

Environmental engineering Aplinkos inžinerija

MIESTO KARŠČIO SALŲ MAŽINIMO PRIEMONIŲ TVARUMO VERTINIMAS GATVIŲ KONTEKSTE: MEDŽIŲ IR ATSPINDINČIŲJŲ VĖSIŲ DANGŲ ANALIZĖ

Paulina JANUŠAITĖ , Rūta MIKUČIONIENĖ 

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

- gauta 2026 m. gegužės 2 d.
- priimta 2026 m. birželio 1 d.

Santrauka. Auganti urbanizacija ir dažnėjantys karščio epizodai stiprina miesto karščio salų (MKS) poveikį, ypač vėsesnio klimato miestams, kurie yra mažiau prisitaikę prie ilgų karščio bangų. Nors MKS mažinimo priemonės plačiai nagrinėjamos mikroklimato požiūriu, jų aplinkosauginiai, socialiniai ir ekonominiai poveikiai dažnai vertinami atskirai, todėl sudėtinga palyginti priemonių visapusišką tvarumą. Šio tyrimo tikslas – įvertinti dviejų skirtingų kategorijų pasyvių fizinių MKS mažinimo priemonių tvarumą siauresniame gatvių kontekste ir patikrinti metodologijos tinkamumą platesnio masto analizėms. Taikytas daugiakriteris SMART metodas, turintis hierarchinę kriterijų struktūrą, apimančią aplinkosauginę, socialinę ir ekonominę plotmę, o kokybiniai įverčiai (1–5) priskirti remiantis mokslinės literatūros įrodymais ir ekspertiniu vertinimu. Vertintos gatvės medžių (GM) ir atspindinčiųjų vėsių dangų (AD) priemonės. Rezultatai parodė, kad GM surinko didesnę bendrą balą (3,50) nei AD (2,45), t. y. susidarė 1,05 balo skirtumas GM naudai. GM buvo pranašesni aplinkosauginėje ir socialinėje plotmėje, o AD išsiskyrė pagal kriterijus, susijusius su šiluminio komforto gerinimu ir universalesniu pritaikomumu. Abiejų priemonių ekonominiai įverčiai buvo vidutiniai ir atskleidė kompromisus tarp poveikio masto ir eksploatacinių poreikių. Tyrimas patvirtina daugiakriterio vertinimo naudą, tačiau platesniam taikymui reikalinga gilesnė kriterijų atranka (dubliavimosi mažinimas), platesnis priemonių spektras ir ekspertinis plotmių svorių nustatymas.

Reikšminiai žodžiai: miesto karščio sala, karščio bangos, gatvės mikroklimatas, gatvės medžiai, atspindinčiosios vėsios dangos, daugiakriteris vertinimas, tvarumo vertinimas.

✉ Autorius susirašinėti. El. paštas ruta.mikucioniene@vilniustech.lt

1. Įvadas

Šiuo metu apie 55 % pasaulio gyventojų gyvena urbanizuotose teritorijose, o iki 2050 m. ši dalis gali išaugti iki 60 % (Ciacci et al., 2023). Urbanizacija siejama su žaliųjų plotų nykimu ir natūralių ar pusiau natūralių ekosistemų pakeitimu dirbtine aplinka (Costadone & Vierikko, 2023). Augantis gyventojų skaičius, vartojimas ir transporto naudojimas didina energijos bei išteklių poreikį miestuose ir prisideda prie klimato kaitos. Šiame kontekste stiprėja miesto karščio salų (toliau – MKS) efektas ir karščio bangos (toliau – KB). Tyrimai rodo, kad vasaros karščio streso didėjimas labiausiai juntamas šiauriniuose vidutinės platumos regionuose, o vėsesnių klimato klasterių miestai yra labiau paveikiami KB nei šiltesnio klimato zonos (Mashhoodi & Unceta, 2024). Vėsesnių klimato zonų miestai yra mažiau prisitaikę kovoti su MKS ir KB, todėl efektyvi adaptacija būtina. Sprendimų paieška MKS efektui mažinti yra vienas iš pagrindinių šiuolaikinių mokslinių tyrimų prioritetų, o tvarūs būdai prisitaikyti prie klimato kaitos – esminis miesto

planuotojų tikslas (Irfeey et al., 2023). Zhao ir kt. (2023) teigia, kad MKS mažinimas nėra vien inžinerinė problema – tai sudėtingas iššūkis, reikalaujantis tarpdisciplininių žinių ir pastangų. Raginama išryškinti finansinių, ekonominių, sveikatos ir aplinkos aspektų tarpusavio sąsajas, siekiant paskatinti tvariai miestų plėtrai palankių sprendimų priėmimą (Zhao et al., 2023). Šio tyrimo tikslas – atlikti dviejų skirtingų infrastruktūros tipų MKS mažinimo priemonių (toliau – MP) tvarumo vertinimą ir patikrinti metodologijos tinkamumą platesnio masto analizėms.

2. Literatūros apžvalga

Nuo pirmųjų Luko Howardo stebėjimų XIX a. pr. MKS reiškinys buvo plačiai dokumentuojamas (Oke, 1982). Literatūroje nurodoma, kad MKS gali padidinti oro temperatūrą miestuose 2–8 °C, o naujesnė tikslesnių reikšmių riba yra 5–15 °C (Mohajerani et al., 2017). MKS formavimąsi lemia gatvių kanjonų geometrija ir sumažėjusi ventilacija, didelis dirbtinių paviršių kiekis bei antropogeninės šilumos

emisijos, o jos intensyvumą papildomai veikia regioninis klimatas, sociodemografinės sąlygos, augalijos savybės ir vietiniai aplinkos veiksniai, tokie kaip oro tarša ar dirvožemio sandarumas (Oke, 1982; Ward et al., 2016). Šis reiškinys pasireiškia beveik visose urbanizuotose teritorijose, tačiau jo mastas ir poveikis priklauso nuo konkretaus miesto morfologijos ir vietos klimato sąlygų (Ward et al., 2016).

Miestus sudaro sudėtingi ir erdviškai nevienalyčiai plotai, kurie turi savitas paviršiaus savybes, lemiančias skirtingas temperatūros charakteristikas. Dėl to vienas geriausių būdų stebėti temperatūros pasiskirstymą yra šiluminiai palydoviniai vaizdai, kurie pateikia žemės paviršiaus temperatūros (angl. *Land Surface Temperature*, toliau – ŽPT) duomenis (Ward et al., 2016). Tyrimuose naudojami ŽPT žemėlapiai, kuriuose parodyti „karšti“ ir „šalti“ miestų taškai, priklausantys nuo toje miesto zonoje esančių pastatų morfologinės erdvinės struktūros ir dirbtinių dangų kiekio santykio su natūralia aplinka (Oke, 1982).

Taigi MKS priklauso ne tik nuo oro temperatūros, bet ir nuo paviršių temperatūros. Rezaie ir kt. (2025) tyrimas Sevilijos senamiestyje parodė, kad, esant maksimaliai oro temperatūrai 36° C, vidutinė spinduliuotės temperatūra (angl. trump. MRT), tenkanti žmogui, siekė virš 70 °C. Tai padeda suprasti, kad jutiminė temperatūra gali būti gero- kai didesnė aplinkoje, kur vyrauja dirbtiniai paviršiai.

Svarbiausios problemos, kylančios dėl MKS, yra ekstremalių oro reiškinų, tokių kaip KB, sustiprinimas ir neigiama įtaka gyventojams. MKS ypač stipriai veikia jautresnes socialines grupes: vaikus, senjorus, asmenis, turinčius lėtinių ligų, fizinių ar socialinių negalių, ir ekonomiškai silpnesnius gyventojus (Elmarakby & Elkadi, 2024). Apibendrinant tai galima vadinti žmogaus diskomforto padidėjimu ar karščio stresu (Ward et al., 2016), kurį galima išmatuoti naudojant universalų šiluminio klimato indeksą (angl. trump. UTCI), fiziologiškai ekvivalentią temperatūrą (angl. trump. PET) ir kitus rodiklius. Šilumos stresas neigiamai veikia žmonių sveikatą ir net gali baigtis mirtimi (ypač vyresnio amžiaus ar širdies ir kraujagyslių ligomis sergančių žmonių) (Mashhoodi & Unceta, 2024; Ward et al., 2016). „Eurostat“ duomenimis, vien 2022 m. liepą Europos Sąjungoje dėl pernelyg didelio karščio buvo užfiksuota daugiau kaip 53 000 priešlaikinių mirčių.

Be poveikio sveikatai, MKS nulemia nemažai kitų netiesioginių problemų. Mohajerani ir kt. (2017) išskyrė šias:

- padidėja energijos sunaudojimas patalpoms vėsinti ir su tuo susijusios išlaidos,
- žymiai išauga energijos poreikis piko metu,

- susidaro dideli kiekiai smogo ir oro teršalų, dėl kurių blogėja oro kokybė,
- stiprėja neigiamas poveikis miesto ekosistemoms,
- gyvenamoji aplinka tampa pažeidžiamesnė ir ne tokia komfortiška,
- sumažėja darbo našumas.

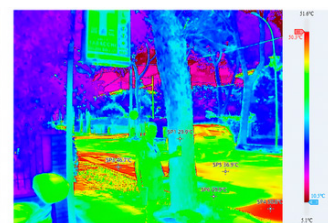
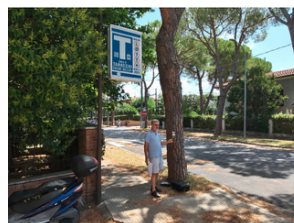
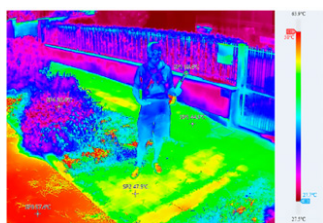
Miesto gatvės – karščio taškai. Šiaurės ir vidutinio klimato miestų atviresnėse erdvėse ir platesnėse gatvėse susidaro sąlygos intensyviau įkaisti paviršiui nei šiltesnių regionų miestuose, kuriuose tankesnė urbanistinė struktūra sukuria daugiau šešėliavimo ir riboja paviršių įšilimą (Mashhoodi & Unceta, 2024; Ward et al., 2016).

Pagal Mohajerani ir kt. (2017), šaligatviai ir kelio dangos sudaro apie 40 % miestų paviršių. Įvairūs tyrimai, atlikti naudojant vidutinio mastelio palydovinius infraraudonųjų ir terminių spindulių vaizdus (1 paveikslas), parodė, kad kelio dangos yra stiprūs šilumos spinduliuotės šaltiniai: nauja asfalto danga sugeria apie 95 % saulės spinduliuotės (Mohajerani et al., 2017). Apskritai tamsūs paviršiai, turintys žemą albedą (atspindžio koeficientą), sugeria daug daugiau šilumos ir ilgiau ją išlaiko nei šviesūs paviršiai. Didelė dalis antropogeninio šilumos srauto miestuose yra sutelkta gatvėse, kur prie šilumos, sklindančios iš abipus esančių pastatų, prisideda ir transporto priemonių emisijos (Stewart & Mills, 2021). Todėl miesto gatvėse, sankryžose, automobilių stovėjimo aikštelėse ir aplink jas tiek dienos, tiek nakties metu būna karščiau. Tai itin pavojinga sveikatai urbanistinė aplinka, kurioje nuolat juda pėstieji, dviratininkai ir kitų nemotorinių transporto priemonių naudotojai, veikiami tiesioginės saulės spinduliuotės bei nuo paviršių atspindėtos trumpabangės spinduliuotės. Be to, tai dažnai jautresnių socialinių grupių asmenys (Zhao et al., 2018).

MKS MP galima skirstyti į fizines ir strategines. Pagal Rezaie ir kt. (2025), gali būti išskiriamos šios fizinės priemonės, kurios, kaip įrodyta tyrimais, yra veiksmingos mažinant MKS ir gerinant gyventojų šiluminį komfortą:

- paviršiaus savybių modifikavimas, siekiant padidinti atspindį ir sumažinti šilumos kaupimą;
- šešėlio užtikrinimas, siekiant sumažinti saulės spinduliuotės absorbciją,
- žaliosios infrastruktūros naudojimas, padidinantis santykinę drėgmę ir mažinantis oro temperatūrą,
- miesto oro srautų gerinimas,
- aktyvaus vėsinimo technologijų, tokių kaip vandens ir grunto vėsinimas, taikymas (Rezaie et al., 2025).

Šiam tyrimui pasirinktos dvi fizinės, pasyvios priemonės, kurios dažniausiai taikomos MKS mažinti gatvėse ir yra



1 paveikslas. Augalų, jų metamų šešėlių, šviesių ir tamsių dangų temperatūrų skirtumai (šaltinis: Frosini et al., 2024)

viena kitai priešingos. Gatvės medžiai (toliau – GM) – žaliosios infrastruktūros (toliau – ŽI) grupės priemonė ir atspindinčiosios dangos (angl. *reflective pavements*, toliau – AD) – pilkosios infrastruktūros (toliau – PI) grupės priemonė.

Abiejų nauda, įskaitant MKS mažinimą įvairiuose scenarijuose, yra gana plačiai ištirta ir aprašyta mokslinėje literatūroje.

Gatvės medžiai vėsina paviršių dėl lapijos metamo šešėlio (1 paveikslas), kuris blokuoja saulės spinduliuotę ir apsaugo paviršių nuo įkaitimo, o aplinką medžiai vėsina sugerdami šilumą iš aplinkos ir atlikdami evapotranspiracijos funkciją (vandens garinimą per lapus). Azmeer ir kt. (2024) pabrėžia, kad augalų pasirinkimas yra svarbus ŽI vėsinimo potencialo veiksnys, nes biocheminiai ir fiziniai parametrai – tokie kaip lapijos tipas, rūšis, saulės spindulių pralaidumas, lapų sugertis, šviesos perdavimas ir spinduliuotės slopinimo koeficientas – lemia ŽI funkciją ir morfologiją. ŽI vėsinimo potencialas priklauso nuo klimato, augalų rūšių, drėkinimo, erdvinio pasiskirstymo ir kitų infrastruktūros tipų (vėsių medžiagų ir mėlynosios infrastruktūros) buvimo, o didžiausią naudą teikia mišrus augalijos tipas (Azmeer ir kt., 2024).

Atspindinčiųjų vėsių dangų veikimo funkcija apibūdinama albedu (1 paveikslas). Kai medžiaga miesto aplinkoje turi aukštą albedą, ji geriau paskleidžia anksčiau sugertą šilumą nei juodas kūnas, esantis toje pačioje temperatūroje, ir gali atspindėti didesnę saulės spinduliuotės dalį bei išsklaidyti šilumą, taip sumažindama dangos paviršiaus temperatūrą dienos metu.

AD galima sukurti pasitelkus du parametrus: spalvą arba paviršiaus šiurkštumą (Mohajerani et al., 2017). Literatūroje minimos įvairios AD, įskaitant modifikuotas bitumines dangas (pvz., skysta bituminė paviršiaus danga (angl. *slurry seal*)), skaldos ir bitumo dangą (angl. *chip seal*), šviesius betoninius mišinius su pigmentais bei natūralaus akmens ar mozaikines dangas.

Visgi šviesių dangų mokslinės poveikio analizės dažnai pateikia prieštaringas išvadas. Kai kuriuose straipsniuose pažymima, kad aukšto albedo dangos gali neigiamai paveikti žmonių šiluminį komfortą, vairuotojų saugumą dėl akinimo (AzariJafari et al., 2021) ir aplinkinius pastatus dėl nuo dangų atspindėtos spinduliuotės.

Priemonių sintezė. Elmagri ir kt. (2024) tyrime buvo analizuotas šešėlio poveikis ir sąveika tarp medžių dangos ir dangos paviršiaus albedo pokyčių. Rezultatai parodė, kad medžių apsaugos neturinčiose teritorijose, tiesiogiai veikiamose saulės spindulių, apie vidurdienį padidėjo tiek MRT, tiek UTCI. Vis dėlto vėsinamųjų dangų savybė dieną atspindėti trumpabangę spinduliuotę ir naktį išspinduliuoti mažiau ilgabangės spinduliuotės prisidėjo prie geresnio šiluminio komforto po saulėlydžio (Elmagri et al., 2024). Tai ne kartą pagrįstas faktas, kad ŽI ir PI sintezė MKS mažina geriausiai.

Nors abi priemonės plačiai nagrinėjamos mikroklimato požiūriu, jų aplinkosauginiai, socialiniai ir ekonominiai padariniai dažnai vertinami fragmentiškai, todėl sudėtinga tiesiogiai palyginti jų visapusišką tinkamumą ir tvarumą gatvių kontekste.

Plačiai pripažįstama, kad vienas sprendimas netinka visiems, o viena MKS MP negali išspręsti problemos. Požiūris, kad reikia taikyti priemonių rinkinį, dabar laikomas miesto vėsinimo pagrindu, bet tai reikalauja kruopščiai parinktų priemonių derinių, kurie mažintų šilumą miesto mastu ir kitus poreikius, atsirandančius kuriant sinergijas ir vengiant kompromisų (Zhao et al., 2023). Tiriant gatvės medžius ir atspindinčiąsias vėsiąsias dangas daugiausia buvo nagrinėjami skirtingi medžių ir atspindinčiųjų dangų tipai, jų taikymo galimybės, poveikis skirtingomis sąlygomis, veiksmingumas mažinant MKS ir oro taršą, skirtingi klimato ir vietinių klimato zonų scenarijai. Kai kurie tyrėjai nagrinėja ir lygina tik skirtingas ŽI arba tik PI priemones, kiti lygina tarpusavyje abiejų grupių priemones. Visgi trūksta kompleksinių pačių MKS MP tvarumo vertinimų – tokių, kokius atliko Zhao ir kt. (2023), ar panašių. Tyrimai, apimančys tris pagrindines tvarumo plotmes (aplinkosauginę, socialinę ir ekonominę) padėtų kompleksiskai suprasti atskirų priemonių teigiamus bei neigiamus aspektus ir kompromisus. Tai sudarytų sąlygas miestų savivaldai lengviau priimti sprendimus karščio mažinimo srityje, nes galėtų būti integruoti, suprasti ir įvertinti ne tik inžineriniai ir klimatiniai aspektai, bet ir socialinės bei ekonominės plotmės (Zhao et al., 2023). Trigubos atskaitomybės principu paremtas tyrimas suteikia galimybę įvertinti papildomą MKS MP naudą aplinkai, jos žiediškojo ir šėdės potencialą, naudą ir galimas grėsmes gyventojams bei įrengimo ir eksploatacijos kaštus. Toks tyrimas suteikia galimybę reitinguoti MKS MP pagal didžiausią teikiamą naudą ir mažiausią neigiamą poveikį aplinkai.

3. Tyrimo metodologija

MKS mažinimo priemonių vertinimas apima aplinkosauginę, socialinę ir ekonominę tvarumo plotmes. Norint atlikti dviejų labai skirtingų priemonių vertinimą, taikomas šio tyrimo pagrindą sudarantis daugiakriteris SMART (angl. *Simple Multi-Attribute Rating Technique*) metodas, leidžiantis struktūruotai palyginti abi priemones pagal skirtingo pobūdžio iš anksto apibrėžtus kriterijus. Jis pasirinktas dėl jo paprastumo, skaidrumo ir lankstumo (Taherdoost & Mohebi, 2024), tačiau dėl kokybinių kriterijų vertinimo kompleksiskumo naudojama kelių lygių daugiakriterė struktūra.

Vertinimo kriterijai atrinkti remiantis literatūroje analizuojamais MKS MP poveikiais, Europos tvarumo atskaitomybės standarto (angl. *ESRS*) potėmėmis (European Parliament and of the Council, 2024) ir STAPLEE metodika (*Prioritize and Plan | STAPLEE Descriptions and Guiding Questions*, n.d.). Kadangi bendras MP tvarumas vertinamas nepriklausomai nuo konkrečios įrengimo vietos mieste ar konkretaus projekto, dalis kriterijų buvo atmesti dėl to, kad nebuvo galimybės jų tiksliai įvertinti. Kita dalis kriterijų buvo konsoliduoti (sugrupuoti į teminius blokus ir vertinami kaip sudėtiniai rodikliai, sudaryti iš kelių vertinimo aspektų) norint išvengti stipriai priklausomų kriterijų atsiradimo bei dubliavimosi, o tyrimui nereikšmingi kriterijai atmesti.

1 lentelė. Kriterijų ir jų aspektų sąrašas (šaltinis: sudaryta autorės)

Kriterijus	Vertinimo aspektas
A – potencialus ŠESD mažinimo indėlis	A1 – anglies sekvestracijos potencialas
	A2 – netiesioginis poveikis aplinkinių pastatų vėsinimo energijos poreikiui
	A3 – gyvavimo ciklo ŠESD balansas
B – oro taršos mažinimas	B1 – gebėjimas mažinti teršalų koncentraciją (PM, NOx ir kt.)
	B2 – poveikis dulkių pakėlimui ir oro cirkuliacijai
C – vandens taršos mažinimas	C1 – lietaus vandens sulaikymo potencialas
	C2 – paviršinių nuotekų filtravimo potencialas
D – triukšmo taršos mažinimas	D1 – gebėjimas veikti kaip fizinis triukšmo barjeras
	D2 – garso sugerties potencialas
E – vietinės bioįvairovės palaikymas	E1 – buveinių kūrimo vietinėms rūšims potencialas
	E2 – indėlis ribojant invazinių rūšių plitimą
F – žiediško potencialas	F1 – medžiagų ilgaamžiškumas
	F2 – elementų atnaujinamumas ir pakeičiamumas
	F3 – atliekų mažinimo potencialas
G – prieinamumas pažeidžiamoms grupėms	G1 – tinkamumas skirtingo tipo VKZ
	G2 – poveikis pažeidžiamoms grupėms karščio piko metu
H – sveikatai ir mikroklimatui palanki socialinė nauda	H1 – šilumos streso mažinimo dienos metu potencialas
	H2 – šilumos streso mažinimo nakties metu potencialas
	H3 – kitų fizinių nepatogumų tikimybė
I – socialinio priimtumo potencialas	I1 – vizualinis priimtumas
	I2 – galimos žmonių saugumo rizikos
	I3 – aiškus naudos suvokimas
J – Δ UTCI	J1 – empiriškai nustatytas Δ UTCI poveikis žmonių šilumos stresui
K – santykiniai diegimo kaštai	K1 – naudojamų medžiagų kaštų lygis
	K2 – reikalingų darbų apimtis
L – eksploatacijos ir priežiūros kaštai	L1 – priežiūros intensyvumas
	L2 – vandens ir energijos poreikis eksploatacijos metu
	L3 – reikalingi žmogiškieji ištekliai

2 lentelė. Vertinimo įverčių reikšmės (šaltinis: sudaryta autorės)

Įvertis	Įverčio reikšmės
1	Nėra poveikio arba poveikis neigiamas; labai dideli diegimo ar eksploatacijos kaštai; neigiamas socialinis priimtumas.
2	Poveikis nedidelis arba empiriškai silpnai pagrįstas; didesni nei vidutiniai kaštai ar sudėtinga eksploatacija; labiau neigiamas nei teigiamas socialinis poveikis.
3	Vidutinio dydžio poveikis arba mišrus rezultatai literatūroje; vidutiniai kaštai ir priežiūros poreikis; tiek teigiami, tiek neigiami socialiniai aspektai.
4	Didelis teigiamas poveikis, nuosekliai parodytas tyrimuose; mažesni nei vidutiniai kaštai arba palyginti paprasta priežiūra; labiau teigiamas nei neigiamas socialinis poveikis.
5	Labai didelis poveikis (viršutinė literatūroje fiksuojama riba); ypač maži kaštai ir minimalus priežiūros poreikis; aiškiai teigiamas ir plačiai priimtinas sprendimas.

Vertinimo kriterijai yra kokybiniai, todėl, norint nustatyti kuo tikslesnį jų balą, kiekvienas tvarumo kriterijus papildomai suskaidomas į kelis vertinimo aspektus (1 lentelė), apibūdinančius skirtingus to kriterijaus komponentus. Aspektams vertinti pasitelkiamas Likert skalės principas (Koo & Yang, 2025), kuriuo remiantis įverčiams pritaikomi atitinkami aprašymai, pateikiami (2 lentelė).

Bendras kriterijaus įvertis apskaičiuojamas išvedant aritmetinį vidurkį iš visų jam priskirtų aspektų balų pagal formulę (1):

$$s_{pj} = \frac{\sum_{a=1}^{m_j} s_{pja}}{m_j}, \quad (1)$$

čia s_{pj} – p-tosios priemonės j-ojo kriterijaus ekspertinis balas, a – kriterijaus aspektas, s_{pja} – p-tosios priemonės

j-ojo kriterijaus a-tojo aspekto balas, m_j – j-ojo kriterijaus aspektų skaičius. Gavus kiekvieno kriterijaus rezultatus priemonės bendras tvarumo balas apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$U_p = \sum_{j=1}^n w_j \cdot s_{pj}, \quad (2)$$

čia U_p – p-tosios priemonės bendras tvarumo balas, w_j – j-ojo kriterijaus svoris, s_{pj} – ekspertinis balas (1–5), n – bendras kriterijų skaičius.

Tyrimo visos trys tvarumo plotmės laikomos vienodai reikšmingomis, todėl kiekvienai jų suteikiamas 0,3333 svoris. Atskirų kriterijų svoriai kiekvienos plotmės grupėje nustatomi proporcingai kriterijų skaičiui, užtikrinant, kad kriterijų svorių suma kiekvienoje grupėje atitiktų jos bendrą svorį naudojant formulę:

$$w_{d,i} = \frac{W_d}{m_d} = \frac{\frac{1}{3}}{m_d} = \frac{1}{3m_d}, \quad (3)$$

čia $i = 1, \dots, m_d$, w – kriterijaus svoris, W – visų grupių bendras svoris, m – kriterijų skaičius tvarumo plotmių kriterijų grupėje, d – plotmė (kriterijų grupė).

Kadangi dauguma kriterijų šiame tyrime negali būti tiesiogiai išmatuojami, taikomas ekspertinis vertinimas, paremtas mokslinės literatūros duomenimis. Nors balų priskyrimas yra ekspertinis, jis grindžiamas kiekybiniais ir kokybiniais rodikliais, pateiktais cituotuose šaltiniuose.

Vertinant MKS MP daroma prielaida, kad priemonės veiksmingumas vertinamas jos subrendimo stadijoje. Subrendimo stadija aktuali GM, kadangi jauna augalija turi daug silpną MKS efekto mažinimo poveikį nei įsitvirtinusi ir subrendusi augalija. Tačiau kai kuriuose kriterijuose (pvz., įrengimo, priežiūros ar išteklių poreikio) taip pat atsižvelgiama į eksploatacijos ir įsitvirtinimo laikotarpio reikalingas sąnaudas. Be to, apibrėžiamos ribos, kad GM vertinami neatsižvelgiant į medžių rūšį ir nenustatant konkretaus užsodinimo tankio, o AD vertinamos bendrai, neišskiriant konkrečios medžiagų rūšies.

4. Rezultatai

Atliekant vertinimą kiekvieno kriterijaus aspektui pagrindimas aprašomas remiantis literatūros šaltiniuose patei-

kiama informacija ir pagal jį priskirtas įvertis. Pagrindiniai šaltiniai – ne senesni nei penkerių metų mokslo straipsniai su tam tikromis išimtimis. Taip pat, nesant pakankamai informacijos mokslinėje literatūroje, buvo remiamasi konkrečių miestų parengtais MKS kontrolės ir kitais strateginiais planais ar rekomendacijomis bei autorės ekspertinėmis išvadomis. Jei aspektas netirtas dėl akivaizdaus poveikio nebuvimo, nurodoma, kad poveikio nėra, ir priskiriamas mažiausias įvertis. Visi kiti įverčiai suteikiami remiantis autorės interpretacija pagal literatūros šaltinių teiginius (3 lentelė).

4.1. Atspindinčiųjų dangų rezultatai

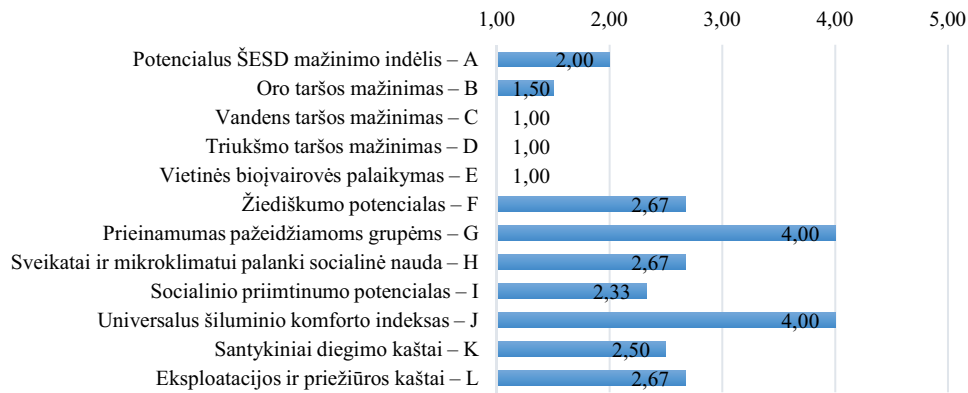
Atliekant šį vertinimą AD pasižymėjo gana siauru, bet aiškiai išreikštu funkciniu profiliu (2 paveikslas). Aukštus balus (4,0 balai) gavo J ir G kriterijai, kurie rodo stiprų potencialą mažinti šilumos stresą ir platų pritaikomumą. Tačiau kiti socialinių kriterijų rezultatai rodo gana nevienareikšmį AD poveikį. Literatūroje pabrėžiama, kad didesnis albedas gali prisidėti prie spartesnio paviršių atvėsimo nakties metu. Vis dėlto H kriterijus buvo įvertintas žemiau nei vidutiniškai, nes AD poveikis šiluminiam komfortui yra prieštaringas. Nors paviršiaus temperatūra mažėja, intensyvus trumpabangės spinduliuotės atspindėjimas gali padidinti žmogaus patiriamą spinduliuotės apkrovą atvirose erdvėse. I kriterijus taip pat buvo įvertintas žemesniu balu nei vidutinis (2,33 balo). Tai gali būti siejama su akinimo efektu ir ribotai suvokiama priemonės nauda gyventojams. Rezultatai rodo pagrindinį socialinį atspindinčiųjų dangų kompromisą – techniškai išmatuojamas vėsinimo efektas ne visada sutampa su subjektyvia žmogaus komforto patirtimi.

Iš 2 paveikslas taip pat matyti, kad priemonė nesuteikia papildomos aplinkosauginės naudos ir turi žemesnį nei vidutinį žiediško potencialą. Tai paaiškinama tuo, kad priemonė visų pirma priklauso PI – yra sukurta iš nelaidžių, gana greitai nusidėvinčių dirbtinių medžiagų. Galimybės jos gamyboje panaudoti perdirbtas medžiagas ar perdirbti ją pačią gyvavimo ciklo pabaigoje yra ribotos. Dėl jos gamybai naudojamų specifinių medžiagų priemonės ŠESD emisijos yra didesnės, o poveikis pastatų energijos poreikiui nėra reikšmingas ir labai priklauso nuo gatvės kanjono aukščio ir pločio santykio.

Ekonominėje plotmėje rezultatai buvo žemesni už vidutinius. Priemonė nereikalauja itin sudėtingų infrastrukt-

3 lentelė. MKS MP kriterijų aspektų įvertinimas balais pagal aprašytą pagrindimą (šaltinis: sudaryta autorės)

Aspekto kodas	A1	A2	A3	B1	B2	C1	C2	D1	D2	E1	E2	F1	F2	F3	G1	G2	H1	H2	H3	I1	I2	I3	J1	K1	K2	L1	L2	L3
Atspindinčiųjų dangų Balas (1–5)	1	2	3	2	1	1	1	1	1	1	1	2	4	2	4	4	2	4	2	3	2	2	4	2	3	3	3	2
Gatvės medžiai Balas (1–5)	5	3	4	3	2	2	2	2	3	5	4	3	4	5	4	5	5	3	3	5	5	5	5	3	3	3	2	2



2 paveikslas. Atspindinčiųjų dangų tvarumo rodiklių vertinimo rezultatai (šaltinis: sudaryta autorės)

tūrinių pertvarkymų, bet jai įrengti gali būti reikalingos brangesnės už tradicines medžiagos. Be to, dėl greito nusidėvėjimo būtinas dažnas atnaujinimas pakartotinai padengiant paviršių nauju sluoksniu (tai lemia ir žemą žiediško balą).

Rezultatai rodo pagrindinį atspindinčiųjų dangų kompromisą: priemonė efektyviai mažina paviršių įkaitimą ir gali gerinti tiesioginį šiluminį komfortą, tačiau suteikia mažai papildomos aplinkosauginės naudos. Tai leidžia jas vertinti kaip technologijomis grįstą MKS mažinimo priemonę, labiau skirtą vienai konkrečiai problemai spręsti – kontroliuoti paviršiaus bei oro temperatūrą, o ne siekti kitokio pobūdžio naudos ekosistemai.

4.2. Gatvės medžių rezultatai

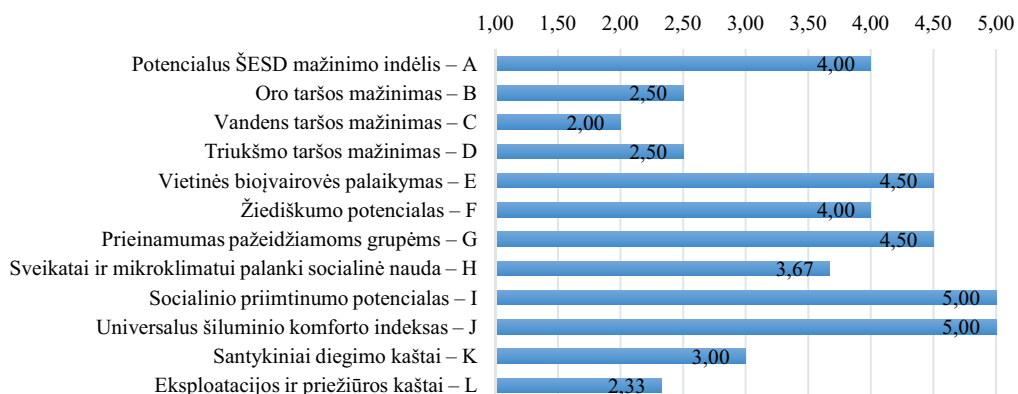
GM pasižymėjo plačiausiu ir geriausiai subalansuotu tvarumo profiliu iš visų vertintų priemonių (3 paveikslas). Aukščiausi įverčiai nustatyti A (4,0 balai), E (4,5 balo), F (4,00 balai), G (4,50 balo), I (5,0 balai) ir J (5,0 balai). Tai daugiausia aukštų balų surinkusi vertinta priemonė. Tokie rezultatai siejami su tuo, kad GM vienu metu teikia kelias ekosistemines paslaugas – mažina šilumos stresą dėl šešėliavimo ir evapotranspiracijos, kuria buveines miesto biologinei įvairovei, be to, yra ilgaamžiai – per savo gyvavimo

ciklą sugeria daugiau CO₂, nei sukelia jų sodinimo ir priežiūros emisijos, o gyvavimo ciklo pabaigoje visas medžių dalis galima panaudoti kitoms reikmėms.

Socialinių kriterijų grupėje didelis J kriterijaus įvertis rodo stiprų potencialą mažinti žmogaus patiriamą šilumos stresą gatvėje. I kriterijaus įvertinimas reiškia, kad gyventojai aiškiai suvokia medžių teikiamą pavėsio, estetinę ir mikroklimato gerinimo naudą. H kriterijaus balas tik truputį aukštesnis už vidutinį, nes šaltiniuose įvardintos kelios galimos rizikos, susijusios su saugumu ir sveikata, tokios kaip šaknų pažeistos dangos, galimas matomumo sumažėjimas.

Nors pusės aplinkosauginių kriterijų balai aukšti, kiti rezultatai rodo, kad kai kurie poveikiai išlieka priklausomi nuo urbanistinio konteksto ir projektavimo sprendimų. Nors GM dažniausiai gerina oro kokybę, tankios ir plačios lajos siauruose gatvių kanjonuose gali riboti ventiliaciją nakties metu ir tam tikrais atvejais prisidėti prie teršalų koncentracijos kaupimosi, o D poveikis ribotas dėl retesnių galimybių sodinti medžius keliomis eilėmis. C kriterijus buvo įvertintas menkai (2,0 balai), nes hidrologinė nauda labai priklauso nuo pralaidžių aplinkinių paviršių kiekio ir konkrečių inžinerinių sprendimų.

Ekonominėje plotmėje rezultatai buvo vidutiniai arba žemesni už vidutinius, kaip ir AD. Nors GM yra plačiai



3 paveikslas. Gatvės medžių tvarumo rodiklių vertinimo rezultatai (šaltinis: sudaryta autorės)

4 lentelė. MKS MP daugiakriterio tvarumo vertinimo rezultatų suvestinė (šaltinis: sudaryta autorės)

Grupės svoris	Kriterijus	Kriterijaus svoris	Priemonė AD	Priemonė GM
0.333	A – potencialus ŠESD mažinimo indėlis	0.056	2,00	4,00
	B – oro taršos mažinimas	0.056	1,50	2,50
	C – vandens taršos mažinimas	0.056	1,00	2,00
	D – triukšmo taršos mažinimas	0.056	1,00	2,50
	E – vietinės biojvairovės palaikymas	0.056	1,00	4,50
	F – žiediško potencialas	0.056	2,67	4,00
0.333	G – prieinamumas pažeidžiamoms grupėms	0.083	4,00	4,50
	H – sveikatai ir mikroklimatui palanki socialinė nauda	0.083	2,67	3,67
	I – socialinio priimtumo potencialas	0.083	2,33	5,00
	J – ΔU_{TCI}	0.083	4,00	5,00
0.333	K – santykiniai diegimo kaštai	0.167	2,50	3,00
	L – eksploatacijos ir priežiūros kaštai	0.167	2,67	2,33
		Bendras balas	2,45	3,50

taikoma priemonė ir nereikalauja išskirtinių medžiagų, ilgalaikė priežiūra išlieka intensyvi. GM reikalingas reguliarus genėjimas, stebėsena, atsodinimas, o jaunų ar karščio stresą patiriančių medžių atveju – papildomas laistymas miesto mastu, reikalaujantis didelių vandens sąnaudų.

Bendri GM vertinimo rezultatai rodo pagrindinį GM pranašumą – tai daugiakriterio MKS MP, vienu metu kuriant tiek mikroklimatinę, tiek ekologinę ir socialinę naudą. Vis dėlto jų efektyvumas ir tvarumas stipriai priklauso nuo tinkamo rūšių parinkimo, urbanistinio konteksto bei ilgalaikės priežiūros kokybės.

Bendrų tvarumo rezultatų 4 lentelėje iš atskirų aspektų balų buvo išvesti bendri kriterijų balai pagal formulę (1), iš jų pagal (2) formulę apskaičiuotas galutinis MKS MP tvarumo balas. Galutinis GM balas – 3,50, o AD – 2,45. Tai +1,05 balo skirtumas GM naudai. Vertinimo skalės vidurkis šiame tyrime yra 3, todėl ŽI priemonė viršija vidutinę reikšmę 0,5 balo, o PI priemonei tenka 0,55 mažesnis balas.

5. Diskusija

Tyrimo rezultatai rodo, kad apskritai GM buvo įvertinti kaip tvaresnė MKS MP nei AD. Galima daryti išvadą, kad tai nulėmė priemonės priklausymas ŽI – gamtinių priemonių grupei. Gamtinių priemonių papildomų naudų spektras yra didesnis, be to, jos yra įprastos ir visuotinai priimtinos. Nepaisant aiškių GM privalumų, abi priemonės turi akivaizdžių kompromisų tarp teigiamo poveikio mikroklimatui, papildomos aplinkosauginės naudos, socialinio priimtumo ir eksploatacinių poreikių. Tai patvirtina ankstesnius tyrimus, kuriuose pabrėžiama, kad sprendimų vertinimas vien pagal oro ar paviršiaus temperatūros sumažėjimą neatskleidžia viso poveikių spektro miestų urbanistinei aplinkai. Tai taip pat pabrėžia galimus neigiamus poveikius, susijusius su gyventojų sveikata (B), šiluminiu komfortu (H) ir fiziniiais nepatogumais (I).

Vertinimo metu paaiškėjo, kad GM naudų mastas stipriai priklauso nuo vietinių sąlygų ir projektavimo sprendimų. Nors AD išsiskyrė vertinant pagal socialinius kriterijus,

jų bendrą tvarumo vertinimą gerokai sumažino papildomos aplinkosauginės naudos trūkumas.

Rezultatai parodo skirtumą tarp tik mikroklimatinių rodiklių ar atskiros plotmės ir išsamaus kompleksinio tvarumo vertinimo, pagrįsdami daugiakriterio metodų taikymo būtinybę lyginant MKS MP. Be to, jie atskleidžia, kad ŽI ir PI sprendimų priešprieša yra pernelyg supaprastinta, nes tam tikrais urbanistiniais atvejais AD gali būti tinkamesnė nei GM, o didžiausias potencialas dažnai pasiekiamas integruojant kelias viena kitą papildančias priemones. Praktiniu požiūriu tai reiškia, kad atliekant miesto planavimą būtina vertinti ne tik numatomą terminį efektą, bet ir ilgalaikės eksploatacijos poreikį, socialinius aspektus bei vietos erdvinį kontekstą.

Tai, kad tyrimas rėmėsi iš dalies ekspertiniu vertinimu ir apėmė tik dvi MKS MP siaurame (gatvių) kontekste, rezultatų analizės metu parodė taikytos metodologijos privalumus ir trūkumus. Atliekant daugiau nei dviejų priemonių vertinimą, GM ir AD galutiniai balai gali skirtis, nes ekspertinis įverčių priskyrimas iš dalies priklausytų nuo visų priemonių konkretaus aspekto pagrindimų spektro. Taip pat matomas poreikis atlikti tvarumo plotmių svorių nustatymą ekspertiniu būdu siekiant įvertinti priemonių reikšmingumą MKS valdymo ir tvarių miestų plėtros kontekste.

6. Išvados

1. ŽI priemonės galutinis vertinimo balas (3,50) yra reikšmingai didesnis nei PI priemonės (2,45). Tai rodo, kad gatvės medžiai bendruoju požiūriu yra tvaresnė priemonė nei atspindinčiosios vėsios dangos. Vis dėlto abi miesto karščio salų mažinimo priemonės, GM ir AD, atskleidė reikšmingus kompromisus tarp skirtingų tvarumo kriterijų. Todėl jų bendrieji rezultatai išlieka santykinai artimi vertinimo skalės vidurkiui.
2. Daugiakriterinė metodologija atskleidė galimybes vertinti platų poveikių spektrą, todėl yra tinkama MKS MP tvarumo palyginimui.

3. Šios metodologijos taikymas platesnio masto analizėms reikalautų išplėsti vertinamų priemonių spektrą, patikslinti kriterijų rinkinį, atlikti ekspertinį svorių nustatymą ir sumažinti besidubliuojančių kriterijų įtaką galutiniams rezultatams.

Literatūra

- AzariJafari, H., Xu, X., Gregory, J., & Kirchain, R. (2021). Urban-scale evaluation of cool pavement impacts on the urban heat island effect and climate change. *Environmental Science & Technology*, 55(17), 11501–11510. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00664>
- Azmeer, A., Tahir, F., & Al-Ghamdi, S. G. (2024). Progress on green infrastructure for urban cooling: Evaluating techniques, design strategies, and benefits. *Urban Climate*, 56, Article 102077. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102077>
- Ciacchi, C., Banti, N., Di Naso, V., & Bazzocchi, F. (2023). Green strategies for improving urban microclimate and air quality: A case study of an Italian industrial district and facility. *Building and Environment*, 244, Article 110762. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110762>
- Costadone, L., & Vierikko, K. (2023). Are traditional urban greening actions compliant with the European Greening Plans guidance? *Urban Forestry & Urban Greening*, 90, Article 128131. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128131>
- European Parliament and of the Council. (2024). *ANNEX I to Commission Delegated Regulation (EU) 2023/2772* (2024). <https://xbrl.efrag.org/e-esrs/esrs-set1-2023.html>
- Elmagri, H., Kamel, T. M., & Ozer, H. (2024). Assessment of the effectiveness of cool pavements on outdoor thermal environment in urban areas. *Building and Environment*, 266, Article 112095. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112095>
- Elmarakby, E., & Elkadi, H. (2024). Prioritising urban heat island mitigation interventions: Mapping a heat risk index. *Science of The Total Environment*, 948, Article 174927. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174927>
- Frosini, G., Amato, A., Mugnai, F., & Cinelli, F. (2024). The impact of trees on the UHI effect and urban environment quality: A case study of a district in Pisa, Italy. *Atmosphere*, 15(1), Article 123. <https://doi.org/10.3390/atmos15010123>
- Irfeey, A. M. M., Chau, H. W., Sumaiya, M. M. F., Wai, C. Y., Muttill, N., & Jamei, E. (2023). Sustainable mitigation strategies for urban heat island effects in urban areas. *Sustainability*, 15(14), Article 10767. <https://doi.org/10.3390/su151410767>
- Koo, M., & Yang, S. W. (2025). Likert-type scale. *Encyclopedia*, 5(1), Article 18. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia5010018>
- Mashhoodi, B., & Unceta, P. M. (2024). Urban form and surface temperature inequality in 683 European cities. *Sustainable Cities and Society*, 113, Article 105690. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105690>
- Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management*, 197, 522–538. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.095>
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal Royal of the Meteorological Society*, 108(445), 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Prioritize and Plan | STAPLEE Descriptions and Guiding Questions. (n.d.). https://toolkit.climate.gov/sites/default/files/PG_Resource_5.3_V2.pdf
- Rezaie, P., Lopez-Cabeza, V. P., Sola-Caraballo, J., & Galan-Marin, C. (2025). Cooling heritage scenarios: Transforming historic squares for thermal comfort. *Buildings*, 15(4), Article 564. <https://doi.org/10.3390/buildings15040564>
- Stewart, I. D., & Mills, G. (2021). UHI management. In *The urban heat island* (pp. 49–74). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815017-7.00003-5>
- Taherdoost, H., & Mohebi, A. (2024). Using SMART method for multi-criteria decision making: Applications, Advantages, and Limitations. *Archives of Advanced Engineering Science*, 2(4), 190–197. <https://doi.org/10.47852/bonviewAAES42022765>
- Ward, K., Lauf, S., Kleinschmit, B., & Endlicher, W. (2016). Heat waves and urban heat islands in Europe: A review of relevant drivers. *Science of the Total Environment*, 569–570, 527–539. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.119>
- Zhao, Y., Sen, S., Susca, T., Iaria, J., Kubilay, A., Gunawardena, K., Zhou, X., Takane, Y., Park, Y., Wang, X., Rubin, A., Fan, Y., Yuan, C., Bardhan, R., Derome, D., Ürge-Vorsatz, D., & Carmeliet, J. (2023). Beating urban heat: Multimeasure-centric solution sets and a complementary framework for decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 186, Article 113668. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113668>

SUSTAINABILITY ASSESSMENT OF URBAN HEAT ISLAND MITIGATION MEASURES IN STREET ENVIRONMENTS: AN ANALYSIS OF STREET TREES AND COOL PAVEMENTS

Abstract. This study evaluates the sustainability of two passive UHI measures – street trees (ST) and reflective pavements (RP) – in a street context using a multi-criteria SMART approach. Criteria covered environmental, social, and economic dimensions, with scores based on literature and expert judgment. Results show that street trees outperformed reflective pavements (3.50 vs. 2.45), mainly due to stronger environmental and social benefits, while reflective pavements performed better in thermal comfort and broader applicability. Both measures showed moderate economic performance, indicating trade-offs. The study confirms the value of multi-criteria assessment but highlights the need for refined criteria, broader measure selection, and expert-defined weighting for wider application.

Keywords: urban heat island, heatwaves, street microclimate, street trees, cool pavements, multi-criteria assessment, sustainability assessment.