumo tiesės nuolydį (polinkį) logaritminėse koordinatėse ir apibūdina medžiagos pasipriešinimą suirčiai. Šis rodiklis daugiausia priklauso nuo bitumo klampos ir jo struktūrizacijos laipsnio. Struktūrizacijos laipsniui įtaką turi bitumo ir mineralinių miltelių santykis ir šių nedžiagų asfaltbetonio mišinyje kiekis, masės %. Pagal [141], asfaltbetoniui, pagamintam iš vienodo bitumo, ilgaamžiškumo tiesės nuolydis (polinkis) į įtempių ašį nepriklauso nuo temperatūros, jei ji kinta nuo +18 °C iki +60 °C. Šių temperatūrų asfaltbetonis dažniausiai turi rišančiosios medžiagos savybes, o jo deformavimo metu vyksta suirties bei ryšių atsistatymo procesai. Koeficientas b_τ gali kisti, jei bitumo sudėtis žymiai skiriasi nuo optimalios, nes tada bitumas tampa naujos struktūros medžiaga. Esant žemoms temperatūroms, asfaltbetonio deformavimo proceso metu ryšiai suardomi negrįžtamai, todėl jie neatsistato.

Dviems apkrovos augimo greičiams rodiklis b_τ nustatomas taip:

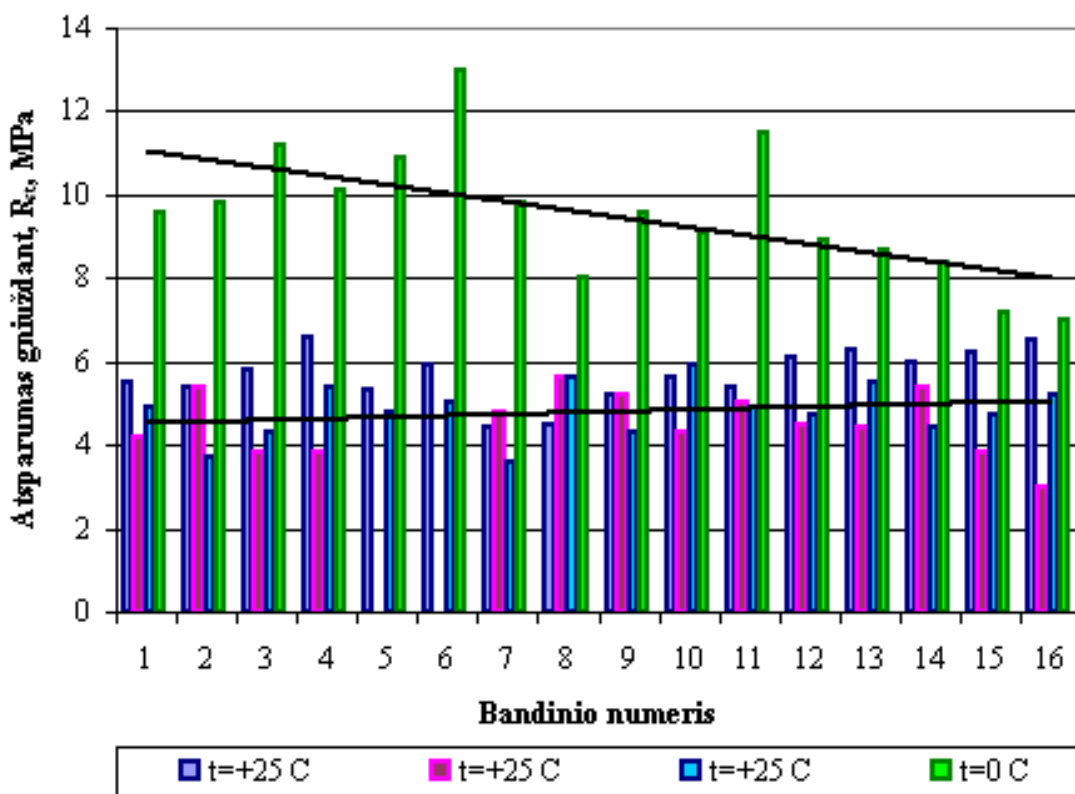
$$b_\tau = \frac{\lg t_{s_1} - \lg t_{s_2}}{\lg \sigma_2 - \lg \sigma_1}, \quad (3.3)$$

Atlikę laboratorinius asfaltbetonio lenkiant tyrimus, nustatėme šiuos jo atsparumo nuovargiui parametrus (žr. III priedo III.2 lent.):

- | | | |
|----------------------|------------------------------|----------------------------------|
| a) kai $t = 0$ °C, | $b_\tau = 1/0,2834 = 3,53$, | $B_\tau = 10^{2,3493} = 223,5$; |
| b) kai $t = +25$ °C, | $b_\tau = 1/0,31 = 3,22$, | $B_\tau = 10^{1,7349} = 54,3$. |

Gniuždymo bandymai buvo atliekami (kai tokios pat temperatūros) pagal standartinę metodiką [9]. Bandiniai buvo formuojami apie 2 valandas, kad suspėtų padidėti bitumo tūšumas – taip sąlyginai buvo imituojamas rišiklio senėjimo procesas. Bandomi buvo keturių serijų (po 16 suformuotų vienetų) ir tokiu eiliškumu, kaip jie buvo suformuoti.

Nustatėme (3.7 pav.), kad bitumo tūšumo padidėjimas, esant +25 °C temperatūrai, praktiškai neturi įtakos asfaltbetonio bandinių atsparumui gniuždant: vidutinis stipris $R_{st} = 5$ MPa, vidutinis kvadratinis nuokrypis $\sigma_R = 0,83$ MPa, variacijos koeficientas $V = 0,17$, o, esant 0 °C temperatūrai, rišiklio senėjimas sumažina atsparumo rodiklio gniuždant vertes nuo 11,0 MPa iki 8,0 MPa, todėl didėja ir duomenų sklaida – $\sigma_R = 1,21$ MPa. Tyrimai rodo, kad rišiklio asfaltbetonio bandiniuose senėjimo procesas buna tuo juntamesnis, kuo apkrovos pridėjimo metu buvo žemesnė temperatūra.



3.7 pav. Asfaltbetonio bandinių atsparumo gniuždant vertės

3.1.4. Siūlomo suirties masto modelio įvertinimas laboratorinėmis sąlygomis

Tam, kad patikrinti kelių dangos asfaltbetonio suirties masto modelį (žr. 2.12 formulę) ir nustatyti asfaltbetonio likutinį stiprį, laboratorijoje (Ukraina, Kijevo OBLAVTODOR) atlikome bandinių lenkimo, esant pastoviam apkrovos prieaugio greičiui, tyrimus. Bandinių formavimo ir tyrimų metodika pateikta III priede.

Tyrimams naudojome [141–148] nustatytus dėsningumus, kad vienkartinis lenkimo bandymas ir cikliniai pasikartojantys bandymai (keičiant įtempius pagal sinusoidinį dėsnį), veikiant stacionariam apkrovos režimui ir tolygiai augančiai apkrovai, kai pastovus deformavimo greitis, tarpusavyje yra susiję. Pasinaudome tuo, kad asfaltbetonio nuovargio bandymai, kurie gana ilgai užtrunka, o jiems atlikti reikia kvalifikuotų specialistų bei specialios įrangos, gali būti pakeisti asfaltbetonio ilgalaikio atsparumo tempimui lenkiant bandymu, kai apkrova nepertraukiamai ir tolygiai didėja. Tokių tyrimų metodika yra paprastesnė, o rezultatų statistinė sklaida, lyginant su asfaltbetonio nuovargio tyrimais, mažesnė.

Tyrimais nustatėme bandinių likutinį stiprį, paveikę bandinius jėga, atitinkančia asfaltbetonio bandinių tam tikrą funkcionavimo trukmės lygį. Kiekvienas bandinys buvo tiriamas taikant [141–148] darbuose numatytus du apkrovos prieaugio greičius: $V_{\sigma_1} = 0,00265$ MPa (tyrimu metu buvo įvairuojama apkrovos poveikio trukmė) ir $V_{\sigma_2} = 0,252$ MPa (tyrimų metu buvo įvertinamas asfaltbetonio likutinis stipris).

Pagal asfaltbetonio bandinių funkcionavimo trukmę (žr. 3.6 pav.) taikėme [141–148] darbuose nustatytas ribines jų stiprio σ ir funkcionavimo trukmės T vertes, esant apkrovos prieaugio greičiams V_{σ_1} ir V_{σ_2} :

a) kai tyrimų temperatūra 0°C ir taikant greitį V_{σ_1} , $\sigma_1 = 3,152$ MPa ir $T_2 = 1112$ s, o taikant greitį V_{σ_2} , $\sigma_2 = 7,940$ MPa ir $T_2 = 31,5$ s;

b) kai tyrimų temperatūra $+25^\circ\text{C}$ ir taikant greitį V_{σ_1} , $\sigma_1 = 0,726$ MPa ir $T_1 = 274$ s, o taikant greitį V_{σ_2} , $\sigma_2 = 2,270$ MPa ir $T_2 = 9$ s.

Pagal numatytą t_i / T_1 lygį kiekvienam bandiniui buvo nustatyta apkrovos poveikio trukmė t_i ir jos poveikio greitis V_{σ_1} , o atliekant tyrimus esant apkrovos poveikio greičiui V_{σ_2} , bandinys suirdavo. Asfaltbetonio bandinių likutinis stipris, atliekant tempimo lenkiant bandymus, nustatytas taip:

$$\sigma = \frac{6}{4} \frac{m_{sm} l}{b h^2} \frac{L_1}{L_2}, \text{ MPa}, \quad (3.4)$$

čia: m_{sm} – smėlio, kuris subyra į kibirėlį per laikotarpį t_i iki bandinio suirties, masė, kg; l – atstumas tarp bandinio pasipriešinimo vietų, $l = 14$ cm; h ir b – bandinio aukštis ir storis, cm; L_1 / L_2 – svirties pečių santykis, lygus $L_1 / L_2 = 18,85$.

Laboratorinių tyrimų rezultatus lyginome su mūsų teoriniais skaičiavimais (formulė (2.12), apibūdinanti apkrovos pridėjimo cikliškumą) ir žinomomis formulėmis [141–148], kad palyginti asfaltbetonio stiprio ir funkcionavimo trukmės rodiklius. Sietį tarp medžiagos nuovargio rodiklių, esant daugkartiniai pasikartojančiai ir stacionariai apkrovai, nustatėme taip:

$$b = b_r - \frac{\lg t_c}{\lg e}, \quad (3.5)$$

čia: b_r – nustatomas pagal (3.3) formulę, t_c – vieno apkrovos poveikio trukmė, s; e – natūrinio logaritmo pagrindas.

Apkrovos poveikio trukmę taikėme 0,10 s, atitinkančią automobilio greičiui 50 km/h (žr. 2.9 pav.) ir nustatėme, kad:

a) kai tyrimų temperatūra 0 °C, asfaltbetonio funkcionavimo trukmės rodiklis yra 0,28 (žr. 3.6 pav.), o nuovargio rodiklis, esant cikliniams bandymams, pagal (3.5) formulę, yra $b_{(0)} = 5,82$;

b) kai tyrimų temperatūra +25 °C, asfaltbetonio funkcionavimo trukmės rodiklis yra 0,31 (žr. 3.6 pav.), o nuovargio rodiklis, esant cikliniams bandymams, pagal (3.5) formulę, yra $b_{(+25)} = 5,54$.

(2.11) formulėje medžiagos pradinio stiprio rodiklio R_0 vertė numatyta apkrovai, veikiančiai 0,10–0,15 s. Naudodamiesi šia rodiklio R_0 verte ir “ilgalaikio” stiprio verte iš formulės [145] apskaičiavome asfaltbetonio “momentinį” stiprį:

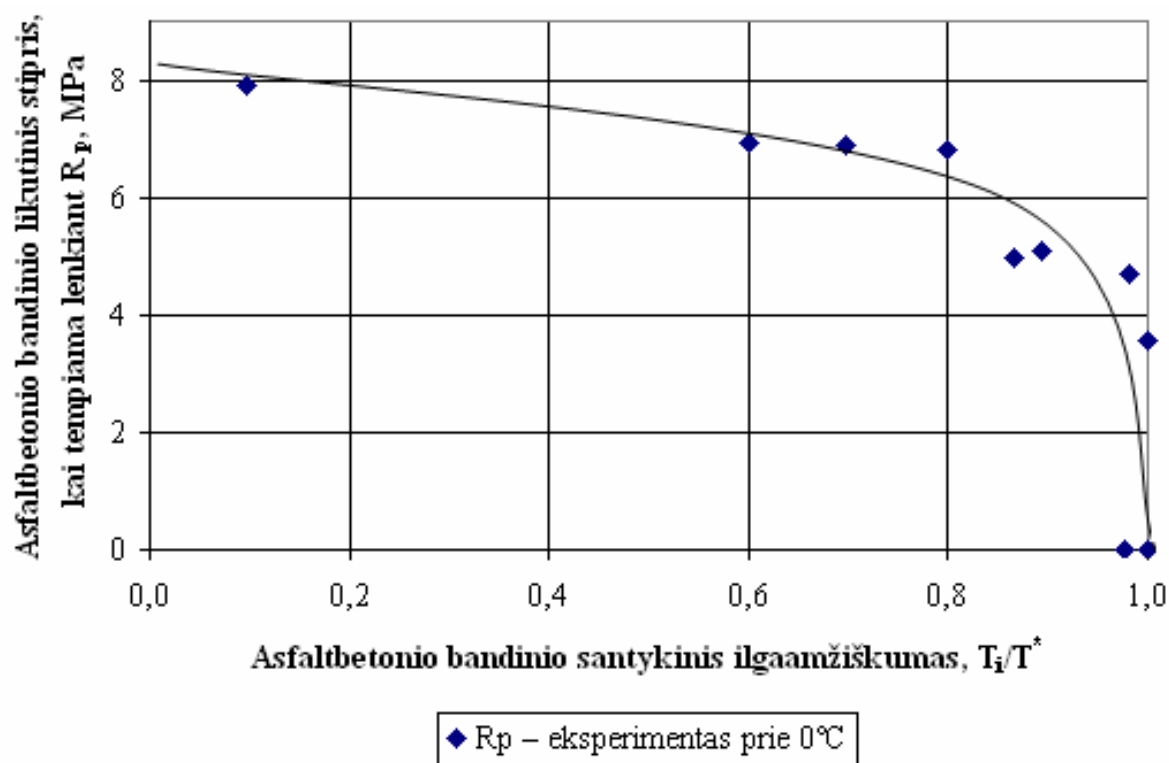
$$R_0 = \frac{\sigma_2}{T_2} \left(\frac{p}{1+p} \right)^p T_2^{(1+p)}, \text{ MPa}, \quad (3.6)$$

čia: p – asfaltbetonio plastiškumo rodiklis.

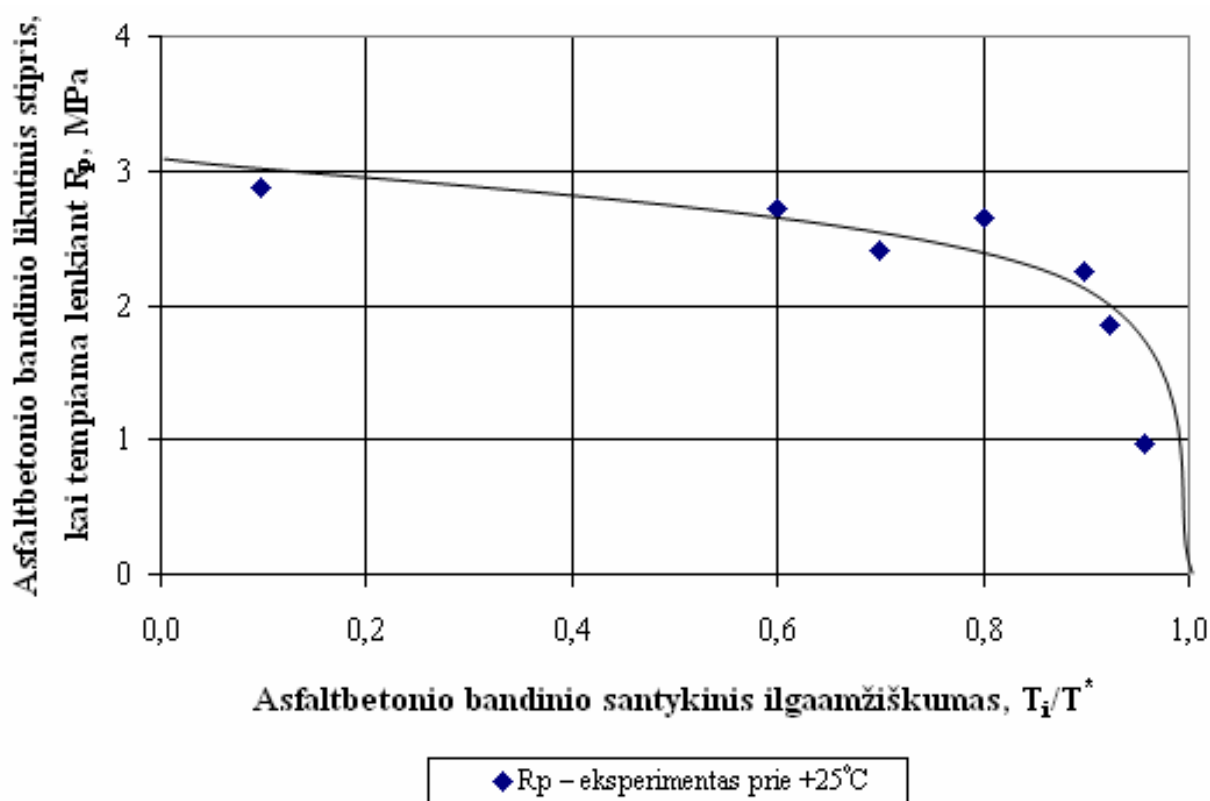
Pagal [147] darbo nuorodas skaičiavimams taikėme rodiklį p ir pagal (3.6) formulę nustatėme, kad:

a) kai asfaltbetonio temperatūra 0 °C ir $p = 0,10$, tai $R_{0(0)} = 8,821$ MPa;

b) kai asfaltbetonio temperatūra +25 °C ir $p = 0,30$, tai $R_{0(+25)} = 2,826$ MPa.



3.8 pav. Asfaltbetonio stiprio (atsparumo tempimui lenkiant) kitėjimas (kai 0°C temperatūra)



3.9 pav. Asfaltbetonio stiprio (atsparumo tempimui lenkiant) kitėjimas (kai $+25^\circ\text{C}$ temperatūra)

Palyginę laboratorinių tyrimų rezultatus su atliktų skaičiavimų rezultatais (3.8 ir 3.9 pav.), galime tvirtinti, kad apie 80 % medžiagos stiprio išaikvojama paskutinėje (20 %) jos funkcionavimo laikotarpio dalyje. Šis dėsningumas apskaičiuotas 0 °C ir +25 °C temperatūroms ir apima laikotarpį, kuris Lietuvos sąlygoms trunka apie šešis mėnesius per metus.

Remiantis gautais rezultatais mūsų pasiūlytas modelis (žr. (2.12) ir (2.18–2.41) formules bei 2.6 ir 2.7 pav.) pakankamai gerai parodo kelių asfaltbetonio dangos suirties mastą ir gali būti taikomas kelių dangos likutiniam stipriui įvertinti.

3.2. Automobilių kelių būklės natūriniai tyrimai

3.2.1. Tyrimų ruožų parinkimas ir tyrimų metodika

Pasiūlytam kelių dangos pažaidų sankaupos (suirties masto) modeliui (žr. (2.12) ir (2.18–2.41) formules bei 2.6–2.8 pav.) patikrinti ir kelių dangos konstrukcijos rodikliams (tampros moduliui E , suirties mastui D , stipriui ir likutiniam stipriui pagal stiprio koeficientą K_{st}) nustatyti, 2002–2005 m. pavasarį ir vasarą Lietuvos krašto kelyje Nr. 121 Anykščiai–Troškūnai–Panevėžys atlikome eksperimentinius tyrimus. Šių tyrimų svarbiausias tikslas – pasiūlyti kelių dangos racionalias remonto priemones.

Kelyje parinkome aštuoniolika vienodo ilgio (po 100 m) ruožų su labai suirusia, vidutiniškai suirusia ir mažai suirusia danga. Šių ruožų projektinė dangos konstrukcija ir eismo intensyvumas buvo tapatūs. Visų tirtų kelio ruožų dangos konstrukcijos stipris, sluoksnių storis ir transporto priemonių eismo intensyvumas buvo maždaug vienodi. Ruožų danga buvo jau seniai kapitaliai neremontuota, todėl jos būklė nebuvo gera. Tirtų kelio ruožų dangos konstrukcija ir jos sluoksnių storis pateikti 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. Tirtų ruožų dangos konstrukcija (KDK) ir jos sluoksnių storiai

KDK sluoksnių pavadinimas	Sluoksnio storis, cm
Asfaltbetonio danga	6
Žvyro pagrindas	22
Žvyro ir smėlio mišinio šalčiui atsparus sluoksnis	35
Žemės sankasos gruntas – molingasis smėlis	

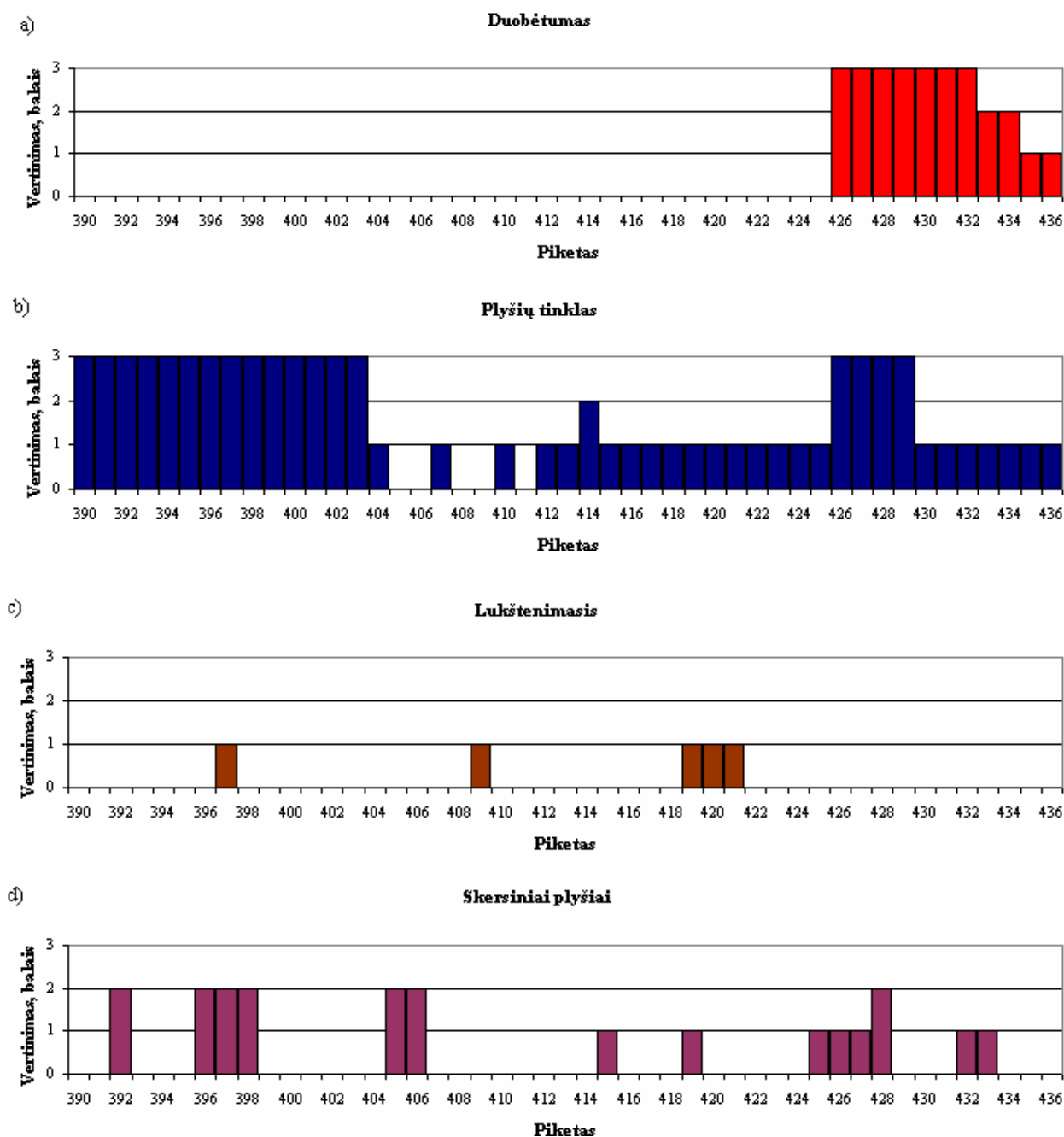
3.2.2. Kelių dangos vizualieji tyrimai

Kelių dangos suirties mastas D buvo tiriamas visame tirtų jos ruožų plote. Šių tyrimų metu buvo užfiksuoti 7 pažaidų tipai ir įvertinta dangos eksploatacinė būklė.

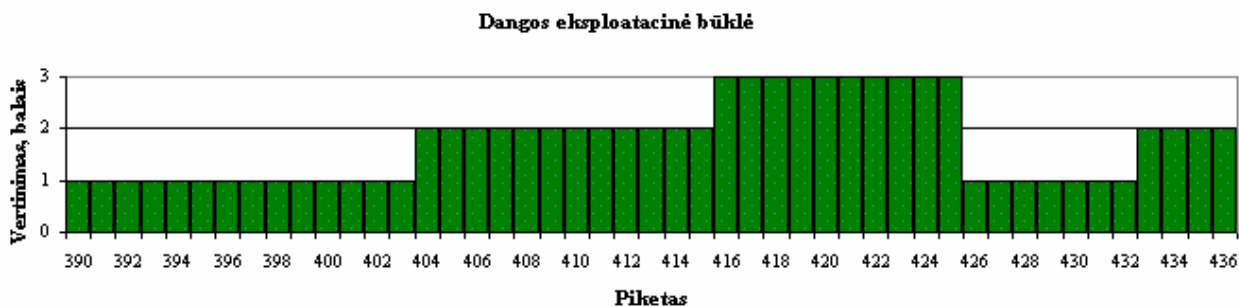
Apdorojus pagal IV priede pateiktą metodiką atliktų vizualiųjų tyrimų rezultatus (žr. IV

priedo IV.2 lent.), buvo sudaryti krašto kelio Anykščiai–Troškūnai–Panevėžys tirtuose ruožuose aptiktų dangos pažeidimų (pagal jų tipus) linijiniai grafikai (3.10 pav. ir IV priedo IV.2 lent.).

Nustatyta, kad kelio Anykščiai–Troškūnai–Panevėžys tirtų ruožų danga beveik ištiesai buvo pažeista atskirais plyšiais ir/ar plyšių tinklų bei žymiu duobėtumu, vietomis pasitaiko dangos išaižų bei skersinių plyšių (žr. 3.10 pav. ir IV priedo IV.2 lent.). Šio kelio dangos būklė buvo patenkinama (3.11 pav.).



3.10pav. Kelio Anykščiai–Troškūnai–Panevėžys dangos konstrukcijos būklės vizualiųjų tyrimų, atliktų 2003–2005 m. pavasarį, linijiniai grafikai



3.11 pav. Kelio Anykščiai–Troškūnai–Panevėžys dangos konstrukcijos eksploatacinės būklės, remiantis 2003–2005 m. pavasarį atliktų vizualiųjų tyrimų rezultatais, linijinis grafikas

3.2.3. Kelių dangos instrumentiniai tyrimai

Pagal V priede pateiktą metodiką buvo atlikti parinktų ruožų instrumentiniai tyrimai. Išanalizavus tyrimų rezultatus ir juos sugrupavus pagal pažaidų tipą ir jomis pažeistų dangos ruožų plotą, buvo nustatytas dangos konstrukcijos tamprusis įlinkis. Pagal [9] darbo nuorodas buvo matuojama pavasarį. Kelių dangos stiprio sumažėjimui, žiūrint jos suirties masto D , nustatyti buvo matuojama ir tuose kelio ruožuose, kuriuose dangos pažaidų nebuvo.

Kelių dangos konstrukcijos tampriajam įlinkiui išmatuoti buvo naudojama Benkelmano sija, o jos konstrukcija buvo apkraunama A grupės automobiliu, kurio galinės ašies apkrova 100 kN (MAZ-5551). Pirmajame tyrimų etape dangos konstrukcijos įlinkiai buvo išmatuoti tuose ruožuose, kuriuose nebuvo jokių dangos pažaidų. Buvo matuojama dešinės eismo juostos 20-tyje tolygiai paskirstytų vietų. Antrajame tyrimų etape dangos konstrukcijos įlinkiai buvo išmatuoti vizualiais tyrimais nustatytų būdingų pažaidų vietose: 5–7-iose kiekvienos pažaidos taškuose. Visi duomenys buvo užfiksuoti matavimų žurnale (žr. VI priedą). Išmatavus dangos konstrukcijos vertikaliuosius įlinkius, šiuose ruožuose buvo detalios suregistruotos dangos pažaidos ir pagal [81] metodiką buvo nustatytas jos suirties mastas D .

Pagal išmatuotą dangos konstrukcijos tamprųjį įlinkį l , iš [54] darbe pateiktos formulės apskaičiuodavome jos tampros modulį E :

$$E = \frac{pD_p(1-\nu^2)}{l}, \text{ MPa}, \quad (3.7)$$

čia: p – oro slėgis padangoje, jos kontakto su danga ploto dalyje (įskaitant išmatuotą bei apskaičiuotą rodiklį $p = P/(2S)$), MPa; P – galinės ašies apkrova, kN; S – automobilio rato pėdsako plotas, m^2 ; D_p – projekcinio automobilio rato pėdsako skersmuo, m; ν – Puasono koeficientas, priimamas $\nu = 0,3$; l – kelių dangos konstrukcijos tamprusis įlinkis, m.

Matavimų metu asfaltbetonio sluoksnio temperatūra galėjo skirtis nuo jo temperatūros projektiniu laikotarpiu (+10 °C), todėl iš (3.7) formulės kelių dangos konstrukcijos tampros modulį E perskaičiavome pagal praktikoje plačiai taikomą formulę ir nustatėme E_p [149]:

$$E_p \approx KE - \Delta E_{gr} + \frac{0,27}{D_p} (h_1 \Delta E_1 + h_2 \Delta E_2 + h_3 \Delta E_3), \text{ MPa} \quad (3.8)$$

čia: K – koeficientas, taikomas atliekant matavimus rudenį, $K = 0,90$; E_p – projektinio laikotarpio kelių dangos konstrukcijos tampros modulis, MPa; E – kelių dangos konstrukcijos tampros modulis, apskaičiuotas pagal jos vertikaliojo įlinkio matavimų rezultatus, MPa; ΔE_{gr} – kelių dangos konstrukcijos tampros modulio pataisa, atsižvelgiant į grunto drėgnį, MPa; ΔE_1 , ΔE_2 , ΔE_3 – pataisos, įvertinančios asfaltbetonio sluoksnių tampros modulių verčių matavimų laikotarpiu skirtumus, lyginant šių modulių vertes su jų vertėmis, būnančiomis projektiniu laikotarpiu, MPa; h_1 , h_2 , h_3 – asfaltbetonio sluoksnių storiai, cm.

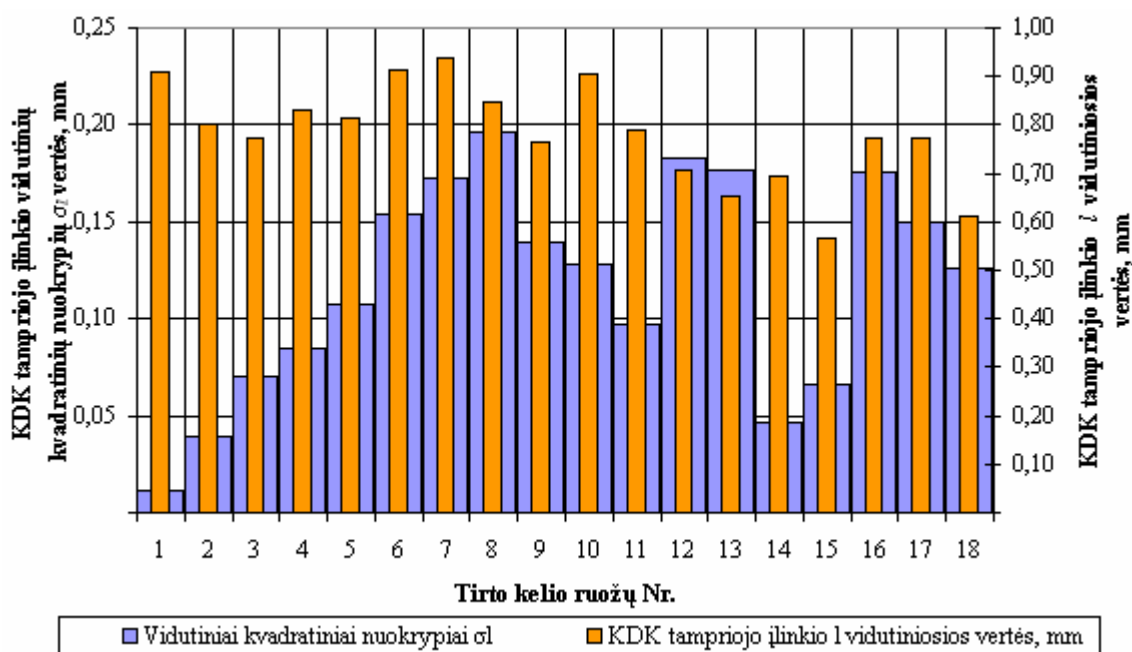
Tyrimų metu kelio Anykščiai–Troškūnai–Panevėžys $\sum n = 198$ -iose vietose buvo išmatuotas jos dangos konstrukcijos tamprusis įlinkis (18-oje ruožų po 11 matavimų kiekviename) ir buvo nustatytas tampros modulis E bei stiprio koeficientas $K_{st} = E / E_r$ (E_r – dangos reikalingas tampros modulis) ir dangos suirties mastas D (3.4 lent. ir 3.12 bei 3.13 pav. ir žr. V priedo V.2 lent.).

3.4 lentelė. Tirtų kelio dangos konstrukcijos (KDK) ruožų dangos kokybės rodikliai

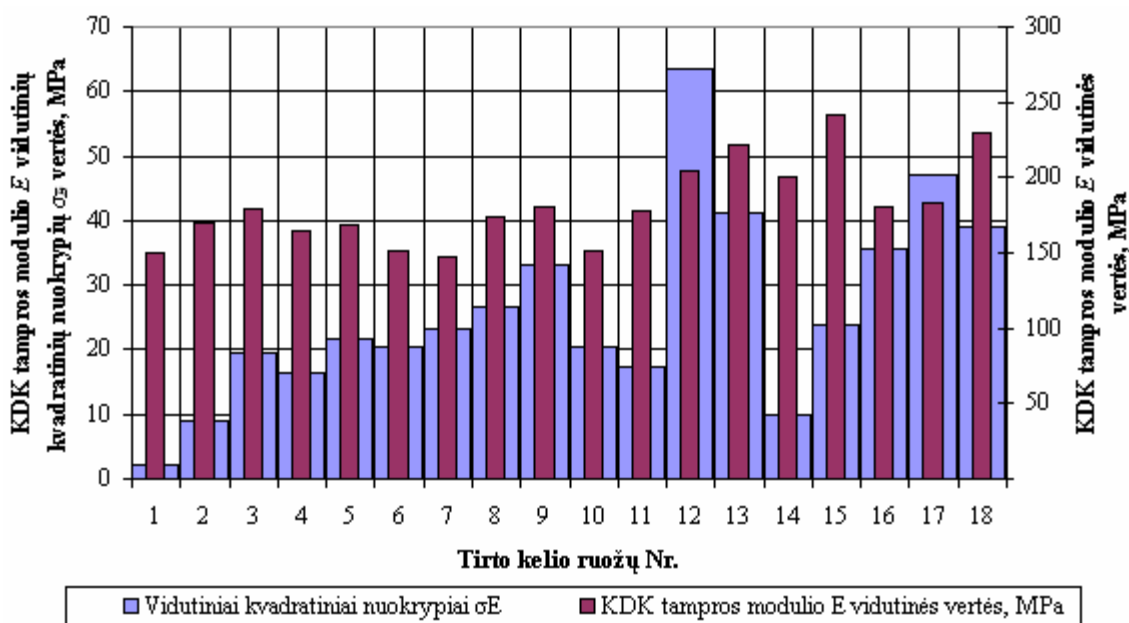
KDK kokybės rodiklis		Kokybės rodiklio vidutinės vertės		
		Dangos suirties mastas D ir remonto poreikis [53, 81]		
Pavadinimas	Būtinoji vertė	$D = 5 - 8\%$ – reikalingas operatyvusis remontas, $n = 38$	$D = 8 - 16\%$ – reikalingas profilaktinis remontas, $n = 65$	$D > 16\%$ – reikalingas kapitalusis remontas, $n = 95$
Tampros modulis E , MPa	218	208	187	174
Stiprio koeficientas K_{st}	1,00	0,95	0,86	0,80

Koeficiento K_{st} orientacinės vertės [53, 81]: $K_{st} = 1,5 - 1,6$ (automagistralėms), $K_{st} = 1,4 - 1,5$ (I kategorijos keliams), $K_{st} = 1,3 - 1,4$ (II kategorijos keliams), $K_{st} = 1,2 - 1,3$ (III kategorijos keliams), $K_{st} = 1,1 - 1,2$ (IV kategorijos keliams) ir $K_{st} = 1,05 - 1,1$ (V kategorijos su asfaltine danga keliams). Pateikti rezultatai (žr. 3.4 lentelę) rodo, kad dangos konstrukcijos stipris jos funkcionavimo pradiniu laikotarpiu, atliekant dangos operatyvius remontus,

mažėja lėčiau, o artėjant prie jos profilaktinio remonto momento (atsiradus makropažaidoms) – ženkliai greičiau: pirmuoju laikotarpiu stiprio koeficiento K_{st} vertė vidutiniškai sumažėja maždaug 5 %, o antruoju – maždaug 13–15 %.



3.12pav. Kelio Anykščiai-Troškūnai-Panevėžys tirtų ruožų dangos konstrukcijos (KDK) tamprinio įlinkio l vidutinių verčių ir jo vidutinio kvadratinio nuokrypio σ_l verčių stulpelinė diagrama

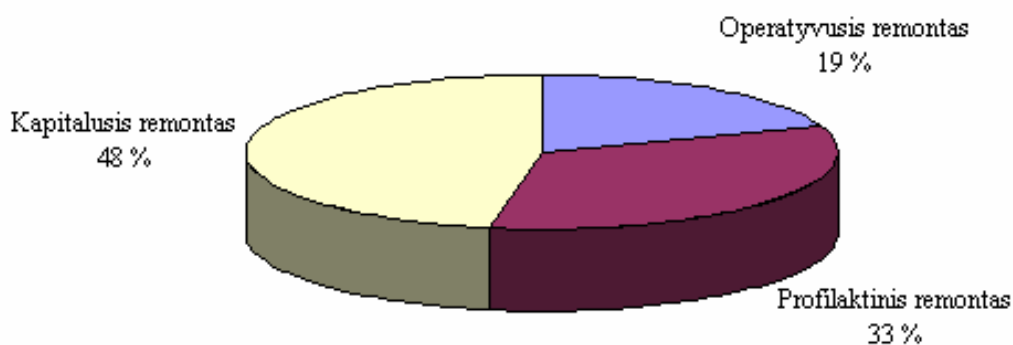


3.13pav. Kelio Anykščiai-Troškūnai-Panevėžys tirtų ruožų dangos konstrukcijos (KDK) tampros modulio E vidutinių verčių ir jo vidutinio kvadratinio nuokrypio σ_E verčių stulpelinė diagrama

Tyrimų rezultatai rodo (žr. 3.12 ir 3.13 pav.), kad tirtuose ruožuose dangos konstrukcijos tampriojo įlinkio l ir tampros modulio E vidutinės vertės kinta ganėtinai ženkliai, o šių rodiklių (l ir E) vidutinių kvadratinų nuokrypių, atitinkamai σ_l ir σ_E , vertės taip pat kito.

Pagal tyrimų rezultatus (žr. 3.4 lent. ir V priedo V.2 lent.) galima padaryti išvadą: kai kelių dangos suirties mastas D pasiekia vertę $D > 16\%$, o stiprio koeficientas K_{st} vertę $K_{st} \leq 0,80$ – yra reikalingas kapitalusis remontas, kai $D = 8 - 16\%$ ir $K_{st} \leq 0,86$ – yra reikalingas profilaktinis remontas ir kai $D = 5 - 8\%$, o $K_{st} \leq 0,95$ – yra reikalingas operatyvusis remontas. Pateikti tyrimų rezultatai gerai atitinka ankstesnių tyrimų [12, 81] rezultatus – tai patvirtina šių mūsų tyrimų rezultatų patikimumą.

Mūsų tyrimų rezultatai rodo (žr. 3.4 lent. ir III priedo III.2 lent.), kad kelio 48 % tirtų dangos konstrukcijos ruožų būtina atlikti kapitalųjį, 33 % tirtų jo ruožų – asfaltinės dangos profilaktinį, o 19 % tirtų jo ruožų – šios dangos operatyvųjį remontus (3.14 pav.).



3.14pav. Duomenų apie kelio Anykščiai–Troškūnai–Panevėžys tirtų dangos konstrukcijos ruožų dangos remonto būtinumą, remonto pobūdį ir jo apimtį, žiūrint dangos konstrukcijos ir dangos būklės, išreikštos suirties mastu D , skritulinė diagrama

Šie mūsų tyrimai objektyviai parodo, kad, nustatčius kelių dangos suirties masto D arba stiprio koeficiento K_{st} vertes, galima numatyti racionalias ir savalaikes jos remonto priemones ir prailginti jos realią funkcionavimo trukmę.

3.3. Išvados

1. Laboratoriniais parinktos sudėties (žr. 3.2 lentelę) asfaltbetonio tyrimais nustatytus nuovargio rodiklius (esant $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai) galima vertinti kaip būdingus, analizuojant asfaltbetonio savybes (žr. (3.3) formulę ir III priedo III.2 lent.). Nustatyta, kad apie 80 % medžiagos stiprio išsikvojama paskutinėje (20 %) jos funkcionavimo laikotarpio dalyje, o

asfaltbetonio bandinių atsparumas tempimui lenkiant R_p nuo rišančiosios medžiagos senėjimo labiau priklauso esant žemai, apie 0 °C, temperatūrai, tačiau esant aukštesnei nei +22 °C temperatūrai – praktiškai nepriklauso (žr. 3.8 ir 3.9 pav.). Šis dėsningumas apskaičiuotas 0 °C ir +25 °C temperatūroms ir apima laikotarpį, kuris Lietuvos sąlygoms trunka apie šešis mėnesius per metus.

2. Natūriniais tyrimams buvo parinkti aštuoniolika vienodo ilgio (po 100 m) kelio Anykščiai–Troškūnai–Panevėžys dangos konstrukcijos ruožų, kurių 198-uose taškuose (po 11 matavimų kiekviename iš 18-os ruožų) buvo išmatuotas dangos konstrukcijos tamprusis įlinkis. Atliktais kelių dangos konstrukcijos būklės vizualiais ir instrumentiniais tyrimais (žr. 3.2 skyrių) nustatėme, kad, žinant asfaltinės dangos suirties mastą D , dangos konstrukcijos tampros modulį E ir jos stiprio koeficientą K_{st} , galima objektyviai įvertinti jos būklę (žr. 3.4 lentelę), nustatyti jos remonto būtinumą, remonto pobūdį bei jo darbų apimtį (žr. 3.14 pav.). Įrodėme, kad kelių dangos konstrukcijos tamprusis įlinkis gali būti naudojamas jos būklei įvertinti.

3. Nustatėme (žr. 3.4 lentelę), kad tirtu kelio ruožų dangos konstrukcijos stipris jos funkcionavimo pradinio laikotarpiu, atliekant kelių dangos operatyvius remontus, mažėja lėčiau, o artėjant prie jos profilaktinio remonto momento (atsiradus makropažaidoms) – ženkliai greičiau: pirmuoju laikotarpiu kelių dangos konstrukcijos stiprio koeficiento K_{st} vertė vidutiniškai sumažėja maždaug 5 %, o antruoju – maždaug 13–15%.

4. Palyginę atliktų laboratorinių bei natūrinių tyrimų rezultatus (žr. 3 skyrių) su atliktais teoriniais apskaičiavimais (žr. 2 skyrių) galime tvirtinti, kad pasiūlyta modelis (žr. (2.12) ir (2.18–2.41) formules bei 2.6–2.8 pav.) pakankamai gerai parodo kelių dangos suirties masto procesą ir gali būti taikomas kelių dangos konstrukcijos likutiniam stipriui įvertinti.

5. Pasiūlyta metodika (žr. 3.2 skyrių ir IV bei V priedus) kelių dangos konstrukcijos remontų būtinumui nustatyti gali padėti, įvertinus jos būklę, laiku atlikti būtinąją jos ar kelių dangos remontą, sutaupyti remontams numatytas lėšas ir prailginti kelių dangos konstrukcijos funkcionavimo trukmę.

4. KELIŲ DANGOS ASFALTBETONIO SLUOKSNIŲ FUNKCIONAVIMO TRUKMĖS BEI LIKUTINIO STIPRIO SKAITINĖ ANALIZĖ

Šio skyriaus medžiaga paskelbta autoriaus publikacijose [2a, 6a].

4.1. Kelių dangos funkcionavimo trukmę nulemiantys sezoniniai veiksniai

Kelių dangos konstrukcijos tampros moduliui E , jos suirties mastui D , stipriui, išreikštam stiprio koeficientu K_{st} , bei likutiniam stipriui nustatyti naudojome 2003–2005 m. Lietuvos krašto kelyje Anykščiai–Troškūnai–Panevėžys atliktų natūrinių tyrimų (žiūr. 3.2 skirsnį) rezultatus.

Kadangi kiekvieno atskiro Lietuvos regiono viduje vietinės sąlygos (gruntai ir hidrologinės bei klimato) skiriasi gan neženkliai, todėl taikėme prielaidą, kad sezoninių veiksmų (oro temperatūros, grunto drėgnio, automobilių eismo intensyvumo) metinį kitėjimą galima apibūdinti kiekvieno mėnesio šių rodiklių vidutinėmis vertėmis.

Mėnesio vidutinė oro temperatūra gali būti nustatyta pasinaudojus [150] darbe atliktais tyrimais. Organiniais rišikliais sustiprintų medžiagų tampros modulis bei stipris (atsparumas tempimui lenkiant) ženkliai priklauso nuo šių medžiagų temperatūros. Kelių dangos asfaltbetonio viršutinio sluoksnio temperatūrai $t_{ab}^{(1)}$ nustatyti taikėme šias empirines formules [149]:

$$t_{ab}^{(1)} = 1,05t_{or} + 1,9, \quad \text{kai } t_{or} \leq 10^\circ\text{C} \quad (4.1)$$

ir

$$t_{ab}^{(1)} = 1,3t_{or} + 7, \quad \text{kai } t_{or} > 10^\circ\text{C}, \quad (4.2)$$

čia: $t_{ab}^{(i)}$ – asfaltbetonio viršutinio sluoksnio temperatūra, $^\circ\text{C}$; t_{or} – oro temperatūra, $^\circ\text{C}$.

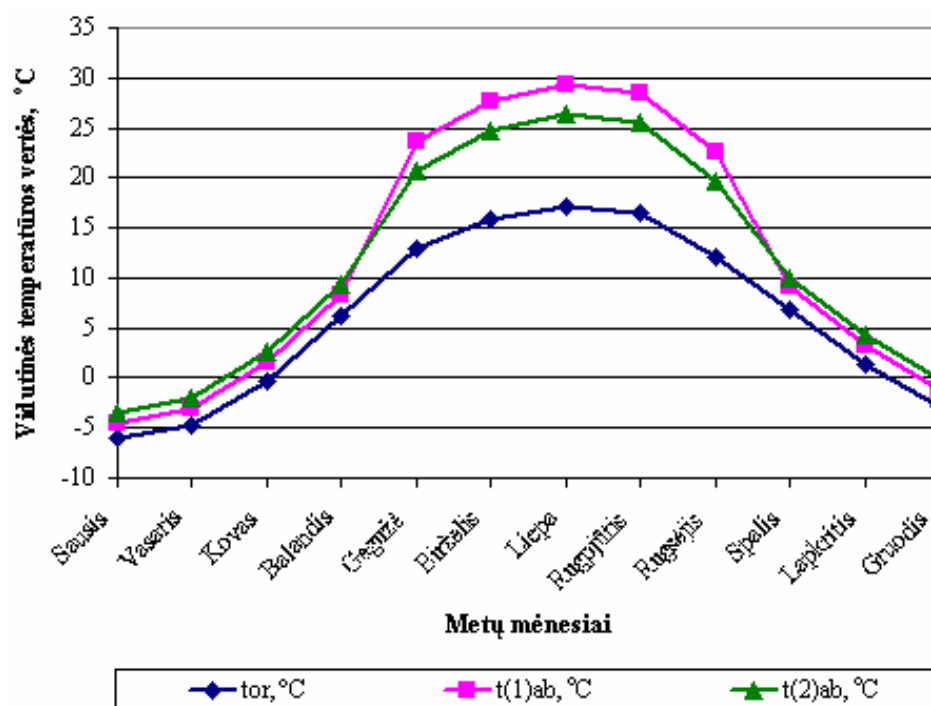
Kelių dangos asfaltbetonio apatinio sluoksnio temperatūrai $t_{ab}^{(2)}$ nustatyti taikėme šias empirines formules [149]:

$$t_{ab}^{(2)} = 1,05t_{or} + 2,9, \quad \text{kai } t_{or} \leq 10^\circ\text{C} \quad (4.3)$$

ir

$$t_{ab}^{(2)} = 1,3t_{or} + 4, \quad \text{kai } t_{or} > 10^\circ\text{C} \quad (4.4)$$

Kelių dangos asfaltbetonio viršutinio bei apatinio sluoksnių atskirų mėnesių temperatūros daugiamečiai (1961–1990 metų) vidurkliai Lietuvos sąlygomis pateikti 4.1 paveiksle.



4.1 pav. Oro t_{or} ir kelių dangos asfaltbetonio viršutinio $t_{ab}^{(1)}$ ir apatinio $t_{ab}^{(2)}$ sluoksnių vidutinių temperatūros verčių kitėjimo atskirais metų mėnesiais grafikas

Žinodami asfaltbetonio temperatūrą ir, pasinaudodami [9] darbu nustatėme asfaltbetonio dangos ir kitų kelių dangos konstrukcijos sluoksnių medžiagų tampros modulius E (4.2 pav.):

$$E_{ab}^{(1)} = 3481,2e^{-0,0495t}, \text{ MPa, kai naudojamas B100/150 markės bitumas} \quad (4.5)$$

ir

$$E_{ab}^{(2)} = 4824,2e^{-0,0524t}, \text{ MPa, kai naudojamas B50/70 markės bitumas} \quad (4.6)$$

čia: t – asfaltbetonio sluoksnių temperatūra, °C.

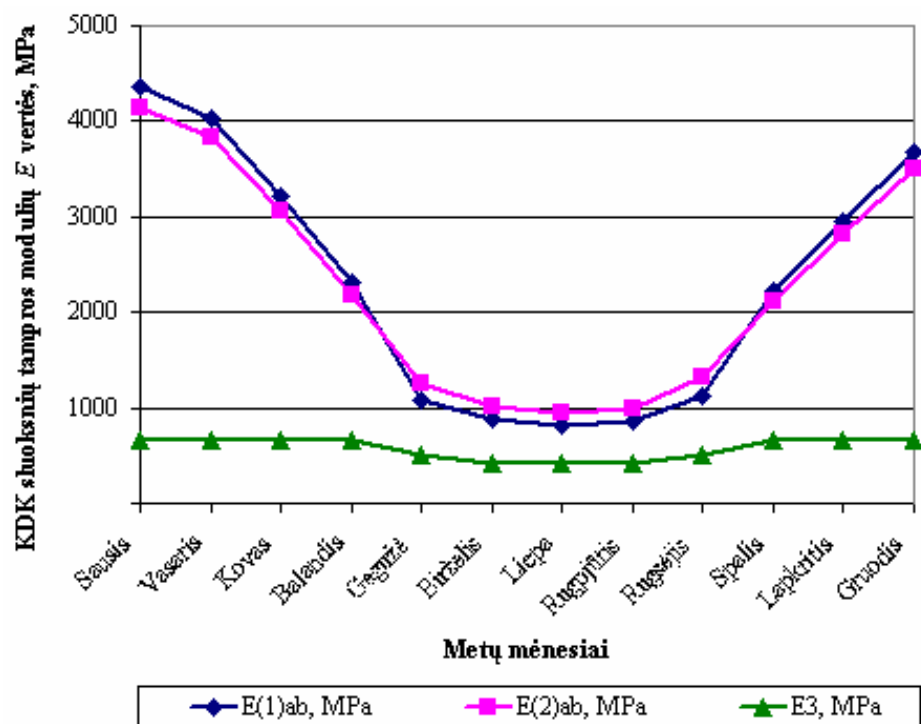
Kelių dangos konstrukcijos šalčiui atsparaus sluoksnio E_4 ir žemės sankasos grunto E_5 tampros modulių nevertinome dėl jų verčių neženklaus kitėjimo (4.2 pav.).

Pagal tyrimų [151] duomenis nustatėme asfaltbetonio atsparumo tempimui lenkiant R_l ir temperatūros t , rodikliui t kintant $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t \leq +40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ribose, sietį (4.3 pav.):

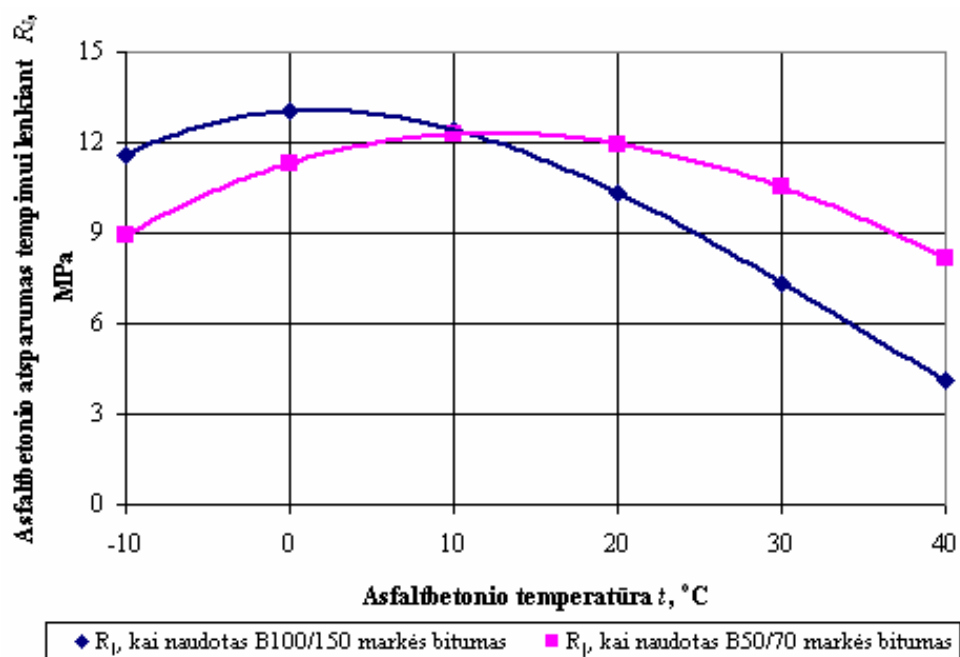
$$R_l = 0,0002t^3 - 0,0104t^2 + 0,0326t + 13,942, \text{ MPa, kai naudojamas B100/150 markės bitumas} \quad (4.7)$$

ir

$$R_l = 0,00003t^3 - 0,0073t^2 + 0,1656t + 11,316, \text{ MPa, kai naudojamas B50/70 markės bitumas} \quad (4.8)$$



4.2 pav. Kelių dangos konstrukcijos (KDK) sluoksnių (viršutinio $E_{ab}^{(1)}$ ir apatinio $E_{ab}^{(2)}$ asfaltbetonio sluoksnių ir žvyro pagrindo E_3) tampos modulių vidutinių verčių kitėjimo atskirais metų mėnesiais grafikas



4.3 pav. Asfaltbetonio atsparumo tempimui lenkiant R_t ir jo temperatūros t sieties grafikas

Pagal [9, 148, 152] darbų nuorodas išmatuotas asfaltbetonio atsparumas tempimui lenkiant R_l buvo redukuotas į projektinį atsparumą $R_l^{(p)}$:

$$R_l^{(p)} = kR_l \text{ MPa}, \quad (4.9)$$

čia: k – koeficientas, įvertinantis asfaltbetonio atsparumo nuovargiui atsargą, $k = 0,15$.

Koeficientui k nustatyti (kai apkrovos poveikio trukmė 0,1 s ir tyrimų temperatūra 5 °C) galima naudotis formule [14]:

$$R_l^{(p)} = 0,1E_{ab}^{0,42}, \text{ MPa}. \quad (4.10)$$

Nustatėme, kad asfaltbetonio faktinis tampros modulis $E_{ab|t=5^0C} = 2718 \text{ MPa}$, o jo projektinis atsparumas tempimui lenkiant $R_l^{(p)} = 5,0 \text{ MPa}$, bei jo faktinis atsparumas R_l yra $R_{l|t=5^0C} = 14,12 \text{ MPa}$ ir rodiklis $k = R_l^{(p)} / R_l = 5 / 14,12 = 0,35$.

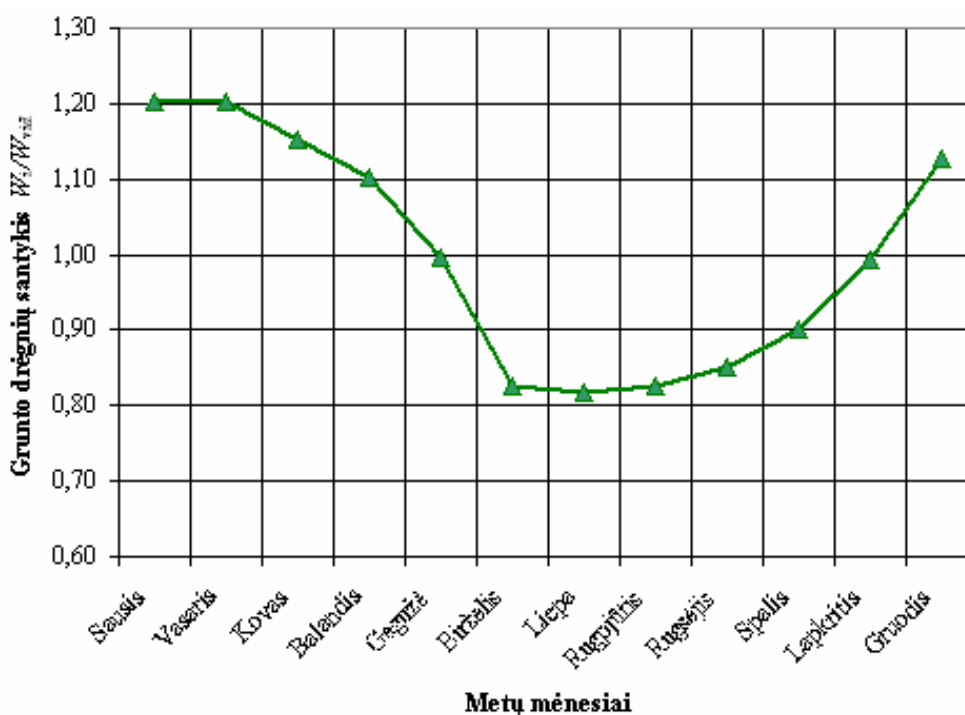
Kitas turintis įtakos kelių dangos konstrukcijos funkcionavimo trukmei veiksnys yra žemės sankasos grunto drėgnis. Aktyviojoje zonoje jis priklauso nuo regiono klimato bei hidrologinių sąlygų, grunto tipo ir žemės sankasos konstrukcijos. Nuo drėgnio priklauso grunto tampros modulis E_{gr} , jo vidaus trinties kampas φ_{gr} bei lyginamoji sankiba C_{gr} . Šie rodikliai gali būti nustatyti eksperimentais arba grunto projekcinio drėgnio W_p vertė gali būti paimta iš norminio dokumento [153]. Nepalankiausiam metų laikotarpiui (pavasariui, kartais rudeniiui) buvo nustatytas grunto aktyvios zonos sluoksnio daugiametis vidutinis drėgnis W_{vid} , naudotas rodiklių E_{gr} , φ_{gr} , C_{gr} kitėjimui vienerių metų bėgyje įvertinti. Tyrimų metu buvo paimti grunto bandiniai, kad nustatyti grunto drėgnį ir granulimetrinę sudėtį bei plastiškumą (takumo ir plastiškumo drėgnį) (4.1 lent.). Bandiniai buvo paimti kiekviename tyrimų ruože, dvejose-trijose vietose kelkraštyje, 0,5 m ir 1,0 m gylyje, 0,1–0,5 m atstumu nuo važiuojamosios dalies krašto. Apdorojus tyrimų duomenis, buvo apskaičiuotas grunto drėgnis, išreikštas metinio vidutinio drėgnio W_{vid} dalimis W_i / W_{vid} (4.1 lent. ir 4.4 pav.).

Žinant rodiklių E_{gr} , φ_{gr} ir C_{gr} priklausomybę nuo grunto drėgnių W_i (vidutinis drėgnis) ir W_t (takumo drėgnis) santykio (W_i / W_t), įvertinus klimato sąlygas, dangos konstrukcijos įrengimo technines sąlygas ir jos funkcionavimo numatytą trukmę, galima parinkti tinkamiausią gruntą, skirtą žemės sankasai įrengti [153, 154]. Akivaizdu, kad žemės sankasai reikia naudoti gruntą su mažiausiai kintančiais rodikliais E_{gr} , φ_{gr} ir C_{gr} .

4.1 lentelė. Žemės sankasos grunto (molingajo smėlio) drėgnio vidutinės vertės.

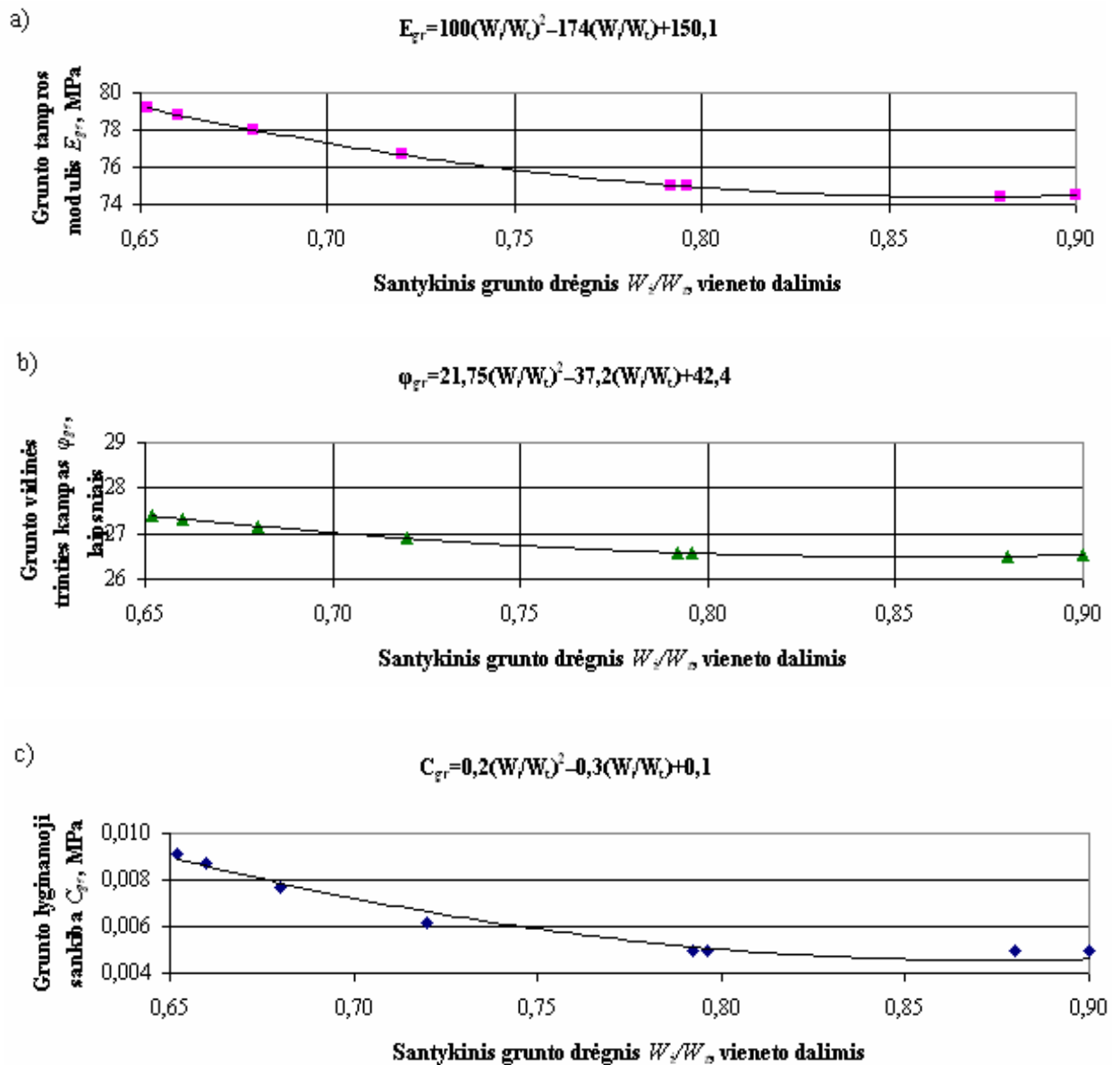
Mėnesiai	Metai		Grunto vidutinis drėgnis W_i , %	Grunto drėgnio santykinų rodiklių vertės	
	2003	2004		W_i/W_t	W_i/W_{vid}
Sausis		24,00	24,00	0,96	1,20
Vasaris		24,00	24,00	0,96	1,20
Kovas		23,00	23,00	0,92	1,15
Balandis		22,00	22,00	0,88	1,10
Gegužė	20,00	19,80	19,90	0,80	1,00
Birželis	16,50		16,50	0,66	0,83
Liepa	16,30		16,30	0,65	0,82
Rugpjūtis	16,50		16,50	0,66	0,83
Rugsėjis	17,00		17,00	0,68	0,85
Spalis	18,00		18,00	0,72	0,90
Lapkritis	19,80		19,80	0,79	0,99
Gruodis	22,50		22,50	0,90	1,13

Pastaba. Rodiklio W_i vidurkis $W_{vid} = 19,96$ %, o rodiklis $W_t = 25,00$ %.



4.4 pav. Žemės sankasos grunto (molingajo smėlio) drėgnio kitėjimo atskirais mėnesiais (pagal 2003–2004 m. tyrimų duomenis) grafikas

Žinant [153], kad vienodo tipo gruntų drėgnio kitėjimas metų bėgyje yra beveik pastovus, galima, remiantis [153] darbo nurodymais, nustatyti šio grunto drėgnių W_{vid} ir W_t santykio W_{vid} / W_t (4.1 lent.) ir grunto rodiklių E_{gr} , ϕ_{gr} ir C_{gr} verčių sietį (4.5 pav.).



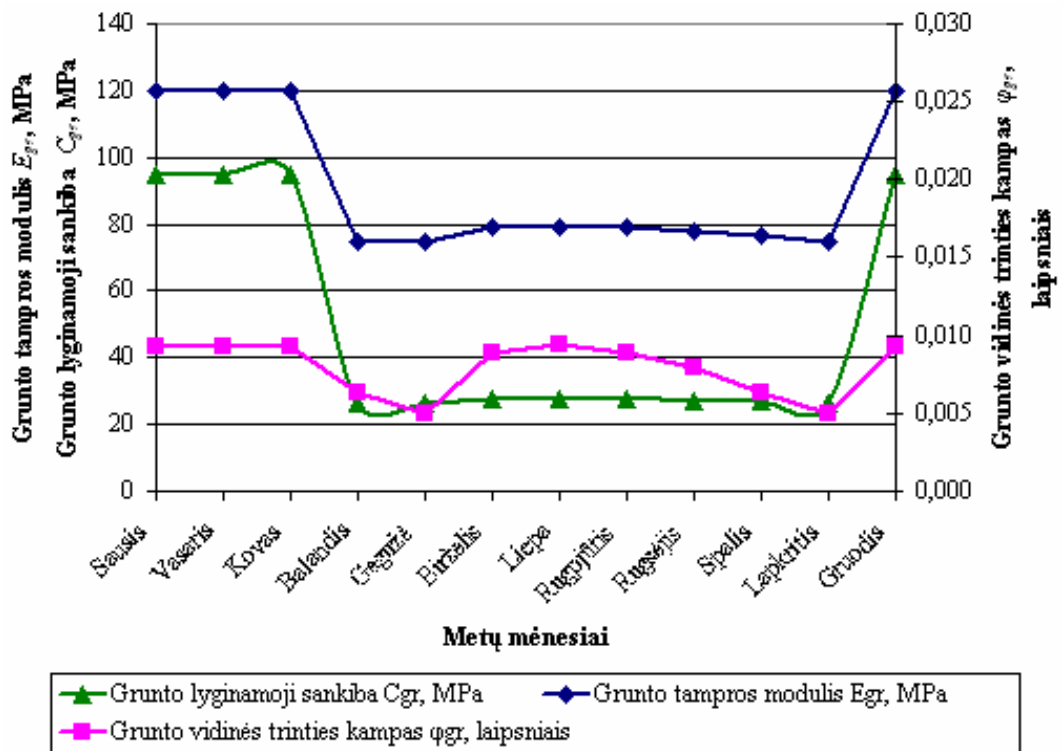
4.5 pav. Mologojų smėlio gruntotampros modulio E_{gr} (a), vidinės trinties kampo φ_{gr} (b), grunto lyginamosios sandaros C_{gr} (c) ir šio grunto santykinio drėgčio W_i/W_t sistis

Kelių dangos konstrukcijos bei žemės sankasos grunto išalui (4.6 pav.) įvertinti, grunto mechaniniai rodikliai, esant oro temperatūrai žemesnei kaip 0°C (pagal [9, 148, 153] darbų rekomendacijas) buvo sąlyginai priimti pastovūs ($E_{gr}=120\text{ MPa}$, $\varphi_{gr}=28^\circ$ ir $C_{gr}=0,01\text{ MPa}$).

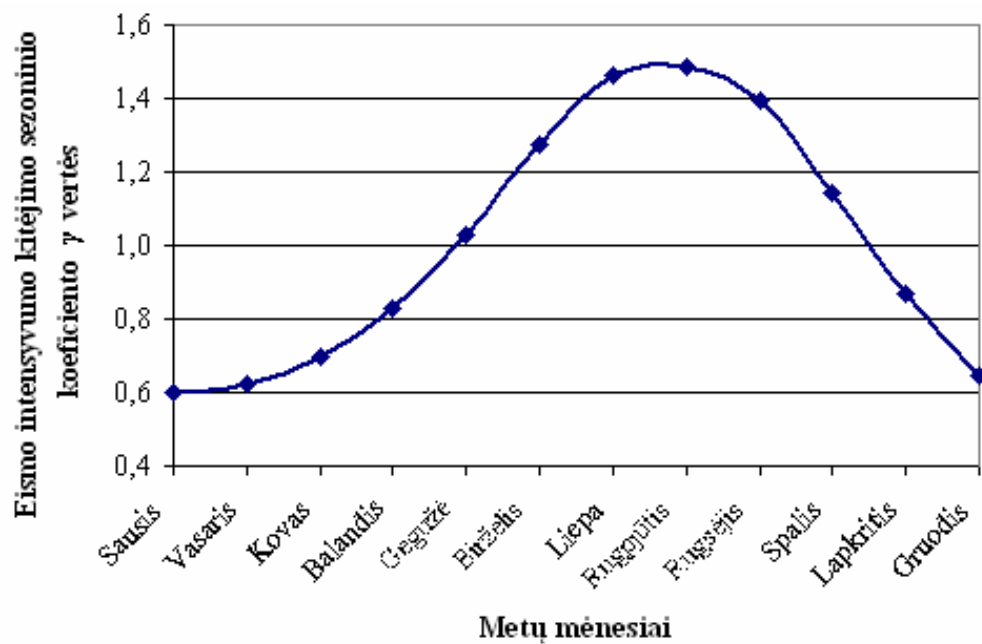
Metų bėgyje kitėja ne tik kelių dangos konstrukcijos ir žemės sankasos grunto savybės, bet ir transporto priemonių eismo intensyvumas. Didžiausias eismo intensyvumas būna vasarą ir rudens pradžioje (liepos, rugpjūčio ir rugsėjo mėnesiais), o mažiausias – žiemą. Eismo netolygumą metų bėgyje įvertinome eismo intensyvumo kitėjimo sezoniniu (sezoninių pokyčių) koeficientu [30] (4.7 pav.):

$$\gamma_i = \frac{1}{K_{ri}}, \quad (4.11)$$

čia: K_{ri} – i -ojo metų mėnesio transporto priemonių vidutinio paros eismo intensyvumo redukcijos vidutiniu metiniu paros eismo intensyvumu koeficientas [30].



4.6 pav. Žemės sankasos grunto rodiklių kitėjimo atskirais metų mėnesiais grafikas

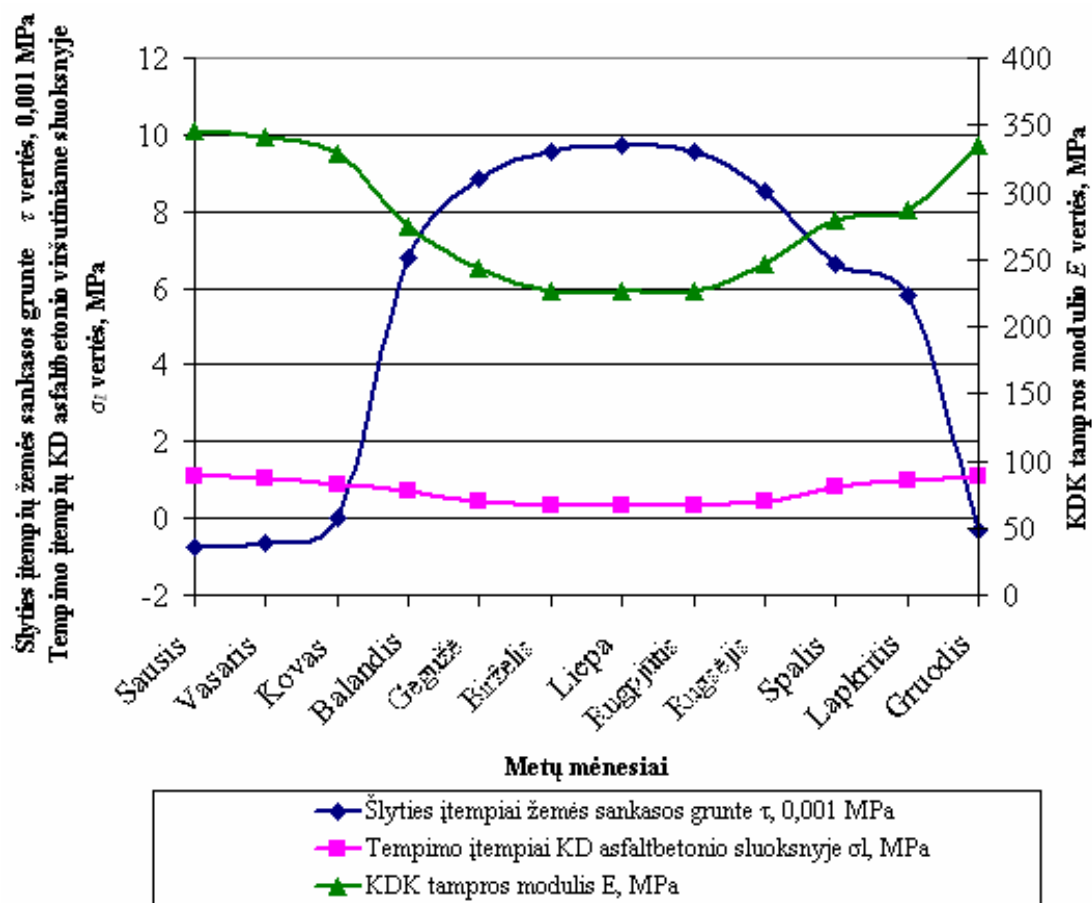


4.7 pav. Eismo intensyvumo kitėjimo sezoninio (sezoninių pokyčių) koeficiento verčių (atskirais metų mėnesiais) grafikas

Nustačius kelių dangos konstrukciją veikiančius sezoninius veiksnius, naudojant duomenis, apibūdinančius kelių dangos sezoninę būklę ir žinant automobilio ašies apkrovą, buvo nustatyti jos stiprio rodikliai ir įtempiai (4.8 pav.). Kelių dangos konstrukcijos tampros moduliui nustatyti naudojome žinomą [30] formulę:

$$E^{(i)} = \frac{E_1^{(i)}}{1 + \frac{0,936 \frac{E_1^{(i)}}{E_2^{(i)}} - 1}{\sqrt{1 + \left[\left(0,936 \frac{E_1^{(i)}}{E_2^{(i)}} \right)^{\frac{2}{3}} 4 \left(\frac{h_i}{D_p} \right)^2 \right]}}}}, \quad (4.12)$$

čia: $E^{(i)}$ – dvisluoksnės sistemos bendrasis tampros modulis i -uoju metų laikotarpiu, MPa; $E_1^{(i)}$ ir $E_2^{(i)}$ – kelių dangos konstrukcijos viršutinio sluoksnio (asfaltbetonio) tampros moduliai i -uoju metų laikotarpiu, MPa; h_i – kelių dangos konstrukcijos viršutinio sluoksnio storis, m; D_p – skritulio, kurio plotas yra lygus projekcinio automobilio rato pėdsako plotui, skersmuo, m.



4.8 pav. Kelių dangos (KD) konstrukcijos sluoksnių ir žemės sankasos grunto charakteristikų kitėjimo atskirais mėnesiais (metų bėgyje) grafikas

Šlyties įtempiai žemės sankasos grunte buvo nustatyti pagal formules (2.35–2.37), o tempimo lenkiant įtempiai asfaltbetonio sluoksniuose – pagal programą ALGOFORT [155], kuri pateikia tamprumo teorijos tikslų daugiasluoksnės tampriosios puserdvės sprendinį.

4.8 paveiksle parodyta, kad šlyties įtempiai žemės sankasos grunte žiemą keičia savo ženklą, t.y. užšalant (dėl vandens tūrio didėjimo) gruntas būna iš anksto įtemptame būvyje. Kelių dangos konstrukcijos tampros modulio E ir asfaltbetonio sluoksnių atsparumo tempimui lenkiant R_l kitėjimo pobūdis metų bėgyje – panašus, kadangi šis kitėjimas labiausiai priklauso nuo jos sluoksnių temperatūros.

Pagal kelių dangos konstrukcijos įtempių ir deformacijų metų bėgyje kitėjimą nustatomas (pagal bet kurią stiprio kriterijų [9]) projektinių automobilių leistinasis eismo intensyvumas (žr. (2.18), (2.22), (2.23) formules):

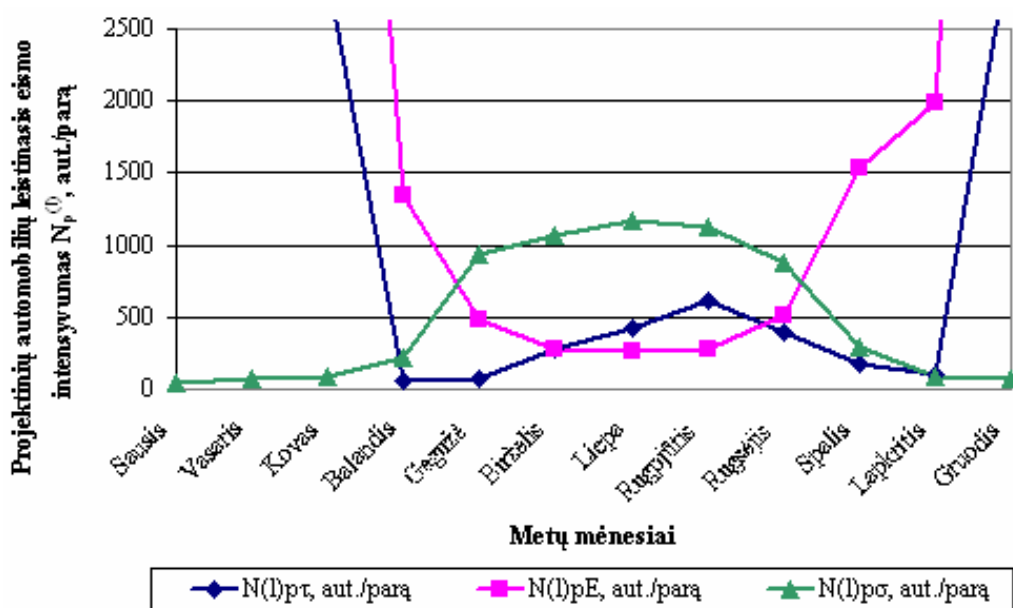
$$N_{pE}^{(i)} = 10^{\frac{1}{A} \left(\frac{E^{(i)}}{K_{st}} - B \right)}, \text{ aut./para}, \quad (4.13)$$

$$N_{p\tau}^{(i)} = \left(2,45 \frac{k_1 k_3}{K_{st}} \frac{C_{gr}^{(i)}}{\tau^{(i)}} \right)^b, \text{ aut./para}, \quad (4.14)$$

$$N_{p\sigma}^{(i)} = \frac{(k_n^{(i)})^b \beta_{sk}^{(i)}}{365 T_f} (1 - t_\alpha V)^b, \text{ aut./para} \quad (4.15)$$

čia: $E^{(i)}$ – kelių dangos konstrukcijos tampros modulis, MPa; A ir B – koeficientai (A ir B grupių automobiliams: $A = 70$ MPa; $B_A = 56$ MPa ir $B_B = 0$ MPa); K_{st} – kelių dangos konstrukcijos stiprio koeficientas; k_1 – koeficientas, įvertinantis kartotinių trumpalaikių apkrovų ardantįjį poveikį, $k_1 = 0,6$ [9]; k_3 – koeficientas, apibūdinantis grunto funkcionavimo kelių dangos konstrukcijoje sąlygas, nustatomas pagal [9] darbo nuorodas; $C_{gr}^{(i)}$ – grunto lyginamoji sankiba, MPa; b – parametras, apibūdinantis asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo trukmės nuovargį esant apkrovos lygiui σ/R ; τ – aktyvūs (šlyties) įtempiai žemės sankasos grunte, veikiant trumpalaikiai apkrovai, MPa; $k_n^{(i)}$ – asfaltbetonio atsparumo nuovargiui rodiklis; $\beta_{sk}^{(i)}$ – koeficientas automobilių ratų važiavimo nuokrypiui nuo labiausiai tikėtinos vietos įvertinti (pasiskirstęs pagal normalųjį dėsnį); T_f – kelių dangos funkcionavimo trukmė, metais; t_α – pagal projektinį patikimumo lygį priimtas nuokrypio norminis koeficientas; V – stiprio variacijos koeficientas.

Kelio Anykščiai–Troškūnai–Panevėžys tirtiems ruožams nustatėme (4.9 pav.), kad pagal asfaltbetonio sluoksnių leistinojo σ kriterijų leistinasis eismo intensyvumas $N_{p\sigma}^{(l)}$ kinta nuo 45 aut./parą iki 1173 aut./parą. Pagal tai labiausiai nepalankus metų laikotarpis yra ganėtinai ilgas – septyni mėnesiai (spalis–gruodis ir sausis–balandis). Nors asfaltbetonio sluoksnių medžiagų stipris šiuo laikotarpiu, lyginant su vėlesniais metų mėnesiais, padidėja daugiau nei 50 %, tačiau šiuo laikotarpiu asfaltbetonio sluoksniuose 2,8 karto padidėja įtempiai nuo automobilių ratų apkrovos, todėl šių sluoksnių nuovargio atsargos koeficientas sumažėja ir turi būti sumažintas leistinasis transporto priemonių eismo intensyvumas.



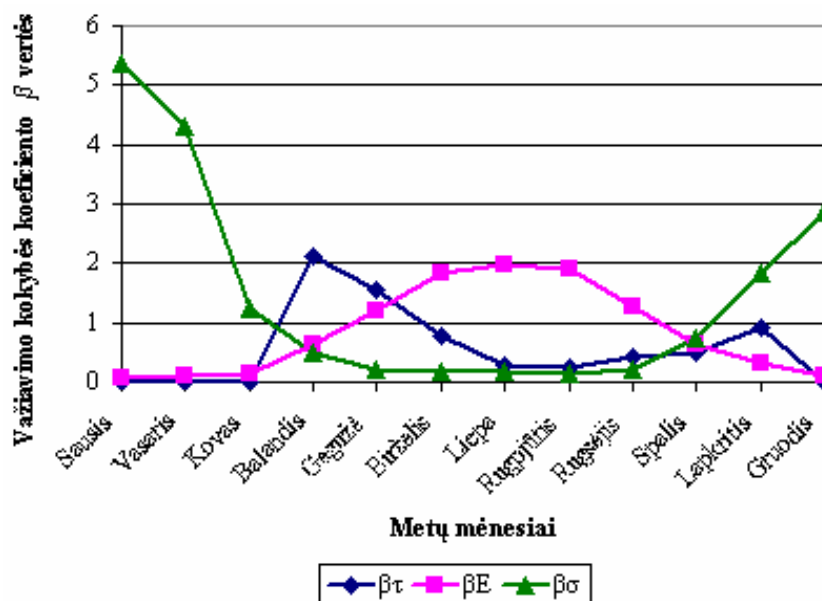
4.9 pav. Kelio Anykščiai–Troškūnai–Panevėžys projektinių automobilių leistinojo eismo intensyvumo $N_{pr}^{(l)}$, $N_{pE}^{(l)}$, $N_{p\sigma}^{(l)}$ kitėjimo atskirais metų mėnesiais, atitinkančio kelių dangos konstrukcijos stiprio kriterijus τ , E , σ , grafikas

Pagal kelių dangos konstrukcijos tampriojo įlinkio kriterijų kelio Anykščiai–Troškūnai–Panevėžys tirtuose ruožuose transporto priemonių leistinasis eismo intensyvumas $N_{pE}^{(l)}$ vienerių metų bėgyje kinta nuo daugiau kaip 2500 aut./parą (žiema) iki 266 aut./parą (vasarą) (žr. 4.9 pav.). Taigi pagal šį kriterijų labiausiai nepalankus yra vasaros laikotarpis, per kurį kelių dangos konstrukcijos tampros modulio sumažėjimą nulemia oro ir asfaltbetonio temperatūros padidėjimas.

Patvirtinta (žr. 4.9 pav.), kad pagal šlyties įtempių žemės sankasos grunte τ kriterijų labiausiai pavojaingas yra pavasario (balandžio ir gegužės mėnesiais) laikotarpis, kai mūsų apskaičiuotas transporto priemonių leistinasis eismo intensyvumas $N_{pr}^{(l)}$ (dėl grunto permirkimo polaidžio vandeniui) yra mažiausias bei rudens (spalio ir lapkričio mėnesiais) laikotarpis, kai

žemės sankasos grunto drėgnis padidėja dėl dažnų liūčių.

Nustačius pavojingų laikotarpių trukmę pagal bet kurį kelių dangos konstrukcijos stiprio kriterijų [9], transporto priemonių leistinąjį eismo intensyvumą ir kelių dangos suirties mastą galima įvertinti eismo kokybės koeficiento β vertėmis (žr. I priedą) atskirais metų mėnesiais ir lyginti šias rodiklio β vertes su vidutinėmis metinėmis jo vertėmis (žr. (2.27) formulę). Nustatėme, kad labiausiai kelių dangos konstrukcijai pavojingos eismo sąlygos yra gruodžio, sausio ir vasario mėnesiais (4.10 pav.).



4.10 pav. Kelio Anykščiai-Troškūnai-Panevėžys eismo kokybės koeficiento β verčių pagal kelių dangos konstrukcijos stiprio kriterijus τ , E ir σ , atitinkamai, β_τ , β_E ir β_σ , kitėjimo atskirais metų mėnesiais grafikas

Didžiausia tikimybė asfaltbetonio sluoksniuose susidaryti nuovargio plyšiams būna rudenį ir žiemą, o pavasarį, dėl žemės sankasos grunto stiprio sumažėjimo, gali susidaryti ženkliai daugiau ir didesnio masto pažeidų: įstrižų plyšių, plyšių tinklo, įdubų ir kt. kelių dangos platinės pažeidos, pakilus oro ir jos temperatūrai, susidaro vasarą ir būna mažiau pavojingos eismui. Akivaizdu, kad nagrinėjamai kelių dangos konstrukcijai vietos klimato, gruntų ir hidrologinėms sąlygoms įvertinti svarbiausi taikytini kriterijai yra jos tamprusis įlinkis bei šlyties deformacija žemės sankasos grunte. Nepalankiausiu laikotarpiu išvengti kelių dangos intensyvių pažeidų galima kontroliuojant sunkiasvorio transporto eismą ir, jeigu projektinių automobilių eismo intensyvumas viršija šiam metų sezonui leistinąjį jų eismo intensyvumą, jį ribojant.

Pagal tyrimų [77, 151] duomenis asfaltbetonio projektinė temperatūra, kuriai esant apibūdinamas asfaltbetonio atsparumas tempimui lenkiant R_l ir įtempiai σ_l , taikoma lygi $0\text{ }^\circ\text{C}$,

nes tada pradeda tirpti asfaltbetonio porose ledas ir susidaro labai palankios sąlygos medžiagoje pažaidoms susidaryti. Tai labai pavojingos sąlygos asfaltbetonio dangai funkcionuoti.

Vertinti asfaltbetonio stiprio atsargą pagal jo atsparumo nuovargiui rodiklį k_n , išreiškiamą santykiu R_t / σ_t , [9, 14, 77] darbuose siūloma tik tada, kai paros vidutinė oro temperatūra yra nuo 0 °C iki 10 °C. Šio intervalo temperatūra, būdinga išalusios kelių dangos konstrukcijos atitirpimo pavasarį temperatūrai, trunka maždaug vieną mėnesį. Asfaltbetonio stipris pagal atsparumo tempimui lenkiant R_t kriterijų kitais metų laikotarpiais nevertinamas. Rodiklis k_n vienu metų bėgyje kitėja ganėtinai ženkliai, o medžiagos nuovargis labiausiai pasireiškia tada, kai oro temperatūra būna žemesnė nei 0 °C.

Atlikę tyrimus įsitikinome, kad, įvertinant medžiagos stiprio atsargą, kriterijumi turi būti ne tik medžiagos atsparumas tempimui lenkiant R_t , bet ir jos atsparumo nuovargiui koeficientas k_n . Projektuojant kelių dangas mažiausia rodiklio k_n vertė turėtų būti taikoma projektiniam metų laikotarpiui. Visgi projektinio laikotarpio sąvokos siūlome netaikyti, nes, jį taikant, kelių dangos funkcionavimas būtų vertinamas tik labai trumpą laikotarpį ir neatspindėtų jos stiprio kitėjimo visos dinamikos ir medžiagos funkcionavimo sąlygų vienerių metų atskirų sezonų bėgyje bei jos funkcionavimo trukmės apskritai. Pagal turimų [9, 76] rezultatus kelių dangoms pavojingiausias būna išalusio grunto atitirpimo pavasarį laikotarpis. Šiuo laikotarpiu grunto mechaniniai rodikliai staigiai pablogėja, o asfaltbetonio sluoksnių standumas dar būna pakankamai didelis, todėl kelių dangos (dėl sunkiasvorio transporto apkrovų poveikio) gali pradėti pleišėti. Šis požiūris teisingas yra tik dalinai, nes kelių dangos konstrukcijos funkcionavimo sąlygos apibūdinamos tarpusavyje susijusiais asfaltbetonio sluoksnių tempimo lenkiant įtempiais σ_t bei šlyties įtempiais žemės sankasos grunte τ . Šlyties įtempiai τ atitirpstant ledui grunte ir dėl σ_t kitėjimo taip pat kitėja, o rodiklis σ_t dalinai priklauso ir nuo rodiklio τ . Jų palyginimas (žr. 4.8 pav.) rodo, kad, gruntų ledui atitirpstant pavasarį (kovo ir balandžio mėnesiais), iškyla ribinio būvio pagal atsparumo tempimui lenkiant kriterijų susidarymo pavojus, o pavojus šiuo laikotarpiu pasiekti kelių dangos konstrukcijos ribinį pagal tamprųjų įlinkį būvį mažiausias būna kovo, o didžiausias balandžio mėnesiais.

Esant molio gruntams, kelių dangos konstrukcijos pavojingiausias būna pavasario laikotarpis, o smėlio gruntams ir rišikliais sutvirtintiems gruntams – vasara, nes, sumažėjus asfaltbetonio standumui, šiuose gruntuose padidėja įtempiai [9]. Kiekvienai kelių ir klimato zonai (čia ir toliau – KKZ) yra reglamentuojama kritinė temperatūra asfaltbetonio ir pagrindo bei žemės sankasos mažai rišlių sluoksnių atsparumui šlyties įtempiams įvertinti: II-ai KKZ – +20 °C; III-ai KKZ – +30 °C [9]. Asfaltbetonio projektinė temperatūra kelių dangos konstrukcijai

pagal tampriojo įlinkio kriterijų įvertinti [77] buvo taikoma 0 °C. Ji taip pat taikoma kelių dangos konstrukcijos stipriui pagal būtinąjį jos tampros modulį apibūdinti, todėl jos tampriojo įlinkio instrumentinius matavimus siūloma atlikti esant būtent šiai (0 °C) dangos temperatūrai. Visgi kelių dangos konstrukcijos stipris negali būti vieninteliu kriterijumi jos kokybei ar būklei įvertinti, nes jis tiesiogiai siejasi su kitais kriterijais, skirtais jos stipriui nustatyti. Žinant kelių dangos konstrukcijos stiprį (tampros modulį E) balandžio mėnesį (esant +10 °C temperatūrai) galima įvertinti žemės sankasos grunto būklę ir asfaltbetonio sluoksnių atsparumą tempimui lenkiant R_l (žr. 4.9 ir 4.10 pav.). Spalio mėnesį (esant +10 °C temperatūrai) taip pat gali būti nustatomas asfaltbetonio sluoksnių standumas. Liepos ir rugpjūčio mėnesiais, kai grunto atsparumas šlyčiai būna ganėtinai didelis, o asfaltbetonio atsparumo nuovargiui koeficiento k_n vertės būna didžiausios, kelių dangos konstrukcijos tamprusis įlinkis ženkliai apibūdina asfaltbetonio sluoksnių atsparumą šlyčiai. Akivaizdu, kad kiekvienu metų laikotarpiu pagal kelių dangos konstrukcijos stiprį (tampros modulį E) galima įvertinti jos būklę, taikant vieną ar kitą jos ribinio būvio kriterijų (žr. 4.9 pav.):

- a) balandžio mėnesį – pagal žemės sankasos grunto atsparumą šlyčiai ir asfaltbetonio atsparumą tempimui lenkiant;
- b) gegužės mėnesį – pagal žemės sankasos grunto ir kelių dangos pagrindo sluoksnių medžiagų (smėlio ar žvyro arba smėlio ir žvyro mišinio) atsparumą šlyčiai;
- c) birželio mėnesį – pagal žemės sankasos grunto atsparumą šlyčiai ir organiniais rišikliais sustiprintų kelių dangos konstrukcijos sluoksnių medžiagų atsparumą plastinėms liekamosioms deformacijoms;
- d) liepos mėnesį – pagal organiniais rišikliais sustiprintų kelių dangos konstrukcijos sluoksnių medžiagų atsparumą plastinėms liekamosioms deformacijoms ir kelių dangos pagrindo sluoksnių medžiagų (smėlio ar žvyro arba smėlio ir žvyro mišinio) atsparumą šlyčiai;
- e) rugpjūčio mėnesį – pagal organiniais rišikliais sustiprintų kelių dangos konstrukcijos sluoksnių medžiagų atsparumą plastinėms liekamosioms deformacijoms;
- f) rugsėjo mėnesį – pagal žemės sankasos grunto atsparumą šlyčiai ir organiniais rišikliais sustiprintų kelių dangos konstrukcijos sluoksnių medžiagų atsparumą plastinėms liekamosioms deformacijoms;
- g) spalio mėnesį – pagal asfaltbetonio atsparumą tempimui lenkiant ir žemės sankasos grunto atsparumą šlyčiai;
- h) lapkričio mėnesį – pagal asfaltbetonio atsparumą tempimui lenkiant ir žemės sankasos grunto atsparumą šlyčiai.

Kitais metų mėnesiais išmatuotas kelių dangos konstrukcijos tamprusis įlinkis būna ganėtinai mažas, o praktikoje naudojamų įlinkiomačių tikslumas siekia apie 5 %, todėl šiuo

laikotarpiu tirti jos stiprį (tampros modulį E) yra netikslinga.

Mūsų pateikti kelio Anykščiai–Troškūnai–Panevėžys dangos konstrukcijos ruožų tyrimų rezultatai įtikinamai rodo, kad vienų metų bėgyje jos visi stiprio kriterijai gali pasiekti ribines vertes.

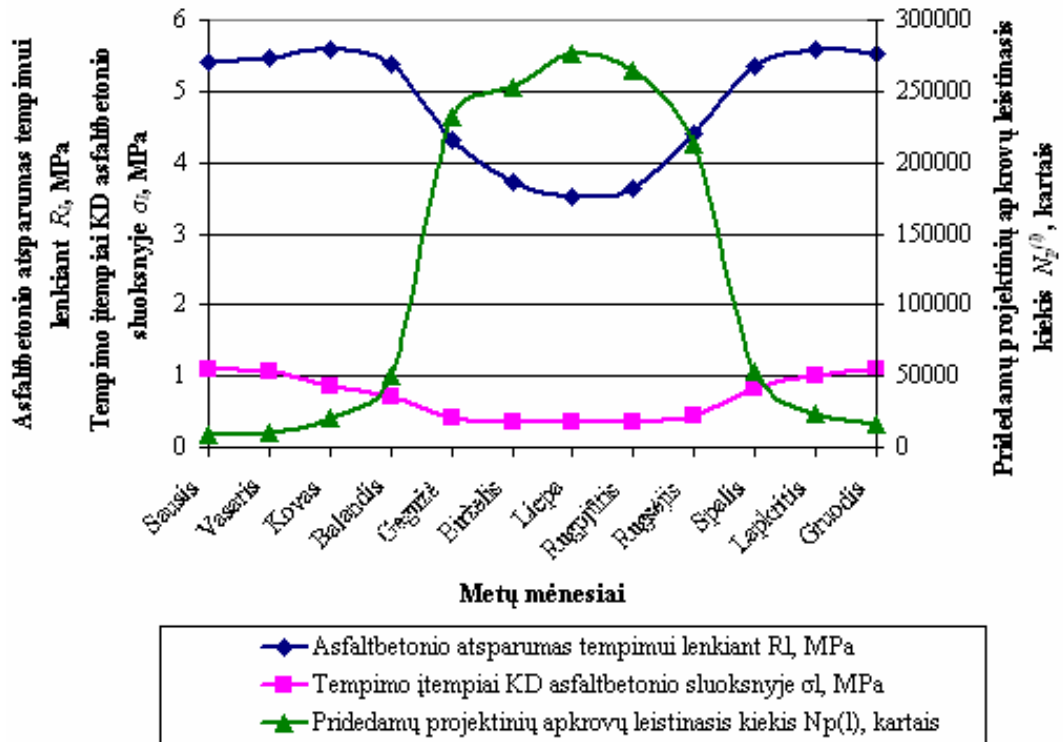
Analizuodami sunkiasvorio transporto poveikio kelių dangai sezoninį ribojimą nustatėme, kad praktiniu požiūriu veiksmingiausia priemonė yra sunkiasvorio transporto ašies apkrovų P , oro slėgio ratų padangose p bei jo važiavimo greičio v kontrolė. Nustatėme, kad šiame kelyje sumažinus sunkiasvorio transporto ašies leistinąsias apkrovas P nuo 100 kN iki 80 kN, asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo trukmė padidėtų 2,7 karto, o sumažinus oro slėgį p jo ratų padangose nuo $p \leq 0,5$ MPa iki $p \leq 0,4$ MPa – ji padidėtų 2,6 karto. Taip pat nustatėme, kad, sumažinus sunkiasvorio transporto važiavimo greitį nuo $v = 60$ km/h iki $v = 40$ km/h, asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo trukmė padidėtų 1,14 karto. Šie rezultatai akivaizdžiai rodo, kad, pritaikius visas tris sunkiasvorio transporto poveikio kelių dangos konstrukcijai ribojimo priemones kartu, pavojingiausiu pažaidoms susidaryti metų laikotarpiu galima ženkliai padidinti asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo trukmę.

4.2. Kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių stipris

Taikant kelių dangos suirties masto modelį (žr. (2.12) formulę) ir įvertinant asfaltbetonio sluoksnių medžiagų stiprio sezoninį kitėjimą, jos įtempius ir deformacijas bei sunkiasvorio transporto eismo intensyvumą, išanalizavome, kaip kinta jos dangos konstrukcijos sluoksnių funkcionavimo trukmė. Tyrėme kelio Anykščiai–Troškūnai–Panevėžys tų pačių ruožų (žr. 3.3 lent.) asfaltbetonio dangą.

Kiek kartų transporto priemonių ašies apkrovos gali paveikti kelių dangą, kad jos visame asfaltbetonio sluoksnyje (visame jo storyje) susidarytų vertikalusis plyšys, priklauso nuo sluoksnio medžiagos atsparumo nuovargiui koeficiento k_n . Taikant patikimumo rodiklį, pavyzdžiui, $\alpha = 0,85$, galima nustatyti kiekvieno metų sezono sąlygoms asfaltbetonio sluoksnio medžiagos funkcionavimo trukmę. Fizine prasme šį patikimumą ($\alpha = 0,85$) apibrėžia daug kartų dangos asfaltbetonį paveikusi apkrova, kurią analizuojamu atveju be pažaidų gali išlaikyti 85 % laboratorinių asfaltbetonio bandinių. Vertinant medžiagos kelių dangoje funkcionavimą galima pažymėti, kad patikimumas $\alpha = 0,85$ atitinka 15 % ploto asfaltbetonio dangos suirties mastą ($D = 15$ % dangos ploto), N_p kartų pridėjus projektinę apkrovą. Vien tik kiekvieno metų sezono sąlygoms asfaltbetonio viršutinio sluoksnio medžiagos funkcionavimo trukmė, taikant patikimumą α , apskaičiavus pagal (2.23) ir (4.15) formules sudaro (4.11 pav.):

$$N_p^{(i)} = \left(\frac{R_l}{\sigma} \right)^b (1 - t_\alpha C_v)^b, \text{ kartų} \quad (4.16)$$



4.11 pav. Kelių dangos (KD) asfaltbetonio sluoksnio lestinųjų apkrovų $N_p^{(i)}$, jo stiprio (atsparumo tempimui lenkiant) R_l ir šiame sluoksnyje susidarantių įtempių σ_t kitėjimo atskirais metų mėnesiais grafikas

Žinant projektinių automobilių faktinį eismo intensyvumą N_p , galima nustatyti kiek kartų i -uoju metų laikotarpiu $n_p^{(i)}$ kelių dangos konstrukcija bus apkrauta projektine apkrova:

$$n_p^{(i)} = N_p^{(i)} \frac{t_i \gamma_i}{\beta_{sk}^{(i)}}, \text{ vnt.}, \quad (4.17)$$

čia: $N_p^{(i)}$ – projektinių automobilių leistinasis eismo intensyvumas, aut./parą; t_i – i -ojo metų laikotarpio trukmė, paromis; γ_i – eismo intensyvumo kitėjimo sezoninis (sezoninių pokyčių) koeficientas; $\beta_{sk}^{(i)}$ – koeficientas automobilių ratų važiavimo nuokrypiui nuo labiausiai tikėtinos vietos apibūdinti (pasiskirstęs pagal normalųjį dėsnį) [30].

Įvertinus kelių dangos suirties masto modelį (žr. (2.12) formulę), asfaltbetonio sluoksnių medžiagos atsparumo tempimui lenkiant mažėjimą jos eksploatavimo pirmųjų metų bėgyje

galima nustatyti taip:

$$R_i = R_0 \left(1 - \sum_i \frac{n_p^{(i)}}{N_i} \right)^{\frac{1}{b}}, \text{ MPa}, \quad (4.18)$$

čia: R_0 – medžiagos pradinis atsparumas tempimui lenkiant, MPa; N_i – medžiagos funkcionavimo likutinė trukmė, aut./parą.

Nagrinėjant šio medžiagos stiprio rodiklio R mažėjimą kelių dangos eksploatavimo kelių metų laikotarpiu T_f , lygtį (4.18) galima užrašyti taip:

$$R_i = R_0 \left(1 - T_f \sum_i \frac{n_p^{(i)}}{N_i} \right)^{\frac{1}{b}}, \text{ MPa}. \quad (4.19)$$

Rodiklis R_i yra medžiagos stiprio (atsparumo tempimui lenkiant) likutinis resursas, kelių dangai funkcionavus laikotarpį $T_f + \sum_i t_i / 365$ [72]. Žinant rodiklio R_i vertę bet kuriuo laikotarpiu, galima apskaičiuoti medžiagos funkcionavimo likutinę trukmę, t.y. kiek kartų kelių dangos konstrukciją gali veikti pridedamos projektinės apkrovos iki asfaltbetonio suirties, įvertinant nepalankųjį (projektinį) kasmetinį laikotarpį:

$$N_i = \left(\frac{R_i}{\sigma_0} \right)^b \frac{1}{t_i}, \text{ aut./parą}, \quad (4.20)$$

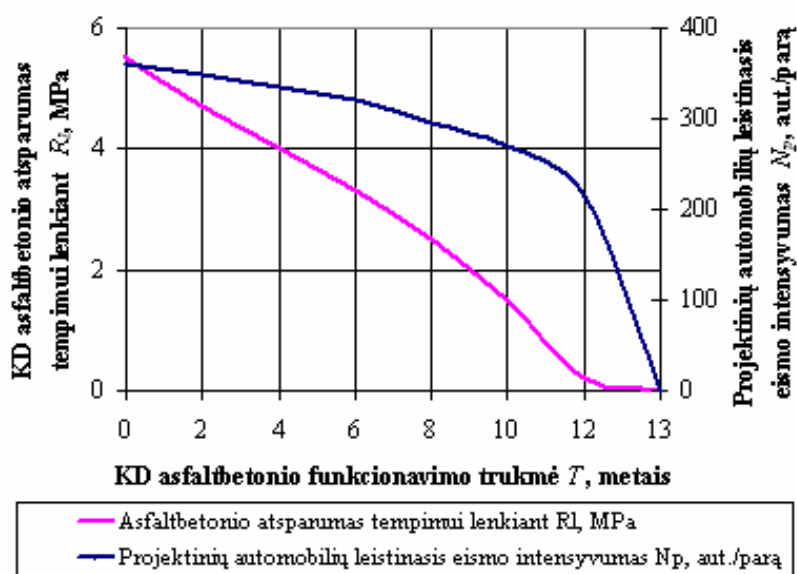
čia: σ_0 – tempimo įtempiai, kurie susidaro asfaltbetonio sluoksniuose nagrinėjamuoju metų laikotarpiu, MPa.

Taikant formulę (4.20), asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo trukmę iki suirties $T_f^{(\max)}$ galima apskaičiuoti taip:

$$T_f^{(\max)} \approx \sum_i \frac{N_i}{n_p^{(i)}}, \text{ metais} \quad (4.21)$$

Priimame prielaidą [72], kad i -ųjų metų laikotarpių trukmė yra lygi bet kurio metų mėnesio trukmei (taikome prielaidą, kad sezoninių veiksnių kitėjimą galima apibūdinti

vidutinėmis vieno mėnesio vertėmis). Pagal 4.9 ir 4.10 paveiksluose pateiktus rezultatus, projektiniu laikotarpiu, taikant asfaltbetonio atsparumo tempimui lenkiant R_l kriterijų, turi būti sausio mėnuo. Mūsų pateiktam atvejui apskaičiavome, kad ši sausio mėnesį asfaltbetonio medžiagos stipris (atsparumas tempimui lenkiant) ir tempimo įtempiai yra $R_0 = 5,4$ MPa ir $\sigma_o = 1,05$ MPa. Kai projektinių automobilių eismo intensyvumas $N_p = 100$ aut./parą, pagal (4.19) ir (4.20) lygtis kelio Anykščiai–Troškūnai–Panevėžys tirtų ruožų danga funkcionuos $T_f^{(\max)} \geq 12$ metų (4.12 pav.).



4.12 pav. Kelių dangos (KD) asfaltbetonio stiprio R_l , projektinių automobilių leistinojo eismo intensyvumo N_p ir asfaltbetonio funkcionavimo trukmės T sistis

Nustatėme, kad, norint laiduoti tirtų ruožų dangos priimtina būklę, esant projektinių automobilių eismo intensyvumui $N_p = 100$ aut./parą, optimaliu galima laikyti tarpremontinį laikotarpį $T_{rem} = 10$ metų (žr. 4.12 pav.), t.y. kiekvienais 10-tais metais stiprinant dangos konstrukciją $H_i = 2$ cm storio asfaltbetonio sluoksniu arba kitu, pagal stiprį jam ekvivalentiniu, sluoksniu, galima išlaikyti reikiamą asfaltbetonio sluoksnių stiprį ir šiuose sluoksniuose nesusidarys įtrūkių daugiau, negu jų galėtų būti, esant patikimumui $\alpha = 0,85$. Pavyzdžiui, jeigu tirtų ruožų danga, įrengus viršutinį asfaltbetonio sluoksnį, funkcionavo $T_f = 7$ metus, tai jos funkcionavimo likutinė trukmė kelių dangos suirties pradžios momentui (įtrūkių asfaltbetonio sluoksniuose atsiradimo pradžia) yra $T_f^{\max} - T_f = 12 - 7 = 5$ metai, o dangos funkcionavimo likutinė trukmė iki jos būtino sustiprinimo momento yra $T_{rem} - T_f = 10 - 7 = 3$ metai.

Mūsų apskaičiuotieji ir analizės rezultatai pakankamai gerai dera su tirtų dangos konstrukcijos ruožų vizualiųjų ir instrumentinių tyrimų rezultatais – tai rodo mūsų tyrimų objektyvumą ir galimybę jų rezultatus taikyti praktinėje veikloje. Šie mūsų tyrimų rezultatai įtikinamai parodo, kad, dėl lėšų stygiaus pastaraisiais metais pratęsus kelių dangos tarpremontinį laikotarpį, daugumos Lietuvos valstybinės reikšmės kelių (pirmiausiai – rajonų ir krašto kelių) dangos būklė yra tik patenkinama, o dažnai – nepatenkinama.

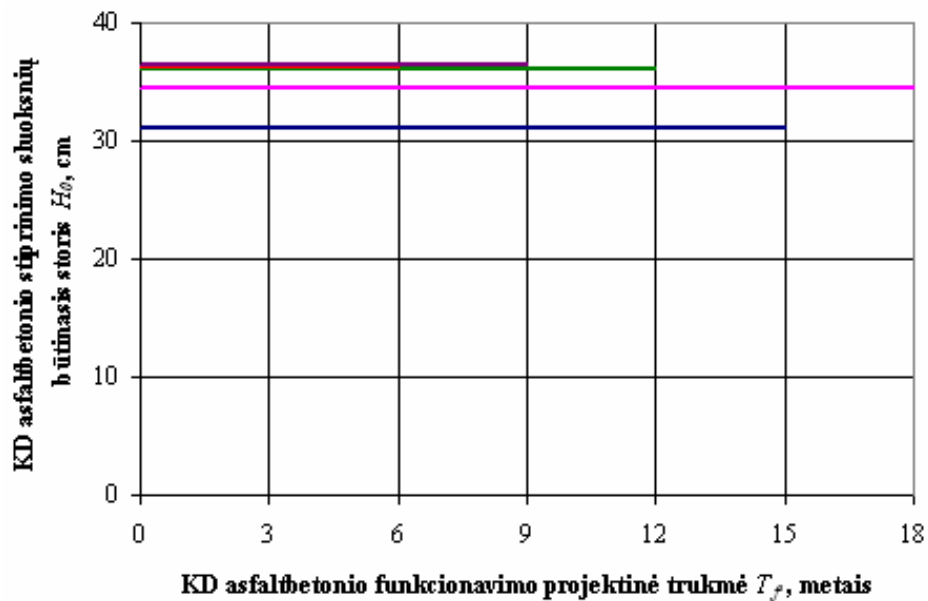
4.3. Kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių racionali funkcionavimo trukmė

Pagal lygtis (2.53–2.60) apskaičiavome kelio Anykščiai–Troškūnai–Panevėžys tirtų ruožų dangos (žr. 3.3 lentelę) optimalią funkcionavimo trukmę. Pradiniai duomenys taikomi tapatūs kaip ir 3.2, 4.1 ir 4.2 skirsniuose. Pasinaudoję [138, 156] darbų rekomendacijomis priėmėme, kad būtinųjų išlaidų ir patiriamų nuostolių keliuose įvertinimo objektyvus laikotarpis T_{Σ} (kelio techninio senėjimo laikotarpis, kuriam pasibaigus įvyksta kelių projektavimo metodų, medžiagų gamybos ir kelių tiesybos bei eksploatavimo proceso technologijų kokybinis šuolis) yra $T_{\Sigma} = 40$ metų, skirtingų laikotarpių išlaidų redukcijos pradiniam momentui koeficientas $E_n = 0,20$, dangos funkcionavimo laikotarpis $T_f^{\max} = 12$ metų, o jos stiprinimo $H_i = 1$ cm storio sluoksniu kaina $C = 10$ eurų/m² (perskaičiuota šiandienos kainomis).

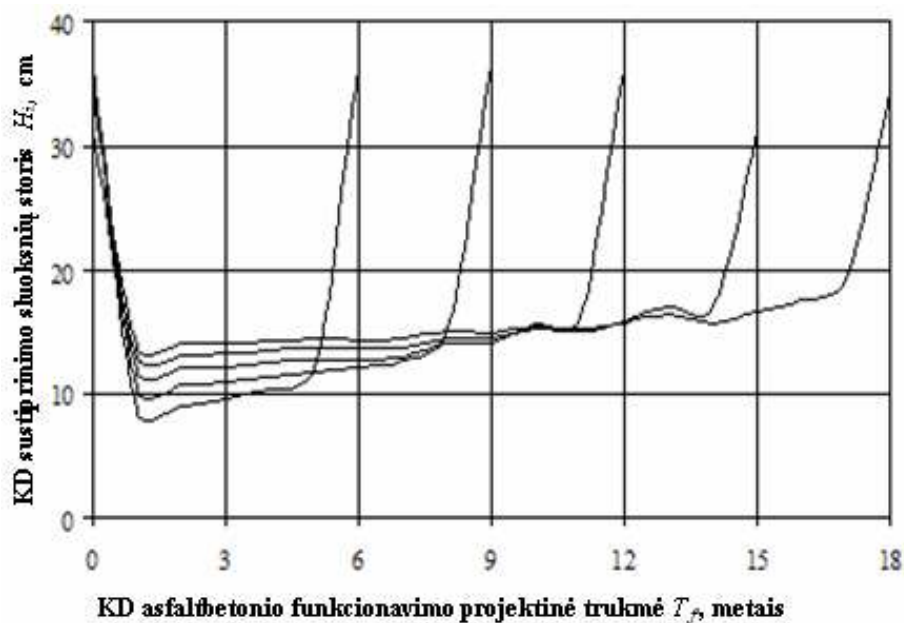
Pasinaudoję [138, 156] darbų tyrimų rezultatais galime teigti, kad, taikant lygtis (2.12) ir (2.33–2.41), galima apskaičiuoti naujai rengiamos viršutinio sluoksnio asfaltbetonio dangos optimalų storį, geriausiai tenkinantį automobilių eismo poreikius (faktinis eismo intensyvumas $N_p^{(f)} = 100$ aut./parą), tada kelių dangos priežiūra taptų ekonomiškesnė.

Priimdami kelių dangos funkcionavimo projektinę trukmę $T_f = 6, 9, 12, 15$ ir 18 metų, pasinaudoję [138, 156] darbais, nustatėme, kad laikotarpiu T_{Σ} dangos stiprinimo sluoksnių būtinasis storis turi būti tuo didesnis, kuo nustatoma trumpesnė jos funkcionavimo projektinė trukmė T_f (4.13 pav.) – taip yra todėl, kad asfaltbetonio plonų sluoksnių funkcionavimo trukmė (prilygintina storio vienetui) būna santykinai maža.

Jeigu bet kuriam (iš mūsų analizuotų) kelių dangos funkcionavimo projektiniam laikotarpiui T_f numatysime prevencinius jos stiprinimo sluoksnius, paaiškės, kad kuo mažesnis numatomas tarpremontinis laikotarpis T_{rem} , tuo gali būti mažesnis jos stiprinimo sluoksnių storis H_i – tai labiau būdinga (labiau ženklu) tai dangai [138], kuri būna numatyta (suprojektuota) trumpesnei funkcionavimo trukmei T_f ir kurios pradinis storis H būna mažesnis (4.14 pav.).

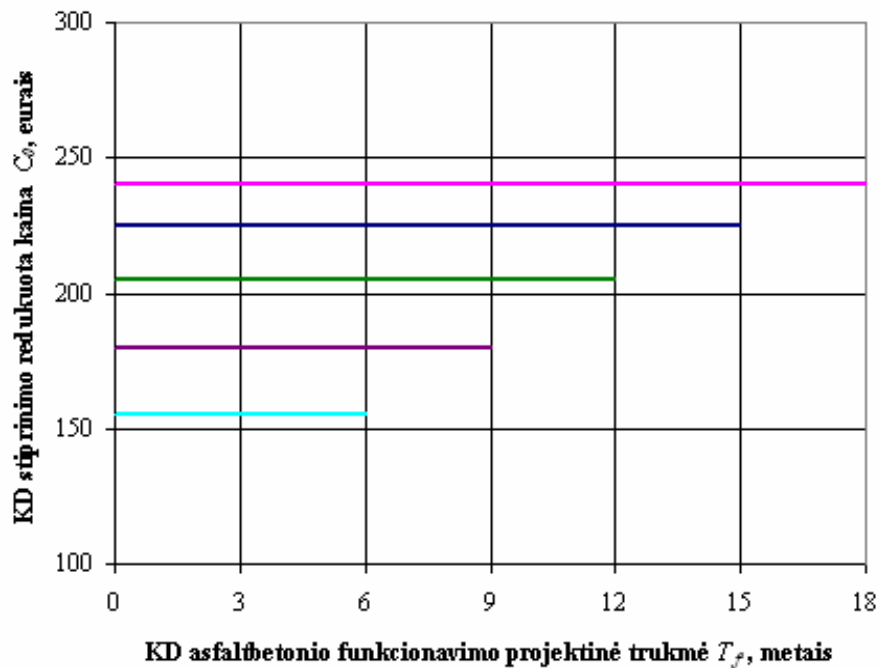


4.13 pav. Asfaltbetonio stiprinimo sluoksnių būtinojo storio H_0 charakteristika, pasirenkant skirtingą kelių dangos (KD) funkcionavimo projektinę trukmę



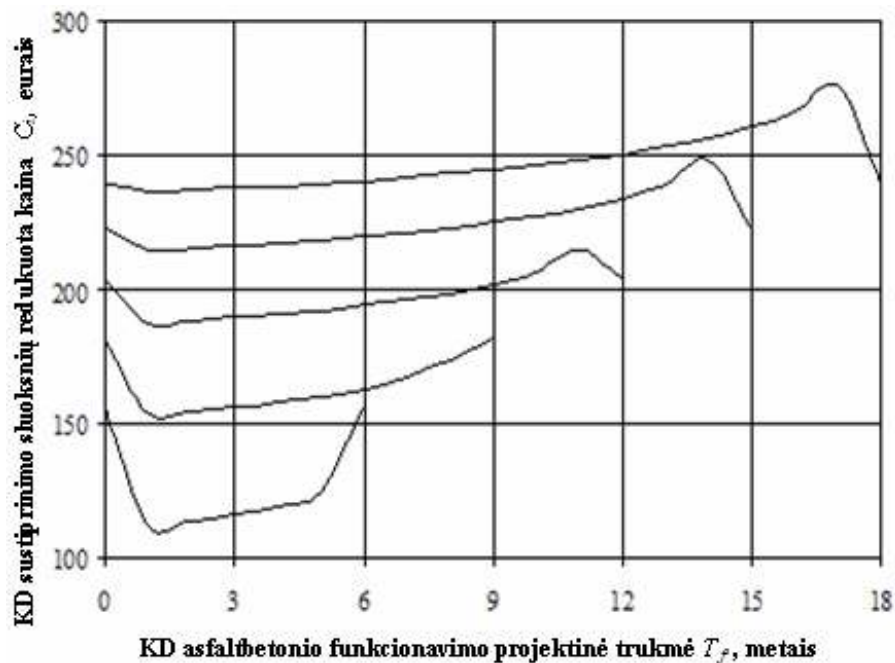
4.14 pav. Kelių dangos (KD) stiprinimo sluoksnių storio H_i kitėjimas, numatant asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo skirtingą projektinį laikotarpį T_{Σ}

Kiek kitoki rezultatą gavome redukavę kelių dangos stiprinimo sluoksnių H_i kainą C_i pradiniam jos įrengimo momentui T_0 . Projektinės funkcionavimo trukmės T_f prailginimas nulemia kelių dangos pabrangimą (4.15 pav.), nors jos storis ir sumažėja (žr. 4.13 pav.) – taip atsitinka todėl, kad investavus daugiau lėšų kelių dangoms sustiprinti, daugiau jų išimama iš apyvartos (t.y. jos „išsaldomos“) ir atgal negrįžta [138].



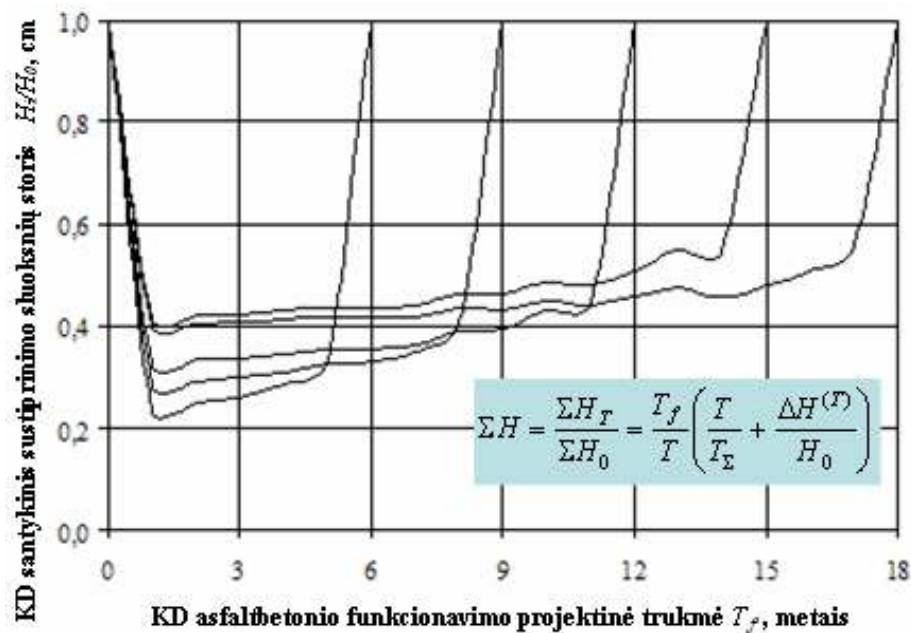
4.15 pav. Asfaltbetonio sustiprinimo sluoksnių redukuotos kainos C_0 charakteristika, pasirenkant skirtingą kelių dangos (KD) funkcionavimo projekcinę trukmę T_Σ

Analogiškai kelių danga pabrangsta, įvertinus prevenciniams jos remontams būtinų (reikiamo storio) asfaltbetonio sluoksnių kainą. 4.16 paveiksle matosi, kad, taikant kelių dangos projekcinę funkcionavimo trukmę T_f , atitinkamai, sudarančią 6-is, 9-is ir (dalina) 12-ka metų, galima nustatyti tokį tarpremontinį laikotarpį T_{rem} , kad jos priežiūros kaina būtų mažiausia.



4.16 pav. Asfaltbetonio sustiprinimo sluoksnių redukuotos kainos C_i kitėjimas kelių dangos (KD) funkcionavimo metu, priklausomai nuo pasirinktos jos funkcionavimo projekcinės trukmės T_Σ metų laikotarpį

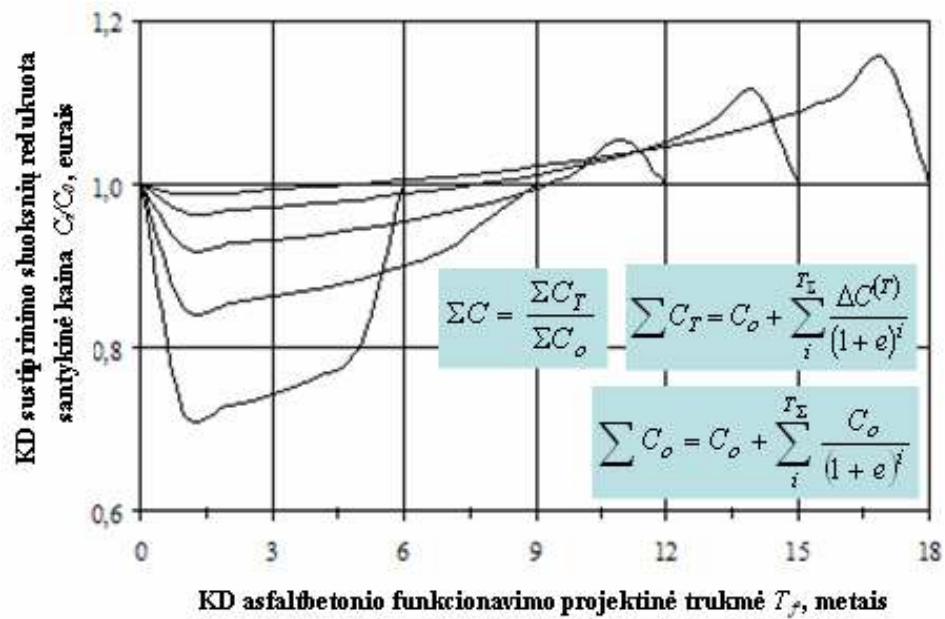
Palyginus mūsų siūlomos prevencinės remonto strategijos kelių dangos visų asfaltbetonio sluoksnių storį su asfaltbetonio sluoksnių storiu, taikomu tradiciniuose remonto darbų planuose [138, 156], nustatėme, kad medžiagų ekonomijos požiūriu efektyviausia yra įrengti plonesnius jos viršutinius asfaltbetonio sluoksnius su numatomu dažnu pakartotinu jų sustiprinimu (4.17 pav.). Pagal šią strategiją reikėtų mažesnių, lyginant su tradicinėmis kelių dangos remontų strategijomis, investicijų, kai jos funkcionavimo projektinė trukmė $T_f < 12$ metų. Pagal teorinius apskaičiavimus taip būtų galima sutaupyti iki 78 % materialijų resursų.



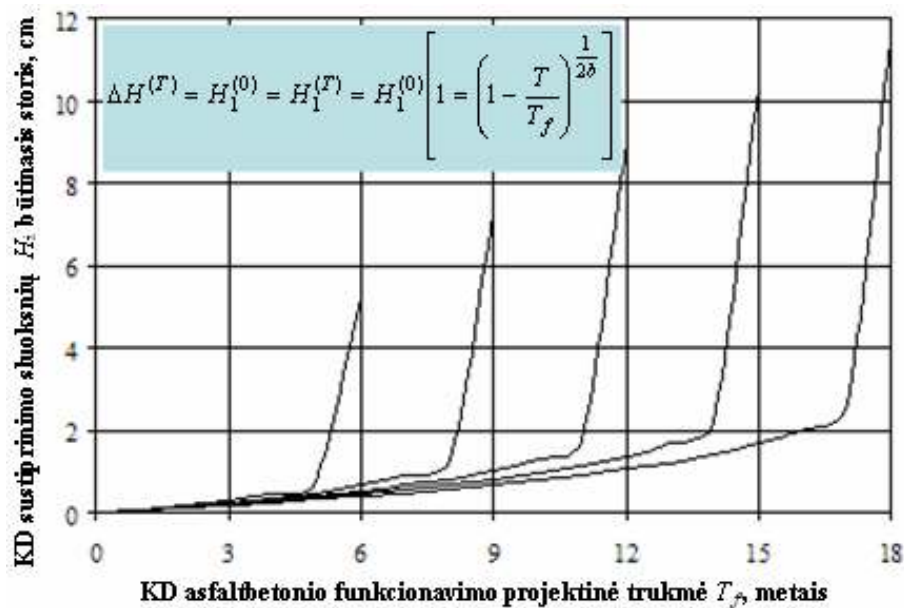
4.17 pav. Kelių dangos (KD) asfaltbetonio sustiprinimo sluoksnių santykinio storio H_i / H_0 kitėjimas, numatant asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo skirtingą projektinį laikotarpį T_Σ

Visgi materialijų resursų taupymas ne visada būna naudingas, kadangi prevencinių, redukuotų pradiniam kelių dangos įrengimo momentui, remontų kaina gali viršyti analogišką tradicinių remonto darbų kainą. Tai būdinga kelių dangai, suprojektuotai ilgesnei nei 9 metų funkcionavimo trukmei T_f ($T_f = 12$ m., $T_f = 15$ m. ir $T_f = 18$ m.) (4.18 pav.).

Taikant kelių dangos prevencinio sustiprinimo strategiją bet kuriam (iš mūsų nagrinėtų) asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo projektiniam laikotarpiui T_f galima nustatyti, kaip, paisant kelių dangos tarpremontinio laikotarpio T_{rem} , keisis jos sustiprinimo sluoksnių būtinasis storis (4.19 pav.).



4.18 pav. Kelių dangos (KD) asfaltbetonio sustiprinimo sluoksnių redukuotos kainos kitėjimas, numatant asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo skirtingą projektinį laikotarpį T_Σ

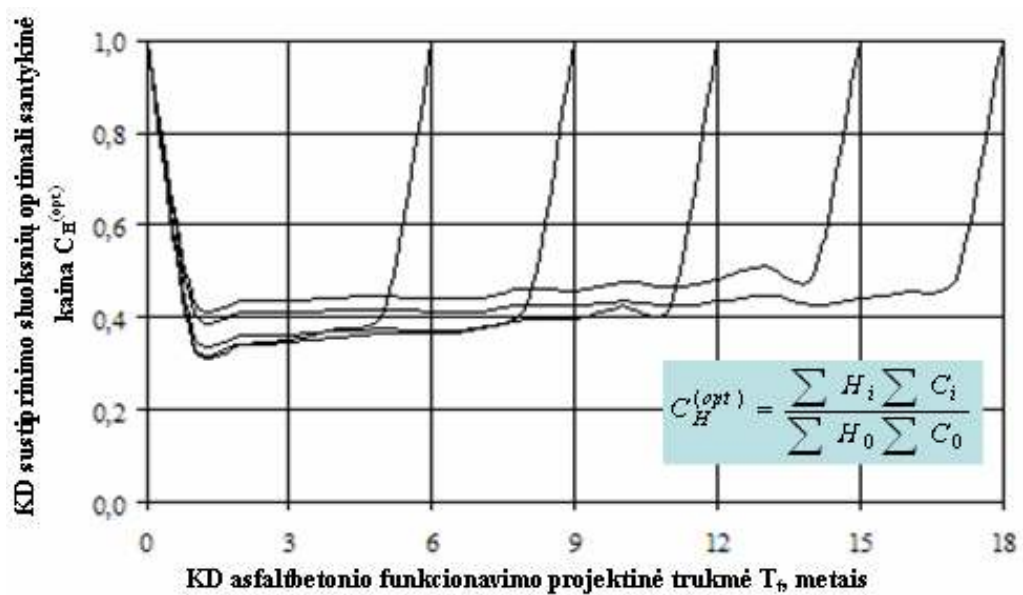


4.19 pav. Kelių dangos (KD) asfaltbetonio sustiprinimo sluoksnių būtinąjo storio kitėjimas, numatant asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo skirtingą projektinį laikotarpį T_Σ

Pagal 4.19 paveiksle pateiktus apskaičiavimo rezultatus, esant automobilių eismo intensyvumui $N_p = 100$ aut./parą, tikslingiausia asfaltbetonio sluoksnių būtinąjį storį nustatyti kelių dangos funkcionavimo projektinei trukmei $T_f = 9$ metai, kai jos tarpremontinis laikotarpis $T_{rem} = 7$ metai. Šiuo atveju asfaltbetonio sluoksnių pradinis storis H_o sudarytų $H_o = 7,5$ cm, o numatomų kelių dangos sustiprinimo sluoksnių storis H_i būtų $H_i = 1$ cm viršutinio sluoksnio

(smulkiagrūdžio) asfaltbetonio. Tokia kelių dangos sustiprinimo bei jos priežiūros (numatytoms sąlygoms) strategija yra ekonomiškiausia ir technologiškai lengvai realizuojama – pastaruoju metu galima kokybiškai pakloti ne tik, pavyzdžiui, $H = 3,0$ cm storio asfaltbetonio sluoksnį [157, 158], bet ir $H = 1,9\text{--}3,0$ cm storio bitumo emulsijos ir mineralinių medžiagų mišinių sluoksnį [159–165] ar net $H = 0,6$ cm storio (labai ploną) dangos sluoksnį [154].

Nustatėme, kad, ilginant kelių dangos funkcionavimo projektinę trukmę T bei jos tarpremontinį laikotarpį T_{rem} , jos sustiprinimo sluoksnių ir jų įrengimo kaina didėja santykinai nežymiai (4.20 pav.).



4.20 pav. Kelių dangos (KD) asfaltbetonio sustiprinimo sluoksnių optimali santykinė kaina, taikant įvairias remonto strategijas, numčius asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo skirtingą projektinį laikotarpį T_p

Kelių dangos tarpremontinio laikotarpio T_{rem} optimaliai trukmei apskaičiuoti vertinimo rodikliu siūlome taikyti optimalų (technologiniu požiūriu) jos sustiprinimo sluoksnį $H_i^{(opt)}$, kurio optimali santykinė kaina yra $C_H^{(opt)}$:

$$C_H^{(opt)} = \frac{\sum H_i \sum C_i}{\sum H_0 \sum C_0}, \quad (4.22)$$

čia: $\sum H_i$ – asfaltbetonio sluoksnių storis, atliekant dangos išankstinį (priešlaikį) remontą, cm; $\sum C_i$ – asfaltbetonio sluoksnių redukuota kaina, atliekant dangos išankstinį (priešlaikį) remontą, eurai; $\sum H_0$ – asfaltbetonio sluoksnių storis, atliekant dangos tradicinį remontą, cm; $\sum C_0$ – asfaltbetonio sluoksnių redukuota kaina, atliekant dangos tradicinį remontą, eurai.

4.4. Išvados

1. Lietuvos sąlygomis (kelio Anykščiai–Troškūnai–Panevėžys tirtų ruožų pavyzdžiu) nustatėme, kad eismo sezoniškumas ir kelių dangos konstrukcijos stipris turi ženkliai įtaką projektinių automobilių leistinajam eismo intensyvumui $N_p^{(l)}$. Nustatėme, kad, įvertinus Lietuvos sąlygas ir dangos konstrukcijos stiprį, vienu jos funkcionavimo metų bėgyje, taikant jos ribinės būklės kriterijus, dažniausiai būna apie vieno mėnesio trukmės dangos konstrukcijos eksploatavimo pavojingasis laikotarpis. Tirtiems ruožams nustatėme, kad kelių dangos funkcionavimo trukmę nulemiančiais kriterijais yra asfaltbetonio viršutinio sluoksnio atsparumas tempimui lenkiant žiemą R_l ir sankasos grunto atsparumas šlyčiai τ pavasarį bei rudenį.

2. Nustatėme, kad, analizuojant asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo trukmę, vertinimo kriterijumi turi būti ne tik medžiagos (asfaltbetonio) stiprio kitėjimo (jos eksploatavimo laikotarpiu) rodiklis, bet ir jos atsparumo nuovargiui koeficientas k_n . Patvirtinome (žr. 4.12 pav.), kad asfaltbetonio sluoksnių realios funkcionavimo trukmės atsarga intensyviai mažėja žiemos ir pavasario laikotarpiais, o jų stipris (atsparumas tempimui lenkiant R_l) pradeda smarkiai mažėti tada, kai jų funkcionavimo trukmės atsarga tampa $T = 2$ m.

3. Įrodėme, kad kelių dangos konstrukcijos tampraus įlinkio rodiklį galima taikyti jos būklei įvertinti, o pagal jį galima nustatyti šiuos jos stiprio rodiklius: viršutinio sluoksnio asfaltbetonio atsparumą tempimui lenkiant R_l , žemės sankasos grunto atsparumą šlyčiai τ , asfaltbetonio ir kitų sluoksnių, įrengtų iš organiniais rišikliais sustiprintų medžiagų, atsparumą plastinėms deformacijoms.

4. Taikydami mūsų pasiūlytą kelių dangos suirties masto modelį ir jos likutinio stiprio bei asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo trukmės rodiklius, nustatėme šiuos parametrus (žr. 4.3 skyrių): asfaltbetonio sluoksnių optimalų storį, kelių dangos optimalų tarpremontinį laikotarpį ir jai sustiprinti reikalingo sluoksnio būtiną storį. Įrodėme, kad kelių dangos prevencinio sustiprinimo strategija yra ekonomiškai naudingesnė, lyginant ją su dangai stiprinti taikoma tradicine strategija. Mūsų tyrimų rezultatai rodo, kad kelių dangos prevencinį remontą tikslinga atlikti tada, kai asfaltbetonio sluoksnyje pradeda intensyviai kauptis pažaidos.

5. Apskaičiavome (žr. 4.20 pav.), kad medžiagų ekonomijos požiūriu yra racionalu kelių dangos funkcionavimo laikotarpio pradžioje įrengti sąlyginai ploną asfaltbetonio viršutinį sluoksnį, o vėliau numatytu momentu jį sustiprinti nauju sluoksniu. Kelių dangos stiprį ir asfaltbetonio sluoksnių pradinį storį tikslinga apskaičiuoti dangos funkcionavimo trukmei $T \leq 12$ metų.

5. SIŪLOMOS KONCEPCIJOS SUNKIASVORIO TRANSPORTO EISMUI IR APKROVOMS APRIKOTI

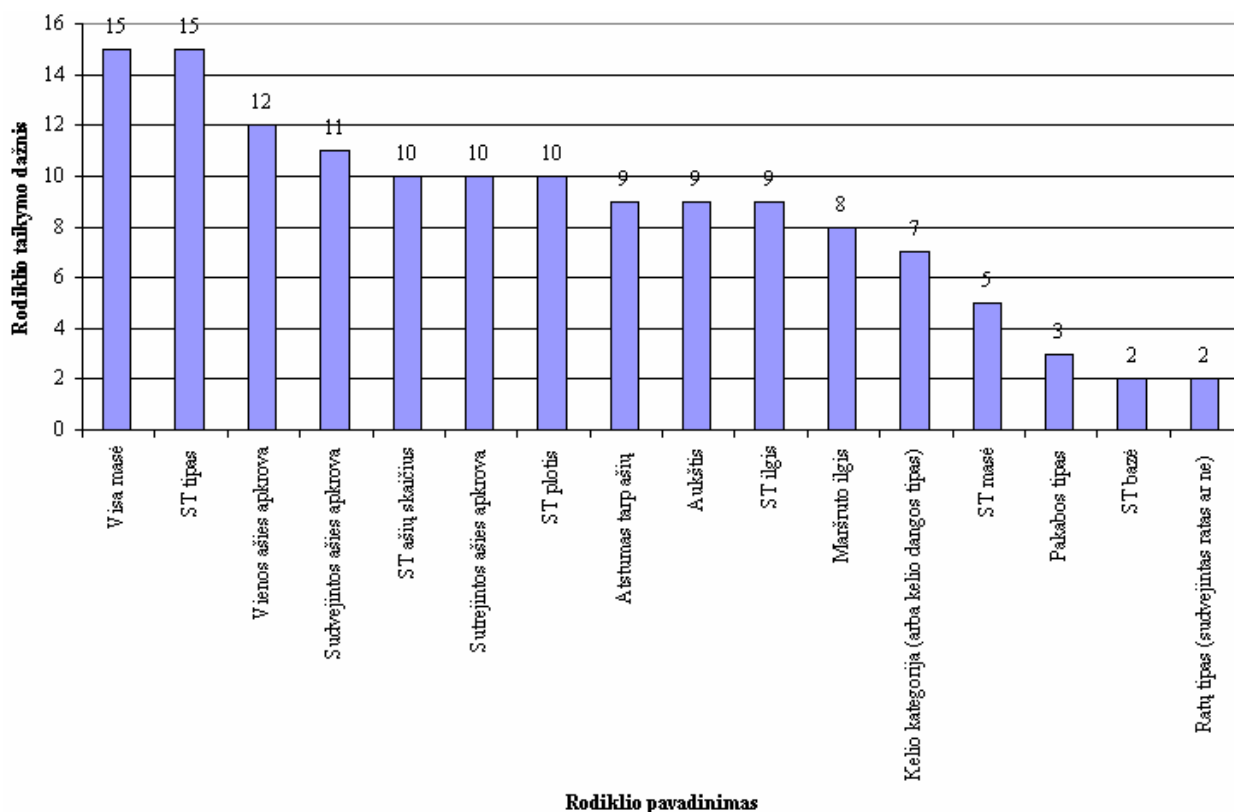
Šio skyriaus medžiaga paskelbta autoriaus publikacijose [1a, 5a, 7a].

5.1. Konceptija sunkiasvorio transporto eismo sukeltiems kompensuotiems nuostoliams apskaičiuoti

Šio darbo 2 skyriuje pasiūlytą ir 3–4 skyriuose patikrintą metodiką galima taikyti kelių dangos pažeidoms, susidariusioms dėl sunkiasvorio transporto eismo, įvertinti ir važiuojančio sunkiasvorio transporto masės bei jo apkrovų ribojimo parametrus nepalankiuoju metų laikotarpiu nustatyti ir jo eismo mokesčiams už važiavimą Lietuvos automobilių keliais nustatyti.

Rodiklių, kuriuos taikant yra skiriamas šis eismo mokestis, taikymo dažnis ir Europos šalių (iš analizuojamų 18 šalių), taikančių [107, 124] tam tikrą rodiklį, skaičius pateiktas 5.1 paveiksle ir 5.1 lentelėje. Daugumoje šalių, nustatant eismo mokestį, įvertinti šie rodikliai:

- sunkiasvorio transporto tipas ir jos masė;
- sunkiasvorio transporto gabaritas (matmenys);
- atstumas tarp sunkiasvorio transporto suporintų ašių;
- maršruto ilgis (vežimų atstumas);
- kelio kategorija ir kelių dangos tipas.



5.1 pav. Rodiklių, pagal kuriuos nustatomas sunkiasvorio transporto (ST) eismo mokestis, taikymo dažnių grafikas

5.1 lentelė. Sunkiasvorio transporto (ST) parametrai ir rodikliai, įvairiose Europos šalyse nulemiantys ST eismo mokestį

Šalis	ST ašių skaičius	ST apkrovos parametrai				Atstumas tarp ašių	ST bazė	Pakabos tipas	Ratų tipas (sudvejintas ratas ar ne)	ST gabarito parametrai (matmenys)			ST tipas	ST masė	Maršruto ilgis	Kelio kategorija (arba kelio dangos tipas)
		Visa masė	Vienos ašies apkrova	Sudvejintos ašies apkrova	Sutrejintos ašies apkrova					Plotis	Aukštis	Ilgis				
Austrija		+											+			
Baltarusija		+	+	+	+	+				+	+	+			+	+
Belgija	+															
Bulgarija	+	+	+	+		+		+	+	+	+	+		+	+	+
Čekija	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+			
Italija													+	+	+	
Kazachstanas		+	+	+	+	+				+	+	+	+		+	+
Lenkija	+	+	+	+	+	+				+	+	+	+	+		+
Lietuva		+	+							+	+	+	+			
Moldavija		+	+	+	+					+	+	+	+			+
Olandija	+												+			
Prancūzija	+	+											+			
Rumunija	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+	+	+	+	+
Rusija	+	+	+	+	+	+	+						+		+	+
Slovakija	+	+	+	+	+	+				+			+	+		
Ukraina		+	+	+	+					+	+	+	+		+	
Vengrija		+	+	+	+	+		+					+		+	
Vokietija	+	+											+			

Nustatant mokesčių tarifus, dažniausiai įvertinamos šios nuostatos [124]:

- a) eismo mokestis turi būti proporcingas apkrovos vertei, pakeltai ketvirtuoju laipsniu, ir turi būti tiesiai proporcingas važiavimo atstumui (maršruto ilgiui);
- b) proporcingumo koeficientas turi būti taikomas toks, kad eismo rinkliavų suma būtų pakankama kelių dangai suremontuoti;
- c) bauda už ašies leistinos apkrovos viršijimą turi viršyti pelną, kurį automobilio savininkas gaus, pažeisdamas automobilių eismo galiojančią tvarką.

Sunkiasvorio transporto eismo mokesčių surinkimo koncepcijos parengimo tikslas – nustatyti sunkiasvorio transporto ir automobilių kelių parametrų racionalias atitiktis, įskaitant kelių ūkio ir sunkiasvorio transporto eksploatavimo pinigines, materialiąsias bei darbo išlaidas.

Sunkiasvorio transporto eismo sukeliamų nuostolių kompensacijos koncepcijai sudaryti iš pradžių buvo priimta išlyga, kad mokesčio tarifas turi būti sudarytas iš dviejų sudėtinių dalių:

- 1) nuostolių, kuriuos patiria kelių danga dėl sunkiasvorio transporto su normine apkrova ir sunkiasvorio transporto su viršnorminiais masės ir apkrovų parametrais poveikio, kompensacijos;
- 2) išlaidų, skirtų keliams rekonstruoti, kad išvengtų nuostolių dėl sunkiasvorio transporto su leistina apkrova sumažėjusio greičio, transporto priemonių sraute atsiradus sunkiasvoriam transportui su viršnormine apkrova, kompensacijos.

Mokesčių rinkimo kriterijumi yra patiriamų nuostolių dėl sunkiasvorio transporto su viršnormine (neleistina) apkrova poveikio kelių dangai kompensacija. Naudojant 5.2 lentelėje pateiktus rodiklius, siūlome nuostolių kompensavimo koncepciją, kuri į vieningą sistemą apjungia sunkiasvorio transporto, kelio dangos konstrukcijos ir tiltų konstrukcijos parametrus, ekonominius rodiklius bei su kelių dangos funkcionavimo sąlygomis susijusius veiksnius.

Nuostoliams įvertinti ir apskaičiuoti taikėme metodiką [126]. Apskaičiuojant nuostolius priėmėme, kad sunkiasvoris transportas laikomas viršnorminiu, jei jis nors vienu parametru skiriasi nuo standartinio parametro. Standartiniais laikėme šiuos sunkiasvorio transporto parametrus: vienos ašies leistinoji apkrova – 100 kN, suporintos ašies – 160 kN (kai atstumas tarp ašių 1,0–1,3 m), sutrejtintos ašies – 215 kN (kai atstumas tarp ašių 1,0–1,3 m), sunkiasvorio transporto masė tarp išorinių ašių neturi viršyti 36 t keturašiams ir 38 t turinčiam daugiau nei keturias ašis. Pavienio sunkiasvorio transporto norminis ilgis neturi viršyti 12 m, autotraukinių „automobilis-priekaba“ ilgis – 16,5 m, plotis turėtų būti 2,55 m (2,60 m refrižeratoriams) ir aukštis – mažiau kaip 4 m.

Lietuvos sąlygoms toks sunkiasvorio transporto masės ribojimas (sunorminimas) geriausiai dera su kelių, tiltų bei viadukų dangos faktiniu stipriu bei jos funkcionavimo trukme. Ribojant sunkiasvorio transporto ilgį, kiti eismo dalyviai transporto priemonių sraute gali saugiai

aplenkti jį, o toks jo pločio ribojimas netrukdo kitiems eismo dalyviams transporto priemonių sraute saugiai važiuoti lygiagrečiai sunkiasvoriam transportui gretima eismo juosta. Sunkiasvorio transporto aukščio ribojimas netrukdo joms laisvai važiuoti po tiltais, viadukais ar kitais statiniais automobilių keliuose.

5.2 lentelė. Rodikliai, turintys įtakos mokesčiams už neatitinkantį normų sunkiasvorio transporto (ST) važiavimą automobilių keliais

ST parametrai	Kelių dangos konstrukcijos parametrai	Tiltų konstrukcijos parametrai	Ekonominiai veiksniai	Kelių dangos funkcionavimo sąlygas apibūdinantys veiksniai
Tipas	Kelių dangos tipas	Tilto ilgis	Kelio tiesybos ir remonto sąmatinė vertė	Klimato veiksniai (aukščiausia ir žemiausia temperatūra, drėgnis, vandens ir šalčio įtakos rodikliai, eismo sezoniškumo rodikliai ir kt.)
Masė	Sluoksnių konstrukcijoje skaičius, sluoksnių ir žemės sankasos grunto būklė	Konstruktinė (skaičiavimo) schema	Medžiagų kaina	ST eismo intensyvumas ir sudėtis
Ašies apkrova	Funkcionavimo (nuo kelio eksploatavimo pradžios ar nuo kapitalaus remonto) trukmė	Projektinė apkrova	Vežimų savikaina	
Atstumas tarp ašių	Konstrukcijos stipris ir potenciali (galima) funkcionavimo trukmė	Statinio plokštės ar sijos medžiaga	Gyventojų pirkimo galia	
Ratų skaičius ant ašies ir atstumas tarp jų skersine bei išilgine kryptimi	Kelių dangos techninė ir eksploatacinė būklė	Funkcionavimo (nuo eksploatavimo pradžios) trukmė	Įplaukų į kelių ūkį mastas (piniginė vertė)	
Oro slėgis padangoje ir jos tipas		Tilto eksploatacinė būklė		
Pakabos tipas				
Variklio galingumas				
Eismo greitis				

Rengiant koncepciją sunkiasvorio transporto eismo mokesčių tarifams nustatyti būtina patiriamus dėl jo eismo (jeigu sumažėja vežimų greitis) nuostolius palyginti su išlaidomis, skirtomis kelių dangos konstrukcijai rekonstruoti arba papildomai eismo juostai įrengti [126].

Sunkiasvorio transporto eismo nuostolius galima išreikšti kaštais, reikalingais kelių

dangos pažaidoms, susidariančiomis pravažiavus vienam sunkiasvoriui transportui, atstatyti. Kaštai turi būti proporcingi susidarančių pažaidų mastui bei pakankami pažaidoms (remontuojant kelių dangą) likviduoti.

Nuostoliai $K_{E,\tau,\sigma}$, patiriami dėl projektinės sunkiasvorio transporto vienos ašies vienkartinio poveikio kelių dangai, esant metų vidutinėms gruntų ir hidrologinėms bei temperatūros sąlygoms, gali būti nustatyti taikant formulę [126]:

$$K_{E,\tau,\sigma} = \frac{K_{rem}}{365 \cdot T_f n_p}, \text{ eurai/km}, \quad (5.1)$$

čia: T_f – kelių dangos profilaktinio tarpremontinio laikotarpio vidutinė trukmė, metais, K_{rem} – kelių dangos remonto priemonių (laikotarpyje T_f) kaina, eurai/km, n_p – vidutinis metinis paros sunkiasvorio transporto eismo intensyvumas, aut./parą.

Patiriami dėl sunkiasvorio transporto važiavimo skirtingais metų laikais, kai būna skirtingas kelių dangos konstrukcijos stipris, 1 km ilgio kelio ruože nuostoliai $K_{kE,\tau,\sigma}^{(i)}$ nustatomi taip [126]:

$$K_{kE,\tau,\sigma}^{(i)} = \beta_{E,\tau,\sigma}^{(i)} \cdot K_{E,\tau,\sigma} \cdot \sum_{j=1}^m (S_{kE,\tau,\sigma}^{(i,j)} - \gamma), \text{ eurai/km}, \quad (5.2)$$

čia: $\beta_{E,\tau,\sigma}^{(i)}$ – nuostoliai dėl projektinės sunkiasvorio transporto ašies vienkartinio poveikio kelių dangos konstrukcijai i -uoju metų laikotarpiu, lyginant su vidutinėmis metinėmis, pagal jos stiprio kriterijus [126], sąlygomis (žr. I priedą); $S_{kE,\tau,\sigma}^{(i,j)}$ – k -ojo modelio sunkiasvorio transporto j -osios ašies įtakos kelių dangos konstrukcijai i -uoju metų laikotarpiu redukcijos projektine apkrova, priklausantis nuo jos stiprio, koeficientas [126]; m – sunkiasvorio transporto ašių skaičius, vnt.; γ – eismo mokesčio, priklausantis nuo kelio administracinės priklausomybės ir finansavimo šaltinio (valstybės ar privatus) bei kelio naudotojo statuso (vietos ar užsienio) koeficientas.

Detaliau panagrinėkime formulių (5.1) ir (5.2) rodiklius T_f ir γ . Rodiklis T_f – kelių dangos funkcionavimo likutinė trukmė (laikotarpio tarp jos profilaktinių remontų vidutinė trukmė), nustatomas pagal mūsų pasiūlytą modelį (žr. (2.34–2.37) formules), kai nuostolių kompensavimo kaštai yra nustatomi vienam keliui ar keliams, kurie turi vienodus kelių dangos konstrukcijos rodiklius ir buvo suremontuoti tuo pačiu metu. Įvertinus nuostolių kompensavimą

tam tikro regiono kelių tinklui, galima priimti, kad bet kuriuo konkrečiu laiko momentu automobilių kelių tinklo būklė atitinka šio tinklo kelių vidutinę būklę, būdingą kiekvieno kelio būklei tarpremontinio laikotarpio tarp kapitaliųjų remontų $T_f^{(\max)}$ viduryje. Tada likusio laikotarpio $T_f^{(\max)} / 2$ metu reikia atlikti 1-ą profilaktinį remontą, o šio laikotarpio pabaigoje – kapitalųjį remontą.

Nuostolių kompensavimo kaštams turi įtaką šie ypatumai:

a) kelio savininkas: jeigu kelias yra valstybės nuosavybė, tai kelio naudotojai už naudojimąsi keliu jau būna sumokėję tam tikras lėšas mokesčių pavidalu; jeigu kelias yra privatus, jo naudotojai turi atlyginti visus padarytus keliui nuostolius; jeigu kelias yra perduotas koncesijai – naudojimosi keliu mokesčiai priklauso nuo koncesijos sutarties sąlygų;

b) naudotojo statusas (valstybės keliams): vietos naudotojai, kaip ir pirmuoju atveju, mokesčių pavidalu jau yra sumokėję nustatytas lėšas, o užsieniečiai privalo padengti visus padarytus keliui nuostolius.

Padarytus automobilių keliams nuostolius turi kompensuoti eismo dalyviai:

- a) vietos sunkiasvorio transportas, važiuojantis valstybinės reikšmės keliais;
- b) užsienio šalių sunkiasvoris transportas, važiuojantis valstybinės reikšmės keliais;
- c) vietos ir užsienio šalių sunkiasvoris transportas, važiuojantis privačiais keliais;
- d) vietos ir užsienio šalių sunkiasvoris transportas, važiuojantis keliais, perduotais koncesijai.

[vertinę patirtų nuostolių ypatumus, koeficientą γ siūlome taikyti iš 5.3 lentelės.

5.3 lentelė. Nuostolių dėl sunkiasvorio transporto (ST) eismo kompensavimo koeficientas

Važiavimo ypatybės (vežėjo statusas ir kelio savininkas)	Koeficiento γ vertės
Vietos ST, važiuojančios valstybinės reikšmės keliais	1
Užsienio šalių ST, važiuojančios valstybinės reikšmės keliais	0
Vietos ir užsienio šalių ST, važiuojančios privačiais keliais	0
Vietos ST, važiuojančios keliais, perduotais koncesijai	0÷1
Užsienio šalių ST, važiuojančios keliais, perduotais koncesijai	0

Pagal [126] darbo nuorodas, nuostolių, padarytų keliui i -uoju metų laikotarpiu keliu važiuojant k -ojo tipo sunkiasvoriam transportui, kompensacijos kaštus $K_k^{(i)}$ tikslinga nustatyti pagal kiekvieno kriterijaus didžiausią vertę:

$$K_k^{(i)} = \max_{k_E, \tau, \sigma} K_{k_E, \tau, \sigma}^{(i)}, \text{ eurai/km.} \quad (5.3)$$

Taip apskaičiuotus nuostolių kompensavimo kaštus (dėl didelės diferenciacijos pagal metų laikus) nepatogu taikyti praktikoje, todėl reikia nustatyti (naudojantis būdingiausiais metų laikotarpiais) šių kaštų vidurkį. Būdingiausius laikotarpius Lietuvos sąlygoms siūlome nustatyti taip:

- a) pavasaris – laikotarpis su vidutine paros oro temperatūra T nuo $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- b) vasara – laikotarpis, apribotas vidutine paros oro temperatūra $T \geq +15\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- c) ruduo – laikotarpis, kai vidutinė paros oro temperatūra T sumažėja nuo $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $0\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- d) žiema – laikotarpis su pastovia vidutine paros oro temperatūra $T < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pavasario pirmasis mėnuo – sniego tirpimo ir žemės sankasos intensyvaus atšilimo (išalo išnykimo) mėnuo. Šis laikotarpis yra labiausiai nepalankus, nes jo metu įmirkę gruntai būna silpniausi (gruntų tampros modulis mažiausias), o gruntelių (ypač molio gruntų) pravažumas būna blogiausias. Šį nepalankų laikotarpį vadiname projektiniu laikotarpiu. Likusį pavasario metų vadinsime pavasario neprojektiniu laikotarpiu.

Žiemą išskyrėme laikotarpį, kai vidutinė paros oro temperatūra būna žemesnė kaip $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_{vid} < -5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Šio laikotarpio metu žemės sankasos gruntas būna išalęs ir jo stipris būna ženkliai didesnis už jame atsirandančius (nuo išorinės apkrovos) įtempius. Šį laikotarpį vadinkime žiemos laikotarpiu. Likusį žiemos tarpsnį (jo pradinę fazę) sąlyginai galima prijungti prie rudens ir apibendrintai pavadinti rudens-žiemos laikotarpiu. Likusį (vasaros) laikotarpį pavadiname vasaros laikotarpiu. Pagal šią klasifikaciją kalendorinius metus sudaro penki laikotarpiai:

- a) projektinis;
- b) pavasario neprojektinis;
- c) vasaros;
- d) rudens-žiemos;
- e) žiemos.

Atsižvelgiant į tai, kad sunkiasvorio transporto eismo maršrutai gali driektis įvairaus kapitalumo keliais, nuostolių kompensavimo lėšas siūlome apskaičiuoti taip [126]:

$$K_{k,i} = K_{k,i}^{(k)}l_k + K_{k,i}^{(l)}l_l + K_{k,i}^{(t)}l_t, \text{ eurai}, \quad (5.4)$$

čia: $K_{k,i}$ – k -ojo modelio sunkiasvorio transporto vieno važiavimo numatytu maršrutu, esant i -am metų laikotarpiui, suminiai nuostoliai, eurai; $K_{k,i}^{(k)}$, $K_{k,i}^{(l)}$, $K_{k,i}^{(t)}$ – nuostolių, patirtų dėl k -ojo modelio sunkiasvorio transporto vienkartinio važiavimo 1 km ilgio kapitalios, lengvesniosios ir tarpinio tipo dangos kelio ruože, esant i -am metų laikotarpiui, kompensavimo lėšos, atitinkamai,

eurais/km; l_k , l_l , l_t – kelio kapitalios, lengvesniosios ir tarpinio tipo dangos ruožų numatyto maršruto ilgis, km.

Lygtys (5.1–5.4) yra modelio (žr. 2.12 ir 2.18–2.41 lygtis bei 2.8 pav.), sunkiasvorio transporto ardančiojo poveikio kelių dangai įvertinti papildas.

Pagal šią metodiką vieno sunkiasvorio transporto važiavimo vienkartinis (vidutinis metinis) mokestis sudarytų, žiūrint kelių dangos tipo, 0,02–0,17 eurų/km (perskaičiuota šiandienos kainomis).

5.2. Konceptija sunkiasvorio transporto eismo apribojimui nepalankiuoju metų laikotarpiu nustatyti

Kelių dangos funkcionavimo trukmė ženkliai priklauso nuo projekcinio sunkiasvorio transporto eismo intensyvumo, todėl įvertinant jo kitėjimą metų sezonų bėgyje, galima taikyti, kad projektinis sezoninis eismo intensyvumas yra leistinasis eismo intensyvumas. Pagal kelių eksploatavimo praktiką galima teigti, kad projektinis leistinasis ir faktinis eismo intensyvumas dažniausiai nesutampa. Čia priežasčių gali būti daug – pradedant kelių projektavimo, tiesybos klaidomis ir baigiant transporto priemonių srauto sudėties nenumatytais pokyčiais, pasikeitus regiono poreikių struktūrai, kuri savo ruožtu priklauso nuo regionų politinių bei ekonominių ir kitų santykių, todėl tiksliai numatyti faktinį eismo intensyvumą yra labai sudėtinga.

Regiono keliams prižiūrėti skiriamų lėšų ne visada pakanka, o finansavimo tvarka ne visada būna palanki kelio ar kelių tinklo reikiamai būklei laiduoti, todėl labai svarbu, kad kelių tinkama eksploatacinė būklė būtų laiduota per visą jų funkcionavimo, reglamentuojamą norminiais dokumentais, laikotarpį.

Kai nepakankamas finansavimas, kelių dangos tinkamą eksploatacinę būklę galima laiduoti šiomis priemonėmis:

- a) jeigu reikia (nepalankiuoju metų laikotarpiu), sunkiasvorio transporto eismo intensyvumo apribojimu;
- b) sunkiasvorio transporto ašies leistinių apkrovų, neribojant jo eismo intensyvumo, mažinimu.

Jeigu tam tikro kelio ruožo danga yra tokio stiprio, kad tinkamai funkcionuoti gali apibrėžtą laikotarpį $T_f^{(max)}$, tai šio ruožo kelių dangos funkcionavimo trukmei be remonto ΔT_f padidinti, projektinių automobilių eismo intensyvumą N_p būtina sumažinti dydžiu ΔN_p . Pagal (4.21) formulę galima apskaičiuoti kelių dangos funkcionavimo trukmės padidėjimą:

$$T_f^{(max)} + \Delta T_f = \sum_i \frac{N_i}{n_p^{(i)} - \Delta n_p^{(i)}} = \sum_i \frac{N_i}{k_i n_p^{(i)}}, \text{ metais,} \quad (5.5)$$

čia: N_i – galimų pridėti apkrovų didžiausias skaičius (likutinis resursas), vnt.; $n_p^{(i)}$ – pridedamų projektinių apkrovų i -uoju metų laikotarpiu skaičius, vnt.; $\Delta n_p^{(i)}$ – pridedamų projektinių apkrovų prieaugio i -uoju metų laikotarpiu skaičius, vnt.; k_i – dvisluoksnės dangos konstrukcijos parametras i -uoju metų laikotarpiu [85]:

$$k_i = 1 - \frac{\Delta n_p^{(i)}}{n_p^{(i)}} = 1 - \frac{\Delta N_p^{(i)}}{N_p}, \quad (5.6)$$

$\Delta N_p^{(i)}$ – projektinių automobilių eismo intensyvumo prieaugis i -uoju metų laikotarpiu, aut./parą;

N_p – projektinių automobilių eismo intensyvumas, aut./parą.

Tarkime, kad apriboti sunkiasvorio transporto eismo intensyvumą yra būtina nepalankiaisiais j -aisiais metų laikotarpiais. Tada kitais laikotarpiais pridedamų apkrovų bus $\Delta n_p^{(i)} = 0$, o koeficientas $k_i = 1$ ir (5.5) formulė įgaus šį pavidalą:

$$T_f^{(\max)} + \Delta T_f = \sum_j \frac{1}{1 - \frac{\Delta N_p^{(j)}}{N_p}} \frac{N_j}{n_p^{(j)}} + \sum_{i-j} \frac{N_{i-j}}{n_p^{(i-j)}}, \text{ metais.} \quad (5.7)$$

Jeigu nepalankiuoju metų laikotarpiu sunkiasvorio transporto eismo intensyvumą apriboti pastoviu dydžiu ΔN_p , tai (5.7) formulę galima pateikti taip:

$$T_f + \Delta T_f = \frac{1}{1 - \frac{\Delta N_p}{N_p}} \sum_j \frac{N_j}{n_p^{(j)}} + \sum_{i-j} \frac{N_{i-j}}{n_p^{(i-j)}}, \text{ metais.} \quad (5.8)$$

Rodiklį ΔN_p , kuriuo būtina apriboti sunkiasvorio transporto eismo intensyvumą nepalankiuoju metų laikotarpiu, galima apskaičiuoti taip:

$$\Delta N_p = A N_p, \text{ metais} \quad (5.9)$$

ir

$$A = 1 - \frac{1}{\left(T_f + \Delta T_f - \sum_{i=j} \frac{N_{i-j}}{n_p^{(i-j)}} \right) \sum_j \frac{n_p^{(j)}}{N_j}}, \quad (5.10)$$

čia: A – kelių dangos konstrukcijos sluoksnių projektinis koeficientas [9].

Praktiškai yra lengviau organizuoti ne sunkiasvorio transporto eismo intensyvumo apribojimą, o jų ašies apkrovų kontrolę, kad sunkiasvorio transporto ašies apkrova neviršytų leistinosios apkrovos P^l . Įvairaus sunkiasvorio transporto, esančio sraute, eismo intensyvumą redukuoti projektinių automobilių eismo intensyvumu N_p [9] galima taip:

$$N_p = f_j \sum_{k=1}^n N_k S_{k\Sigma}, \text{ aut./parą}, \quad (5.11)$$

čia: f_j – koeficientas, įvertinantis eismo juostų skaičių bei eismo pasiskirstymą jose; n – įvairių modelių sunkiasvorio transporto sraute skaičius, vnt.; N_k – k -ojo modelio sunkiasvorio transporto eismo intensyvumas per parą (abiem kryptimis), vnt.; $S_{k\Sigma}$ – k -ojo modelio sunkiasvorio transporto poveikio kelių dangos konstrukcijai (redukuojant jo apkrovas projektine apkrova P_p) suminis koeficientas (žr. (2.30) ir (2.31) formules bei [9]):

$$S_{k\Sigma} = \sum_{j=1}^m \left(\frac{P_{k,j}^{ekv}}{P_p} \right), \quad (5.12)$$

$P_{k,j}^{ekv}$ – k -ojo modelio sunkiasvorio transporto j -osios ašies ratų ekvivalentinė apkrova, MPa; m – sunkiasvorio transporto ašių skaičius, vnt.

Apibendrinus (5.9) ir (5.11) bei (5.12) formules, galima nustatyti sunkiasvorio transporto ašies apkrovos $P_{k,j}^{ekv}$ apribojimą, esant sąlygai:

$$\Delta N_p \geq A \cdot f_j \cdot \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m N_k \left(\frac{P_{k,j}^{ekv}}{P_p} \right)^{4,4}, \text{ vnt.} \quad (5.13)$$

Akivaizdu, kad ašies apkrovos apribojimas pirmiausiai taikomas sunkiasvoriui transportui. Pagal faktinio ir leistinojo sunkiasvorio transporto eismo intensyvumo skirtumą per

projektinį laikotarpį galima nustatyti jo apkrovų, kurių eismą reikia kontroliuoti arba riboti, skaičių ΔN_p :

$$\Delta N_p = N_f - N_p, \text{ aut./parą,} \quad (5.14)$$

čia: N_f – sunkiasvorio transporto faktinis eismo intensyvumas, aut./parą.

Formulės (5.5–5.14) taip pat yra modelio (žr. 2.12 ir 2.18–2.41 lygtis bei 2.8 pav.), sudaryto sunkiasvorio transporto ardančiojo poveikio kelių dangai įvertinti, papildas.

5.3. Išvados

1. Gabenant krovinius tarptautiniais maršrutais ir dideliais atstumais, pastebima tendencija naudoti didelės keliamosios gebos sunkiasvorį transportą – tai leidžia sumažinti automobilių parką ir jų eksploatavimo išlaidas, naudoti standartais sunormintus kontenerius, sumažinti degalų sąnaudas. Visgi sunkiasvorio transporto apkrovos ženkliai pagreitina kelių dangos konstrukcijos irtį, ypač tos, kurios stipris yra nepakankamas, todėl sunkiasvorio transporto naudojimo ekonominis efektas dažniausiai nekompensuoja kelių remonto ir priežiūros išlaidų. Kelių dangos ardymo, važiuojant sunkiasvoriu transportui, poveikis įvairiais metų laikais būna skirtingas: mažėjant jos konstrukcijos stipriui, jis didėja.

2. Analizuojant sunkiasvorio transporto masės sezoninį apribojimą, pasiūlytos šios praktikoje realiai galimos jį realizuoti priemonės: sunkiasvorio transporto ašies apkrovų, oro slėgio padangose bei jo važiavimo greičio kontrolė. Taikant visas šias priemones vienu metu (pavojingais pažaidų kaupimosi metų laikotarpiais), galima išvengti asfaltbetonio sluoksnių priešlaikės suirties.

3. Mokesčiai už sunkiasvorio transporto važiavimą sudarytų sąlygas geriau valdyti automobilių kelių būklę bei jo eismo intensyvumą, gauti papildomų lėšų keliams tiesti, remontuoti bei prižiūrėti ir sumažintų transporto priemonių spūstis keliuose. Mokesčių apimtys turėtų būti nustatomos atsižvelgiant į vežimų sezoniškumą, sunkiasvorio transporto parametrų neatitiktį leistiniams (projektiniams) parametrams, kelių kategoriją, atstumą jo ašių ir kitus veiksnius.

4. Pasiūlyta koncepcija įgalina paruošti metodiką sunkiasvorio transporto eismo nuostoliams kompensuoti, pagal kurią būtų galima tiksliau ir labiau diferencijuotai, esant įvairioms eismo sąlygoms, įvairiai kelių tinklo būklei ir ekonominei padėčiai kelių bei transporto ūkyje, nustatyti už įvairių tipų sunkiasvorio transporto važiavimą diferencijuotus mokesčius. Kai nepakankamas kelių dangos konstrukcijos stipris, stinga lėšų jai stiprinti ir nėra galimybių

nepalankiais metų laikotarpiais apriboti sunkiasvorio transporto ašies apkrovas ar nukreipti eismą kitais keliais, viena iš efektyvių priimtinių priemonių Lietuvos kelių dangoms išsaugoti ir/ar reikiamai jos būklei laiduoti yra mokesčių, kompensuojančių patirtus nuostolius (dėl dangos būklės pablogėjimo), sistemos sukūrimas ir, taikant šią sistemą, sunkiasvorio transporto eismo mokesčių Lietuvos keliais surinkimas.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Sukurtas taikytinas Lietuvos sąlygoms (įvertinantis vietovės gruntų, hidrologines ir klimato sąlygas) kelių asfaltbetonio dangos suirties, jos likutinio stiprio ir funkcionavimo trukmės, veikiant automobilių ratų pasikartojančioms apkrovoms, modelis. Siūlomas modelis leidžia nustatyti kelių dangos suirties mastą, jos racionalią funkcionavimo trukmę bei jos likutinį stiprį. Šiuo modeliu galima apskaičiuoti kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių funkcionavimo trukmės racionalius tarpremontinius laikotarpius, nustatyti jos sustiprinimo sluoksnio racionalų storį ir pasiūlyti mažiausių sąnaudų jos sustiprinimo strategiją. Pagal tyrimų sprendinius pasiūlytas naujas metodas kelių dangos funkcionavimo racionaliai trukmei nustatyti, kurį taikant galima nustatyti kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių racionalų storį ir numatyti šių sluoksnių savybių išsaugojimo racionalią strategiją.

2. Pasiūlytas kelių dangos asfaltbetonio likutinio stiprio ir jų funkcionavimo trukmės modelis įvertina sunkiasvorio transporto apkrovos parametrus bei jos poveikio intensyvumą, automobilių srauto sudėtį, leistinąją ašies apkrovą, dangos būklę, dangos asfaltbetonio sluoksniams įrengti bei jai stiprinti naudojamų medžiagų projektines savybes, asfaltbetonio sluoksnių medžiagų stiprio kitėjimą, dangos konstrukcijos sluoksnių ir žemės sankasos grunto įtempius, dangos remonto darbų kainą ir stiprinant kelio konstrukciją gaunamą ekonominį efektą.

3. Pasiūlyta metodika kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių tarpremontiniams laikotarpiams bei stiprinimo sluoksnių parametrams nustatyti. Pagal tyrimų rezultatus nustatyta, kad dangos ankstyvo stiprinimo strategija yra ekonomiškai naudingesnė, lyginant ją su dangos stiprinimo bei tarpremontinių laikotarpių naudojimo tradicine praktika. Nustatėme, kad medžiagų ekonomijos požiūriu yra racionalu kelių dangos funkcionavimo pradžioje įrengti sąlyginai ploną jos asfaltbetonio sluoksnį, o vėliau numatyti būtinąjį momentą dangai sustiprinti nauju sluoksniu. Kelių dangos konstrukcijos stiprį ir asfaltbetonio sluoksnių pradinį storį tikslinga nustatyti konstrukcijos funkcionavimo trukmei $T \leq 12$ metų. Dangos asfaltbetonio sluoksnių stipriui išsaugoti siūlome daryti prevencinius (profilaktinius) remontus, periodiškai įrengiant plonus, $H = 1,5 \text{ cm} \div 3,0 \text{ cm}$ storio, kelių dangos sustiprinimo sluoksnius.

4. Parinktos sudėties asfaltbetonio eksperimentiniais laboratoriniais tyrimais bei parinktu Lietuvos kelio (Anykščiai–Troškūnai–Panevėžys) ruožų (18-lika vienodo (po 100 m) ilgio) natūriniais vizualiais ir instrumentiniais būklės tyrimais (198-uose (po 11 matavimų kiekviename iš 18-os ruožų) taškuose) įrodėme, kad pasiūlyta kelių dangos asfaltbetonio suirties ir jos likutinio stiprio nustatymo metodika yra tinkama naudoti praktikoje. Įrodėme, kad, žinant kelių dangos suirties mastą, jos konstrukcijos tampros modulį E ir stiprio koeficientą K_{st} , galima

objektyviai įvertinti dangos būklę ir remonto būtinumą, pobūdį bei darbų apimtį. Vizualus kelių dangos būklės įvertinimas yra būtinas, tačiau nepakankamas jos remonto būtinumui pagrįsti.

5. Naudojant pasiūlytas sunkiasvorio transporto ašies apkrovų ir oro slėgio padangose bei važiavimo greičio apribojimo bei kontrolės priemones vienu metu – pažaidų susidarymo ir vystimosi pavojingais metų laikotarpiais, galima išvengti kelių dangos asfaltbetonio sluoksnių priešlaikės suirties. Stingant lėšų kelių dangos konstrukcijoms stiprinti bei neturint galimybių nepalankiais metų laikotarpiais apriboti sunkiasvorio transporto ašies apkrovas ar nukreipti jo eismą kitais keliais, viena iš efektyvių priemonių Lietuvos kelių dangoms išsaugoti ir/ar reikiamai jų būklei laiduoti yra mokesčių, paruoštų pagal pasiūlytas koncepcijas, kompensuojančių patirtus nuostolius (dėl dangos būklės pablogėjimo), sistemos sukūrimas ir, taikant šią sistemą, mokesčių už sunkiasvorio transporto važiavimą Lietuvoje surinkimas.

NAUDOTOS LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Lietuvos automobilių kelių direkcija. Informacinis pranešimas. *Tinklapis*: www.lra.lt, 2007.03.12.
2. Specialieji tyrimai, matavimai ir analizė automobilių keliuose. Valstybinių kelių automobilių eismo intensyvumo tyrimai. Kaunas: Transporto ir kelių tyrimo institutas, 2006, p. 30–42.
3. Jongwon S., Sanghyeok K. Geographic information system based roadway construction planning. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 33, No 5: 2006, p. 508–528.
4. Palšaitis E., Vidugiris L. Automobilių kelių projektavimas. Teorija ir praktika. Vilnius: Technika, 1999. 440 p.
5. Богуславский А.М., Ефремов Л.Г. Асфальтобетонные покрытия. Москва: Транспорт, 1981. 146 p.
6. Yu H.S. Road materials and pavement design – Foreword. *Road Materials and Pavements* 6 (1): 2005, p. 7–14.
7. Puodžiukas V. Bituminous pavement evaluation and strengthening needs assessment in Lithuania. *Summary of doctoral dissertation*. Vilnius: Technika, 2000. 42 p.
8. de Solminihaç H., Salsilli R., Kohler E., et al. Analysis of pavement serviceability for the AASHTO design method: The Chilean case. *Arabian Journal for Science and Engineering* 28 (2B): 2003, p. 143–160.
9. Отраслевые дорожные нормы ODN 218.046–01. Проектирование нежестких дорожных одежд. Москва: Транспорт, 2001. 144 p.
10. Chen J.S., Lin C.H., Stein E., et al. Development of a mechanistic-empirical model to characterize rutting in flexible pavements. *Journal of Transportation Engineering-ASCE* 130 (4): 2004. 519 p.
11. LST 1331-2000. Automobilių kelių gruntai. Vilnius, 2002, p. 10–25.
12. Повышение надежности автомобильных дорог / Под ред. И.А. Золотаря. Москва: Транспорт, 1993. 183 p.
13. Petkevičius K., Podagėlis I. Didžiausią atsparumą nuovargiui laiduojanti optimali asfaltbetonio sudėtis. *City Development and Roads: Supplement of Journal Civil Engineering* (Miestų plėtra ir keliai. Mokslo žurnalo „Statyba“ priedas). Vilnius: Technika, 2000, p. 49–54.
14. Радовский Б.С., Супрун А.С., Казаков И.И. Проектирование дорожных одежд для движения большегрузных автомобилей. Киев: Будивельник, 1989. 168 p.

15. Shekharan R.A., Ostrom B.K. Effect of traffic load estimates on pavement design. *Transportation Research Record* (1809): 2002, p. 105–109.
16. Салль А.О. Сопротивление асфальтобетонного покрытия изгибу при действии движущегося автомобильного транспорта. *Автореф. дис. канд. техн. наук*. Ленинград: 1968. 28 p.
17. Pell P.S. Fatigue of bituminous materials in flexible pavements. *Journal of Institute of Highway Engineering* (8): 1971, p.17–23.
18. Радовский Б.С. Влияние нагрузок от автотранспортных средств на долговечность дорожных одежд. *Автомобильные Дороги*, No 10: 1984, p. 6–8.
19. Радовский Б.С., Супрун А.С. Конструирование дорожных одежд для многоосных транспортных средств большой грузоподъемности. *Обзорная информация ЦБНТИ Минавтодора РСФСР*, No 3: 1985. 60 p.
20. Tarefder R.A., White L., Zaman M. Development and application of a rut prediction model for flexible pavement. *Transportation Research Record* (1936): 2005, p. 201–209.
21. Hongbing F., Haddock J.E., White T.D., et al. On the characterization of flexible pavement rutting using creep model-based finite element analysis. *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 41, No 1: 2004, p. 49–73.
22. Королев И.В. Пути экономии битума в дорожном строительстве. Москва: Транспорт, 1986. 149 p.
23. Petkevičius K., Christauskas J. Asphalt concrete quality assurance during production. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, Vol. 1, No 3: 2006, p. 151–157.
24. Железко Е.П. Оценка и повышение трещиностойкости дорожных асфальтобетонов. Проблемы транспортного строительства и транспорта. *Материалы международной научно-технической конференции*, Вып. 2. Саратов: 1997, p. 34–36.
25. Hudson W.R., Flanagan P.R. An Examination of Environmental Versus load Effects on Pavements. *Transportation Research Record* (1121): 1987, p. 34–39.
26. Zhang Z.M., Leidy J.P., Kawa I., et al. Impact of changing traffic characteristics and environmental conditions on flexible pavements. *Transportation Research Record* (1730): 2000, p. 125–131.
27. Arand W. Die Dauerhaftigkeit von Asphaltstraßen unter Berücksichtigung des Klimas. *Strasse und Autobahn* (2): 1991, p. 80–88.
28. Руденский А.В. Прочностные и деформативные характеристики асфальтобетонов. *Сборник научных трудов ГП Росдорнии*, Вып. 8: 1996, p. 56–62.

29. Reid J.M. Recycling in transport infrastructure. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport* 153 (4): 2002, p. 255–262.
30. Инструкция по проведению экономических изысканий для проектирования автомобильных дорог ВСН 42–87. Москва: Минтрансстрой СССР, 1988. 66 p.
31. Spornol A. Aggressivité du trafic. *Revue Générale des Routes et des Aérodrômes*, No 1: 1994, p. 32–37.
32. Romero J.A., Lozano A., et al. Effect of truck suspension and tire properties on pavement damage spatial distribution. *Transportation Research Record* (1949): 2006, p. 148–154.
33. Zhang Z.M., Leidy J.P., Kawa I., et al. Impact of changing traffic characteristics and environmental conditions on flexible pavements. *Transportation Research Record* (1730): 2000, p. 125–131.
34. Salama H.K., Chatti K., et al. Effect of heavy multiple axle trucks on flexible pavement damage using in-service pavement performance data. *Journal of Transportation Engineering-ASCE* 132 (10): 2006, p. 763–770.
35. Hall J.W., Turner D.S.. Development and adoption of early AASHO design criteria. *Transportation Research Record* (1612): 1998, p. 26–33.
36. Бабков В.Ф. Автомобильные дороги. Москва: Транспорт, 1983. 280 p.
37. Al-Qadi I.L., Loulizi A., Janajreh I., et al. Pavement response to dual tires and new wide-base tires at same tire pressure. *Transportation Research Record* (1806): 2002, p. 38–47.
38. Richter C.A., Schwartz C.W. Modeling stress- and moisture-induced variations in pavement layer moduli. *Transportation Research Record* (1860): 2003, p. 33–40.
39. Artamendi I., Khalid H. Characterization of fatigue damage for paving asphaltic materials. *Fatigue and Fracture of Engineering Material and Structures*, Vol.28, No.12: 2005, p. 1113–1131.
40. Machemehl R.B., Wang F., Prozzi J.A. Analytical study of effects of truck tire pressure on pavements with measured tire-pavement contact stress data. *Transportation Research Record* (1919): 2005, p. 111–120.
41. Douglas R.A., Woodward W.D.H., Rogers R.J. Contact pressures and energies beneath soft tires – modeling effects of central tire inflation-equipped heavy-truck traffic on road surfaces. *Transportation Research Record* (1819): 2003, p. 221–227.
42. Sousa J.B., Lysiner J., Chen S., Monismith C.L. Effect of dynamic loads on performance of asphalt concrete pavements. *Transportation Research Record* (1207): 1988, p. 145–168.

43. Shekharan R.A., Ostrom B.K. Effect of traffic load estimates on pavement design. *Transportation Research Record* (1809): 2002, p. 105–109.
44. Autret P., Baucheron A. De Boissoudy, Graflisammer J.-C. Le Manège de Fatigue du Laboratoire central des Ponts et Chaussées. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, No 155: 1988, p. 33–45.
45. Park D.W., Fernando E., Leidy J. Evaluation of predicted pavement response with measured tire contact stresses. *Transportation Research Record* (1919): 2005, p. 160–170.
46. Радовский Б.С., Сливинский В.И., Мозговой В.В., Супрун А.С., Сом М.И., Швец В.В. О нормировании осевых нагрузок автомобильного подвижного состава, No 10. Киев: Промышленный транспорт, 1980, p. 22–25.
47. Carpenter S.H., Ghuzlan K.A., Shen S.H. Fatigue endurance limit for highway and airport pavements. *Transportation Research Record* (1832): 2003, p. 131–138.
48. Hu X., Sun L. Stress response analysis of asphalt pavement under measured tire ground pressure of heavy vehicle. *Journal of Tongji University* (Natural Science), Vol. 34, No 1: 2006, p. 64–72.
49. Wang F., Machemehl R.B. Current status and variability of in-service truck tire pressures in Texas. *Transportation Research Record* (1853): 2003, p. 157–164.
50. Трощенко В.Г., Красовский А.Я., Покровский В.В., Сосновский Л.А., Стрижало В.А. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. *Справочное пособие*, Часть 1. Киев: Наукова думка, 1994. 288 p.
51. Супрун А.С. Расчет напряжений перемещений и деформаций нежестких дорожных одежд при движении многоосных многоколесных транспортных средств. *Дис. канд. техн. наук*. Киев: Союздорнии, 1983. 306 p.
52. Радовский Б.С. Теоретические основы конструирования и расчета нежестких дорожных одежд на воздействие подвижных нагрузок. *Дис. канд. техн. наук*. Киев, 1983. 552 p.
53. Sivilevičius H., Petkevičius K. Regularities of development in the asphalt concrete road pavement. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 8, No 3, Vilnius: Technika, 2002, p. 206–213.
54. Sawangsuriya A., Edil T.B. Evaluating stiffness and strength of pavement materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering* 158 (4): 2005, p. 217–230.

55. Li J.H., Muench S.T., Mahoney J.P., et al. The highway development and management system in Washington State – Calibration and application for the Department of Transportation Road Network. *Transportation Research Record* (1933): 2005, p. 53–61.
56. Tebodin Consultants and Engineers O’Sullivan and Graham. Enhancement of the DAVASEMA Pavement Management System. Pavement Performance Modelling: 1996. 43 p.
57. Bennett C.R., Paterson W.D.O. HDM–IV. Vol. 5. Guide to Calibration and Adaptation. PIARC: 1999.
58. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов. *Учебное пособие*. Москва: Наука, 1986. 560 p.
59. Бартенев Г.М., Зуев Ю.С. Прочность и разрушение высокоэластичных материалов. Москва–Леннинград: Химия, 1964. 387 p.
60. Ильюшин А.А., Победря Б.Е. Основы математической теории термовязкоупругости. Москва: Наука, 1970. 280 p.
61. Москвитин В.В. Сопротивление вязкоупругих материалов. Москва: Наука, 1972. 327 p.
62. Серенсен С.В. Вопросы несущей способности при малом числе циклов нагружения. Квазистатическое и усталостное разрушение материалов и элементов конструкций, Том 3. Киев: Наукова думка, 1985, p. 37–56.
63. Трощенко В.Г., Красовский А.Я., Покровский В.В., Сосновский Л.А., Стрижало В.А. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. *Справочное пособие*, Часть 2. Киев: Наукова думка, 1994. 701 p.
64. Funk Th. Kretz R., Lindner T., Welmers W. Zerstörungsfreie Erkundung des Straßenaufbaus mit Hilfe des Impulsradars. *Strasse und Autobahn* (47), No 8: 1996, p. 422–431.
65. Weingart V.W. Testing for road construction and earthworks by means of impact testing instrument. *OELAZ Oesterreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift*, Vol. 150, No 4–5: 2005, p. 111–127.
66. Köhler M. Zur Analyse und Beurteilung des strukturellen Zustandes vorhandener flexibler Fehrbahnbefestigungen *Strasse und Autobahn* (47), No 3: 1996, p. 148–152.
67. Schmuck A., Hehenberger F. Mängelursachen, Erhaltungsmaßnahmen und Auswirkungen auf das Zustandsniveau – Entwicklung einer Systematik für das Management der Straßenerhaltung. *Forsch. Strassenbau und Strassenverkehrstechn*, No 652: 1993, 118 p.

68. Petkevičius E., Petkevičius R., Babickas R. Investigation of asphalt concrete pavement quality of Lithuanian highways. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, Vol. 1, No 2: 2006, p. 71–76.
69. Brillet F. Construction de Lois d'évolution de l'état des chaussées par la méthode des Lois de survie. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, No 197: 1995, p. 43–79.
70. Sun L., Liu L. Unification of core design theories for asphalt pavements. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, Vol. 34, No 10: 2006, p. 1315–1333.
71. Grätz B., Durth W. Beurteilung der Tragfähigkeit von Fahrbahnbefestigungen im Hinblick auf die Systematik der Straßenerhaltung. *Bitumen* (57), No 4: 1995, p. 164–173.
72. Grätz B., Durth W. (Überprüfung praktischer Methoden zur Messung der Tragfähigkeit und Einsschätzung der Restnutzungsdauer, insbesondere für Straßen auf dem Gebiet der neuen Bundesländer. *Forsch. Strassenbau und Strassenverkehrstechn*, No 723: 1995. 224 p.
73. Kim H.B. Practical probabilistic design format for flexible pavements. *Transportation Research Record* (1947): 2006, p. 185–192.
74. Livneh M. Determination of residual life in flexible pavement. *Journal Civil Engineering* (23), No 5: 1996, p. 1012–1024.
75. Апестин В.К., Дудаков А.И., Стрижевский А.М. Основные принципы сезонного ограничения движения и оценки ущерба от проезда по дорогам тяжеловесных автотранспортных средств. *Сборник научных трудов ГП Росдорнии*, Вып. 8: 1996, p. 81–92.
76. Указания по оценке прочности и расчету усиления нежестких дорожных одежд ВСН 52–89. Москва: ЦБНТИ Минавтодора РСФСР, 1989. 72 p.
77. Васильев Ю.М., Агафонцев В.П., Исаев В.С. и др. Дорожные одежды с основаниями из укрепленных материалов. Москва: Транспорт, 1989. 191 p.
78. Jiang Y., Selezneva O., Mladenovic G., et al. Estimation of pavement layer thickness variability for reliability-based design. *Transportation Research Record* (1849): 2003, p. 156–165.
79. Evdorides H.T., Snaith M.S., Anyala M. An analytical study of road pavement fatigue. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport* 159 (2): 2006, p. 93–100.
80. Проектирование и строительство автомобильных дорог / Под ред. В.И. Заворицкого. *Справочник*. Київ: Техніка, 1996. 383 p.
81. Petkevičius K. Automobilių kelių asfaltbetonio dangos tarpremontiniai laikotarpiai ir metodika jiems nustatyti. *City Development and Roads: Supplement of Journal Civil*

- Engineering (Miestų plėtra ir keliai. Mokslo žurnalo „Statyba“ priedas). Vilnius: Technika, 2000, p. 44–48.
82. Теляев П.И. Конструкции дорожных одежд. *Автомобильные Дороги*, No 1: 1989, p. 5–7.
 83. Statybos techninis reglamentas STR 2.06.03:2001 Automobilių keliai. Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija ir susisiekimo ministerija, 2001. 92 p.
 84. Statybos rekomendacijos R 35–01 Automobilių kelių asfaltbetonio ir žvyro dangos. Vilnius: LAKD, 2001. 117 p.
 85. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд / Под ред. Н.Н.Иванова. Москва: Транспорт, 1973. 328 p.
 86. Tsunokawa K., Riaz-ul-Islam G.-Ch. Optimal strategies for highway pavement management in developing countries. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 17, No 3: 2002, p. 194–202.
 87. Yuan J., Sun L. Research on sample size selection of pavement management system. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, Vol. 34, No 10: 2006, p. 1340–1344.
 88. Klinghammer S., Huber Th., Nagel M. Methodenstudie zur Verbesserung des Prognoseinstrumentariums für die langfristige Erhaltung der Bundesfernstraßen. *Forsch. Strassenbau und Strassenverkehrstechn*, No 743: 1997. 61 p.
 89. OECD. Pavement Management Systems. Paris: OESD, 1987. 160 p.
 90. Радовский Б.С., Сердюк А.В. Прогнозирование закономерности изменения состояния дорожной одежды. *Автомобильные Дороги*, No 7: 1997, p. 19–21.
 91. Платные дороги. Информационный центр по автомобильным дорогам. *Автомобильные Дороги*, No 2: 1996, p. 2–7.
 92. Pothengatter W. Road pricing. *Strasse und Autobahn* (45), No 8: 1994, p. 425–429.
 93. Gérondeau Ch. Le financement des routes. *Revue Générale des Routes et des Aérodrômes*, No 746: 1996, p. 22–24.
 94. Camomilla G. Пътни такси по автомагистралите в света. Пътища, No 3 (35): 1996, p. 28–29.
 95. Quelques question sur les autoroutes a peage. *Revue Générale des Routes et des Aérodrômes*, No 627: 1988, p. 81.
 96. Kockelman K.M., Podgorski K.V. Public perceptions of toll roads: A survey of the Texas perspective. *Transportation Research. Part A (Policy and Practice)*, Vol. 40, No 10: 12 2006, p. 888–902.
 97. Zhou J., Huang Y.-G. Pricing strategies in toll road network with elastic demand. *Journal of Systems Engineering*, Vol. 20, No 1: 2005, p. 19–37.

98. Конвисаров Е.В. Финансирование затрат на строительство и эксплуатацию автомобильных дорог в условиях перехода к рынку. Вопросы организации работы транспорта в условиях рыночных отношений. *Материалы научно-практической конференции*. С. Петербург: Знание, 1991, p. 38–42.
99. Hensher D.A., Sullivan C. Willingness to pay for road curviness and road type. *Transportation Research. Part D (Transport and Environment)*, Vol. 8D, No 2: 2003, p. 139–194.
100. Einbock M. Effects of the Austrian road toll system on companies. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 36, No 2: 2006, p. 153–169.
101. Mattsson L.-G., Eliasson J. Equity effects of congestion pricing. Quantitative methodology and a case study for Stockholm. *Transportation Research. Part A (Policy and Practice)*, Vol. 40, No 7: 2006, p. 602–620.
102. L'Allemagne veut mettre les camions á contribution. *Vie Rail*, No 2435: 1994. 24 p.
103. Zhang H.M., Ge Y.E. Modeling variable demand equilibrium under second-best road pricing. *Transportation Research. Part B (Methodological)*, Vol. 38B, No 8: 2004, p. 733–782.
104. Feng S.W. A traffic control strategy based on an evolution equation of traffic cost under dynamical road-pricing regulation. *9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*. 2006. 6 p.
105. Asai Sh. Development of road in Japan. History and civil engineering technology. *Civil Engineering Japan*, No 30: 1991, p. 1–13.
106. Blumberg A.J., Chase R. Congestion pricing that respects "driver privacy". *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*. 2006. 8 p.
107. Условия международных автомобильных перевозок грузов. *Краткий справочник*. Киев: АСМАП Украины, 1997. 156 p.
108. Gronau R. Fuel taxes and road-user charges in LDC's some lessons from sub-Saharan Africa. *Journal of Transport Economics and Policy* (28), No 3: 1994, p. 255–339.
109. Joksimovic D., Bliemer M.C.J., Bovy P.H.L., et al. Dynamic road pricing for optimizing network performance with heterogeneous users. *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*. 2005, p. 407–419.
110. Poingt M.-H. Le Prado Carénage: un tunnel qui roule. *Vie Rail*, No 2467: 1994. 34 p.
111. Savona P. Tariffe autostradali e carta della mobilità. *Autostrade* (38), No 1: 1996, p. 2–13.

112. Altner H. French reichs Mautstaffelung bewährt. *Automobile Revue* (87), No 45: 1992, p. 7.
113. Jiang Q.Y. Sensitivity analysis based method for optimal road network pricing. *Annals of Operations Research*, Vol.133: 2005, p. 303–320.
114. Дорожное хозяйство в условиях рыночной экономики. *Автомобильные Дороги*, No 5: 1991, p. 43.
115. Drocourt M. L'organisation de l'exploitation des autoroutes. *Travaux*, No 660: 1990, p. 60–84.
116. Feng S.-W. Economic analysis of traffic flow with an evolution equation. *Journal of Shanghai University*, Vol. 9, No.1: 2005, p. 1–5.
117. Becher Y. Privates kapital für maut-autobahnen. *BW: Bauwirtschaft* (46), No 10: 1992, p. 39–40.
118. Сваткова Е.А. Европейская дорожная система. *Автомобильные Дороги*, No 2: 1993, p. 28–29.
119. Постанова КМУ від 2 лютого 1993 р. № 83 „Про порядок збору та використання коштів для фінансування витрат, пов'язаних з будівництвом, ремонтом і утриманням автомобільних доріг загального користування“. 1993. 12 р.
120. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 25 июля 1993 г. № 421 “Об утверждении допустимых параметров тяжеловесных и крупногабаритных транспортных средств с грузом, проезжающих по автомобильным дорогам общего пользования Республики Беларусь, тарифов за их проезд и ставок транзитного налога с владельцев (пользователей) транспортных средств“. 1993. 15 р.
121. „Положение о порядке компенсации ущерба, наносимого тяжеловесными автотранспортными средствами при проезде по федеральным автомобильным дорогам“, № 1334. Москва: Информавтодор, ФДД Минтранс России, 1997. 31 р.
122. „Положение о порядке компенсации ущерба за пропуск по автомобильным дорогам тяжеловесных автотранспортных средств“. Москва: Информавтодор, ФДД Минтранс России, 1994. 27 р.
123. Стороженко М.С., Прусенко Е.Д. Динамика снижения несущей способности дорожных одежд от сверхнормативной транспортной нагрузки и обоснование затрат на их восстановление. Проблемы эксплуатации автомобильных дорог. *Сборник научных трудов ХГАДТУ*. Харьков: Знание, 1998, p. 88–95.
124. Gedankenaustausch zum Road Pricing. *Strasse und Verkehr* (50), No 47: 1994, p. 18.
125. EG diskutiert Autobahn gebuht. *Automobile Revue* (87), No 45: 1991. 7 р.

126. Дорожній транспорт. Транспортні засоби. Навантаження та габарити. ДСТУ. *Збірник нормативних документів ГУ ДАІ МВС України*. Київ: Радуга, 2001, р. 2–29.
127. Bhattacharya A., Velinsky S.A. Damage mechanics based approach to predicting cyclic pavement response and cumulative damage due to heavy vehicles. *Heavy Vehicle Systems-International Journal of Vehicle Design* 12 (1): 2005, р. 1–15.
128. Hajek J.J., Billing J.R. Trucking trends and changes that affect pavements. *Transportation Research Record* (1816): 2002, р. 96–103.
129. Heydinger A.G. Evaluation of seasonal effects on subgrade soils. *Transportation Research Record* (1821): 2003, р. 47–55.
130. Збірник нормативних документів по службі нагляду за станом автомобільних доріг та вулиць Державтоінспекції МВС України. Частина 3. *Збірник нормативних документів ГУ ДАІ МВС України*. Київ: Радуга, 1997. 407 р.
131. Збірник нормативних документів по службі нагляду за станом автомобільних доріг та вулиць Державтоінспекції МВС України. Частина 2. *Збірник нормативних документів ГУ ДАІ МВС України*. Київ: Станіца–Київ, 1996. 597 р.
132. Uzan J. Permanent deformation in flexible pavements. *Journal of Transportation Engineering-ASCE* 130 (1): 2004, р. 6–13.
133. Радовський Б.С., Гамеляк І.П., Шевчук В.Р. Обґрунтування нормативів компенсації збитків від руйнування дорожніх одягів автомобільних шляхів у весняний період. *Автомобільні Дороги і Дорожнє Будівництво*, Вып. 52. Київ: Будівельник, 1994, р. 79–89.
134. Эрастов А.Я., Чванов В.В., Работяга М.Т. Оценка эффективности дорожно-ремонтных работ в условиях нового механизма. *Автомобильные Дороги*, No 12: 1990, р. 4–5.
135. Золотарь И.А., Энтина С.Б., Юдовин М.Э. Определение надежности автомобильных дорог при выборе проектных решений. *Автомобильные Дороги*, No 3: 1985, р. 5–6.
136. Васильев А.П., Апестин В.К., Куликов С.С. Критерии и методы планирования ремонта и очередности работ по результатам диагностики. *Автомобильные Дороги*, No 6: 1993, р. 6–9.
137. Брашно А.А., Салль А.О. Стимулирование качества дорожной одежды. *Автомобильные Дороги*, No 4: 1991, р. 3–5.
138. Хомяк Я.В. Оценка эффективности капитальных вложений в строительство и реконструкцию дорог. *Автомобильные Дороги*, No 9: 1989, р. 18–19.

139. Теляев П.И., Щербакова Е.Я. О напряженно деформированном состоянии дорожной одежды под действием нормальной и касательной нагрузок. Исследования по механике дорожных одежд. Москва: Труды Союздорнии, 1985, р. 60–70.
140. Программа ASPHALT по расчету оптимального состава асфальтобетона. *Інформаційний листок* № 111–96. Київ: ЦНТЭИ, 1996. 87 р.
141. Золотарев В.А. Долговечность дорожных асфальтобетонов. Харьков: Вища школа, Изд-во при Харьковском гос. ун-те, 1977. 114 р.
142. Гамеляк І.П. Про визначення характеристик втомленості дисперсно-армованого асфальтобетону. *Автомобільні Дороги і Дорожнє Будівництво*, Вып. 51. Киев: Будівельник, 1993, р. 59–63.
143. Di Benedetto H., de La Roche C., Baaj H., et al. Fatigue of bituminous mixtures. *Materials and Structures* 37 (267): 2004, p. 202–216.
144. Fischer R. Design and configuration of protective layers. *Eisenbahningenieur*, Vol.57, No.1: 2005, p. 32–37.
145. Руденский А.В., Калашникова Т.Н. О взаимосвязи прочностных показателей асфальтобетона при различных режимах нагружения, Вып. 12. Москва: Труды Гипродорнии, 1975, р. 72–76.
146. Калашникова Т.Н. Исследование усталостных свойств дорожных асфальтовых бетонов. *Автореф. дис. канд. техн. наук*. Москва, 1975. 24 р.
147. Иванов Н.Н., Руденский А.В. Определение требуемой прочности асфальтобетона с учетом его пластичности и конкретных условий работы покрытия, Вып. 11. Москва: Труды Союздорнии, 1967, р. 121–125.
148. Указания по определению прочностных и деформативных характеристик дорожно-строительных материалов и грунтов. Киев: 1975. 78 р.
149. Белан А.А., Радовский Б.С. Определение модуля упругости при обследовании дорожных одежд. *Автомобильные Дороги*, No 10: 1976, р. 6–7.
150. World Meteorological Organization. World Weather Information Service. Climatologically Information. *Tinklapis*: www.worldweather.org, 2007.02.25.
151. Салль А.О. Механические свойства асфальтобетона при изгибе кратковременными нагрузками, Вып. 34. Москва: Транспорт, 1969, р. 102–115.
152. Апестин В.К., Стрижевский А.М. Оценка прочности нежестких дорожных одежд в нерасчетный период года. Новое в проектировании конструкций дорожных одежд. 1988, р. 107–118.

153. Носов В.П., Носов В.В. Математическое моделирование водно-теплого режима автомобильных дорог с использованием метода динамической адаптации. Транспорт. Наука, техника, управление. *Сборник обзорной информации*, No 3. Москва: BINITI, 1997, p. 18–32.
154. Bleßmann W., Drüschner L. Überbauung einer Betondecke mit standfestem Asphalt für eine zeitlichbegrenzte Nutzung. *Bitumen* (56), No 2: 1994, p. 61–65.
155. Програма ALGOFORT по рішенняня теорії пружності для багатошарового пружного напівпростору. Український транспортний університет (УТУ), кафедра ДБМіХ. *Інформаційний листок* № 15–99. Київ: ЦНТЭИ, 1999. 127 р.
156. Хомяк Я.В. Проектирование сетей автомобильных дорог. Москва: Транспорт, 1983. 207 р.
157. Шевчук В.Р. Методика і результати обслідування ділянок дорожніх одягів з тонкошаровими покриттями. *Тез. доп. науково-практичної конференції “Сучасні методи підвищення транспортно-експлуатаційного стану автомобільних доріг влаштуванням тонкошарових захисних покриттів”*. Чернігів: 1997, р. 19–21.
158. Сердюк О.В., Короленко С.О. Досвід. влаштування тонкошарових покриттів при використанні середніх ремонтів на магістральних та місцевих дорогах Чернігівської області. *Тез. доп. науково-практичної конференції “Сучасні методи підвищення транспортно-експлуатаційного стану автомобільних доріг влаштуванням тонкошарових захисних покриттів”*. Чернігів: 1997, р. 26–27.
159. Борисенко А.А., Рябченко О.І., Островерхий О.Г. Тонкошарові покриття на основі бітумних емульсій. *Тез. доп. науково-практичної конференції “Сучасні методи підвищення транспортно-експлуатаційного стану автомобільних доріг влаштуванням тонкошарових захисних покриттів”*. Чернігів: 1997, р. 24–25.
160. Dumont A.-G. Revêtement de chaussées en cruches inhabituellement minces. *Strasse und Verkehr* (12), No 77: 1991, p. 719–720.
161. BBTM ET BBUM: d’veloppement et perspectives. *Route Actual*, No 34: 1994, p. 51–58.
162. Dübner R. Standfeste Fahrbahndecken durch veränderten Schichtenaufbau? *Bitumen* (58), No 4: 1996, p. 153–158.
163. Brosseaud Y., Abadie R., Legonin R. Couches de roulement très minces et ultra-minces en matériaux bitumineux à chaud Bilan d’emploi et de comportement. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, No 207: 1997, p. 55–131.
164. Brosseaud Y., Sicard D. Bilan des performances et domaine d’emploi des ECF en France. *Revue Générale des Routes et des Aérodrômes*, No 749: 1997, p. 19–29.

165. Grätz B. Beurteilung dünner Asphaltdeckschichten im Heiß und Kalteinbau, insbesondere in Bezug auf die Oberflächeneigenschaften, Griffigkeit und Dichtigkeit. *Forsch. Strassenbau und Strassenverkehrstechn*, No 649: 1993. 274 p.

AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

Tyrimų rezultatai paskelbti straipsniuose recenzuojamuose periodiniuose leidiniuose:

- 1a. Буткявичюс С., Петкявичюс К. Нагрузки на ось тяжеловесных транспортных средств и целесообразность их ограничения в неблагоприятное время года.). *Труды БГТУ*, Серия 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность, вып. 14. Минск: 2006, p. 44–50. ISSN 1683–0377.

- 2a. Butkevičius S., Petkevičius K., Kamaitis I.Z. Evaluation of state of flexible road pavement construction using objective strength criteria. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, Vol. II, No 2: 2007, p. 61–66. ISSN 1822–427X.

Tyrimų rezultatai paskelbti straipsniuose recenzuojamuose neperiodiniuose leidiniuose:

- 3a. Butkevičius S., Petkevičius K. Rational service life of solid layers in flexible road pavement construction and main principles that determine it. *The 8th International Conference “Modern building materials, structures and techniques”*. Selected Papers. Vilnius: Technika, 2004, p. 945–950. ISBN 9986–05–757–4.

- 4a. Butkevičius S., Petkevičius K. Factors determining the duration of solid layer in non-stiff road pavement construction. *The 8th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”*. Proceedings. Vilnius: Held on May 19–21, 2004.

- 5a. Butkevičius S., Petkevičius K. Conception of compensation for damage caused by traffic of heavy weight vehicles on roads with flexible pavement. *The 6th International Conference on Environmental Engineering*. Selected Papers, Vol. II. Vilnius: Technika, 2005, p. 669–676. ISBN 9–986–05850–3.

- 6a. Пяткявичюс К., Лауринавичюс А., Буткявичюс С. Воздействие нагрузок транспортных средств и климатических факторов на ровность асфальтобетонных покрытий. *The 45th International Seminar on Modelling and Optimisation of Composites“*. Proceedings. Odessa: 2006, p. 164–167. ISBN 966–318–496–5.

- 7a. Буткявичюс С., Пяткявичюс К. Нагрузки на ось тяжеловесных транспортных средств и целесообразность их ограничения в неблагоприятное время года. *Автомобильные Дороги и Мосты*, No 1/2006. Минск: Белавтодор, 2006, p. 12–18.

- 8a. Пяткявичюс К., Камайtis З., Подагелис И., Буткявичюс С. Назначение вида ремонта нежестких дорожных одежд с монолитными слоями асфальтобетона на

основе объективной оценке их состояния по предлагаемой методике. *The 46th International Seminar on Modelling and Optimisation of Composites*“. Proceedings. Odessa: 2007, p. 225–226. ISBN 978–966–318–720–4.

- 9a. Butkevičius S., Petkevičius K., Christauskas J. Evaluation of condition of flexible road pavement. *The 7-th European Conference of Young Research and Science Workers “Transcom 2007”*. Proceedings, Section 8. Žilina: 2007, p. 33–36.