

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Simona ZAPOLSKYTĖ

**IŠMANIOJO MIESTO SUSISIEKIMO
SISTEMOS INFRASTRUKTŪROS
KOMPLEKSINIS VERTINIMO MODELIS**

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (T 002)

Vilnius, 2021

Disertacija rengta 2017–2021 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

doc. dr. Vytautas PALEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002) (2017–2020),

prof. dr. Marija BURINSKIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002) (2020–2021).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. dr. Donatas ČYGAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002).

Nariai:

doc. dr. Rasa APANAVIČIENĖ (Kauno technologijos universitetas, statybos inžinerija – T 002),

doc. dr. Raimundas JUNEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – T 003),

doc. dr. Marjan LEP (Mariboro universitetas, Slovėnija, transporto inžinerija – T 003),

doc. dr. Tatjana VILUTIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2022 m. sausio 17 d. 10 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto Senato posėdžių salėje.

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

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vilniustech.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2021 m. gruodžio 16 d.

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

Vilniaus Gedimino technikos universiteto 2021-055-M mokslo literatūros knyga
doi:10.20334/2021-055-M

© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2021

© Simona Zapolskytė, 2021

simona.zapolskyte@vilniustech.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Simona ZAPOLSKYTĖ

COMPLEX EVALUATION MODEL OF SMART CITY MOBILITY SYSTEM INFRASTRUCTURE

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (T 002)

Vilnius, 2021

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2017–2021.

Supervisor

Assoc. Prof. Dr Vytautas PALEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002) (2017–2020),

Prof. Dr Marija BURINSKIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002) (2020–2021).

The Dissertation Defense Council of Scientific Field of Civil Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

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

Members:

Assoc. Prof. Dr Rasa APANAVIČIENĖ (Kaunas University of Technology, Civil Engineering – T 002),

Assoc. Prof. Dr Raimundas JUNEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – T 003),

Assoc. Prof. Dr Marjan LEP (University of Maribor, Slovenia, Transport Engineering – T 003),

Assoc. Prof. Dr Tatjana VILUTIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defense Council of Civil Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **10 a. m. on 17 January 2022.**

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vilniustech.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 16 December 2021.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at Vilnius Gediminas Technical University repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjama išmaniojo miesto susisiekimo sistemos infrastruktūra. Disertacijos tikslas – nustatius išmaniosios miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros kompleksinius vertinimo kriterijus, sudaryti hierarchinį vertinimo modelį, daugiakriteriais metodais palyginti miestų išmaniąsias susisiekimo sistemas. Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autorės publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriamа problema, darbo aktualumas, formuluojamas darbo tikslas ir uždaviniai, aprašomi tyrimų objektas ir metodika, mokslinis darbo naujumas, praktinė darbo rezultatų reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pateikiamas autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas.

Pirmajame skyriuje pateikiama išmaniojo miesto analizė, komponentai ir charakteristikos, užsienio ir Lietuvos miestų raida bei išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros svarba išmaniajam miestui. Pateikiama išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros 2006–2021 metų literatūros apžvalga, rodiklių ir veiksmų analizė bei kooperacinės intelektinės transporto sistemos, suskirstytos pagal veiklas, skirtingų šalių apžvalga. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje parinkti išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros vertinimo veiksniai ir rodikliai, sudarytas hierarchinis išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros vertinimo modelis, parinkta tyrimų metodologija, pagal ekspertų apklausos rezultatus nustatytas veiksmų ir rodiklių bei integruotų rodiklių reikšmingumas. Pasirinkti daugiakriteriai metodai.

Trečiajame skyriuje atliktas Lietuvos Vilniaus, Kauno, Klaipėdos ir Monrealio miestų daugiakriteris vertinimas SAW, COPRAS ir TOPSIS metodais bei gautų rezultatų jautrumo analizė pagal rodiklių reikšmingumą.

Disertacijos tema paskelbti šeši moksliniai straipsniai: du – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į duomenų bazę „Clarivate Analytics Web of Science“, vienas – recenzuojamame mokslo žurnale, vienas – kitų tarptautinių duomenų bazių leidinyje, du – recenzuojamuose tarptautinių konferencijų straipsnių rinkiniuose. Disertacijos tema perskaityti du pranešimai tarptautinėse mokslinėse konferencijose.

Abstract

The dissertation examined the smart city transport system infrastructure.

The aim of the dissertation is to determine the complex evaluation criteria of the smart urban mobility system infrastructure for the hierarchical evaluation model creation and to compare the urban smart mobility systems with MCDM methods. The dissertation consists of an introduction, three chapters, general conclusions, references and lists of the author's publications on the topic of the dissertation.

The introductory chapter discusses the research problem, the relevance of the thesis, describes the object of the thesis, formulates the aim and objectives of the thesis, describes the research methodology, the scientific novelty of the thesis, practical value of the research findings, defended statements. At the end of the introduction, there is a list of the author's scientific publications on the topic of the dissertation.

The first chapter presents the analysis of a smart city, its components and characteristics, development in foreign and Lithuanian cities and the importance of a smart mobility system to a smart city. It provides an overview of the smart mobility system literature for 2006–2021, an analysis of indicators and factors, an overview of ITS in different countries. Conclusions are formulated and the tasks of the dissertation are specified at the end of the chapter.

In the second chapter, the selection of factors and indicators for the evaluation of the smart mobility system infrastructure is performed, a hierarchical model for the evaluation of the smart mobility system infrastructure is developed, the research methodology is selected, the significance of factors and indicators also integrated indicators based on the results of the expert survey is determined. A selection of multi-criteria methods was made.

In the third chapter, the multi-criteria evaluation of Vilnius, Kaunas, Klaipėda and Montreal cities using SAW, COPRAS and TOPSIS methods was performed. The sensitivity analysis of the obtained results, depending on the significance of the indicators, was performed.

Six scientific articles were published on the topic of the dissertation: two in scientific journals referenced in Clarivate Analytics Web of Science database, one in a periodical peer-reviewed scientific journal, one in a journal of other international databases, two in peer-reviewed international conferences proceedings. Research results were presented at two foreign international scientific conferences.

Žymėjimai

Simboliai

A – varianto racionalumas;

a^+ – idealiai geriausia alternatyva;

a^- – idealiai blogiausia alternatyva;

$\bar{a}_i$ – alternatyvos racionalumo vidurkis;

$C.I.$ – suderinamumo indeksas (angl. *consistency index*);

$C.R.$ – suderinamumo santykis (angl. *consistency ratio*);

cvp_i – procentinis alternatyvos variacijos koeficientas;

d_{ij} – COPRAS metodo normalizuotos matricos nariai;

K_i – alternatyvos santykinis atstumas iki idealaus;

L_i^+ – atstumas tarp lyginamosios ir idealiai geriausios alternatyvos;

L_i^- – atstumas tarp lyginamosios ir idealiai blogiausios alternatyvos;

m – kriterijų skaičius;

N_i – alternatyvų naudingumo laipsnis;

P – porinio lyginimo matrica;

p – ekspertų skaičius;
 $\bar{P}^*$ – vertinė normalizuota matrica;
 p_{ij} – kriterijų nežinomųjų svorių santykiai;
 R_j – kriterijaus rangų suma;
 $\bar{R}$ – bendras vidurkis;
 $\bar{R}_j$ – kriterijaus rangų vidurkis (norminis);
 S_i – standartinis nuokrypis;
 S_{+j} – maksimizuojančių įvertintų normalizuotų kriterijų suma;
 S_{-j} – minimizuojančių įvertintų normalizuotų kriterijų suma;
 α – reikšmingumo lygmuo;
 Q_i – alternatyvų santykinis reikšmingumas;
 q_j – integruotas reikšmingumas;
 $\lambda_{\max}$ – matricos tikrinė reikšmė;
 ω_i – kriterijų svoriai;
 W – konkordancijos koeficientas;
 v – laisvės laipsnis;
 χ^2 – konkordancijos koeficiento reikšmingumas;
 χ_{kr}^2 – konkordancijos koeficiento kritinė reikšmė;
 x_{ij} – sprendimų priėmimo matricos nariai;
 $\bar{x}_{ij}$ – TOPSIS metodo normalizuotos matricos nariai.

Santrumpos

AHP – analitinio hierarchinio proceso metodas (angl. *Analytic Hierarchy Process*);
 ANPR – automobilių numerių nuskaitymo technologija (angl. *Automatic number plate recognition*);
 BVP – bendrasis vidaus produktas;
 C-ITS – kooperacinės intelektinės transporto sistemos (angl. *Cooperative Intelligent Transport Systems*);
 CEN – Europos standartizacijos komitetas (angl. *The European Committee for Standardization*);
 CENELEC – Europos elektrotechnikos standartizacijos komitetas (angl. *European Committee for Electrotechnical Standardization*);
 COPRAS – kompleksinio santykinio įvertinimo metodas (angl. *COmplex PROportional ASsessment*);
 viii

DIN – Vokietijos standartizacijos institutas (angl. *German Institute for Standardization*);
EK – Europos Komisija;
ES – Europos Sąjunga;
ETSI – Europos telekomunikacijų standartų institutas (angl. *European Telecommunications Standards Institute*);
EV – elektromobilis;
FAHP – neraiškiojo analitinio hierarchinio proceso metodas (angl. *Fuzzy Analytic Hierarchy Process*);
GPS – globalinė vietos nustatymo sistema (angl. *Global Positioning System*);
HTML – hiperteksto žymėjimo kalba (angl. *Hypertext Markup Language*);
IEEE – Elektros ir elektronikos inžinierių institutas (angl. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*);
IRT – informacinės ryšių technologijos;
ISO – Tarptautinė standartizacijos organizacija (angl. *International Organization for Standardization*);
IT – informacinės technologijos;
ITU – Tarptautinė telekomunikacijų sąjunga (angl. *International Telecommunication Union*);
ITU-T – ITU telekomunikacijų standartizacijos sektorius (angl. *ITU Telecommunication Standardization Sector*);
LR – Lietuvos Respublika;
MCDM – daugiakriteris sprendinių priėmimas (angl. *Multi-Criteria Decision-Making*);
SAW – paprastojo svorių sudėjimo metodas (angl. *Simple Additive Weighting*);
SEAKI – saugaus eismo automobilių keliais įstatymas;
SĮ – savivaldybės įmonė;
TC – Techninis komitetas (angl. *Technical Committee*);
TOPSIS – artumo idealiajam taškui metodas (angl. *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*);
TP – transporto priemonė;
UAB – uždaroji akcinė bendrovė;
VILNIUS TECH – Vilniaus Gedimino technikos universitetas;
VŠĮ – viešoji įstaiga;
VT – viešasis transportas.

Sąvokos

Ekspertas [lot. *expertus* – įgudęs, prityręs] – mokslo, meno ar kitų sričių žinovas, kviečiamas atsakyti į klausimus, reikalaujančius specialiųjų žinių.

Elektromobilis – automobilis, varomas vienu ar daugiau elektrinių variklių. Elektra saugoma baterijose arba kituose įrenginiuose. Automobiliai, kurie kartu su elektriniais naudoja ir vidaus degimo variklius, vadinami hibridiniais.

Informacinės ryšių technologijos – technologijos, kurias pasitelkus kuriama, renkama, saugoma, transformuojama ir perduodama informacija.

Infrastruktūra – įvairių veiklos sričių objektų, aptarnaujančių ūkį ir gyventojus, kompleksas (inžineriniai tinklai, susisiekimo komunikacijos, komunaliniai, visuomeniniai, prekybos ir kiti gyventojų paslaugoms teikti ar aplinkos kokybei gerinti reikalingi objektai).

Intelektinės transporto sistemos – informacinėmis ir elektroninių ryšių technologijomis grindžiamos sistemos, skirtos geležinkelių, kelių, jūrų, oro ir vidaus vandenų transporto eismui, įskaitant infrastruktūrą, transporto priemones ir naudotojus, valdyti, taip pat sąsajoms tarp šių transporto rūšių užtikrinti.

Kooperacinės intelektinės transporto sistemos (C – ITS) – transporto sistemos, kuriose, bendradarbiaujant tarp dviejų ar daugiau ITS posistemų, teikiama geresnės kokybės ir patobulinta ITS paslauga.

Prioritetas [vok. *prioritet* < lot. *prior* – pirmas] – pirmenybė to, kas laikomas svarbiausiu dalyku.

Rangas – hierarchijos lygmuo hierarchinėje sistemoje.

Reitingas – asmens, institucijos, reiškinio kiekybinis įvertinimas, padedantis palyginti vienos rūšies objektus, nustatyti jų vietą vertinimo skalėje.

Savivaldis (autonominis) automobilis – save valdantis robotizuotas automobilis, kuris savarankiškai dalyvauja viešajame eisme.

Sistema – tam tikra tvarka sujungtų komponentų visuma.

Sistema „Park and Ride“ – susisiekimo sistema, kai asmeninė TP yra paliekama specialioje automobilių stovėjimo aikštelėje miesto prieigose ir toliau kelionė tęsiama viešuoju transportu arba specialiuoju autobusu.

Susisiekimo sistema – tai pėsčiųjų, keleivių ir transporto priemonių bei jų eismui reikalingos techninės infrastruktūros, informacinių ir eismą reguliuojančių priemonių visuma.

Susisiekimo sistemos infrastruktūra – tai tarpusavyje susijusių struktūrinių elementų visuma, palaikanti visą susisiekimo sistemos funkcionavimą, aptarnaujanti ūkį ir gyventojus.

Transporto priemonė – bet koks savaeigis mechanizmas ar mechanizmų junginys keleiviams, bagažui ir (arba) kroviniams vežti.

Viešasis transportas – keleivių, bagažo ir (arba) krovinų vežimo nustatytais maršrutais nustatytu laiku paslauga, teikiama visiems, kurie kreipiasi.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektas	2
Darbo tikslas	2
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas	4
Disertacijos struktūra	5
 1. MOKSLINĖS LITERATŪROS APIE IŠMANIUOSIUS MIESTUS IR JŲ SUSISIEKIMO SISTEMOS INFRASTRUKTŪRĄ APŽVALGA	7
1.1. Išmaniojo miesto raida užsienyje ir Lietuvoje	7
1.2. Išmaniojo miesto koncepcija	13
1.3. Intelektinės transporto sistemos	20
1.4. Norminių aktų, strategijų, programų ir plėtros planų, reglamentuojančių išmaniojo miesto plėtrą, apžvalga	25
1.5. Išmaniojo miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros vertinimo veiksnių ir rodiklių analizė	28
1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas	34

2. IŠMANIOJO MIESTO SUSISIEKIMO SISTEMOS INFRASTRUKTŪROS TYRIMO HIERARCHINIO MODELIO SUDARYMAS	37
2.1. Tyrimų planas	37
2.2. Išmaniojo miesto susisieikimo sistemos infrastruktūros vertinimo veiksnių bei rodiklių parinkimas.....	39
2.3. Išmaniojo miesto susisieikimo sistemos infrastruktūros vertinimo metodai.....	45
2.3.1. Rodiklių subjektyvių reikšmingumų nustatymas analitinio hierarchijos proceso (AHP) metodu	48
2.3.2. Rodiklių subjektyvių reikšmingumų nustatymas tiesioginio vertinimo ir rangavimo metodais	51
2.3.3. Ekspertų grupės nuomonių suderinamumo teorinis tyrimas rangų koreliacijos metodu.....	51
2.3.4. TOPSIS metodas	54
2.3.5. SAW metodas	55
2.3.6. COPRAS metodas.....	56
2.4. Rodiklių subjektyvių reikšmingumų nustatymas.....	56
2.4.1. Rodiklių reikšmingumų nustatymas AHP metodu.....	57
2.4.2. Ekspertų grupės nuomonių suderinamumo praktinis tyrimas	61
2.4.3. Rodiklių subjektyvių reikšmingumų nustatymas tiesioginio vertinimo metodu	64
2.4.4. Rodiklių subjektyvių reikšmingumų nustatymas ekspertinio rangavimo metodu	67
2.5. Išmaniojo miesto susisieikimo sistemos infrastruktūros hierarchinis modelis .	70
2.6. Antrojo skyriaus išvados.....	73
3. VILNIAUS, KAUNO, KLAIPĖDOS IR MONREALIO MIESTŲ IŠMANIOSIOS SUSISIEKIMO SISTEMOS INFRASTRUKTŪROS VERTINIMAS.....	75
3.1. Vilniaus, Kauno, Klaipėdos ir Monrealio miestų susisieikimo sistemos infrastruktūros ypatumai	76
3.2. Sprendimo priėmimo duomenys miestų daugiatisliam vertinimui	77
3.3. Miestų išmaniosios susisieikimo sistemos infrastruktūros daugiatislis vertinimas SAW, COPRAS ir TOPSIS metodais	80
3.3.1. Daugiatislis vertinimas pagal veiksnis	81
3.3.2. Daugiatislis vertinimas pagal apibendrintus integruotus vertinimo rodiklių reikšmingumus	83
3.4. Rodiklių reikšmingumų įtakos rezultatams jautrumo analizė.....	87
3.5. Išmaniojo miesto susisieikimo sistemos infrastruktūros hierarchinio vertinimo modelio praktinis pritaikymas	93
3.6. Trečiojo skyriaus išvados	95
BENDROSIOS IŠVADOS	97
REKOMENDACIJOS	99
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	101

AUTORĖS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS.....	113
SUMMARY IN ENGLISH.....	115
PRIEDAI ¹	131
A priedas. Ekspertų apklausos anketų pavyzdžiai.....	132
B priedas. AHP metodu apskaičiuoti veiksnių ir rodiklių reikšmingumai	135
C priedas. Porinio palyginimo matricų suderinamumo santykiai C.R.	139
D priedas. Veiksnių ir rodiklių reikšmingumai pagal ekspertų tiesioginį vertinimą.....	140
E priedas. Integruoti rodiklių reikšmingumai, apskaičiuoti trimis skirtingais metodais.....	144
F priedas. Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija.....	146
G priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos	147

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Contents

INTRODUCTION	1
Problem formulation	1
Relevance of the thesis	2
Research object	2
Aim of the thesis	2
Tasks of the thesis	3
Research methodology	3
Scientific novelty of the thesis	4
Practical value of the research findings.....	4
Defended statements	4
Approval of the research findings	4
Structure of the dissertation.....	5
1. REVIEW OF THE SCIENTIFIC LITERATURE ON SMART CITIES AND URBAN MOBILITY SYSTEM INFRASTRUCTURE	7
1.1. Development of a smart city abroad and in Lithuania	7
1.2. The concept of the smart city.....	13
1.3. Intelligent transport systems	20
1.4. Overview of regulations, strategies, programs and development plans governing smart city development.....	25
1.6. Conclusions of the first chapter and formulation of dissertation tasks	34

2. DEVELOPMENT OF A HIERARCHY MODEL OF A SMART CITY MOBILITY SYSTEM INFRASTRUCTURE	37
2.1. Research plan.....	37
2.2. Selection of factors and indicators for evaluation of smart city mobility system infrastructure.....	39
2.3. Smart urban mobility system infrastructure assessment methods.....	45
2.3.1. Determination of subjective significance of indicators by the method of analytical hierarchy process (AHP)	48
2.3.2. Determination of subjective significance of indicators by direct evaluation and ranking methods	51
2.3.3. Theoretical study of the consistency of expert group opinions using the rank correlation method	51
2.3.4. TOPSIS method	54
2.3.5. SAW method.....	55
2.3.6. COPRAS method.....	56
2.4. Determination of subjective significance of indicators.....	56
2.4.1. Determination of significance of indicators by AHP method	57
2.4.2. Practical study on the expert group opinions compatibility	61
2.4.3. Determination of subjective significance of indicators by direct evaluation method.....	64
2.4.4. Determination of subjective significance of indicators by ranking methods.....	67
2.5. Hierarchical model of smart city mobility system infrastructure.....	70
2.6. Conclusions of the second chapter.....	73
3. EVALUATION OF THE SMART MOBILITY SYSTEM INFRASTRUCTURE OF VILNIUS, KAUNAS, KLAIPĖDA AND MONTREAL CITIES	75
3.1. Peculiarities of Vilnius, Kaunas, Klaipėda and Montreal city mobility system infrastructure.....	76
3.2. Decision data for multi-objective urban assessment.....	77
3.3. Multi-objective assessment of cities using SAW, COPRAS and TOPSIS methods.....	80
3.3.1. Multi-objective assessment by factors	81
3.3.2. Multi-objective evaluation based on generalized integrated significance of evaluation indicators.....	83
3.4. Sensitivity analysis of the indicators significance on the results	87
3.5. Practical application of the model of hierarchical evaluation of smart city transport system infrastructure.....	93
3.6. Conclusions of the third chapter	95
GENERAL CONCLUSIONS	97
RECOMMENDATIONS	99
REFERENCES	101

LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION.....	113
SUMMARY IN ENGLISH.....	115
ANNEXES ²	131
Annex A. Example of expert survey questionnaires	132
Annex B. Significances of factors and indicators calculated using the AHP method.....	135
Annex C. Compatibility ratios C.R. of pairwise comparison matrices.....	139
Annex D. Significance of factors and indicators according to direct evaluation of experts	140
Annex E. Integrated significance of the indicators calculated using three different methods.....	144
Annex F. Author's declaration of academic integrity	146
Annex G. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation.....	147

² The annexes are supplied in the enclosed compact disc.

Ivadas

Problemos formulavimas

Nuolat didėjantis gyventojų skaičius miestuose ir sudėtingas miestų valdymas reikalauja, kad miesto valdžia ir institucijos diegtų naujas technologijas aukštesnei miesto erdvių kokybei palaikyti ir viešosioms paslaugoms geriau teikti. Pastaraisiais metais miestuose vis labiau populiarėja ir plinta išmaniųjų technologijų diegimo projektai, darantys miestus išmanesniais, nors nėra vienareikšmės ir bendrai pripažintos „išmanusis miestas“ sąvokos.

Miestams naudojant neefektyvų ir aplinkai nedraugišką transportą atsiranda daugybė nepageidaujamų pasekmių: neigiamai veikiama gyvenimo kokybė, darbo produktyvumas, didėja energijos suvartojimas, spūstys, oro tarša, atsiranda grėsmė asmens saugumui. Daugelyje miestų dėl per mažai modernizuotos susisiekimo infrastruktūros sumažėja susisiekimo greitis, padidėja avaringumo mastas. Didelę įtaką susisiekimui turi reguliuojamos sankryžos. Netinkamai nustatytos fazės ir laiko tarpai, nepritaikyti besikeičiančioms eismo sąlygoms, didina spūsčių sukeliamas problemas. Tokie veiksniai kaip transporto priemonių skaičiaus augimas, viešojo transporto prastovos, vėlavimai, didelis avaringumas, didelė oro tarša automobilių išmetamosiomis dujomis iššaukia susisiekimo infrastruktūros modernizavimo poreikį. Susisiekimo sistemos problemos tiesiogiai liečia ne tik miestų gyventojus, bet ir aplinką, įmones bei miestų svečius.

Judumas – viena iš sudėtingiausių temų, su kuria susiduria didmiesčiai. Jis apima tiek aplinkos, tiek ekonominius aspektus ir reikalauja aukštųjų technologijų bei doro žmonių elgesio (Benevolo et al., 2016).

Darbo aktualumas

Susisiekimo sistema – vienas svarbiausių ūkio sektorių, lemiančių gyventojų socialinę bei ekonominę gerovę, užtikrinančių sklandų žmonių judėjimą, prekių ir paslaugų tiekimą. Todėl kiekvienas miestas susisiekimo sistemos plėtrai ir modernizavimui turi kuo racionaliau pritaikyti įvairius technologinius sprendimus, kad susisiekimo sistema būtų konkurencinga ir ekonomiškai efektyvi, o aplinkai ir visuomenei užtikrintas tvarus susisiekimas.

Disertacijos aktualumą galima pagrįsti Europos Parlamento dokumentais. 2010 m. Europos Parlamento ir Tarybos direktyvoje teigiama, kad IRT taikymas kelių transporto sektoriuje ir jo sąsajose su kitų rūšių transportu gerokai prisidės prie aplinkosaugos veiksmingumo, efektyvumo didinimo, įskaitant energijos vartojimo efektyvumą, kelių transporto saugą ir saugumą, visuomenės saugumą ir keleivių bei krovinių judumą, kartu užtikrins vidaus rinkos veikimą ir didesnę konkurencingumą.

ES baltojoje knygoje (2011) intelektinės transporto sistemos (ITS) įvardijama kaip priemonė, didinanti transporto sistemų efektyvumą, mažinanti aplinkos taršą ir avaringumą. Pateikiamas technologijų planas ir strategija, kurioje nurodyta diegti ITS ir kitos kartos daugiarūšio eismo valdymo ir informacinės sistemas.

Tarptautinių organizacijų rekomendacijose susisiekimo sektoriui keliami tikslai, kurie daugiausia susiję su tvarių TP įsigijimu, darnaus judumo skatinimu, alternatyvių degalų infrastruktūros kūrimu bei plėtra, IRT skatinimu.

Tyrimų objektas

Disertacijos tyrimo objektas – susisiekimo sistemos infrastruktūros technologiniai bei techniniai sprendimai, darantys miestus išmanesnius.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – nustčius išmaniosios miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros kompleksinius vertinimo kriterijus, sudaryti hierarchinį vertinimo modelį, daugiakriteriais metodais palyginti miestų išmaniąsias susisiekimo sistemas.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti tyrime reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Atlikti mokslinės literatūros analizę, susijusią su išmaniųjų miestų raida Lietuvos ir užsienio miestuose.
2. Atlikti mokslinės literatūros, susijusios su išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros reitingavimui naudojamų kriterijų, analizę.
3. Vadovaujantis Europos Komisijos dokumentų rekomendacijomis ir atsižvelgiant į mokslininkų pateikiamus reitingavimo modelius, nustatyti kompleksinio išmaniojo miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros vertinimo veiksniai ir rodiklius.
4. Nustatyti išmaniojo miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros vertinimo veiksnių ir rodiklių reikšmingumą skaitinės vertės.
5. Pasinaudojant sudarytu miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros hierarchiniu modeliu, įvertinti miestų kiekybinius bei kokybinius susisiekimo sistemos infrastruktūros parametrus.
6. Atlikti Vilniaus, Kauno, Klaipėdos ir Monrealio miestų daugiakriterį vertinimą pagal atskirus veiksniai – kriterijų (rodiklių) grupes.
7. Daugiakriteriais metodais apskaičiuoti Vilniaus, Kauno, Klaipėdos ir Monrealio miestų susisiekimo sistemos infrastruktūros įverčius ir palyginti miestus tarpusavyje.

Tyrimų metodika

Rengiant darbą remtasi užsienio šalių ir Lietuvos mokslininkų publikacijomis, tyrimais ir mokslinių studijų medžiaga. Mokslinės teorinės analizės metodu atlikta šiuolaikinės mokslinės literatūros, EK leidinių ir kitų teisinių šaltinių analizė.

Ekspertiniais metodais nustatytas išmaniųjų miestų susisiekimo sistemos infrastruktūros vertinimo veiksnių bei rodiklių reikšmingumas pagal svarbą. Kitame etape taikomi šie daugiakriteriniai metodai: AHP, SAW, COPRAS, TOPSIS. Jų teikiamais rezultatais galima įvertinti miestų išmanumą ir palyginti juos tarpusavyje. Prioritetinei eilei sudaryti taikomi vidurkio, Borda ir Copelando metodai. Taip pat taikyti matematinės statistikos metodai – atlikta galutinių rezultatų jautrumo analizė.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją gauti šie nauji statybos inžinerijos mokslo rezultatai:

1. Parinkti išmaniųjų miestų susisiekimo sistemos infrastruktūros vertinimo veiksniai ir rodikliai, apibrėžiantys susisiekimo sistemos infrastruktūros išmanumą.
2. Taikant kriterijų svorių nustatymo metodus, apskaičiuotos veiksnių ir rodiklių reikšmingumų skaitinės vertės.
3. Pasiūlyta praktiškai pritaikoma miestų susisiekimo sistemos infrastruktūros daugiakriterio vertinimo metodologija, kurią galima taikyti išmaniesiems miestams įvertinti ir palyginti.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Darbe pasiūlytas išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros vertinimo modelis gali būti taikomas miestų susisiekimo sistemos infrastruktūros išmanumui vertinti tiek kompleksiskai (kai miestai lyginami pagal visus rodiklius iš karto siekiant reitinguoti miestus), tiek pagal atskirus veiksnius (išmanumo rodiklių grupes). Pasiūlytas vertinimo modelis gali būti taikomas miestų darnaus judumo planams stebėti, vertinti ir palyginti.

Ginamieji teiginiai

1. Miestų susisiekimo sistemos infrastruktūros išmanumą lemia 22 priemonės (rodikliai), suskirstytos į 5 grupes (veiksnius): kelionių motorinėmis transporto priemonėmis ir spūsčių mažinimo; taršos mažinimo; kelionių saugumo užtikrinimo ir avaringumo mažinimo; eismo valdymo ir informacijos; išmaniosios infrastruktūros priemonės.
2. Pasirinkta daugiakriterio vertinimo metodologija leidžia tiksliai įvertinti atskirų rodiklių įtaką išmaniojo miesto susisiekimo sistemos infrastruktūrai.
3. Modelis gali būti praktiškai taikomas išmaniųjų miestų susisiekimo sistemos infrastruktūros išmanumo lygiui identifikuoti bei miestams palyginti tarpusavyje.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema publikuoti šeši moksliniai straipsniai: du – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į „Clarivate Analytics Web of Science“ duomenų bazę, turinčiuose

citavimo indeksą (Zapolskytė et al., 2020a, 2020b); du – kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose (Zapolskytė & Palevičius, 2018; Zapolskytė et al., 2019); du – recenzuojamuose konferencijų straipsnių rinkiniuose (Palevičius et al., 2018; Zapolskytė & Burinskienė, 2020).

Disertacijos tema atliktų tyrimų rezultatai paskelbti dviejose mokslinėse konferencijose užsienyje:

- tarptautinėje mokslinėje ir techninėje konferencijoje, skirtoje Baltarusijos kelių mokslo devyniasdešimtmečiui paminėti, „Highways: safety and reliability“ 2018 m. lapkričio 22–23 d., Minskas, Baltarusija;
- tarptautinėje konferencijoje „10th Annual international conference on urban studies & planning“ 2020 m. birželio 1–4 d., Atėnai, Graikija.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados ir rekomendacijos, literatūros sąrašas, autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas. Taip pat yra 7 priedai.

Darbo apimtis – 130 puslapių (neskaičiuojant priedų), tekste pateikta 40 numeruotų formulių, 29 paveikslai ir 28 lentelės. Rašant disertaciją naudotasi 144 literatūros šaltiniais.

Mokslinės literatūros apie išmaniuosius miestus ir jų susisiekimo sistemos infrastruktūrą apžvalga

Skyriuje pateikiama išmaniojo miesto analizė: komponentai ir charakteristikos, raida užsienio ir Lietuvos miestuose, išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros svarba išmaniajame mieste. Taip pat pateikiama ITS, suskirstytų pagal veiklas, apžvalga skirtingose šalyse. Šia tema paskelbti du straipsniai (Zapolskytė & Palevičius, 2018; Zapolskytė et al., 2019), perskaitytas pranešimas tarptautinėje konferencijoje „International scientific and technical conference, dedicated to the ninetieth anniversary of Belarusian road science „Highways: safety and reliability“, November 22–23, 2018 Minsk“.

1.1. Išmaniojo miesto raida užsienyje ir Lietuvoje

Pažangios bendruomenės ir miestai priklauso besiformuojančiam judėjimui, kurio tikslas – kurti aplinką, gerinančią pažinimo įgūdžius, gebėjimą mokytis ir diegti naujoves. Jie atstovauja aplinkai, kuri leidžia kolektyviai sukurti didžiausius pajėgumus ir kūrybiškumą, derinti atskirus kognityvinius gebėjimus ir in-

formacines sistemas, veikiančias miestų fizinėje, institucinėje ir skaitmeninėje erdvėje (Kominios, 2006).

Sparčiai vystantis išmaniosioms technologijoms, kasdien pasaulio miestai ir jų gyventojai tampa vis išmanesni. Ši tendencija miestuose skatina kurti išmaniuosius technologinius sprendimus, pagal kuriuos plėtojama viešųjų paslaugų infrastruktūra. Įgyvendindamas išmaniųjų technologijų srities darnaus vystymosi principus ir užtikrindamas geresnę gyvenimo kokybę, kiekvienas miestas turi rasti, kaip kuo racionaliau gyvenamojoje aplinkoje pritaikyti ir panaudoti išmaniąsias sistemas.

IRT sprendimais ir išmaniosiomis technologijomis Lietuva neatsilieka nuo kitų šalių. Inovatyviais IT sprendimais optimizuojamas kasdienis žmonių gyvenimas įvairiose srityse.

Vilnius yra vienas iš sparčiausiai augančių Rytų Europos miestų. Tai Lietuvos ir Baltijos regiono politinių, ekonominių, socialinių ir aplinkos pokyčių centras (Vilnius becomes one of Europe's smartest cities). Vilniaus miesto valdžia iškilusiems iššūkiams spręsti pasitelkia išmaniąsias technologijas ir miesto gyventojus. Miestas turi spartų interneto ryšį, aukštą gyvenimo kokybę, taip pat švarų vandenį bei orą. 2014 m. Vilnius tapo vienu iš šešiolikos pasaulio miestų, gavusių stipendiją „IBM iššūkis išmanesniems miestams“ (*IBM Smarter Cities Challenge*) ir IBM ekspertų konsultacijas (Šiupšinskas, 2014; Vilnius becomes one of Europe's smartest cities). Kaip sostinė Vilnius yra draugiškas miestas, juo pasitiki tokios aukštos kvalifikacijos bendrovės, kaip IBM, „Barclays“, „Western Union“, „Teva Group“, „Thermo Fisher Scientific“, CSC ir kt.

„New York Times“ straipsnyje „Hip Cities That Think About How They Work“ Vilnius įvardytas kaip vienas geriausiai valdomų pasaulio miestų greta Berlyno, Barselonos, Keiptauno, Kopenhagos, Monrealio, Santjago ir Šanchajaus (Schuetze, 2011). Tokį palankų įvertinimą Vilniui nulėmė keletas sprendimų: sukurta ir įdiegta miesto elektroninė svetainė, eismo stebėjimo ir reguliavimo sistema, efektyviau perplanuoti VT maršrutai, įvestos greitųjų autobusų linijos, elektroninė mokėjimo kortelė.

VT sistema taip pat pasiekė teigiamų pokyčių. Miestas įdiegė naują mobiliųjų programų paketą. Mobiliosios bilietų programos „m.Ticket“ ir „Trafi“ leidžia nusipirkti ir aktyvuoti bilietus savo mobiliajame telefone, pažiūrėti VT tvarkaraštį, suplanuoti būsimą kelionę bei kitas paslaugas. Toks požiūris į išmaniųjų judumą buvo pripažintas IBM ir Vilniaus miestui suteikta išmaniųjų miestų iššūkių stipendija.

Vilniuje pradėtas taikyti integruotas viešojo bei privataus transporto valdymo metodas bei ieškomi tinkamiausi IT sprendimai VT veiklai gerinti. Įdiegta eismo stebėjimo ir reguliavimo sistema, o miesto šviesoforai atnaujinti ir prijungti prie vieno eismo stebėjimo ir valdymo centro.

Kaunas dalyvauja tarptautiniame projekte, kuris jungia kelių šalių miestus ir kurio rezultatas – daiktų interneto technologijų įgyvendinimas realybėje. Kaunas labai stengiasi tobulinti infrastruktūrą, kartu bandydamas valdyti strateginius ilgalaikės plėtros klausimus. Kaunas vienintelis iš Lietuvos dalyvauja projekte „Miestų darbotvarkė ES“, kurio tikslas – gerinti miestų gyvenimo kokybę. Dalyvavimas formuojant miesto politiką ES neabejotinai įrodo, kad Kaunas vertinamas kaip tvirtas ir kompetentingas partneris tarptautiniu lygmeniu.

Į Vienos technologijų universiteto mokslininkų sudarytą Europos išmaniųjų miestų sąrašą Kaunas buvo įtrauktas 2007 m., Vilnius – 2015 m. Europos išmaniųjų miestų žemėlapis pateikiamas 1.1 paveiksle.



1.1 pav. Vienos technologijų universiteto mokslininkų sudarytas Europos išmaniųjų miestų žemėlapis, į kurį įtrauktas Vilnius ir Kaunas (Europeansmartcities 4.0. 2015)

Fig. 1.1. A map of European smart cities, prepared by the researchers of Vienna University of Technology, which includes Vilnius and Kaunas (Europeansmartcities 4.0. 2015)

Tokiuose sparčiai judančiuose ir priekį miestuose kaip Singapūras, Dubajus, Niujorkas, Barselona, Amsterdamas ir kt. jau yra daug pasiekta diegiant išmaniąsias technologijas. Technologijomis aprūpinti miestai mažai skiriasi nuo įprastų, bet juose technologinių sprendimų dėka daugelis objektų tiesiogiai susieti pagal išmaniojo miesto architektų sprendimus.

Nors sąvoka „išmanusis miestas“ tapo populiari, sunku nustatyti, kokios išmaniosios miesto iniciatyvos yra pačios pažangiausios. 2016 m. „Juniper“ mokslininkai (Basingstoko tyrimo įmonė „Juniper Research“, Didžioji Britanija) įvertino miestus įvairiais aspektais, įskaitant pažangių technologijų taikymą, informacijos technologijų naudojimą eismui gerinti, belaidžio interneto ryšio

prieigos taškus ir t. t. ir sudarė išmaniausių pasaulio miestų penketuką (Buntz, 2016.). Tai:

„Juniper Research“ Singapūrai davė aukštą įvertinimą už protingą judumo politiką, technologijas ir belaidį ryšį. 2014 m. miestas valstybė paskelbė, kad kuria programinę įrangą „Virtual Singapore“ – dinamišką 3D modelį, kuris leidžia miestų planuotojams atlikti virtualius bandymus, pvz., patikrinti, kaip žmonių minios gali evakuotis iš apylinkių, esančių kaimynystėje su vietovėmis, kuriose susidarė avarinė situacija. Singapūras agresyviai apmokestino TP grūstis, daug investavo į keliuose ir gatvėse įrengtus jutiklius ir intelektinį automobilių statymą. Įdiegta žaliosios nuorodos nustatymo (angl. *Green Link Determining*) sistema GLIDE, kuri valdo visus Singapūro eismo signalus, reguliuoja žalio šviesoforo signalo laiką, kai keičiasi eismo srautas. GLIDE taip pat susieja greitimus eismo signalus, kad TP galėtų važiuoti iš vienos sankryžos į kitą mažai sustodamas (Land Transport Authority..., 2017).

Barselona plačiai naudojasi jutikliais, kurie padeda stebėti ir valdyti eismą. Miesto planuotojai numato pertvarkyti eismo srautą, kuris, jų manymu, bus sumažintas 21 %. Mieste įdiegta intelektinė automobilių stovėjimo technologija, pažangūs gatvių apšvietimo įtaisai ir jutikliai oro kokybei ir triukšmui stebėti, plečiamas nemokamas belaidžio interneto tinklas viešosiose erdvėse. Barselonoje sukurta miesto drėkinimo sistema. Žemėje esantys jutikliai analizuoja kritulių ir prognozuojamą lietaus kiekį, pagal tai atitinkamai pakeičiami miesto drėkinimo sistemos purkštuvai, kad būtų taupomas vanduo.

Londonas jau seniai yra išmaniųjų pasaulio miestų sąrašo viršuje. Jis pradėjo imtis veiksmų, kad technologijos spęstų spūstis ir būtų lengviau pasistatyti automobilių stovėjimo aikštelėje. Londone gerai vertinamas plačiajuosčio ryšio prieinamumas. Miestas investuoja į pažangias eismo technologijas. Šviesoforai reaguoja į autobusus, kad būtų progresyvesnis VT.

Pasak „Juniper“ tyrimų, VT tinklas San Fransiske yra ganėtinai brangus. Pagal VT miesto rezultatai yra gana aukšti. San Fransiske yra gera apmokėjimo sistema – galima mokėti internetu arba naudotis bekontakto mokėjimo sistema. Vis dėlto miestas susiduria su didėjančia TP perkrova, gana daug laiko sugaištama eisme. Tačiau miestas pirmauja pagal intelektines automobilių stovėjimo aikšteles. San Fransiske jutikliai stebi automobilių stovėjimo vietas. Dinaminė stovėjimo sistema nustato stovėjimo vietas pagal jų užimtumą.

Oslas – vienas iš turtingiausių pasaulio miestų. Sparčiai diegiami IT sprendimai sumažino suvartojamos energijos ir šiltnamio efektą sukeliančių išmetamų dujų kiekius. Oslas stengiasi mažinti išmetamų teršalų kiekį, todėl pertvarkė transporto tinklą, įdiegė jutiklius, kurie stebi automobilių stovėjimo aikšteles, bei jutiklių tinklą, skirtą sergančių, pagyvenusių žmonių priežiūrai gerinti. Miestas taip pat sukūrė pažangų gatvių apšvietimo tinklą, kuris sumažino vartojamos

energijos kiekius beveik dviem trečdaliais. Taip pat yra automobilių numerių atpažinimo technologija, siejama su grūsčių apmokestinimo sistema.

Yra miestų, kurie atlieka arba ketina atlikti savivaldžių TP bandymus: San Fransiskas, Austinas, Našvilis, Vašingtonas, Paryžius, Helsinkis, Londonas ir kt. Los Andželas, Tel Avivas, Buenos Airės, San Paulas ir kt. vykdo savivaldžių TP tyrimus arba vertina tyrimų rezultatus (HaWkins, 2017).

Europos miestuose Helsinkyje (Suomija), Sione (Šveicarija), Vageningene (Nyderlandai) atliekami savivaldžių autobusų tyrimai.

2017 m. rugpjūtį Helsinkyje buvo bandomi savivaldžiai automobiliai. „Easymile EZ-10“ (1.2 pav. a). Be šių bandymų, mikroautobusai buvo testuojami kelyje tarp Espo ir Tamperės miestų. Taip pat išbandytas maršrutinis reisas iš Helsinkio pramogų salos „Mustikkamaa“ į Helsinkio zoologijos sodą (Sisson, 2017).

Šveicarija yra labiau pažengusi savivaldžių autobusų bandymuose nei kitos Europos šalys (1.2 pav. b). Nuo 2016 m. pavasario vykdytas projektas „SmartShuttle“, kurio metu Siono gyventojai ir turistai galėjo važiuoti savivaldžiais autobusais Siono senamiestyje ir trasoje tarp Valerio ir Turbijono pilių. Dvejų metų bandymo laikotarpiu kelionės buvo nemokamos (Bradley, 2015).

Nyderlandų nacionalinė kelių eismo agentūra parengė aiškią savivaldžių automobilių ir kitų intelektinių transporto sistemų bandymo procedūrą. Nyderlandai išlieka kaip šalis, geriausiai pasirengusi įvesti autonominius automobilius (Delft University of Technology, 2019). (1.2 pav. c).

2017 m. lapkričio 15 d. Vilniuje išbandytas visiškai autonominis elektrinis automobilis (1.2 pav. d). Tai TP, į kurią sumontuoti naujausi jutikliai, kurių dėka automobilis randa kelią, aptinka kliūtis, atpažįsta kelio ženklus bei šviesoforų signalus.

Vokietijos parlamento žemuosiuose rūmuose Bundestage 2017 m. pavasarį buvo patvirtinti teisės aktų pakeitimai, leidžiantys savivaldėms TP dalyvauti eisme. Vykdyti savivaldžių TP bandymams Vokietijoje A9 greitkelyje įrengtas išmanusis kelio ruožas (Experiments on autonomous..., 2015).

Švedijoje 2017 m. vasarą pradėtas didelio masto projektas „Drive Me“, 100 savivaldžių automobilių riedėjo Geteborgo apylinkėse (Volvo Car Group..., 2013). Projektas unikalus tuo, kad savivaldžius automobilius bandė potencialūs klientai.

Japonija 2013 m. pradėjo pirmuosius savivaldžių TP testus viešuosiuose keliuose. (Experiments on autonomous..., 2015). Spartinant praktinį naudojimą nuspręsta įgyvendinti didelio masto sistemos testavimus viešuosiuose keliuose jau 2018 m. rudenį (Field operational tests..., 2018). 2020 m. balandžio 1 d. įsigaliojo Kelių transporto priemonių įstatymo ir Kelių eismo įstatymo pakeitimai, leidžiantys Japonijoje apskritai naudoti 3 lygio automatines transporto priemones (Autonomous driving in Japan..., 2020).



1.2 pav. Išbandomi savivaldžiai automobiliai: a) EZ-10 autobusas Helsinkyje (Sisson, 2017); b) Savivaldžiai autobusai Siono gatvėse (Bradley, 2015); c) savivaldžių autobusų tyrimai Gelderlande (Delft University of Technology, 2019); d) Vilniuje išbandytas pirmasis Lietuvoje savaeigis automobilis „Navya Arma“ (Sauliaus Žiūros nuotr.)

Fig. 1.2. a) EZ-10 buses tested in Helsinki (Sisson, 2017); b) Driverless buses on the streets of Sion (Bradley, 2015); c) Autonomous bus in Gerderland (Delft University of Technology, 2019); d) The first autonomus vehicle Navya Arma tested in Vilnius, Lithuania (photo: Saulius Žiūra)

2014 m. Singapūro susisiekimo ministerija įkūrė komisiją sausumos autonominių TP strategijai sukurti (Committee on Autonomous..., 2014). Nuo 2016 m. čia teikiama savarankiškai važiuojančio taksi paslauga.

JAV 2014 m. gegužę patvirtintos ir 2014 m. rugsėjį įsigaliojo savarankiškų TP bandymų taisyklės. 2018 m. vasario 26 d. Kalifornijos administracinės teisės biuras (OAL) patvirtino galutinius autonominių TP bandymų ir dislokavimo nuostatus (Overview of California's Final Autonomous Vehicle Testing..., 2018).

Išanalizavus užsienio šalių patirtį ir tarptautines iniciatyvas, pastebima aiški tendencija, jog ne tik gamintojai, bet ir pasaulio valstybės konkuruoja, norėdamos būti inovacijų lyderės. Kiekviena šalis pabrėžia, jog naujos technologijos yra neišvengiamos saugiai, patogiai ir darniai ateičiai užtikrinti. Pastebima, kad valstybės kuria specialias darbo grupes, komitetus, finansuojami projektai, susiję su išmaniosiomis technologijomis, o universitetai, viešasis ir privatus sektoriai bendradarbiauja vystydami nacionalinius projektus. Sudaroma aiški valstybės vizija ir strategija ateinantiesiems metams (Ginkutė & Siavris, 2017).

1.2. Išmaniojo miesto koncepcija

Išmanusis miestas yra neseniai susiformavęs reiškinys, tačiau pastaraisiais metais jų skaičius ir sklaida sparčiai didėja. Dabar išmanieji miestai yra plačiai paplitę visame pasaulyje. Siekiant išspręsti miestams išylančias problemas, tokias kaip spūstys, tarša, žemas pragyvenimo lygis, miestai pereina į pažangesnę erdvę, naudoja išmaniasias technologijas (Dameri, 2013).

Sąvokos „išmanusis miestas“ ir „protingas miestas“ pasirodė XX a. devintojo dešimtmečio antroje pusėje. „Google Scholar“ duomenimis, pirmąkart terminas „išmanusis miestas“ pavartotas 1986–1990 m. laikotarpio literatūroje apie miestų plėtros inovacijas ir Japonijos „Technopolis“ programos kontekste. Tuo pačiu laikotarpiu pirmą kartą buvo apibrėžtas terminas „išmanusis miestas“ – tai IT naujovės miesto paslaugoms teikti ir geresni miestų aplinkosaugos, ekonomikos ir socialinės aplinkos veiklos rezultatai (Komninos, 2006).

„Išmaniojo miesto“ terminas nėra aiškiai apibrėžtas, jo sąvoka nėra iki galo aiški ir ne visada nuosekliai vartojama. Taigi nėra nė vieno modelio, pagal kurį būtų galima kurti išmanųjį miestą, ir visiems suprantamo apibrėžimo (Nam et al., 2011). Be termino „išmanusis miestas“, vartojami ir kiti: „protingas miestas“, „skaitmeninis miestas“ arba „e. miestas“. Skaitmeniniame mieste dauguma paslaugų ir valdymo perkelta į elektroninę erdvę, tačiau tai nėra išmanusis ar protingas miestas (Komninos, 2006). Protingas miestas, kaip ir išmanusis, ne tik pats teikia paslaugas elektroninėje erdvėje, prie jo valdymo ir minėtų paslaugų kūrimo bei gerinimo aktyviai prisideda vietiniai gyventojai. Kitaip tariant, išmanusis miestas neatsiejamas nuo grįžtamojo ryšio, inovacijų, gyventojų aktyvumo ir kolektyvinio intelekto kūrimo (Šiupšinskas, 2014).

Sąvoka „išmanusis miestas“ toli gražu neapsiriboja tik technologijomis, tai-kytinomis miestams. Štai kelios skirtingos koncepcijos „išmanusis miestas“ apibrėžtys ir reikšmės:

- Išmaniojo miesto vizija yra saugaus ateities miesto, išsaugančio žaliąją aplinką ir turinčio efektyvias infrastruktūras (elektros, vandens, transporto ir t. t.), vizija, kur naudojamos pažangios, integruotos medžiagos, jutikliai, elektronika ir tinklai susieti su kompiuterinėmis sistemomis,

kurias sudaro duomenų bazės, stebėjimo ir sprendimų priėmimo algoritmai (Hall, 2000).

- Išmanusis miestas yra miestas, naudojantis protingą sistemą, kuriai būdinga infrastruktūros, kapitalo, elgsenos ir kultūrų sąveika, pasiekta per jų integraciją (Alkandari et al., 2012).
- Miestas gali būti vadinamas „išmaniuoju“, kai investicijos į žmogiškąjį ir socialinį kapitalą bei tradicinę (transporto) ir modernią (IRT) ryšių infrastruktūrą skatina tvarų ekonomikos augimą ir aukštą gyvenimo kokybę (Schaffers et al., 2011).

Iš tiesų daugelyje sektorių terminas „išmanusis miestas“ plačiai vartojamas be sutartų apibrėžimų. Tai sukėlė miesto politikos painiavą (Albino et al., 2015) – juk išmanusis miestas nėra valdomas iš viršaus į apačią, bet iš apačios į viršų. Iš viršaus į apačią valdymo procesas vyksta dėl aiškiai apibrėžtos strateginės miesto vizijos, taikomos vyriausybės taisyklės ir politika, kad būtų pasiekti numatyti bendri tikslai. Išmaniojo miesto idėja kyla priešingai – dėl technologijų taikymo miesto problemoms spręsti (Dameri, 2013). Miestų valdymo modeliai atsiranda kaip milijonų individualiai motyvuotų sprendimų produktas, jei planuojama iš viršaus į apačią, rezultatai įprastai yra trumpalaikiai, nors ir skirti miesto problemoms spręsti (Batty, 2017).

2015 m. spalio mėn. ITU–T tyrimo grupė sutarė dėl tokios protingo ir tvaraus miesto apibrėžties: „Protingas subalansuotas miestas yra novatoriškas miestas, kuriame naudojamos IRT bei kitos priemonės, skirtos gyvenimo kokybei, miestų eksploatavimo ir paslaugų efektyvumui bei konkurencingumui gerinti, kartu užtikrinant, kad jis atitiktų dabartinių ir būsimų kartų poreikius, atsižvelgiant į ekonominius, socialinius, aplinkos apsaugos ir kultūrinius aspektus.“

R. Jucevičius (2014) pateikia bendruosius principus, atspindinčius svarbiausias sumanumo dimensijas:

- nestandartinis požiūris į vystymosi galimybes;
- kūrybiškumui, antreprenerystei ir inovacijoms palankios ekosistemos kūrimas;
- bendruomeninės kultūros formavimas;
- savivaldos institucijų filosofijos keitimas iš atliekančios tradicinę vertės ir resursų persikirstytojos funkciją į aktyvaus socialinės ir ekonominės vertės kūrimo proceso dalyvio poziciją.

B. Lakamp (2017) „ReadWrite“ rašo, kad rytojaus išmanieji miestai reikalauja daugiau nei tiesiog diegti ryšį, jutiklius ir įrenginius. Siekiant sukurti išmanųjį miestą, būtina prognozuoti ir planuoti. Autorius pateikia pagrindinius elementus, iš tikrųjų reikalingus išmaniesiems miestams, suprantamiems bet kokios pažangiosios miestų iniciatyvos kontekste:

- įvairus ryšys tarp infrastruktūros dalių ir mobilumo paslaugų;
- atspari ir pažangi energija;

- saugumas ir privatumas;
- jutikliai ir matavimas;
- didelio duomenų kiekio (apdorojimo) sparta;
- didelio duomenų kiekio saugojimas;
- techninės įrangos priežiūra ir tobulinimas;
- vartotojo sąsajos;
- geresnis dizainas.

2017 m. spalio mėn. surengtame tradiciniame Lietuvos ūkio ministerijos renginių cikle „Inovacijų savaitė 2017“ buvo skiriama dėmesio išmaniajam miestui populiarinti. Buvo pateiktos septynios idėjos, būdingos išmaniesiems miestams:

- naujos iniciatyvos;
- inovatyvios verslo idėjos;
- kūrybiškas požiūris;
- sveika ir sąmoninga visuomenė;
- verslo, mokslo ir viešojo sektoriaus partnerystė;
- originalus įvaizdis;
- inovacijų taikymas miesto poreikiams.

Išmaniajam miestui neužtenka vien įdiegtų skaitmeninių technologijų. Internetas ir su juo susietos programos yra labai svarbios kuriant išmanųjį miestą. Daug svarbiau, kaip tos technologijos naudojamos, ar jos padeda kurti darną, kuo platesnei visuomenės daliai planuoti miesto plėtrą, įgyvendinti naujus projektus. Skaitmeninis miestas gimsta daugiau iš apačios, stichiškai, pritaikant naujas technologijas kasdienybei, o išmaniojo miesto kūrimą reikia spręsti valstybiniu lygiu.

Telekomunikacijų standartizavimo sektoriaus (ITU-T) ataskaitoje „Technology Watch Report 2013“ buvo nustatyta, kad išmaniojo miesto plėtrą reikia kruopščiai planuoti. Būtina, kad valdžios institucijos, gyventojai ir kiti suinteresuoti asmenys pritartų ketinamai įgyvendinti išmaniojo miesto strategijai. Išmanusis miestas gali pasiūlyti vietos piliečiams ir įmonėms įvairių priemonių bei IRT programų. Tokiu būdu sukuriami virtuali aplinka, kuri remia individualius pasirinkimus bei tarpusavio bendravimo galimybes (Komninos, 2006).

Išmanusis miestas sulaukia vis daugiau susidomėjimo, gausėja publikacijų skaičius, todėl tikėtina, kad bus pripažintas kaip nauja ir tarpdalykinė mokslinio tyrimo sritis (Komninos et al., 2018). Taigi išmanieji miestai yra būsimą visą jungianti koncepcija, skatinanti ieškoti sprendimų pasitelkiant naujoves ir technologijas. Joje daugiausia dėmesio skiriama mokslinėmis ir praktinėmis žiniomis grindžiamai miestų plėtrai.

Protingo miesto koncepcija neapsiriboja IRT, siekiant geriau panaudoti išteklius ir mažinti atliekų kiekį. Tai reiškia pažangesnius miestų transporto tinklus, modernizuotus vandens tiekimo ir atliekų šalinimo įrenginius bei efektyves-

nius pastatų apšvietimo ir šildymo būdus. Tai labiau interaktyvus ir greitas miesto administravimas, saugesnės viešosios erdvės ir patenkinti senėjančios visuomenės poreikiai (European Commission, Smart Cities..., 2017).

Francini et al. (2021), tirdamas išmaniųjų miestų koncepciją, apibrėžė tris išmaniųjų miestų kartas:

- „Išmanieji miestai 1.0“ – tai technologijomis grįsti miestai, kuriuose daugiausia naudos gauna sprendimus ir paslaugas teikiančios technologijų įmonės.
- „Išmanieji miestai 2.0“ – tai technologijų valdomi miestai, kuriuose valdžios institucijos vis daugiau dėmesio skiria technologiniams sprendimams, padedantiems pagerinti gyventojų gyvenimo kokybę.
- „Išmanieji miestai 3.0“ – tai labai intelektualūs integruoti miestai, kuriems būdingas didelis valdžios bei gyventojų tarpusavio sąveikos laipsnis ir pilietinis dalyvavimas miesto procesuose.

Nors ir lėtai, tačiau tikrai išmanieji miestai tampa realybe ir keičia aplinką. Išmaniojo miesto tikslas – skatinti tvarią aplinką, nuolat informuoti piliečius, kad jiems būtų saugu ir patogų gyventi. Kiekvienas didysis miestas yra savaip unikalus ir susiduria su daugybe tų pačių arba labai panašių problemų. Viso pasaulio miestai susiduria su kliūtimis, kurias galima išspręsti arba gerokai patobulinti plėtojant išmaniuosius miestus:

- užtikrintas vandens tiekimas ir kokybė;
- eismo spūstys;
- automobilių stovėjimo aikštelės;
- oro tarša;
- orų prognozė ir modeliavimas;
- energijos efektyvumas;
- atliekų tvarkymas;
- transportas;
- piliečių saugumas ir gerovė;
- ekonomikos augimas ir vystymasis;
- t. t.

Išmaniojo miesto sąvoka apima beveik visus visuomenės ir žmonių gyvenimo aspektus, pvz., viešosios erdvės stebėjimą ir požeminių vamzdinių bei gatvių apšvietimo valdymą; pastatų statybą, saugumą, energijos valdymą ir vidinę komunikaciją; VT paslaugos kaip signalų valdymą, kelių eismą ir stovėjimo vietų stebėjimą; namų automatizavimą ir nuotolinį valdymą; didelės spartos interneto tinklo ir debesų saugyklą; elektroninę visuomenę ir verslo paslaugas.

Pasaulio išmaniųjų miestų charakteristikos, reikalavimai ir komponentai yra gana įvairūs (Mohanty et al., 2016). R. Giffinger et al. (2007) nustatė keturis išmaniojo miesto komponentus: pramonė, švietimas, valdymas ir techninė infrastruktūra. Šis sąrašas buvo išplėstas Vienos technologijos universiteto region-

nių mokslų centro projekto (Albino et al., 2015). Išnagrinėjus išmaniojo miesto modelius išskirti šeši aspektai: valdymas, ekonomika, mobilumas, aplinka, žmonės ir gyvenimas. Kiekvienas turi konkrečią struktūrą, kuri ir sudaro integralią holistinę sumanaus miesto gyvenimo kokybės kūrimo, valdymo ir palaikymo viziją (1.1 lentelė).

1.1 lentelė. Išmaniojo miesto komponentai (Giffinger et al., 2007)

Table 1.1. Components of the smart city (Giffinger et al., 2007)

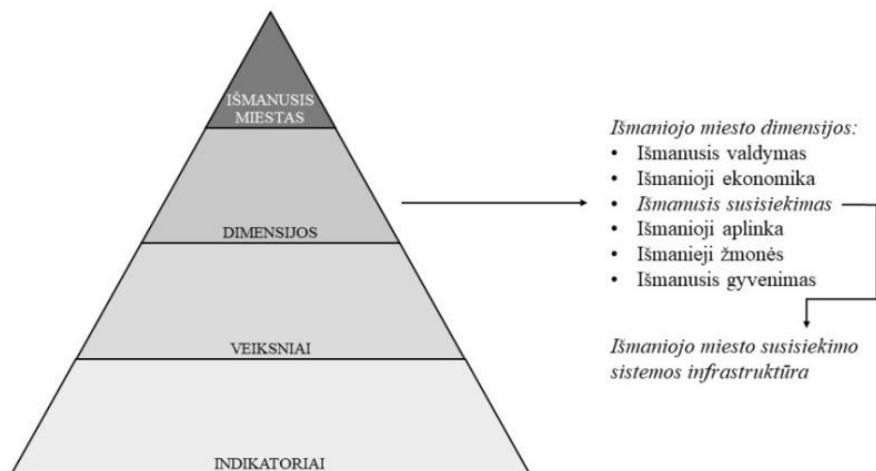
Aspektai	Veiksniai
1	2
Išmanusis valdymas	– Dalyvavimas priimant sprendimus – Skaidrus valdymas – Viešosios ir socialinės paslaugos – Politinės strategijos ir perspektyvos
Išmanioji ekonomika	– Novatoriška dvasia – Verslumas – Ekonominis įvaizdis ir ženklai – Produktyvumas – Darbo rinkos lankstumas – Tarptautinis įsitvirtinimas – Gebėjimas transformuotis
Išmanusis susisieikimas	– Vietos prieinamumas – Tarptautinis / nacionalinis prieinamumas – IRT infrastruktūros prieinamumas – Modernios ir saugios transporto sistemos
Išmanieji žmonės	– Kvalifikacijos lygmuo – Galimybės mokytis visą gyvenimą – Socialinė ir etninė įvairovė – Kūrybiškumas – Lankstumas – Globalumas – Dalyvavimas visuomenės gyvenime
Išmanusis gyvenimas	– Kultūrinė infrastruktūra – Sveikatos sistema – Individualus saugumas – Gyvenamosios vietos infrastruktūra – Švietimo infrastruktūra – Socialinė sanglauda – Turistinis patrauklumas

1.1 lentelės pabaiga

1	2
Išmanioji aplinka	– Patrauklios gamtinės sąlygos – Tarša – Aplinkos apsauga – Tvarus išteklių valdymas

Išmanųjų miestą apibūdina ne vien komponentai. Norint apibūdinti jį ir šias savybes, būtina sukurti skaidrią ir lengvą hierarchinę struktūrą, kurios kiekvienas lygis apibūdinamas toliau pateikto lygmens rezultatais. Todėl kiekvieną charakteristiką apibūdina daug veiksnių, o kiekvieną veiksnį – keli rodikliai.

Disertacijoje nagrinėjama išmaniojo miesto susisiekimo sistemos infrastruktūra yra viena išmaniojo miesto sudėtinių dalių (1.3 pav.).



1.3 pav. Išmanioji susisiekimo sistemos infrastruktūra išmaniojo miesto kontekste

Fig. 1.3. Smart mobility system infrastructure in the context of a smart city

Susisiekimas tampa vis svarbesnis miesto augimui – tai reikšmingas augančių miestų aspektas. Judumo svarba ir poveikis kitiems pažangaus miesto aspektams, kaip tvarumas, ekonomika ir gyvenimas, daro šį klausimą gyvybiškai svarbų piliečiams ir vietos valdžiai. Norint nustatyti efektyviausias miestų infrastruktūros ir darnaus susisiekimo priemonės, pagrindiniai principai yra visuomenės ir suinteresuotųjų šalių įtraukimas į procesų planavimą ir įgyvendinimą, institucinio bendradarbiavimo skatinimas susisiekimo srityje. Vystant miesto susisiekimo sistemos infrastruktūrą keliamas tikslas švelninti klimato kaitą ir kartu užtikrinti gyvybiškai svarbų žmonių, prekių ir paslaugų judėjimą.

Išmanioji miesto susisiekimo sistemos infrastruktūra yra neatsiejama nuo darnaus judumo. Darnaus judumo koncepcija skirta spręsti miesto problemas, kylančias dėl transporto spūsčių, oro taršos ir triukšmo, taip pat padaryti judėjimą mieste dar patogesnę ir patrauklesnę kiekvienam gyventojui. ES skatina kurti darnaus judumo planus, kurie apimtų visas transporto rūšis. Tvarus judumas mieste tebėra viena iš neišspręstų aktualių problemų (Foltýnová et al., 2018, 2020). Didėjantis judumo mieste poreikis sukūrė situaciją, kuri nėra tvari. Miesto transporto veikla yra pagrindinis šio neigiamo poveikio veiksnys, ypač tuose miestuose, kuriuose yra didelis motorizacijos lygis, o priklausomybė nuo automobilio yra dominuojantis individualių kelionių būdas (Pendolovska et al., 2013). Tvarų judumą įgyvendinti gana sunku; todėl transporto ekspertai yra linkę sutelkti dėmesį į aplinkosaugos ir socialines problemas bei galimus jų sprendimus pasitelkdami įvairias strategijas (Foltýnová et al., 2020, Hickman et al., 2013, Litman, 2019). Siekiant užtikrinti tvarų judumą mieste, Europos Komisijos Žaliojoje knygoje dėl judumo mieste (2007 m.) skatinamas naudojimasis viešuoju transportu ir jo sistemos tobulinimas, ekologiškesnio kuro naudojimas ir kelių bei transporto saugumo gerinimas. Foltýnová et al. (2018) pabrėžia tyrimų svarbą nustatant įvairias miesto gyventojų suinteresuotųjų šalių grupes, pateikiant kiekvienai grupei pritaikytas priemones bei siekiant tvaresnio žmonių ir prekių judumo.

Darnaus judumo sistemos palaikymas miestuose yra gana sudėtingas procesas. Jis vykdomas integruojant įvairias priemones. Skatinant darnų judumą, siekiama padėti žmonėms rasti tinkamiausią alternatyvią transporto rūšį pakeisti automobilių ir taip prisidėti prie gyvenamosios aplinkos gerinimo.

Išmaniojo miesto susisiekimo sistemos infrastruktūra apima kelių infrastuktūrą, transporto priemones, politiką ir taisykles, užtikrinančias gerą eismo srautą mieste, sutrumpinant kelionės laiką ir taršą, užtikrinant galimybę saugiai ir patogiai judėti žmonėms bei socialinę lygybę kokybiškų kelionių pasirinkimui. Tvarus judumas mieste prisideda prie ekonomikos ir visuomenės gerovės. Kelionių miesto erdvėje būdai neturėtų pakenkti žmonių sveikatai ir aplinkai (Pereira et al., 2021). Skirtumas tarp judumo ir išmaniojo judumo – tai visuomenės galimybė gauti informaciją realiuoju laiku, kad būtų galima sutaupyti laiko ir pinigų, gerinti keliones, mažinti išmetamą CO₂ kiekį. Išmanusis judumas yra pagrindinė pažangių miestų transformacija. Francini et al. (2021) išskyrė tris pagrindinius išmaniosios ir tvarios susisiekimo sistemos iššūkius:

- veiksmams dėl susisiekimo poreikio, siekiant panaikinti nereikalingas keliones ir padaryti jas lengvesnes bei prieinamesnes;
- mobilumo srautų valdymas, siekiant sumažinti grūstis, prastovas, neefektyvumą ir riziką;
- novatoriškų infrastruktūrų projektavimas siekiant, kad, naudojant tinkamas technologijas, jos taptų interaktyvesnės ir funkcionalesnės.

Daugelis miestų jau sprendžia susisiekimo problemas, diegdami su judumu susijusias išmaniąsias technologijas. Protingas judumas reiškia susietų transporto sistemų, suteikiančių lankstumo ir efektyvumo, sukūrimas – tai pagrindinis šiuolaikinių miestų augimo komponentas. Miestams reikalingi pažangaus judumo modeliai, pagrįsti tvariomis susisiekimo sistemomis.

Miestui, ketinančiam išspręsti susisiekimo problemas, būtina turėti pažangią infrastruktūrą, kuri yra brangesnė ir sudėtingesnė, tačiau labai svarbi pažangiam transportui diegti. Diegiant pažangią infrastruktūrą, esama miestų infrastruktūra papildoma jutikliais, duomenų analizės ir sprendimų palaikymo sistemomis, naujomis technologijomis (spartus visą apimantis internetas, daugybė belaidžio interneto prieigos vietų, galimybė naudotis atviromis duomenų bazėmis bei vizualizacijos priemonėmis ir pan.). Išmaniuosiuose miestuose atsiranda naujų technologijų ir būdų, kaip gerinti eismo srautus ir skatinti efektyviau naudoti susisiekimo infrastruktūrą.

1.3. Intelektinės transporto sistemos

Išmaniojo miesto koncepcijoje miestas skaitmeninėmis, informacinėmis ir ryšių technologijomis sujungs visas viešąsias paslaugas. Dėl to išaugusi miesto paslaugų kokybė ir našumas mažins naudojamų miesto sąnaudų ir išteklių kiekius.

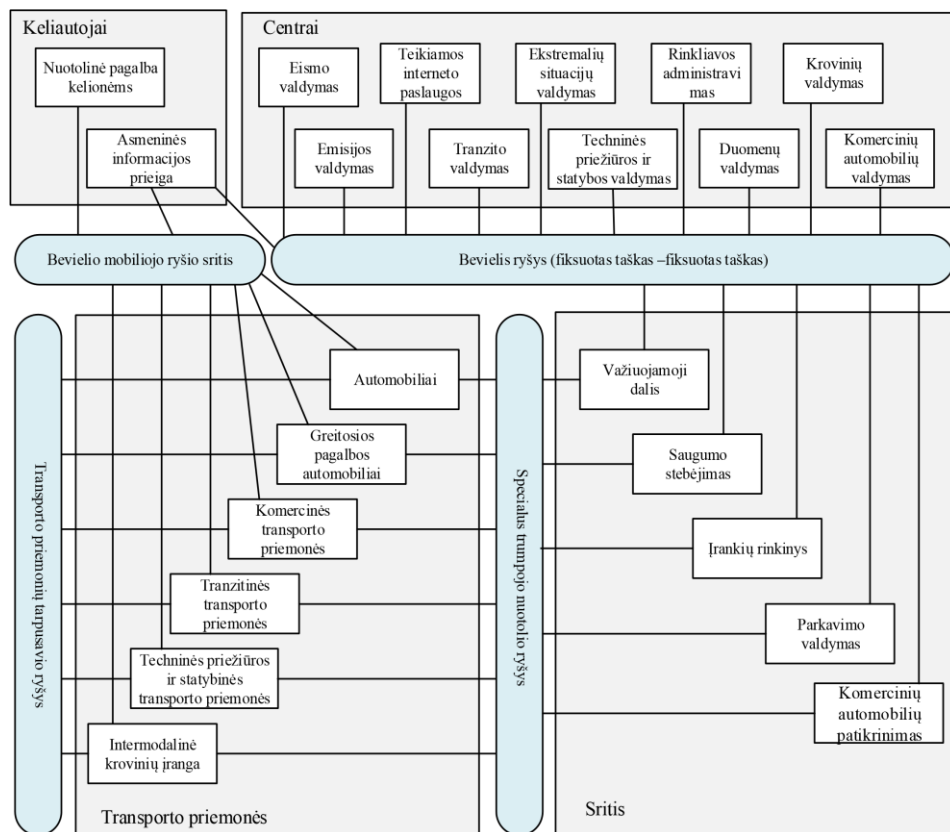
Susisiekimas yra kasdienio ekonomikos ir visuomenės funkcionavimo pagrindas. Per pastaruosius kelis dešimtmečius matomas didžiulis susisiekimo sistemos augimas ir reikšmingas šių pokyčių poveikis visuomenei ir gyvenimui. Informatikos inžinerijos koncepcijos, kaip kad dirbtinis intelektas, mašininis mokymasis, komunikacija, internetas ir daugelis kitų kylančių inžinerijos sričių, tampa ITS branduoliu. Todėl ITS apibrėžiamas kaip pažangių programų rinkinys, kuris siekia pritaikyti intelektinę informaciją ir ryšių technologijas transporto bei eismo valdymo paslaugoms teikti (Zear et al., 2016).

Išmaniojo miesto infrastruktūra susideda iš trijų dalių: fizinės, IRT ir paslaugų (Mohanty et al., 2016). Susisiekimo sistema yra tos pačios struktūros. Todėl kuriant išmaniąją susisiekimo sistemos infrastruktūrą mieste, didelę reikšmę turi ITS, kurios naudoja šiuolaikines IRT ir prisideda prie racionalaus infrastruktūros eksploatavimo nenaudojant naujų įrenginių (Alkandari et al., 2012).

ITS architektūra turi kelias jungtis (logines, fizines ir komunikacines), tačiau nesukurta ir nepatvirtinta bendra, visame pasaulyje naudojama ITS architektūra. Kiekviena šalis susikuria savitą ITS architektūrą (1.4 pav.).

1.4 paveiksle parodyti ITS architektūros transporto posistemiai (balti stačiakampiai) ir keturios bendrosios komunikacijos nuorodos (ovalai), naudojamos informacijai tarp posistemių keistis. Fiziniai transporto valdymo sistemų ele-

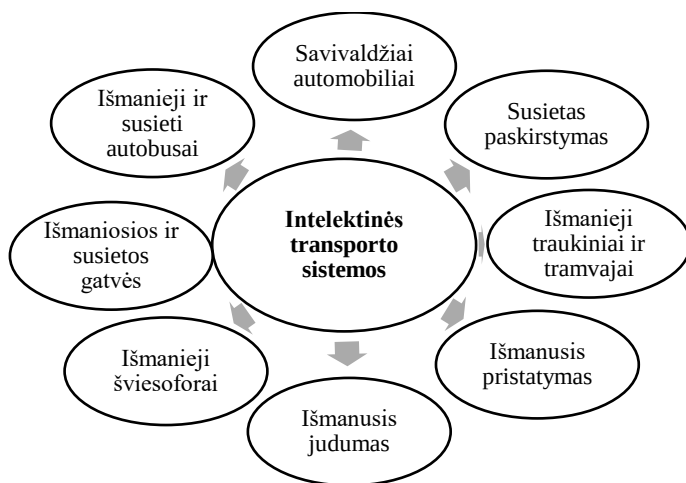
mentai yra sugrupuoti į 4 klases (didesni stačiakampiai): centrai, laukai, transporto priemonės ir keliautojai.



1.4 pav. ITS fizinė architektūra (ITS Architecture For..., 2019)

Fig. 1.4. ITS physical architecture (ITS Architecture For..., 2019)

ITS – tai sistemos, kuriose IRT taikomos kelių transportui, įskaitant infrastruktūrą, TP ir naudotojus, eismui ir judumui valdyti. ITS plėtra veiksmingai mažina spūstis ir avaringumą, kontroliuoja eismą ir sprendžia VT problemas. Boukerche & Coutinho (2019) pateikia tokias ITS bendrąsias dalis: išmanieji ir susieti autobusai, savivaldžiai automobiliai, susietas paskirstymas, išmanieji traukiniai ir tramvajai, išmanusis pristatymas, išmanusis judumas, išmanieji šviesoforai, išmaniosios ir susietos gatvės (1.5 pav.).



1.5 pav. Bendros miestuose taikomų intelektinių transporto sistemų sudedamosios dalys (Boukerche & Coutinho, 2019)

Fig. 1.5. Common components of urban intelligent transport systems (Boukerche & Coutinho, 2019)

Išnagrinėtos JAV (United States Department of..., 2019), Kanados (ITS Architecture For..., 2019), Indijos (Mohan 2008), Kroatijos (Mandžuka et al., 2013), Lenkijos (Modelewski, 2008) ir Lietuvos (Paulauskas et al., 2011) ITS architektūros. Paslaugų kategorijos, sudarančios minėtų šalių ITS architektūrą, pateiktos 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė. Intelektinių transporto sistemų architektūros paslaugų kategorijos skirtingose šalyse

Table 1.2. Categories of intelligent transport systems architecture services in different countries

Kategorija	JAV	Kanada	Indija	Kroatija	Lenkija	Lietuva
1	2	3	4	5	6	7
Viešojo transporto operacijos	+	+	+	+	+	+
Eismo valdymo operacijos	+	+	+	+	+	+
Informacija keliautojui	+	+	+	+	+	+
Transporto priemonės sauga	+	+	+	+	+	+

1.2 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6	7
Krovininio transporto ir komercinių transporto priemonių operacijos	+	+	+	+	+	+
Avarinių atvejų valdymas		+	+	+	+	+
Asmeninė sauga	+		+		+	+
Elektroninis mokesčių rinkimas			+	+	+	+
Oro ir gamtinių sąlygų monitoringas	+			+		+
Duomenų valdymas	+	+				
Priežiūra ir statyba	+	+				
Nacionalinis saugumas				+		+
Automobilių pastatymo valdymas	+					
Palaikymas	+					
Tvarios kelionės	+					

Kai kurios veiklos kategorijos yra minimos visų nagrinėtų šalių ITS, tai „Viešojo transporto operacijos“, „Krovininio transporto ir komercinių transporto priemonių operacijos“. „Eismo valdymo operacijos“, „Informacija keliautojui“, „Transporto priemonės sauga“ ir „Avarinių atvejų valdymas“.

Kiekvienos šalies ITS architektūroje pateikiamas skirtingas kategorijų skaičius – nuo 8 (Kanada, Indija, Lenkija) iki 12 (JAV). Kiekvienai kategorijai priskiriami tam tikri ITS paslaugų paketai. Jie nėra susieti su konkrečiomis technologijomis, bet jų įgyvendinimas priklauso nuo dabartinių technologijų ir produktų rinkos. Kaip ir ITS paslaugų kategorijos, taip ir joms priskiriami ITS paslaugų paketai šalyse skiriasi. Nors nagrinėtų šalių architektūrose kiekvienai kategorijai priskiriami paslaugų paketai nėra visiškai vienodi, tačiau daugelis jų visose šalyse priklauso toms pačioms kategorijoms.

Kategorijai „Viešojo transporto operacijos“ priskiriami tokie paslaugų paketai: „TP sekimas“, „Fiksuoto maršruto operacijos“, „Reakcijos į paklausą operacijos“, „Mokesčių rinkimo valdymas“, „Saugumas“, „VT parko valdymas“, „Informacija apie keliautojus“, „Signalų prioritetas“, „Keleivių skaičiavimas“, Daugiarašio ryšio apsauga“.

Kategorijai „Krovinio transporto ir komercinių transporto priemonių operacijos“ priskiriami tokie paslaugų paketai: „Krovinių administravimas“, „Elektroninės sąskaitos“, „Administraciniai procesai“, „Tarptautinės pasienio elektroninės sąskaitos“, „Važiuojančių transporto priemonių svėrimas“, „Sauga keliuose“, „Transporto priemonių ir krovinių sauga“, „Transporto priemonių priežiūra“, „Pavojingųjų medžiagų gabenimo planavimas ir reagavimas į incidentus“, „Saugumo užtikrinimas kelyje gabenant pavojingas medžiagas“, „Vairuotojo saugos autentifikavimas“, „Krovinių sekimas“, „Krovinių terminalo valdymas“.

Kategorijai „Eismo valdymo operacijos“ priskiriami tokie paslaugų paketai: „Specialių eismo juostų valdymas“, „Eismo informacijos sklaida“, „Regioninis eismo valdymas“, „Eismo įvykių valdymo sistema“, „Eismo prognozė ir paklausos valdymas“, „Daugiarūšių operacijų koordinavimas“, „Kintamo greičio apribojimo vykdymas“, „Pakeliamųjų tiltų valdymas“, „Kelių uždarymo valdymas“, „Išpėjimas apie kliūtis kelyje“.

Kategorijai „Informacija keliautojui“ priskiriami tokie paslaugų paketai: „Informacijos keliautojui transliacija“, „Interaktyvi informacija apie keliautojus“, „Autonominis maršruto valdymas“, „Dinaminis maršruto valdymas“, „Kelionių planavimas“, „Transporto operacijų duomenų sklaida“.

Kategorijai „Transporto priemonės sauga“ priskiriami tokie paslaugų paketai: „Transporto priemonių saugos stebėseną“, „Išpėjimas apie išilginį saugumą“, „Išpėjimas apie šoninį saugumą“, „Išpėjimas apie sankryžos saugumą“, „Apsauga nuo susidūrimo“, „Matomumo pagerinimas vairuotojui“, „Išplėstinė transporto priemonės išilginė kontrolė“, „Išplėstinė transporto priemonės šoninė kontrolė“, „Susidūrimo vengimas sankryžose“, „Automatizuota greitkelių sistema“, „Kooperatinės transporto priemonės saugos sistemos“.

Kategorijai „Avarinių atvejų valdymas“ priskiriami tokie paslaugų paketai: „Eismo įvykių valdymo sistema“, „Skubiosios pagalbos iškvietimas ir išsiuntimas“, „Avarinis maršrutas“, „Išankstinio išpėjimo sistema“, „Reagavimas į nelaimes ir įvykių atkūrimas“, „Evakuacijos ir grįžimo valdymas“.

Kategorijai „Asmeninė sauga“ priskiriami tokie paslaugų paketai: „Kelionių viešuoju transportu saugumas“, „Saugumo gerinimas pažeidžiamiesiems eismo dalyviams“, „Išmaniosios sankryžos“.

Kategorijai „Elektroninis mokesčių rinkimas“ priskiriami tokie paslaugų paketai: „Elektroninė rinkliava“, „Keliautojams teikiamų paslaugų rezervavimas ir apmokėjimas“.

Kategorijai „Oro ir gamtinių sąlygų monitoringas“ priskiriami tokie paslaugų paketai: „Orų duomenų rinkimas“, „Orų informacijos apdorojimas ir platinimas“.

Kategorijai „Duomenų valdymas“ priskiriami tokie paslaugų paketai: „ITS duomenų saugyklos“, „Veiklos stebėjimas“.

Kategorijai „Priežiūra ir statyba“ priskiriami tokie paslaugų paketai: „Techninių ir statybinių transporto priemonių priežiūra“, „Automatinis kelių dangos gydymas“, „Kelių priežiūra žiemą“, „Kelių priežiūra ir statyba“, „Darbo zonos valdymas“, „Darbo zonos saugos stebėjimas“, „Techninės priežiūros ir statybos veiklos koordinavimas“, „Infrastruktūros stebėsena“.

Kategorijai „Nacionalinis saugumas“ priskiriami tokie paslaugų paketai: „Reagavimas į ekstremalias situacijas“, „Avarinės transporto priemonės pirmenybė“, „Įvykio vietos saugos stebėjimas“, „Kelių priežiūros tarnybos patruliai“, „Transporto infrastruktūros apsauga“, „Informacija apie nelaimingų atsitikimų dalyvius“.

Kategorijai „Automobilių pastatymo valdymas“ priskiriami tokie paslaugų paketai: „Automobilių stovėjimo aikštelės valdymas“, „Išmanioji „Park and Ride“ sistema“, „Stovėjimo vietų rezervavimas“.

Kategorijai „Palaikymas“ priskiriami tokie paslaugų paketai: „Transporto priemonių stebėjimas ir valdymas“, „Duomenų paskirstymas“, „Žemėlapių valdymas“, „Vietos ir laiko nustatymas“, „Objekto aptikimas ir registracija“, „ITS komunikacijos“, „Saugos ir įgaliojimų valdymas“, „Vidaus įrangos priežiūra“, „Lauko įrangos priežiūra“.

Kategorijai „Tvarios kelių“ priskiriami tokie paslaugų paketai: „Išmetamųjų teršalų stebėsena ir valdymas“, „Kelio apšvietimo sistemos valdymas“, „Elektros įkrovimo stočių valdymas“, „Specialių eismo juostų valdymas“.

Vystantis transporto poreikiams, tobulėjant technologijoms ir kuriant naujus įrenginius, paslaugų paketai gali keistis. Taip pat gali būti apibrėžti nauji paslaugų paketai.

ITS tikslas – gerinti esamų ir būsimų sistemų ekonominę produktyvumą; taupyti energiją ir saugoti aplinką; gerinti eismo saugumą; didinti keliautojų gerovę; efektyvinti transporto sistemos paslaugas; trumpinti važiavimo laiką ir išlaidas; numatyti eismo judėjimą ir įvykius, galinčius turėti įtakos ateičiai.

1.4. Norminių aktų, strategijų, programų ir plėtros planų, reglamentuojančių išmaniojo miesto plėtrą, apžvalga

Naujos technologijos reikalauja imtis neatidėliotinių veiksmų, kad esama ekosistema būtų pritaikyta prie sparčiai besivystančios intelektinių technologijų pramonės, šios technologijos gali būti diegiamos tik tuo atveju, jei yra sutvarkytas teisinis reguliavimas, pritaikyta infrastruktūra ir kt. Tai yra pasaulinis iššūkis, todėl šalys turėtų bendradarbiauti ir dalintis šioje srityje sukaupta patirtimi bei žiniomis.

Europos ir pasaulio standartizacijos organizacijos dirba rengdamos išmaniojo miesto direktyvas. Galima paminėti šias organizacijas: DIN, CENELEC, ETSI, ISO, ITU-T, IEEE.

ISO / TC 204 apibrėžia bendrus ITS sistemos ir infrastruktūros aspektus: architektūra; ITS duomenų bazių technologija; automatinės TP; elektroninė rinkliava; VT ir pagalbos tarnybos; integruota transporto informacija ir valdymas; keliautojų informacinės sistemos ir kt.

CEN / TC 278 parengia telematikos srities standartus, taikomus kelių eismui ir transportui: TP; susisiekimas tarp TP; susisiekimas tarp TP ir kelių infrastruktūros; eismo ir automobilių stovėjimo aikštelių valdymas; vartotojo mokesčio surinkimas; VT valdymas; vartotojo informacija ir kt.

IEEE 1609 bevielės prieigos transporto priemonėse standartų šeima apibūdina duomenų mainus, saugumą ir paslaugų reklamą tarp TP ir pakelės prietaisų.

2010 m. liepos 7 d. Europos Parlamento ir Tarybos direktyvoje 2010/40/ES dėl kelių transporto ir jo sąsajų su kitų rūšių transportu srities intelektinių transporto sistemų diegimo sistemos teigiama, kad IRT taikymas kelių transporto sektoriuje ir jo sąsajose su kitų rūšių transportu darys gerokai veiksmingesnę ir efektyvesnę aplinkosaugą, įskaitant energijos vartojimo efektyvumą, kelių transporto saugą ir saugumą, visuomenės saugumą ir keleivių bei krovinių judumą, kartu užtikrins vidaus rinkos veikimą ir didesnį konkurencingumą.

Europos Komisija. Baltoji knyga. Bendros Europos transporto erdvės kūrimo planas. Konkurencingos efektyviu išteklių naudojimu grindžiamos transporto sistemos kūrimas (Briuselis, 2011-03-28). Knygoje ITS įvardijama kaip priemonė, padedanti efektyvinti transporto sistemas, mažinti aplinkos taršą ir avaringumą. Pateikiamas technologijų planas ir strategija, kuriuose nurodyta diegti ITS ir kitos kartos daugiarašio eismo valdymo ir informacines sistemas.

Europos Bendrijos Komisija. Žalioji knyga. Nauja mobilumo mieste kultūra (Briuselis, 2007-09-25). Knygoje rašoma, kad judumas turi leisti užtikrinti ekonominę miestų plėtrą, tinkamą miestų gyventojų gyvenimo kokybę ir aplinkos apsaugą. Žaliojoje knygoje pateikti pagrindiniai miestų susisiekimo sistemų vystymo tikslai: spūsčių ir taršos mažinimas, išmaniųjų technologijų diegimas, prieinamumo didinimas, saugos ir saugumo gerinimas.

Europos sąveikiųjų intelektinių transporto sistemų strategija – svarbus žingsnis į sąveikų, susietą ir automatizuotą judumą (Briuselis, 2016-11-30). Strategijoje pabrėžiama: „Transporto priemonių tarpusavio ryšys ir ryšys su infrastruktūra bei kitais eismo dalyviais yra labai svarbus ir siekiant didinti automatizuotų transporto priemonių saugą bei jas visiškai integruoti į bendrą transporto sistemą. [...] 2016 m. balandžio mėn. Amsterdamo deklaracijoje Europos transporto ministrai paragino Europos Komisiją parengti Europos strategiją dėl sąveikiųjų, susietųjų ir automatizuotų transporto priemonių. Ne mažiau svarbu tai, kad pramonė pareiškė savo ketinimą 2019 m. pradėti plačiu mastu diegti transporto priemones, galinčias veikti su C-ITS. Tačiau norint, kad tai įvyktų, būtina skubiai imtis koordinavimo Europos lygmeniu.“

Intelektinių (pažangių) transporto sistemų įgyvendinimo Lietuvoje galimybių studija (Vilnius, 2011-02-15) (Paulauskas et al., 2011). Studijoje pateikiamos prioritetinės ITS plėtros kryptys Lietuvoje: avaringumo mažinimas; efektyvus transporto infrastruktūros naudojimas; viešojo transporto populiarinimas keliant paslaugų kokybę; darni transporto sistemos plėtra; ITS gebėjimų didinimas. Taip pat siūlomi įgyvendinti ITS projektai ir vizija, kaip atrodys Lietuva įgyvendinus projektus.

Nacionalinė susisiekimo plėtros 2014–2022 metų programa, patvirtinta Lietuvos Respublikos Vyriausybės 2013 m. gruodžio 18 d. nutarimu Nr. 1253 (Lietuvos Respublikos Vyriausybės 2014 m. gruodžio 15 d. nutarimo Nr. 1443 redakcija). Programoje nurodoma, kad keleivinio transporto sektoriuje taip pat reikia diegti ITS, kurios gerintų skirtingų transporto rūšių sąveiką. Be to, labai svarbu diegti inovatyvias mokėjimo už kelionę sistemas.

Informacinių sistemų plėtros galimybių studija, 2014 m. Studijoje pabrėžiama, kad privaloma užsitikrinti duomenų mainus su kitomis atsakingomis institucijomis, sukurti priemones reikalingiems duomenims kaupti, apdoroti, viešinti, perduoti ir pan., diegti ITS ir kitas inovacijas, skatinti tarpinstitucinį, viešojo ir privataus sektorių bendradarbiavimą diegiant ITS paslaugas, plėtoti Lietuvos transporto informacinę infrastruktūrą ir siekti, kad ji atitiktų ES valstybių narių transporto informacinę infrastruktūrą.

Ilgalaikė (iki 2025 metų) Lietuvos transporto sistemos plėtros strategija, patvirtinta Lietuvos Respublikos Vyriausybės 2005 m. birželio 23 d. nutarimu Nr. 692. Strategijoje nurodoma, kad, kuriant ekonomiškai efektyvią transporto sistemą, būtina suderinti visų transporto rūšių plėtrą, teikti pirmenybę mažesnę neigiamą poveikį aplinkai darančiam transportui, efektyvinti energinį transporto sektorių, naudoti daugiau alternatyvių ir mažiau aplinką teršiančių degalų, mažinti aplinkos taršą.

Valstybės pažangos strategija „Lietuvos pažangos strategija „Lietuva 2030“, patvirtinta Lietuvos Respublikos Seimo 2012 m. gegužės 15 d. nutarimu Nr. XI-2015. Viena iš strategijos sumanios ekonomikos priemonių – užtikrinti gyventojų judumo poreikį, sukuriant efektyvią integruoto viešojo susisiekimo sistemą, tinkamos kokybės ir šiuolaikišką infrastruktūrą bei plėtojant darnaus judumo iniciatyvas.

Nutarimas dėl Lietuvos Respublikos saugaus eismo automobilių keliais įstatymo Nr. VIII-2043 2, 10 ir 13 straipsnių pakeitimo įstatymo projekto Nr. XIII-391, 2017 m. birželio 14 d. Nr. 447 (Vilnius). Pagrindiniai siūlomi šio įstatymo pakeitimai yra susiję su savivaldžių automobilių integracija į viešąjį eismą.

Lietuvos Respublikos transporto veiklos pagrindų įstatymas Nr. IX-747 (2002-02-28) nustato bendrąją institucijų kompetenciją transporto sektoriaus reguliavimo klausimu. Įstatymo 4 str. 1 d. nustato, kad transporto viešąjį administravimą vykdo Vyriausybė, Susisiekimo ministerija ir savivaldybių institucijos.

jos. Vyriausybė formuoja subalansuotą valstybės transporto politiką ir koordinuoja jos įgyvendinimą. Savivaldybėms ir jos institucijoms palikta teisė formuoti viešojo vietinio transporto veiklos strategiją ir organizuoti jos įgyvendinimą.

Susisiekimą reguliuojančius teisės aktus leidžia susisiekimo ministerija. Savivaldybės privalo laikytis šių teisės aktų, tačiau susisiekimo ministerija jokios kontrolės neatlieka. Pačių savivaldybių priimami teisės aktai bei jų institucijų veikla nėra kontroliuojami valstybės institucijų. Neužtikrintas teisinis reguliavimas bei veiksmų koordinavimas gali turėti neigiamos įtakos ITS diegimui.

1.5. Išmaniojo miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros vertinimo veiksnių ir rodiklių analizė

Siekiant sudaryti išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros vertinimo veiksnius bei rodiklius, nagrinėta mokslinė literatūra, kurioje būtų pateikiami susisiekimo sistemos infrastruktūros vertinimo rodikliai. Mokslinės literatūros ieškota duomenų bazėje „Web of Science“ ir tinklalapyje „Google Scholar“, naudotos paieškos frazės, susijusios su nagrinėjama tema (1.6 pav.).

Nagrinėti mokslinės literatūros šaltiniai (45)													
Web of Science (Clarivate Analytics) duomenų bazė (20)										Tinklalapis Google Scholar (25)			
Aplinkos rodikliai (1)	Išmanioji susisiekimo sistema (3)	Išmanusis transportavimas (2)	Išmaniųjų miestų rodikliai (2)	Tvraus transporto rodikliai (2)	Susisiekimo sistemos indeksai (1)	Išmaniojo transporto palyginimas (2)	Daugiakriteris vertinimas (1)	Išmaniosios susisiekimo sistemos rodikliai (3)	Susisiekimo sistemos rodikliai (3)	Transportavimo reitingavimas (1)	Išmanioji susisiekimo sistema (1)	Išmanieji miestai (2)	Tvraus transporto rodikliai (3)
													Susisiekimo sistemos rodikliai (18)

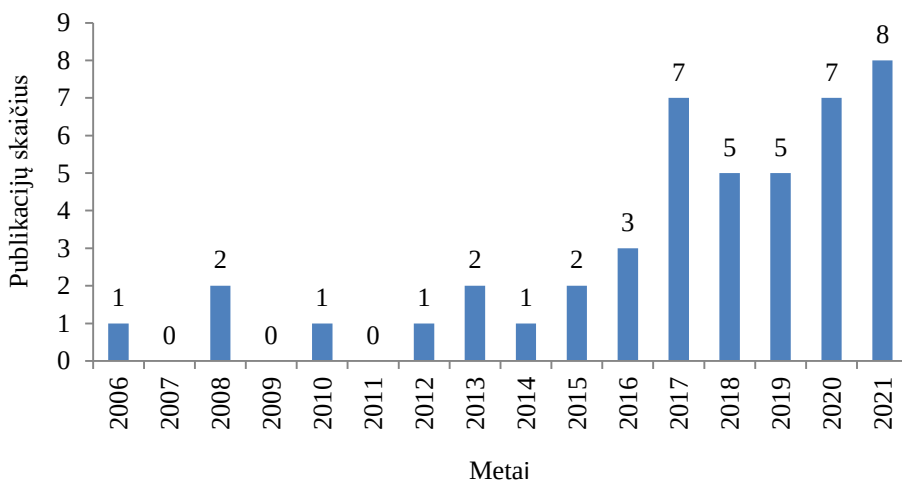
1.6 pav. Literatūros šaltinių, kuriuose pateikiami išmaniojo miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros rodikliai, paieškos šaltiniai ir reikšminiai žodžiai

Fig. 1.6. References and keywords for literature sources that provide smart urban mobility system infrastructure indicators

Ieškota publikacijų, išleistų 2006–2021 m. Buvo rasta 45 šaltiniai: 20 iš jų duomenų bazėje „Web of Science“ ir 25 tinklalapyje „Google Scholar“. Paieškai naudoti įvairūs reikšminiai žodžiai: išmanieji miestai (angl. *Smart cities*), išmaniųjų miestų rodikliai (angl. *Smart cities indicators*), išmanioji susisiekimo sistema (angl. *Smart Mobility*), susisiekimo sistemos rodikliai (angl. *Mobility indicators*), išmaniosios susisiekimo sistemos rodikliai (angl. *Smart mobility indicators*), susisiekimo sistemos indeksai (angl. *Mobility Indexes*), išmanusis transportavimas (angl. *Smart Transportation*), tvaraus transporto rodikliai (angl. *Sustainable transport indicators*), išmaniojo transporto palyginimas (angl. *Benchmarking smart transport*), transportavimo reitingavimas (angl. *Transportation Ranking*), daugiakriteris vertinimas (angl. *Multicriteria Evaluation*), aplinkos rodikliai (angl. *Environmental indicators*). Duomenų bazėje „Web of Science“ šaltiniai buvo rasti pagal 10 skirtingų reikšminių žodžių, o „Google Scholar“ tinklalapyje – pagal penkis.

Pagal tai, koks skaičius reikšminių žodžių panaudotas šaltiniams rasti, galima spręsti, kad bendrų terminų susisiekimo sistemos infrastruktūros rodikliams sudaryti arba miestams lyginti nėra.

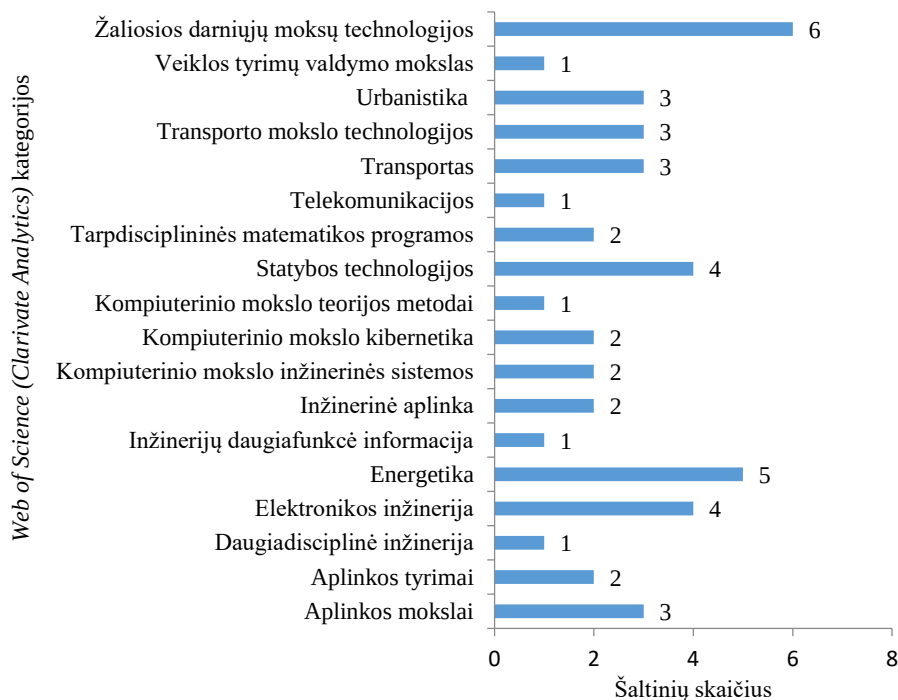
Pagal išleidimo metus galima spręsti, kad susidomėjimas išmaniųjų miestų susisiekimo sistemos infrastruktūra didėja. Daugiausia (8) publikacijos rastos 2021 m., po 7 – 2020 ir 2017 m., po 5 – 2018 ir 2019 m. (1.7 pav.).



1.7 pav. Disertacijoje nagrinėtų publikacijų, kuriose pateikiami išmaniojo miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros rodikliai, skaičius pagal išleidimo metus

Fig. 1.7. Number of publications analysed in the dissertation, which provide indicators of the smart urban mobility system infrastructure by year of publication

Duomenų bazėje „Web of Science“ rasti šaltiniai priklauso skirtingoms kategorijoms, dauguma – net kelioms. Dažniausiai pasitaikančios kategorijos: „Žaliosios darniųjų mokslų technologijos“ (6 šaltiniai), „Energetika“ (5), „Statybos technologijos“ ir „Elektronikos inžinerija“ (po 4). 20 duomenų bazėje „Web of Science“ rastų šaltinių priskiriami net 19 kategorijų (1.8 pav.).

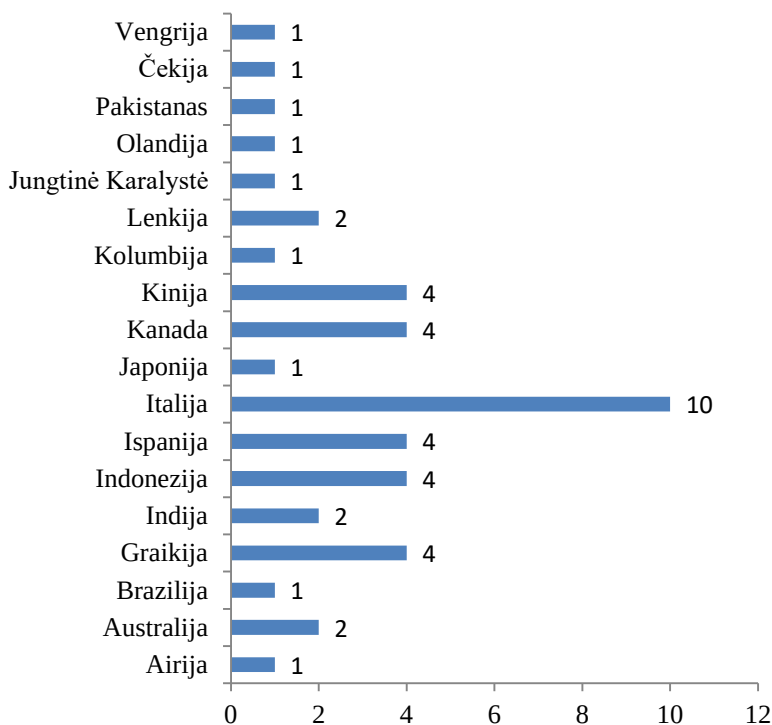


1.8 pav. Disertacijoje nagrinėtų publikacijų, kuriose pateikiami išmaniojo miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros rodikliai, skaičius pagal *Clarivate Analytics* kategorijas

Fig. 1.8. Number of analysed publications in the dissertation, which present the indicators of the smart urban mobility system infrastructure by *Clarivate Analytics* categories

Daugiausia apie miestų susisiekimo sistemos infrastruktūrą rasta Italijos mokslininkų publikacijų – 10, Graikijos, Ispanijos, Indonezijos, Kanados ir Kinijos mokslininkų – po 4 publikacijas (1.9 pav.).

Mokslininkai susisiekimo sistemos infrastruktūros tyrimuose išskiria skirtingus rodiklius. Vieni autoriai juos skirsto į grupes, dažniausiai kai jų yra daug, kiti rodiklių negrupuoja. Pastebėta, kad rodikliai negrupuojami tada, kai tiriami visi išmaniojo miesto aspektai, o ne vien susisiekimo sistemos infrastruktūra. Tačiau kai kurie autoriai negrupuoja rodiklių, tirdami vien susisiekimo sistemos infrastruktūrą.



1.9 pav. Disertacijoje nagrinėtų publikacijų, kuriose pateikiami išmaniojo miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros rodikliai, skaičius pagal šalis

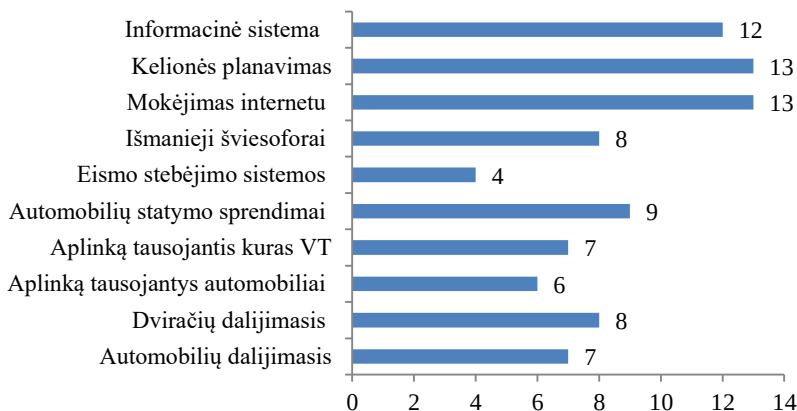
Fig. 1.9. Number of analysed publications in the dissertation, which present the indicators of the smart city mobility system infrastructure by countries

Savelson et al. (2006) mokslinėje publikacijoje apie tvarų transportą Naujojoje Škotijoje, pateikia 20 darnaus transporto rodiklių, suskirstytų į 4 grupes. Appleton et al. (2008) išmanaus susisiekimo rangavimo ataskaitoje pateikia 17 išmaniosios transporto politikos rodiklių, suskirstytų į 4 grupes. T. Litman (2008) straipsnyje apie tvarios susisiekimo sistemos rodiklius, pateikia 30 rodiklių rinkinį, suskirstytą į 9 grupes. Castillo & Pitfield (2010) straipsnyje apie tvaraus transporto rodiklių nustatymo ir parinkimo metodiką pateikia 20 rodiklių, susijusių su tarša ir saugumu, prieiga ir informacija. Marletto & Mameli (2012) mokslinėje publikacijoje apie procedūras, kaip atrinkti tvaraus judumo mieste rodiklius, pateikia sudarytą tvaraus judumo rodiklių rinkinį, kurį sudaro 13 rodiklių, suskirstytų į 3 grupes. Carli et al. (2013) siūlo išmaniojo miesto veiklos rodiklių klasifikavimo sistemą, susidedančią iš 9 rodiklių. Jiang et al. (2013) siekiant įvertinti viešojo transporto paslaugas Kinijos miestuose, pateikia 26

darnaus miesto susisiekimo sistemos plėtros rodiklius, suskirstytus į 6 grupes. Debnath et al. (2014) siūlo išsamią ir praktišką sistemą, kuria remiantis būtų galima palyginti miestų susisiekimo sistemų išmanumą, pagal 21 rodiklį, suskirstytą į 3 grupes. Boselli et al. (2015) pateikia 16 rodiklių, suskirstytų į 3 grupes, rinkinį, taikant daugiakriterį sprendimų priėmimo metodą išmaniosios susisiekimo sistemos vertinimui. Sureshchandra et al. (2016) pateikia integruotą išmaniojo miesto projektavimą veikiančių veiksnių vertinimo sistemą, susidedančią iš 6 rodiklių. Benevolo et al. (2016) pateikia 52 pažangaus judumo rodiklius, kaip dalį išmanaus miesto rodiklių. Straipsnyje ištirtas IRT vaidmuo palaikant pažangų judumą, savo poveikiu darantį įtaką gyvenimo kokybei ir visuomenei. Rodikliai suskirstyti į 5 grupes. Garau et al. (2016) aprašo metodiką, kaip įvertinti susisiekimo sistemą Kaljario mieste, ir siūlomi veiksmai, kurių būtų galima imtis, atsižvelgiant į tarptautinę geriausią transporto praktiką. Metodika susideda iš 18 rodiklių, suskirstytų į 6 grupes. Sdoukopoulos et al. (2017) pateikia 16 darnaus judumo mieste rodiklių, kuriuos galima įvertinti naudojant socialinės žiniasklaidos duomenis. Tafidis et al. (2017) pateikia veiksmingą ir išsamią rodiklių sistemą kaip susisiekimo sistemos vertinimo priemonę, susidedančią iš 81 rodiklio. Rodikliai suskirstyti į 8 grupes. Pinna et al. (2017) tyrime pateikia rodiklius, skirtus Italijos miestų susisiekimo sistemos išmanumui įvertinti, siekiant suprasti, kaip miestai vadovavosi naujomis ES gairėmis. Rodikliai suskirstyti į 4 grupes. Yadav et al. (2017) pateikia 30 išmaniosios susisiekimo sistemos rodiklių, suskirstytų į 7 grupes, devynių išmaniųjų miestų vertinimui, naudojantis turimų atvirų mobilumo duomenų rinkiniu. Costa et al. (2017) pateikia 22 rodiklius, suskirstytus į 7 grupes miesto viešojo transporto vertinimui. Girardi & Temporelli (2017) pateikia išmaniojo miesto tvarumo vertinimo metodiką, susidedančią iš 6 rodiklių. Lopez-Carreiro & Monzon (2018) pateikia metodiką, kuri remiasi kiekybinių rodiklių, vadinamų išmaniojo susisiekimo indeksu, nustatymu. Metodikos pagrindą sudaro 16 rodiklių, suskirstytų į 4 grupes. Reiber & Huang (2018) pateikia 12 rodiklių, suskirstytų į 2 grupes, Šanchajaus ir Berlyno miestų išmaniųjų strategijų, kurių tikslas – lyderiauti šalyje ar net žemyne, tyrimui. Battarra et al. (2018a) tiria išmaniųjų susisiekimą Italijos didmiesčiuose. Lyginamajai analizei naudoja 28 rodiklius ir 3 veiksnus. Battarra et al. (2018b) pateikia išmaniojo judumo priemonių vyresnio amžiaus žmonėms vertinimą. Vertinimui atliekamas pagal 27 rodiklius, kurie suskirstyti į 7 grupes. Balducci & Ferrara (2018) pateikia 28 rodiklius suskirstytus į 3 kategorijas, siekiant sudaryti išmanumo taksonomiją. Boukerche & Coutinho (2019) pateikia 6 išmaniosios susisiekimo sistemos ateities tyrimų kryptis. Alexopoulos et al. (2019) straipsnyje apžvelgia išmaniųjų miestų plėtrą savivaldybės veiklos srityse. Pasiūlyta išmaniųjų miestų plėtros taksonomija, susidedanti iš 12 rodiklių. Li et al. (2019) darbe pateiktas tyrimas, kuriuo įvertinta ir išanalizuota 35 Kinijos išmaniųjų miestų raida. Susisiekimo sistemos vertinimas susideda iš 4 rodik-

lių. Farooq et al. (2019) pateikia greitojo geležinkelių transporto planų daugiakriterinį įvertinimą, į metodiką įtraukiant AHP metodą, pagal 8 rodiklius. Orłowski & Romanowska (2019) tyrime pateikia 16 išmaniosios susisiekimo sistemos rodiklių, suskirstytų į 4 grupes. Nagy et al. (2020) darbe apžvelgė išmaniųjų miestų susisiekimo sistemą bei jos vykdomų paslaugų kokybės elementus. Tyrime naudojama 17 rodiklių, suskirstytų į 3 grupes. A. Sojda (2020) straipsnyje rašo apie pasirinktų miestų vertinimą naudojant TOPSIS metodą. Susisiekimo sistemos vertinimui pateikia 6 rodiklius. Sunardi et al. (2020) savo moksliniame straipsnyje pateikia Banjarmasin miesto išmaniosios susisiekimo sistemos pasirengimo lygio tyrimą. Tyrime naudojami 5 rodikliai. Adiyarta et al. (2020) tyrime sudarė išmaniojo miesto rodiklių rinkinį, kurį sudaro 43 rodikliai, suskirstyti į 8 kategorijas. Susisiekimo sistemos tyrimui skirti 7 rodikliai. A. L. Chao (2020) pasiūlė 14 kategorijų ir 48 rodiklių struktūrą, kuri lengvai yra pritaikoma vykdant pagrindinius tvaraus miesto aspektus, kur 8 rodikliai priskirti susisiekimo sistemos kategorijai. Sharifi et al. (2020) publikacijoje išnagrinėtos išmanaus miesto rodiklių įtraukimo į tvarumo mastą vertinimo priemonės. Susisiekimo sistema vertinama pagal 39 rodiklius, suskirstytus į 6 veiksnus. K. Ogrodnik (2020) pasiūlė 43 išmaniojo miesto rodiklius, prieinamus viešojoje statistikoje. Išmaniosios susisiekimo sistemos vertinimui skirti 5 rodikliai. Nagy et al. (2020) tyrime apžvelgti išmanieji miestai bei išmaniojo mobilumo ir išmaniojo mobilumo paslaugų kokybės elementai. Miesto keleivinio transporto sistemų veikla aprašoma naudojant 6 veiksnus ir 16 rodiklių. C.A. Raskeyn (2021) susisiekimo sistemos vertinimui išskyrė 11 rodiklių, suskirstytų į 4 veiksnus. Paiva et al. (2021) pateikia išmaniosios susisiekimo sistemos trijų lygių hierarchinę vertinimo sistemą. Primame lygyje 6 rodikliai, antrame – 17 ir trečiame – 6. Kristiningrum (2021) pateikia išmaniojo miesto vertinimo rodiklius, iš jų 14 rodiklių yra skirti susisiekimo sistemai tirti. Quiroga et al. (2021) publikacijoje analizuoja dabartinę išmaniosios susisiekimo sistemos padėtį Kolumbijoje ir kituose miestuose (Madridas – Ispanija, Lisbona – Portugalija, Paryžius – Prancūzija) pasinaudojant 13 kriterijų, suskirstytų į 4 veiksnus. D. Kusumawardani (2021) atlieka išmaniojo susisiekimo greitaisiais autobusais tyrimą, panaudodami 14 rodiklių, suskirstytų į 3 grupes. Razmjoo et al. (2021) tiria kliūtis, išskylančias naudojant elektrinius TP pagal 6 rodiklius. A. Nazam (2021) publikacijoje išmaniesiems miestams vertinti siūlo rodiklių rinkinį, kad būtų galima objektyviau ir tiksliau panaudoti vertinimo modelius. Susisiekimo sistemai vertinti skirti 7 rodikliai.

Dažniausiai literatūroje pasitaikantys susisiekimo sistemos infrastruktūros rodikliai parodyti 1.10 paveiksle. Tyrimuose naudojamų rodiklių skaičius taip pat yra įvairus ir siekia nuo 4 (Li et al., 2019) ar 6 rodiklių (Boukerche & Coutinho, 2019; Girardi & Temporelli, 2017; Sureshchandra et al., 2016) iki 81 (Tafidis et al., 2017).



1.10 pav. Dažniausiai pasitaikantys susisiekimo sistemos infrastruktūros rodikliai
Fig. 1.10. The most common indicators of the mobility system infrastructure

Atlikus literatūros analizę nustatyta, jog mokslininkai integruoja skirtingus vertinimo rodiklius. Kai kurie autoriai vartoja skirtingai pavadintus tos pačios reikšmės rodiklius. Dažniausiai mokslinėje literatūroje pasitaikantys rodikliai yra „Kelionės planavimas“, „Mokėjimas internetu“, „Informacinė sistema“.

1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Išmanieji miestai yra ateities miestai, kuriuose vykdomiems sprendimams skatinama pasitelkti naujoves ir technologijas. Kuriant išmanųjį miestą daugiausia dėmesio skiriama mokslinėmis ir praktinėmis žiniomis grindžiamai tvariai plėtrai, kuriai reikalingos prognozės ir planavimas. Susisiekimas yra vienas iš svarbiausių šiuolaikinio miesto komponentų.

2. Valstybės konkuruoja siekdamos būti inovacijų lyderės. Yra miestų, kuriuose jau nemažai nuveikta išmanumo srityje – tai Singapūras, Dubajus, Niujorkas, Barselona, Amsterdamas ir kt. Lietuva neatsilieka nuo kitų Europos valstybių išmaniaisiais sprendimais. Vilnius yra vienas iš sparčiausiai sumanumo linkme augančių Rytų Europos miestų.

3. Vienas pagrindinių išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros komponentų – intelektinės transporto sistemos. Atskirose šalyse sudaroma intelektinių transporto sistemų architektūra, kuri, būdama skirtinga, turi daug bendrų bruožų.

4. Išnagrinėjus išmaniojo miesto modelius išskirti šeši aspektai: valdymas, ekonomika, mobilumas, aplinka, žmonės ir gyvenimas. Kiekvieną aspektą api-

būdina daug veiksmų, o kiekvieną veiksmą – rodikliai. Disertacijoje nagrinėjama susisiekimo sistemos infrastruktūra yra viena išmaniojo miesto sudėtinių dalių.

5. Atlikus straipsnių, susijusių su miestų susisiekimo sistemos infrastruktūros išmanumo reitingavimu, analizę nustatyta, jog šia tema publikacijų skaičius auga. 2006–2019 m. laikotarpiu daugiausia straipsnių publikuota 2017 m., šiuo atveju pirmauja Italija. Literatūros analizė rodo, kad net šalys, kurios plačiai tiria miestų transporto ir susisiekimo sistemas, neturi bendro šių sistemų vertinimo modelio.

Remiantis mokslinės literatūros analize formuluojamas disertacijos tikslas ir uždaviniai.

Darbo tikslas – nustatius išmaniosios miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros kompleksinius vertinimo kriterijus, sudaryti hierarchinį vertinimo modelį, daugiakriteriais metodais palyginti miestų išmaniąsias susisiekimo sistemas.

Uždaviniai:

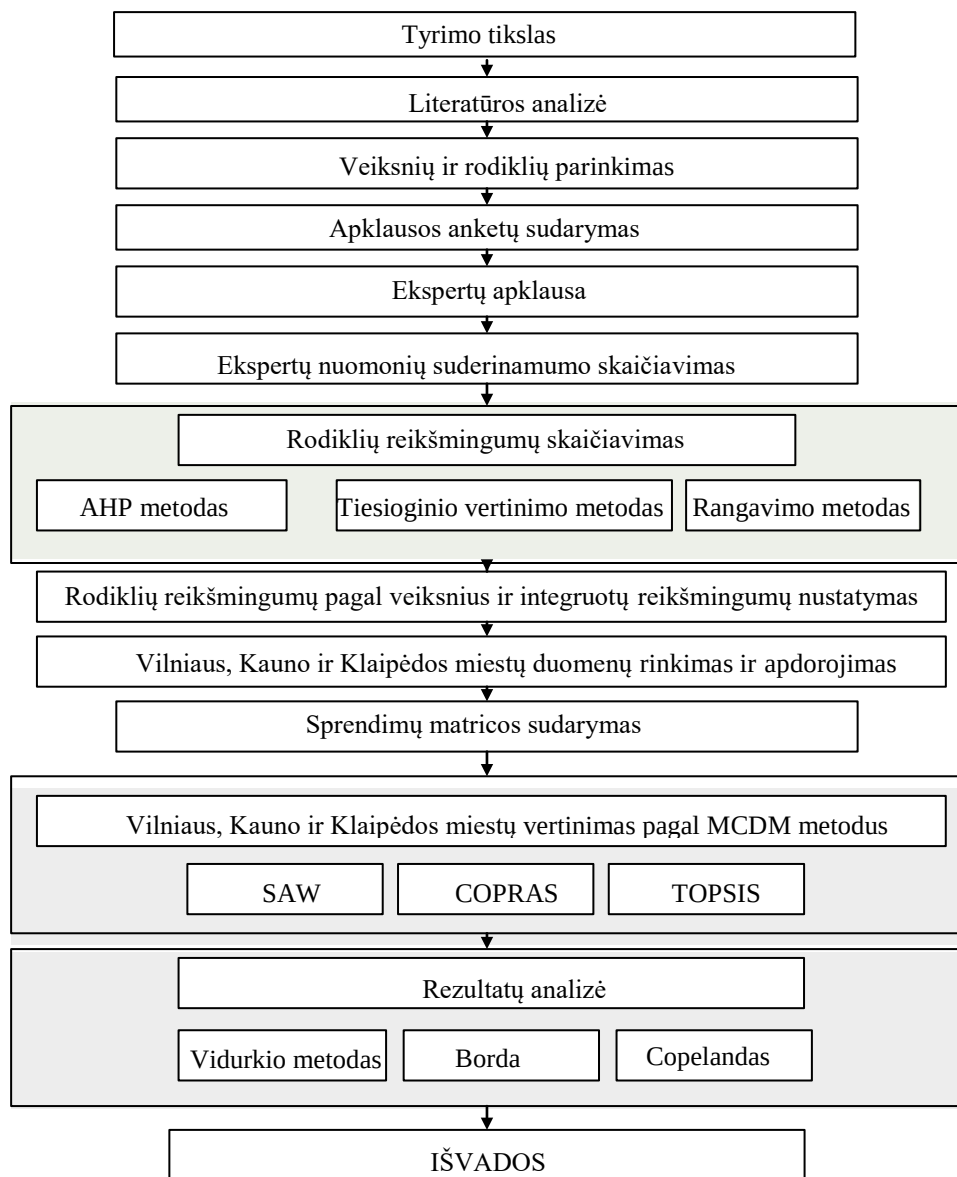
1. Atlikti mokslinės literatūros analizę, susijusią su išmaniųjų miestų raida Lietuvos ir užsienio miestuose.
2. Atlikti mokslinės literatūros, susijusios su išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros reitingavimui naudojamų kriterijų, analizę.
3. Vadovaujantis Europos Komisijos dokumentų rekomendacijomis ir atsižvelgiant į mokslininkų pateikiamus reitingavimo modelius, nustatyti kompleksinio išmaniojo miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros vertinimo veiksmus ir rodiklius.
4. Nustatyti išmaniojo miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros vertinimo veiksmų ir rodiklių skaitinės vertės.
5. Pasinaudojant sudarytu miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros hierarchiniu modeliu, įvertinti miestų kiekybinius bei kokybinius susisiekimo sistemos infrastruktūros parametrus.
6. Atlikti Vilniaus, Kauno, Klaipėdos ir Monrealio miestų daugiakriterį vertinimą pagal atskirus veiksmus – kriterijų (rodiklių) grupes.
7. Daugiakriteriais metodais apskaičiuoti Vilniaus, Kauno, Klaipėdos ir Monrealio miestų susisiekimo sistemos infrastruktūros įverčius ir palyginti miestus tarpusavyje.

Išmaniojo miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros tyrimo hierarchinio modelio sudarymas

Šiame skyriuje parinkti išmaniosios susisiekimo sistemos ir infrastruktūros vertinimo veiksniai ir rodikliai, pateikta tyrimų metodologija, pagal ekspertų apklausos rezultatus nustatytas veiksmų ir rodiklių reikšmingumas, sudarytas hierarchinis vertinimo modelis. Skyriaus tematika paskelbtas straipsnis (Zapolskytė et al., 2020a) ir skaitytas pranešimas tarptautinėje konferencijoje „10th Annual international conference on urban studies & planning“, 1–4 June 2020, Athens, Greece.

2.1. Tyrimų planas

Atliktas Vilniaus, Kauno, Klaipėdos ir Monrealio miestų išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros vertinimas taikant daugiakriterius vertinimo metodus (MCDM). Tyrimo planas pateiktas 2.1 paveiksle.



2.1 pav. Miestų susisiekimo sistemos infrastruktūros tyrimo planas
Fig. 2.1. Smart urban mobility system infrastructure research plan

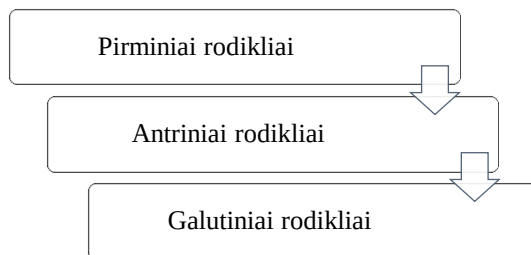
2.2. Išmaniojo miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros vertinimo veiksnių bei rodiklių parinkimas

ES prioritetas – išmanusis, netaisus ir susietas transportas. Šis prioritetas pasirinktas kuriant tarpusavyje susijusią visas transporto rūšis apimančią sistemą, kurioje žmonės, TP ir transporto infrastruktūra nuolat veiksmingai sąveikautų.

EK baltojoje knygoje pagrindinė miestų transporto plėtros kryptis – transporto ekologiškumo didinimas ir transporto poveikio aplinkai mažinimas. Pagal šio strateginio dokumento nuostatas miestuose daug dėmesio turi būti skiriama VT, alternatyviomis kuro rūšimis (elektra, vandeniliu, gamtinėmis dujomis) varomų TP parko didinimui.

EK žaliojoje knygoje rašoma, kad judumas turi užtikrinti ekonominę miestų plėtrą, tinkamą miestų gyventojų gyvenimo kokybę ir aplinkos apsaugą. Žaliojoje knygoje pateikti pagrindiniai miestų susisiekimo sistemos vystymo tikslai: spūsčių ir taršos mažinimas, IT diegimas, prieinamumo didinimas, saugos ir saugumo gerinimas.

Išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros vertinimo rodikliams parinkti buvo naudojami nagrinėtose mokslinėse publikacijose pateikti rodikliai. Jie buvo parenkami pagal hierarchinę sistemą (2.2 pav.), susidedančią iš trijų lygių.



2.2 pav. Vertinimo rodiklių parinkimo hierarchinė struktūra
Fig. 2.2. Hierarchical structure of evaluation indicators selection

Dauguma rodiklių ne kartą buvo paminėti mokslinėje literatūroje. Pirmiausia buvo suskaičiuotas pirminių rodiklių skaičius – 599. Pirminiai rodikliai – tai rodikliai, rasti mokslinėse publikacijose, nepriklausomai nuo jų pasikartojimo. Buvo suvienodinti tą pačią reikšmę turinčių rodikliams pavadinimai. Pasikartojantys rodikliai buvo pašalinti paliekant po vieną. Gautas antrinių rodiklių rinkinys – 194.

Galutinis rodiklių rinkinys buvo sudarytas vadovaujantis Europos Komisijos dokumentų rekomendacijomis. Taip pat buvo organizuojami susitikimai su ekspertais, turinčiais mokslinės ir/arba darbo patirties susisiekimo sistemos infrast-

ruktūros srityje. Siekiant sukurti modelį, kurį būtų galima pritaikyti ne tik Lietuvoje bet ir užsienyje, buvo vedamos diskusijos apie atitinkamų rodiklių svarbą ir apie tai, kaip konkretūs rodikliai paveiks rezultatus esant skirtingiems miestų dydžiams, klimatinėms sąlygoms, VT rūšims ir kt. Galiausiai buvo atrinkti 22 rodikliai. Pagal ekspertų pastabas ir rekomendacijas, rodikliai buvo suskirstyti į penkias grupes (veiksnius) (2.1 lentelė).

2.1 lentelė. Išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros veiksniai

Table 2.1. Smart mobility system infrastructure factors

Žymuo	Veiksny
A	Kelionių motorinėmis transporto priemonėmis ir spūsčių mažinimo priemonės
B	Taršos mažinimo priemonės
C	Kelionių saugumo užtikrinimo ir avaringumo mažinimo priemonės
D	Eismo valdymo ir informacijos priemonės
E	Išmaniosios infrastruktūros priemonės

Kelionių motorinėmis transporto priemonėmis ir spūsčių mažinimo priemonės – tai priemonės, galinčios mažinti automobilių skaičių ir spūstis gatvėse.

Taršos mažinimo priemonės – tai priemonės, tiesiogiai susijusios su teršalų, išmetamų į aplinką, nebuvimu arba mažinimu.

Kelionių saugumo užtikrinimo ir avaringumo mažinimo priemonės – tai priemonės, susijusios su žmonių saugumu VT arba peronuose, pėsčiųjų ir dviratinkų saugumu, taip pat didinančios eismo saugumą gatvėse.

Eismo valdymo ir informacijos priemonės – tai eismo valdymo ir informacijos apie kelius ir eismą priemonės.

Išmaniosios infrastruktūros priemonės – tai inžineriniai infrastruktūros statiniai ir įrenginiai.

Priklausomai nuo to, kokiam veiksniai priskiriami rodikliai, suteiktas rodiklio žymuo (2.2 lentelė). Veiksniui A priskirtų rodiklių žymenys yra A1, A2, A3, A4, A5, veiksniai B – B1, B2, B3, B4, veiksniai C – C1, C2, C3, C4, veiksniai D – D1, D2, D3, D4 ir veiksniai E – E1, E2, E3, E4, E5.

Dalijimosi automobiliais sistema leidžia žmonėms pasiskolinti automobilius. Išmaniųjų įrenginių programėlėje vartotojas mato laisvus automobilius ir gali juos rezervuoti. Pasinaudojus automobiliu, jį galima palikti bet kurioje aptarnavimo zonos vietoje.

2.2 lentelė. Išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros rodikliai**Table 2.2.** Smart mobility system infrastructure indicators

Žymuo	Rodikliai
1	2
A1	Dalijimasis automobiliais (Garau et al., 2016; Balducci & Ferrara, 2018; Battarra et al., 2018a, 2018b; Girardi & Temporelli, 2017; Reiber & Huang, 2018; Benevolo et al., 2016)
A2	Dalijimasis dviračiais (Garau et al., 2016; Balducci & Ferrara, 2018; Battarra et al., 2018a, 2018b; Girardi & Temporelli, 2017; Reiber & Huang, 2018; Benevolo et al., 2016; Alexopoulos et al., 2019)
A3	Dalijimasis nedidelės galios elektrinėmis transporto priemonėmis (Benevolo et al., 2016)
A4	Pavėžėjimas (Benevolo et al., 2016; Battarra et al., 2018a, 2018b)
A5	„Park and Ride“ sistema (Balducci & Ferrara 2018, Benevolo et al. 2016, Tafidis et al. 2017)
B1	Alternatyvaus kuro ir atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimas viešajam transportui (Balducci & Ferrara, 2018; Benevolo et al., 2016; Carli et al., 2013; Appleton et al., 2008; Lopez-Carreiro & Monzon, 2018; Tafidis et al., 2017)
B2	Aplinką tausojantys automobiliai (Balducci & Ferrara, 2018; Battarra et al., 2018a; Benevolo et al., 2016; Carli et al., 2013; Neirotti et al., 2014; Petrova-Antonova & Ilieva, 2018; Tafidis et al., 2017)
B3	Modernūs automobilių statymo sprendimai (Girardi & Temporelli, 2017; Wibowo & Grandhi, 2015; Debnath et al., 2014; Reiber & Huang, 2018; Benevolo et al., 2016; Alexopoulos et al., 2019; Macedo et al., 2017; Surreshchandra et al., 2016; Orlowski & Romanowska, 2019)
B4	Išmetamųjų teršalų matavimas ir mažinimas (Debnath et al., 2014; Benevolo et al., 2016)
C1	Išmaniosios pėsčiųjų ir dviračių perėjos (Alexopoulos et al., 2019; Battarra et al., 2018b; Macedo et al., 2017)
C2	Išmaniosios greičio mažinimo priemonės (Benevolo et al., 2016; Mohmmmed & Osman, 2017; Tafidis et al., 2017)
C3	Eismo stebėjimo sistemos (Wibowo & Grandhi, 2015; Debnath et al., 2014; Battarra et al., 2018b; Mohmmmed & Osman, 2017)
C4	Savivaldės transporto priemonės (Benevolo et al., 2016; Boukerche & Coutinho, 2019)

2.2 lentelės pabaiga

1	2
D1	Centralizuotos šviesoforų valdymo sistemos (Balducci & Ferrara, 2018; Battarra et al., 2018a; Garau et al., 2016; Benevolo et al., 2016; Boukerche & Coutinho, 2019; Alexopoulos et al., 2019; Orłowski & Romanowska, 2019; Petrova-Antonova & Ilieva, 2018)
D2	Transporto priemonių ryšys tarpusavyje, su infrastruktūra ir valdymo centrais (Battarra et al., 2018a; Wibowo & Grandhi, 2015; Debnath et al., 2014)
D3	Informacija, kelionės planavimas ir mokėjimas internetu (Balducci & Ferrara, 2018; Battarra et al., 2018a; Battarra, et al. 2018b; Reiber & Huang, 2018; Li et al., 2019; Alexopoulos et al., 2019; Orłowski & Romanowska, 2019; Petrova-Antonova & Ilieva, 2018; Lopez-Carreiro & Monzon, 2018)
D4	Informacinė sistema gatvėse (Balducci & Ferrara, 2018; Battarra et al., 2018a, 2018b; Reiber & Huang, 2018; Alexopoulos et al., 2019; Orłowski & Romanowska, 2019; Garau et al., 2016; Petrova-Antonova & Ilieva, 2018; Lopez-Carreiro & Monzon, 2018; Sureshchandra et al., 2016)
E1	Specialios eismo juostos (Battarra et al., 2018a; Benevolo et al., 2016)
E2	Riboto eismo zonos (Balducci & Ferrara, 2018; Battarra et al., 2018a, 2018b; Benevolo et al., 2016)
E3	Elektrinių transporto priemonių įkrovimo prieigos (Balducci & Ferrara, 2018; Girardi & Temporelli, 2017; Benevolo et al., 2016; Petrova-Antonova & Ilieva, 2018)
E4	Išmaniosios gatvių dangos
E5	Išmanusis gatvių apšvietimas (Balducci & Ferrara, 2018; Reiber & Huang, 2018; Battarra et al., 2018b)

Dalijimosi dviračiais sistema leidžia žmonėms pasiskolinti dviračius iš nuomos punkto ir grąžinti jį kitame, toje pačioje sistemoje esančiame nuomos punkte. Išmaniųjų telefonų žemėlapių programos rodo netoliese esančius dviračius ir atvirus nuomos punktus.

Dalijimosi nedidelės galios elektrinėmis transporto priemonėmis sistema leidžia žmonėms pasiskolinti elektrinius paspirtukus, dviračius ir kt. Naudodamiesi mobiliąja programėle naudotojai mato žemėlapyje nedidelės galios elektrinių transporto priemonių buvimo vietą.

„Park and Ride“ sistema teikia vairuotojams informaciją apie aikštelėje esančias laisvas vietas ir alternatyvų tolesnės kelionės būdą, VT arba specialaus autobuso tvarkaraščius ir laiką. „Park and Ride“ aikšteles tiksliausiai statyti prie įvažiavimų į miestą, įrengiant VT galinius punktus arba prie greitojo miesto VT maršrutų.

Alternatyvaus kuro ir atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimas viešajam transportui – tai kuro, alternatyvus iškastiniam: elektra, suskystintosios dujos, metanas, vandenilis, biodyzelinas, kuro elementai, naudojimas.

Aplinką tausojantys automobiliai – tai elektra varomi, vandeniliniai automobiliai ir kiti, naudojantys alternatyvų kurą.

Modernūs automobilių statymo sprendimai – tai automatizuotos automobilių statymo aikštelės arba aikštelės su įrengta nukreipimo sistema ir vietos aikštelėje rezervavimas.

Išmetamųjų teršalų matavimo ir mažinimo sistema naudoja pažangius jutiklius, kad stebėtų užteršto oro zonas ir kontroliuotų prieigą prie jų. Pvz., kai per daug užterštas oras, tuneliuose įjungiamos ventiliavimo sistemos.

Išmaniosiose pėsčiųjų ir dviračių perėjose įrengta aparatūra aptinka pėsčiuosius ir įjungia ant kelio sumontuotas šviesos plokštes bei vertikalias plokštes abiejose kelio pusėse. Gali būti sumontuota lazerinė STOP juosta (juosmens lygmeniu) arba STOP siena vairuotojams, įspėjanti, kad perėjoje yra žmonių. Suformuojamos 2 m aukščio šviečiančios raudonos užtvartos su žmonių siluetais. Pagal jutiklių duomenis valdomi dviračių eismo signalai, sukuriama žaliosios bangos.

Išmaniosios greičio mažinimo priemonės pagrįstos tuo, kad automatinės greičio mažinimo sistemos jutikliai gatvėse aptinka kada automobilių skaičius viršija nustatytas greičio ribas ir automatiškai mažina greičio ribą. Greičio pažeidėjams kelio dangoje gali būti sumontuotos išmaniosios eismo duobutės, kurios nedaro žalos tvarkingų eismo dalyvių automobiliams.

Eismo stebėjimo sistemos padeda sukurti saugią aplinką keleiviams, vairuotojams ir pagalbiniam personalui. Jutikliais stebima transporto, stočių, automobilių stovėjimo aikštelių aplinka ir prireikus generuojami pavojaus signalai.

Savivaldėse transporto priemonėse instaliuota įranga seka aplinką, kelio ženklus, šviesoforų signalus ir aplink esančią teritoriją. Sistema suteikia informacijos vairuotojams, padeda saugiau vairuoti. Kai kuriuose ruožuose galimas ir autonominis vairavimas.

Centralizuotos šviesoforų valdymo sistemos – tai išmanieji šviesoforai, kurie gerina eismo sąlygas VT, suteikia prioritetus sankryžose, sudaro prioritetinius maršrutus specialiajam transportui (greitosios medicinos pagalbos automobiliams, gaisrinėms).

Transporto priemonių ryšys tarpusavyje, su infrastruktūra ir valdymo centrais – tai „Vehicle-to-everything“ (V2X) sistema, kuriai priklauso „Vehicle-to-vehicle“ (V2V) ir „Vehicle-to-infrastructure“ (V2I) technologijos, fiksuojančios galimas kliūtis, padedančios jų išvengti, perspėjančios apie jas eismo dalyvius.

Informacija, kelionės planavimas ir mokėjimas internetu – tai mobiliosios programėlės, padedančios vartotojams pasirinkti norimą kelionę pagal laiką ir patogumą viena ar keliomis transporto rūšimis bei sumokėti už kelionę.

Informacinė sistema gatvėse suteikia informaciją keliautojams apie eismą. Prie stotelių įrengtos švieslentės realiuoju laiku informuoja eismo dalyvius apie VT eismo situaciją. Kintamieji informacijos ženklai praneša vartotojams apie įvykius gatvėse, transporto vėlavimus, maršruto pakeitimus ir t. t. Informaciniuose ekranuose rodoma vairuotojams aktuali informacija – oro ir kelio dangos temperatūra, oro taršos rodikliai bei pranešimai apie eismo spūstis.

Specialiosmis eismo juostosmis gali važiuoti tik TP, atitinkančios juostos žymėjimo reikalavimus (autobusai, 4+, EV, taksi). Išmaniosiose specialiose juostose gali būti įrengti jutikliai, kurie fiksuotų pažeidėjus – naudojama ANPR sistema.

Išmaniosios riboto eismo zonos fiksuoja į zoną įvažiuojančius automobilius. Jei sistema konkretaus automobilio neranda duomenų bazės sąraše, pagal kurį leidžiama įvažiuoti į zoną, skiriama bauda.

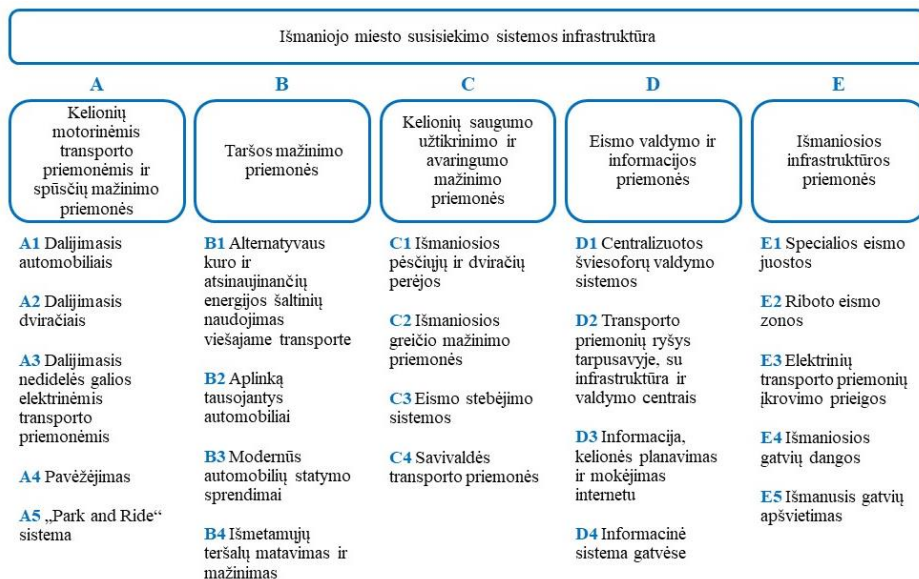
Elektrinių transporto priemonių įkrovimo prieigos – tai EV įkrovimo elementų užpildymo stotelės ir kitos išmaniosios EV įkrovimo priemonės.

Išmaniosios gatvių dangos – tai šviečiančios, šildomos, tirpdančios ledą, įkraunančios EV ir t. t. kelių dangos.

Išmaniojo gatvių apšvietimo kontrolė veikia pagal klimatinės sąlygas, paros laiką, eismo intensyvumą ir kt. Pagrindinis šios sistemos privalumas – centruotai galima valdyti visus prie sistemos prijungtus šviestuvus, keisti nuotoliniu būdu apšvietimą, gauti informaciją apie šviestuvų gedimus, kelio dangą, eismo sąlygas.

Pasirinkus vertinimo veiksnius ir rodiklius, sudaryta išmaniojo miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros hierarchinio vertinimo modelio struktūra (2.3 pav.).

Išmaniojo miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros vertinimo struktūra susideda iš 5 veiksnių, kurie apibrėžti kaip atitinkamų priemonių rinkinys. Kiekvienas rodiklis pagal įtaką miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros išmanumui yra priskirtas konkrečiam veiksnui, tačiau tai nereiškia, kad konkreti priemonė turės įtakos tik vienam veiksnui. Kai kurios išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros priemonės turi įtakos keliems veiksniams. Kaip pavyzdys gali būti rodiklis „Park and Ride“ sistema. Šis rodiklis turi įtakos net trims veiksniams, tokiems kaip „Kelionių motorinėmis transporto priemonėmis ir spūsčių mažinimo priemonės“, „Taršos mažinimo priemonės“, „Išmaniosios infrastruktūros priemonės“. Tokių rodiklių, kurie gali turėti įtakos daugiau nei vienam veiksnui yra ir daugiau, todėl buvo vedamos diskusijos su ekspertais apie atitinkamų rodiklių svarbą kiekvienam veiksnui ir apie tai, kaip tikslinga suskirstyti rodiklius.



2.3 pav. Išmaniojo miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros priemonių hierarchinio vertinimo modelio struktūra

Fig. 2.3. Structure of the hierarchical evaluation model of smart urban mobility system infrastructure

2.3. Išmaniojo miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros vertinimo metodai

Sprendžiant tvarios inžinerijos problemas svarbus įrankis yra daugiakriterės analizės metodai (MCDM) (Zavadskas et al., 2020). Yra daug daugiakriterės analizės metodų: AHP, ARAS, SAW, COPRAS, TOPSIS, PROMETHEE, EDAS, ELECTRE, VIKOR, DEMATEL ir kt. Kyla klausimas – kuris metodas tinkamiausias konkrečioms uždaviniais spręsti. Geriausio daugiakriterės analizės metodo nustatymas visada keldavo daug ginčų ir nesibaigiančių diskusijų. Zavadskas et al. (2018) atliko MCDM metodų analizę, kuri parodė, kad AHP ir TOPSIS yra tarp žinomiausių. Tačiau nėra vieno geriausio MCDM metodo, kuris garantuotų tikslų vertinimą (Bielinskas et al., 2018).

Sudėtingiems uždaviniais spręsti, kai susiduriama su dideliais informacijos kiekiais, tikslesnių rezultatų galima gauti naudojant hibridinį MCDM metodą (Zavadskas et al., 2016a). Tai metodas, kai problemai spręsti taikomi metodų rinkiniai. Taip galima atlikti dvi užduotis: apskaičiuoti pasirinktų indikatorių reikšmingumus ir integruoti juos į kelių atributų naudingumo funkcijos vertę (Zavadskas et al., 2016b). Derinant su kitais MCDM metodais, AHP metodas yra vienas iš dažniausiai taikomų (Stojčić et al., 2019).

Dauguma šiuo metu žinomų ir taikomų daugiakriterio vertinimo kriterijų svorių nustatymo metodų yra grįsti ekspertiniais vertinimais. Subjektyvių kriterijų svorių nustatymo pagrindą sudaro specialistų ekspertų vertinimai. Atskirų ekspertų nuomonės dažnai nesutampa, o gali būti ir prieštaringos, t. y. skirtis atskirų ekspertų vertinimų kriterijų svarba ir prioritetai.

Taikant ekspertinius metodus svarbu nustatyti rodiklių reikšmingumą, be jo sunku įvertinti tyrimo patikimumą ir alternatyvas. Vertinimai priklauso nuo ekspertų kvalifikacijos, darbo specifikos, suinteresuotumo gauti tam tikrus įvertinimo rezultatus, darbo stažo ir pan. Kriterijų svorius, kaip apibendrintus ekspertų nuomonių vidurkius, galima taikyti daugiakriteriam vertinimui, jei nustatytas ekspertų vertinimų neprieštaringumas, t. y. įrodyta, kad nuomonės yra statistiškai suderintos (Podvezko & Podvezko, 2014).

Skaiciavimo rezultatų patikimumui didinti vienu metu galima taikyti ne vieną MCDM metodą, todėl kriterijų reikšmingumams skaičiuoti naudojami AHP, tiesioginio vertinimo ir rangavimo metodai, o geriausiai alternatyvai nustatyti – SAW, COPRAS ir TOPSIS.

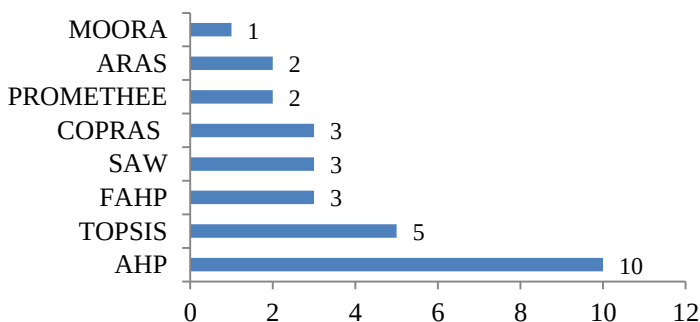
Dažnai skirtingais metodais sprendžiant tą patį uždavinį su identiškais rodikliais, jų reikšmėmis ir reikšmingumais gaunami skirtingi rezultatai. Tokiu atveju siūloma taikyti integruotus MCDM metodus, kai skirtingų MCDM metodų rezultatai analizuojami svertinio vidurkio, Borda ar Copelando metodais, kurie apibendrina išvadas (Damidavičius et al., 2020).

Siekiant ištirti, kokie MCDM metodai dažniausiai taikomi sprendžiant susisieki mo, transporto ir statybos uždavinius, išnagrinėta 20 mokslinės literatūros šaltinių šia tema. Šaltiniuose buvo aprašomi atliekami tyrimai, susiję su transporto arba statybos sritimis.

Broniewicz & Ogirodnik (2020) panaudojo hibridinius MCDM metodus (AHP, FAHP, TOPSIS, PROMETHEE) tiriant aplinkai palankiausio maršruto varianto pasirinkimą, taikant kelių kriterijų metodus. Siwa et al. (2020) taiko AHP ir SAW metodus sprendimų palaikymo sistemoje kuriant automobilių nuomos sistemos programą su rekomendacijomis. Gunawan et al. (2020) atlieka analitinės hierarchijos proceso (AHP) metodo derinimo su paprastu priedų svorių metodu (SAW) tyrimą. Goswami & Mitra (2020) atliko tyrimą kaip pasirinkti geriausią mobilųjų modelių iš įvairių rinkoje esančių alternatyvų, taikant AHP-COPRAS ir AHP-ARAS sprendimų priėmimo metodiką. Montazer et al. (2020) tyrime naudoja hibridinį MCDM metodą Fuzzy AHP – COPRAS oficialios aviakompanijos strateginiam partneriui pasirinkti. Vilutienė et al. (2020) naudoja SAW, ARAS, COPRAS metodus komercinio pastato laikančiųjų konstrukcijų tvarumą vertinančiame tyrime. Ogirodnik (2020) naudoja PROMETHEE metodą, analizuojant didžiausius Lenkijos miestus pagal išmaniojo miesto rodiklius. Damidavičius et al. (2020) taiko daugiakriterius sprendimų priėmimo metodus COPRAS, TOPSIS, ARAS, EDAS, vertinant miesto transporto sistemas ir jų

galimybes tvaraus judumo požiūriu. Milošević et al. (2019) naudoja AHP metodą siekiant ištirti pagrindinius Serbijos išmaniojo miesto koncepcijos kūrimo rodiklius ir įvertinti veiklos prioritetus. Zhu et al. (2019) tyrime naudoja AHP-TOPSIS hibridinį MCDM metodą 187 išmaniųjų Kinijos miestų vertinimui ir reitingavimui. Nosal Hoy et al. (2019) tyrime iliustruoja galimybę taikyti paprastą SAW metodą, siekiant įvertinti Europos Sąjungos ir nacionalinės politikos priemonės antžeminiame transporte. Straipsnyje daugiausia dėmesio skiriama pačiam metodui, nurodant jo lankstumą ir paprastą taikymą. Krmac & Djordjević (2019) tyrime naudoja TOPSIS metodą traukinių valdymo informacinės sistemos poveikio pajėgumų išnaudojimui įvertinti. Erdogan & Kaya (2019) tyrime naudoja FAHP-TOPSIS hibridinį MCDM metodą, pritaikytą greitojo tranzito sistemos vertinimui. Farooq et al. (2019) tyrime naudoja AHP-PROMETHEE II hibridinį MCDM metodą, siekiant nustatyti geriausią naujos greitųjų geležinkelių linijos transporto alternatyvą. Bhandari et al. (2018) tyrime taikomi AHP-PROMETHEE, TOPSIS, MOORA hibridiniai MCDM metodai, siekiant įvertinti kaimo kelius. Boselli et al. (2015) tyrime taikomas AHP metodas įvertinant veiksnius, kurie nusako išmaniojo mobilumo paslaugas. Podvezko et al. (2014) darbe atlieka mokslinį AHP metodo pritaikymą tiriant transporto sistemos elementų tarpusavio ryšį; įvertinant tarpusavio ryšių įtaką kelių eismo saugumui; įvertinant keleivių vežimo geležinkeliais paslaugų kokybę. Castillo & Pitfield (2010) naudoja AHP metodą tiriant tvaraus transporto rodiklių nustatymui.

Daugumoje nagrinėtų mokslinių straipsnių skaičiavimai atliekami hibridiniais MCDM metodais. 2.4 paveiksle pateikiamas nagrinėtuose straipsniuose taikytų daugiakriterių skaičiavimo metodų dažnumas.



2.4 pav. Daugiakriterės analizės metodų taikymo dažnumas

Fig. 2.4. Frequency of use of multicriteria analysis methods

Iki pat šių dienų vienas populiariausių daugiakriterės analizės metodų yra AHP, kuris dažniausiai taikomas pasirinkus hibridinius MCDM skaičiavimo me-

todus. Antroje vietoje yra TOPSIS metodas, o trečioje COPRAS, SAW ir FAHP. Mažiau populiarūs metodai yra MOORA, ARAS ir PROMETEE.

2.3.1. Rodiklių subjektyvių reikšmingumų nustatymas analitinio hierarchijos proceso (AHP) metodu

Hierarchijos analizės metodą AHP (*Analytic Hierarchy Process*) pasiūlė T. Saaty (Saaty, 1980). AHP yra plačiausiai taikomas vertinant įvairius transporto projektus, susijusius su organizaciniais, technologiniais, aplinkos ir infrastruktūros sprendimais. Jis yra ypač naudingas, nes padeda išskaidyti sudėtingą problemą į sudedamąsias dalis ir naudojimosi paprastumą (Turcksin et al., 2011).

Atliekant vertinimą šiuo metodu, Saaty siūlo naudoti penkių (1–3–5–7–9) arba devynių balų skalę (1–2–3–4–5–6–7–8–9) (2.3 lentelė).

2.3 lentelė. Vertinimo skalė (Saaty, 1980)

Table 2.3. Rating scale (Saaty, 1980)

Svarbos lygis	Aprašymas
1	Kriterijai vienodai svarbūs
3	Vienas kriterijus truputį svarbesnis už kitą
5	Vienas kriterijus daug svarbesnis už kitą
7	Vienas kriterijus labai daug svarbesnis už kitą
9	Vienas kriterijus nepalyginti svarbesnis už kitą
2, 4, 6, 8	Tarpinės reikšmės

AHP metodas leidžia poromis palyginti atskirus rodiklius (kriterijus), suteikiant jiems svarbą vienas kito atžvilgiu. AHP metodas paprastas tuo, kad ekspertams yra lengviau palyginti kriterijus tarpusavyje po du, o ne visus iš karto. Metoda išmanančiam ekspertui nesudėtinga palyginti kriterijus.

Metodo pagrindas yra porinio lyginimo kvadratinė matrica P . Visus kriterijus ekspertai lygina tarpusavyje R_i ir R_j ($i, j = 1, \dots, m$), m – kriterijų skaičius. Vertinimo matricos P elementai p_{ij} traktuojami kaip kriterijų R_i ir R_j svorių santykiai:

$$p_{ij} = \frac{\omega_i}{\omega_j}, (i, j = \overline{1, m}). \quad (2.1)$$

Šis santykis parodo i -os priemonės R_i ir j -os priemonės R_j tarpusavio svarbą.

Matrica P yra atvirkštinė simetrinė („reciprocal“), t. y. $p_{ij} = 1/p_{ji}$. Matricos P elementai yra skaičiai nuo $p_{ij} = 1$, kai abiejų lyginamų kriterijų reikšmingumai tiriamo reiškinių atžvilgiu yra vienodi. Šiuo atveju visi pagrindinės įstrižainės elementai $p_{ii} = 1$ ($i = 1, 2, \dots, m$), nes kriterijus lyginamas pats su savimi. Kitu atveju p_{ij} reikšmė iki 9 priskiriama pagal apibrėžimus, nurodytus 2.4 lentelėje.

Eksperto vertinamų kriterijų porinio lyginimo kvadratinė matrica atrodo taip:

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\omega_1}{\omega_1} & \frac{\omega_1}{\omega_2} & \cdots & \frac{\omega_1}{\omega_m} \\ \frac{\omega_2}{\omega_1} & \frac{\omega_2}{\omega_2} & \cdots & \frac{\omega_2}{\omega_m} \\ \frac{\omega_3}{\omega_1} & \frac{\omega_3}{\omega_2} & \ddots & \frac{\omega_3}{\omega_m} \\ \frac{\omega_m}{\omega_1} & \frac{\omega_m}{\omega_2} & \cdots & \frac{\omega_m}{\omega_m} \end{pmatrix}. \quad (2.2)$$

Ekspertai, lygindami po du tiriamo objekto kriterijus, suteikia svarbos lygius, pagal 2.4 lentelėje pateiktą tarpusavio svarbos intensyvumo aprašą. Patogu iš pradžių objekto kriterijams suteikti rangus ir svarbiausią kriterijų lyginti su antru pagal svarbą, trečiu pagal svarbą ir t. t., o pabaigoje – su paskutiniu (m -tuoju) pagal svarbą (užpildoma svarbiausio kriterijaus eilutė iš sveikųjų skaičių) (Podvezko, Sivilevičius, 2013). Paskui tokia pat seka lyginamas antras pagal svarbą kriterijus ir visi likę kriterijai (užpildoma antro pagal svarbą kriterijaus eilutė iš $m-1$ sveikųjų ir vieno trupmeninio skaičiaus) ir t. t.

Labai svarbus yra eksperto užpildytos lyginimo matricos suderinamumas, rodantis pildymo logikos neprieštarumą. Ne visada pavyksta teisingai užpildyti matricą. Būtina lyginimo matricos suderinamumo sąlyga yra jos elementų svarbumo tranzityvumas. Jei elementas A yra svarbesnis už elementą B, o elementas B – už elementą C, elementas A yra svarbesnis už elementą C. Užpildytas matricas, kurios šios sąlygos netenkina, būtina ištaisyti arba tyrime nenaudoti.

Suderinamumo sąlygą galima patikrinti dauginant matricą P iš stulpelio vektoriaus svorių, t. y. transponuotos eilutės $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^T$:

$$P\omega = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\omega_1}{\omega_1} & \frac{\omega_2}{\omega_1} & \cdots & \frac{\omega_m}{\omega_1} \\ \frac{\omega_1}{\omega_2} & \frac{\omega_2}{\omega_2} & \cdots & \frac{\omega_m}{\omega_2} \\ \frac{\omega_1}{\omega_3} & \frac{\omega_2}{\omega_3} & \ddots & \frac{\omega_m}{\omega_3} \\ \frac{\omega_1}{\omega_m} & \frac{\omega_2}{\omega_m} & \cdots & \frac{\omega_m}{\omega_m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_m \end{pmatrix}. \quad (2.3)$$

Yra sprendžiamas tikrinės reikšmės ir tikrinio vektoriaus uždavinys:

$$P\omega = \lambda_{\max}\omega. \quad (2.4)$$

Porinio palyginimo matricos P svoriai ω_i yra tikrinio vektoriaus, atitinkančio didžiausią tikrinę reikšmę (angl. *largest eigenvalue*) $\lambda_{\max}$, normalizuotos reikšmės, kurių suma lygi vienetui: $\sum_{i=1}^m \omega_i = 1$.

Kriterijų svorių ω_i skaičiuojami nustatant porinio lyginimo matricos elementų p_{ij} sandaugos geometrinius vidurkius:

$$\omega_i = \frac{\sqrt[m]{\prod_{j=1}^m p_{ij}}}{\sum_{i=1}^m \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m p_{ij}}} \quad (i = 1, 2, \dots, m). \quad (2.5)$$

Porinio lyginimo matricos suderinamumui nustatyti skaičiuojama didžiausia tikrinė reikšmė $\lambda_{\max}$:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{\sum_{j=1}^m p_{ij} \omega_j}{\omega_i}. \quad (2.6)$$

AHP metodas gali būti naudojamas atskirų ekspertų įvertinimų nuoseklumui (atitikčiai) nustatyti, apskaičiuojant lyginimų nuoseklumą ir atitikties indeksą. Vertinimas poromis gali būti laikomas gana patikimu tik tuo atveju, jei ekspertų sprendimai sutampa. Todėl statistiškai apdorojant ekspertų duomenis turėtų būti nustatytas atitikties indeksas. Kiekvienos ekspertų užpildytos matricos suderinamumo laipsnį galima nustatyti apskaičiavus suderinamumo indeksą (angl. *the compatibility index, C.I.*) ir suderinamumo santykį (angl. *the compatibility ratio, C.R.*). Saaty (1980) suderinamumo indeksą apibrėžia kaip santykį, išreikšiamą šia formule:

$$C.I. = \frac{(\lambda_{\max} - m)}{(m-1)}. \quad (2.7)$$

Kuo mažesnė apskaičiuojama suderinamumo indekso reikšmė, tuo labiau yra suderinta matrica, o idealiu atveju $C.I. = 0$.

Matricos P suderinamumo laipsnis gali būti nustatomas palyginant vertinimo matricos apskaičiuotą suderinamumo indeksą $C.I.$ su tokios pat eilės atsitiktiniu indeksu $R.I.$, pateiktu 2.4 lentelėje.

2.4 lentelė. Nuo matricos eilės priklausančio atsitiktinio indekso $R.I.$ reikšmės (Saaty, 1980)

Table 2.4. The matrix-dependent random index $R.I.$ meanings (Saaty, 1980)

Matricos eilė	3	4	5	6	7	8	9	10
$R.I.$	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Konkrečios matricos apskaičiuoto suderinamumo indekso $C.I.$ ir atsitiktinio indekso vidurkio $R.I.$ santykis vadinamas suderinamumo santykiu ir vertina matricos suderinamumo laipsnį:

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (2.8)$$

Pagal Saaty (1980), jeigu apskaičiuotas suderinamumo santykis $C.R.$ yra mažesnis už 0,1 laikoma, kad matrica yra suderinta. $C.R. \leq 0,1$.

Toliau kriterijų svoriai ω_i suskaičiuojami kaip visų ekspertų AHP svorių aritmetiniai vidurkiai:

$$\omega_i = \frac{\sum_{j=1}^p \omega_{ij}}{p} \quad (2.9)$$

2.3.2. Rodiklių subjektyvių reikšmingumą nustatymas tiesioginio vertinimo ir rangavimo metodais

Taikant tiesioginio kriterijų svorių nustatymo metodą, kiekvieno eksperto visų vertinimų svorių suma turi būti lygi vienetui (arba 100 %) (Podvezko & Podvezko, 2014). Kriterijų svoriai tiesioginio vertinimo pagrindu suskaičiuojami pagal tokią formulę:

$$Q_m = \frac{\sum_{i=1}^p c_{ij}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^p c_{ij}} \quad (2.10)$$

Ekspertinio rangavimo metodu būtina pertvarkyti rangavimą tam, kad geriausia rangui (pirmam) būtų priskirta didžiausia reikšmė. Kriterijų svorių reikšmės apskaičiuojamos pagal formulę (Sivilevičius, 2011):

$$\omega_j = \frac{(m+1) - \bar{R}_j}{\sum_{j=1}^m \bar{R}_j} \quad (2.11)$$

čia $\bar{R}_j$ – kriterijaus rangų vidurkis (norminis).

2.3.3. Ekspertų grupės nuomonių suderinamumo teorinis tyrimas rangų koreliacijos metodu

Vertinimų suderinamumui nustatyti galima taikyti Kendallo konkordancijos koeficientą (Kendall, 1970). Norint apskaičiuoti konkordancijos koeficientą, reikia atlikti rodiklių rangavimą. Rodiklių rangavimą atlieka ekspertai, vertinantys rodiklių svarbą arba jei vertinimai atliekami kitais būdais, rodiklius būtina suranguoti remiantis vertinimo rezultatais. Rangavimas – tai procedūra, kai pačiam svarbiausiam rodikliui suteikiamas rangas, lygus vienetui, antram pagal svarbumą – antras rangas ir t. t. Kiekvieno kriterijaus rangų suma skaičiuojama taip:

$$R_j = \sum_{i=1}^p R_{ij}, \quad (2.12)$$

čia p – ekspertų skaičius; m – kriterijų skaičius.

Nuokrypio nuo vertinimų bendro vidurkio kvadratų suma skaičiuojama šia formule:

$$S = \sum_{j=1}^m (R_j - \bar{R})^2, \quad (2.13)$$

čia R_j – kriterijaus rangų suma; $\bar{R}$ – bendras vidurkis.

Bendras vidurkis $\bar{R}$ skaičiuojamas taip:

$$\bar{R} = \frac{\sum_{j=1}^m \bar{R}_j}{m} = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m R_{ij}}{m}. \quad (2.14)$$

Jei ekspertai vienodai įvertintų visus rodiklių rangus, svarbiausias rodiklis turėtų vieneto rangą ir šių rodiklių visų ekspertų rangų suma būtų lygi p , antrojo pagal svarbumą rodiklio – 2 ir t. t., o paskutinio rodiklio – mp . Šis atvejis ekspertų nuomonių suderinamumo atžvilgiu yra idealus (Podvezko, 2005). Visų p ekspertų m rodiklių rangų suma skaičiuojama pagal formulę:

$$\sum_{j=1}^m R_j = \frac{1}{2} pm(m+1) \quad (2.15)$$

ir bendras vidurkis:

$$\bar{R} = \frac{1}{2} p(m+1). \quad (2.16)$$

Bendras vidurkis priklauso tik nuo p ir m dydžių ir nepriklauso nuo suderinamumo lygio. Naudojant žinomų p natūraliųjų skaičių ir jų kvadratų sumų formules, kvadratų suma S yra lygi:

$$S_{\max} = \frac{p^2 m(m^2-1)}{12}. \quad (2.17)$$

Vidutinis kiekvieno j -ojo kriterijaus rangas $\bar{R}_j$ gaunamas šiam kriterijui suteiktą rangų sumą padalinus iš ekspertų skaičiaus:

$$\bar{R}_j = \frac{\sum_{i=1}^p R_{ij}}{p}. \quad (2.18)$$

Vidutinį rangą $\bar{R}_j$ ir jo konkordancijos koeficientą W patogiu skaičiuoti matrica, kurios struktūra pateikta 2.5 lentelėje.

Kiekvieno kriterijaus rangų R_{ij} sumos $\sum_{i=1}^p R_{ij}$ nuokrypių nuo rangų vidurkio $\bar{R}$ kvadratų sumų galima skaičiuoti pagal formulę:

$$S = \sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1}^p R_{ij} - \frac{1}{2} p(m+1) \right]^2. \quad (2.19)$$

2.5 lentelė. Tiriamo objekto kriterijų rangai ir apskaičiuotos reikšmės, reikalingos Kendalo koreliacijos koeficientui nustatyti

Table 2.5. Criteria ranks of the investigated object and calculated values required to determine the Kendall correlation coefficient

Eksperto kodas		Kriterijaus žymuo ($j = 1, 2, \dots, m$)				
		K_1	K_2	K_3	$\dots$	K_m
$i = 1, 2, \dots, p$	X_1	R_{11}	R_{12}	R_{13}	$\dots$	R_{1m}
	X_2	R_{21}	R_{22}	R_{23}	$\dots$	R_{2m}
	X_3	R_{31}	R_{32}	R_{33}	$\dots$	R_{3m}
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
	X_p	R_{p1}	R_{p2}	R_{p3}	$\dots$	R_{pm}
Rangų suma $\sum_{i=1}^p R_{ij}$		R_1	R_2	R_3	$\dots$	R_m
Vidutinis rangas $\bar{R}_j = \frac{\sum_{i=1}^p R_{ij}}{p}$		$\bar{R}_1$	$\bar{R}_2$	$\bar{R}_3$	$\dots$	$\bar{R}_m$
$\sum_{i=1}^p R_{ij} = \frac{1}{2}p(m+1)$						
$\left[\sum_{i=1}^p R_{ij} = \frac{1}{2}p(m+1) \right]^2$						

Jei S yra reali kvadratų suma, suskaičiuota pagal formulę (2.19), konkordancijos koeficientas apibrežiamas suskaičiuotos S ir atitinkamos didžiausios $S_{\max}$ santykiu:

$$W = \frac{12S}{p^2(m^3 - m)}. \quad (2.20)$$

Konkordancijos koeficientas yra atsitiktinis dydis, todėl reikia apskaičiuoti koeficiento reikšmingumą. Konkordancijos koeficiento reikšmingumas nustatomas pagal formulę:

$$\chi^2 = p(m-1)W = \frac{12S}{pm(m+1)}. \quad (2.21)$$

Pagal pasirinktą reikšmingumo lygmenį (angl. *confidence level*) α , kurio reikšmė praktikoje imama 0,05 arba mažesnė, naudojantis χ^2 (chi kvadrato) Pirsono kriterijumi, esant $\nu = m - 1$ laisvės laipsniui, nustatoma kritinė skirstinio reikšmė $\chi_{kr}^2 = \chi_{\nu, \alpha}^2$. Jei pagal (2.21) formulę apskaičiuota χ^2 reikšmė yra didesnė už $\chi_{\nu, \alpha}^2$, tariama, kad visų ekspertų vertinimai yra suderinti ir kriterijų svorių vidurkiausiai pagrįstai gali būti imami kaip problemos sprendinys.

Grupės ekspertų vertinimo suderinamumą nustatome suskaičiuodami konkordancijos koeficiento W minimalią reikšmę pagal formulę:

$$W_{min} = \frac{\chi^2_{v\alpha}}{p(m-1)}. \quad (2.22)$$

Jei gaunama, kad $W > W_{min}$, patvirtina, kad ekspertų nuomonės yra suderintos.

2.3.4. TOPSIS metodas

TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similiarity to Ideal Solution*) metodą sukūrė Hwang ir Yoon (Hwang & Yoon, 1981). Tai artumo idealiajam taškui nustatymo metodas, pagrįstas koncepcija, kad optimaliausia alternatyva yra mažiausiai nutolusi nuo idealaus sprendinio ir labiausiai nutolusi nuo „neigiamai idealaus“ sprendinio. Jis leidžia taikyti maksimalius (jų geriausios vertės yra didžiausios) ir minimizuoti (jų geriausios vertės yra mažiausios) rodiklius, t. y. minimizuotų rodiklių nereikia pertvarkyti iki maksimalių (Balezentis et al., 2020). TOPSIS metodas yra lengvai suprantamas, skaičiavimas – paprastas. Jis grįstas matematiniais skaičiavimais, todėl plačiai taikomas inžineriniuose mokslų darbuose.

Metode TOPSIS pritaikytas vektorinių duomenų normalizavimas, kuris atliekamas pagal formulę:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}; i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}, \quad (2.23)$$

čia x_{ij} – sprendimų priėmimo matricos nariai; $\bar{x}_{ij}$ – normalizuotos matricos nariai; i – alternatyva; m – alternatyvų skaičius; j – rodiklis; n – rodiklių skaičius

Svertinė normalizuota matrica sudaroma pagal šią formulę:

$$\bar{P}^* = [\bar{P}] \cdot [q], \quad (2.24)$$

čia q – integruotasis reikšmingumas.

Idealiai geriausios ir blogiausios alternatyvos nustatomos šiomis formulėmis:

$$a^+ = \{[(\max_i \bar{x}_{ij} | j \in J), (\min_i \bar{x}_{ij} | j \in J')]/i = \overline{1, m}\} = \{a_1^+, a_2^+, \dots, a_n^+\}; \quad (2.25)$$

$$a^- = \{[(\min_i \bar{x}_{ij} | j \in J), (\max_i \bar{x}_{ij} | j \in J')]/i = \overline{1, m}\} = \{a_1^-, a_2^-, \dots, a_n^-\}, \quad (2.26)$$

čia a^+ – idealiai geriausia alternatyva; a^- – idealiai blogiausia alternatyva; J – rodiklių, kurių didesnės reikšmės yra geresnės, indeksų aibė; J' – rodiklių, kurių mažesnės reikšmės yra geresnės, indeksų aibė.

Atstumų tarp lyginamųjų ir idealiai geriausių bei blogiausių alternatyvos skaičiuojamos taip:

$$L_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\bar{x}_{ij} - a_j^+)^2}; i = \overline{1, m}; \quad (2.27)$$

$$L_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\bar{x}_{ij} - a_j^-)^2}; i = \overline{1, m}, \quad (2.28)$$

čia L_i^+ – atstumas tarp lyginamosios ir idealiai geriausios alternatyvos; L_i^- – atstumas tarp lyginamosios ir idealiai blogiausios alternatyvos.

Alternatyvos santykinis atstums iki idealaus skaičiuojamas pagal šią formulę:

$$K_i = \frac{L_i^-}{L_i^+ + L_i^-}, i = \overline{1, m}, \quad (2.29)$$

čia K_i – alternatyvos santykinis atstumas iki idealaus.

2.3.5. SAW metodus

SAW (*Simple Additive Weighting*) metodas – tai paprastasis svorių sudėjimo metodas, vienas iš paprastesnių ir plačiai taikomų. Metodo taisyklės apibendrina MacCrimmon (MacCrimmon, 1968). Normalizuotos matricos skaičiavimas atliekamas pagal formules, atsižvelgiant į rodiklį (min. ar maks.):

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j^{\max}}; \quad (2.30)$$

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_j^{\min}}{x_{ij}}, \quad (2.31)$$

čia x_{ij} – sprendimų priėmimo matricos nariai; $\bar{x}_{ij}$ – normalizuotos matricos nariai; m – alternatyvų skaičius; j – rodiklis; n – rodiklių skaičius; $x_j^{\max}$ – maksimali rodiklio reikšmė; $x_j^{\min}$ – minimali rodiklio reikšmė.

Nustatant varianto racionalumą atitinkami normalizuotos sprendimo matricos nariai dauginami iš rodiklių reikšmingumų ir gautos sandaugos sumuojamos:

$$A = \{A_i | \max_i \sum_{j=1}^n q_i \cdot \bar{x}_{ij} / \sum_{j=1}^n q_j\}, \quad (2.32)$$

čia q_j – integruotasis reikšmingumas.

Racionalaus varianto sandaugų suma bus maksimali.

2.3.6. COPRAS metodas

COPRAS (*COmplex PROportional ASsessment*) metodo principas – santykinis lyginamųjų alternatyvų reikšmingumas, nustatomas pagal juos apibūdinančias teigiamas ir neigiamas savybes. 1996 m. Vilniaus Gedimino technikos universiteto mokslininkai (Zavadskas, Kaklauskas, 1996) sukūrė kompleksinio proporcingo vertinimo metodą COPRAS. Jį autoriai, jų mokiniai ir specialistai (Vilutienė et al., 2020; Damidavičius et al., 2020; Montazer et al., 2020; Goswami & Mitra, 2020) plačiai naudoja vertindami sudėtingus procesus kiekybiniais daugiakriteriais metodais (Zavadskas et al., 2016).

COPRAS metode matrica normalizuojama pagal šią formulę:

$$d_{ij} = \frac{x_{ij} \cdot q_j}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}; i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}, \quad (2.33)$$

čia x_{ij} – sprendimų priėmimo matricos nariai; d_{ij} – normalizuotos matricos nariai; i – alternatyva; m – alternatyvų skaičius; j – rodiklis; n – rodiklių skaičius; q_j – integruotasis reikšmingumas.

Alternatyvas apibūdinančių maksimizuojančių ir minimizuojančių normalizuotų rodiklių sumos skaičiuojamos pagal formules:

$$S_{+j} = \sum_{i=1}^n d_{+ij}; \quad (2.34)$$

$$S_{-j} = \sum_{i=1}^n d_{-ij}. \quad (2.35)$$

Alternatyvų santykinis reikšmingumas (efektyvumas) skaičiuojamas pagal formulę:

$$Q_i = S_{+i} + \frac{S_{-\min} \sum_{i=1}^m S_{-i}}{S_{-i} \sum_{i=1}^m \frac{S_{-\min}}{S_{-i}}}; i = \overline{1, m}, \quad (2.36)$$

čia S_{+i} – maksimizuojanti rodiklio suma; S_{-i} – minimizuojanti rodiklio suma; $S_{\min}$ – mažiausia minimizuojančių rodiklių suma.

Alternatyvų naudingumo laipsnis skaičiuojamas pagal formulę:

$$N_i = \frac{Q_i}{Q_{\max}} \cdot 100 \%, \quad (2.37)$$

čia Q_i – alternatyvos santykinis reikšmingumas; $Q_{\max}$ – didžiausias alternatyvų santykinis reikšmingumas; N_i – alternatyvos naudingumo laipsnis.

2.4. Rodiklių subjektyvių reikšmingumų nustatymas

Pagal 2.3 paveiksle pateikto išmaniojo miesto susisieikimo sistemos infrastruktūros hierarchinio vertinimo modelio struktūrą buvo parengtos penkios apklausos anketos atskirų veiksmų rodikliams įvertinti ir šeštoji anketa – veiksnams įver-

tinti. Kiekvienoje anketoje buvo pateikta po keturis (3 anketos) arba po penkis (3 anketos) klausimus. Toks kriterijų skaičius mažai nukrypsta nuo AHP metodu tinkamiausio kriterijų skaičiaus, kuris yra „septyni plus minus du“ (Saaty, Ozdemir, 2003).

Anketose pateikti rodikliai ir veiksniai paaiškinti ekspertams, kad kiekvienas geriau suprastų jų paskirtį, savybes ir nekiltų prieštaravimų tarp eksperto ir tyrimą atliekančio mokslininko ar tyrėjo nuomonės dėl rodiklių reikšmės. Taip pat ekspertams buvo paaiškinta, kaip teisingai pildyti rangus, atitinkančius, jų manymu, kiekvieno kriterijaus reikšmingumą.

Pasirenkant ekspertus buvo labai svarbu, kad jie išmanytų tiriamo objekto esmę, turėtų praktinės ir mokslinės patirties statybos, transporto ir civilinės inžinerijos srityse. Ekspertai buvo atrenkami griežtai atsižvelgiant į jų kompetenciją: SĮ „Susisiekimo paslaugos“, teikiančios susisiekimo paslaugas Vilniaus mieste, direktorė ir skyrių vadovai (3), Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos (1), Lietuvos Respublikos susisiekimo ministerija (1), VILNIUS TECH Kelių tyrimo instituto darbuotojai, turintys mokslinį laipsnį (3), VILNIUS TECH Aplinkos inžinerijos fakulteto Kelių katedros tyrėjai (5) ir VILNIUS TECH Transporto inžinerijos fakulteto mokslininkai (2). Visi apklausti ekspertai turėjo ne mažesnę kaip 10 metų mokslinio darbo patirtį yra publikavę straipsnių šioje srityje.

Ekspertai buvo apklausti po vieną arba išskirtiniais atvejais mažose grupėse, nes AHP metodas yra gana sudėtingas ir reikalauja tyrėjo paaiškinimo. Kiekvienas ekspertas suteikė kriterijams rangus (svarbiausiam – reikšmę 1, antram pagal svarbą – 2 ir t. t.), veiksmų ir rodiklių reikšmingumus įvertino procentais (iš viso 100 %) ir užpildė porinio lyginimo matricą, reikalingą reikšmingumams skaičiuoti AHP metodu.

Gavus užpildytas porinio lyginimo matricas, buvo patikrintas užpildytos lyginimo matricos suderinamumas, rodantis pildymo logikos neprieštarumą. Radus, kad lyginimo matrica nesuderinta, buvo paprašyta ekspertų matricas pataisyti.

2.4.1. Rodiklių reikšmingumų nustatymas AHP metodu

Gavus kiekvieno eksperto užpildytą kriterijų rangų lentelę ir porinio lyginimo matricą (A priedas) buvo apskaičiuotas tikrinis vektorius ω_i , nustatyti rangai, apskaičiuota didžiausia tikrinė reikšmė $\lambda_{\max}$, suderinamumo indeksas $C.I.$ ir suderinamumo santykis $C.R.$ Užpildytos anketos, kurių suderinamumo santykis $C.R. > 0,1$, pripažintos netinkamomis. 5 ekspertai matricas pataisė. Pabaigoje liko 15 suderintų ir tyrimui tinkamų matricų, kurių rezultatai buvo naudojami reikšmingumams skaičiuoti.

Disertacijoje pateikiama pirmo eksperto E rodiklių matrica ir svarbiausių reikšmių skaičiavimai $\lambda_{\max}$, $C.I.$ ir $C.R.$ (2.6 lentelė).

2.6 lentelė. Eksperto užpildyta porinio palyginimo matrica ir skaičiavimo rezultatai
Table 2.6. Expert-filled pair comparison matrix and calculation result

		$j = 1, 2, \dots, 5$					ω_i	$\sum_{i=1}^5 p_{ij}\omega_i$	$\frac{\sum_{i=1}^5 p_{ij}\omega_i}{\omega_i}$	Rangas (R_i)
		E1	E2	E3	E4	E5				
$i = 1, 2, \dots, 5$	E1	1	1/2	1/7	2	1/4	0,0727	0,3677	5,0077	4
	E2	2	1	1/5	3	1/2	0,1269	0,6442	5,0544	3
	E3	7	5	1	8	2	0,4982	2,5390	5,1100	1
	E4	1/2	1/3	1/8	1	1/5	0,0470	0,2400	5,0203	5
	E5	4	2	1/2	5	1	0,2559	1,2903	5,0690	2
Suma:							1,0000	5,0807	25,2614	
$\lambda_{\max}$							5,0523			
$C. I.$							0,0131			
$C. R.$							0,0117			

2.7 lentelėje pateikiamas apskaičiuotų reikšmių skaičiavimo pavyzdys. Rodiklio E1 svorio koeficientas ω_1 skaičiuojamas pagal 2.5 formulę, kaip p_{1j} reikšmių geometrinis santykis su visų rodiklių (E1, E2, E3, E4, E5) geometrinių vidurkių suma:

$$\omega_i = \frac{\sqrt[m]{\prod_{j=1}^m p_{ij}}}{\sum_{i=1}^m \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m p_{ij}}} =$$

$$\frac{\sqrt[5]{1 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{7} \cdot 2 \cdot \frac{1}{4}}}{\sqrt[5]{1 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{7} \cdot 2 \cdot \frac{1}{4}} + \sqrt[5]{2 \cdot 1 \cdot \frac{1}{5} \cdot 3 \cdot \frac{1}{2}} + \sqrt[5]{7 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 8 \cdot 2} + \sqrt[5]{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{8} \cdot 1 \cdot \frac{1}{5}} + \sqrt[5]{4 \cdot 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 1}} =$$

$$\frac{0,51353}{7,11631} = 0,0722.$$

Taip apskaičiuojamos visų 2.7 lentelės kriterijų ω_i reikšmės ir visų veiksnių ir rodiklių reikšmingumai pagal visus ekspertus (B priedas)

$\sum_{i=1}^m p_{ij} \omega_i$ skaičiuojamas taip: porinio lyginimo matricos (2.7 lentelė) pirmos eilutės E1 rodikliui suteikti svarbos lygiai p_{ij} dauginami iš atitinkamo rodiklio reikšmingumo koeficiento ω_i . Gaunama šių sandaugų suma:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m p_{ij} \omega_i &= p_{11} \cdot \omega_{c1} + p_{12} \cdot \omega_{c2} + \dots + p_{15} \cdot \omega_{c5} = \\ &= 1 \cdot 0,0722 + \frac{1}{2} \cdot 0,1269 + \frac{1}{7} \cdot 0,4982 + 2 \cdot 0,0470 + \frac{1}{4} \cdot 0,2559 = \\ &= 0,3673. \end{aligned}$$

Taip dauginama antra, trečia, ketvirta ir penkta likusių kriterijų eilutės. Pagal formulę (2.6) skaičiuojamas $\lambda_{\max}$:

$$\begin{aligned} \lambda_{\max} &= \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{\sum_{j=1}^m p_{ij} \omega_j}{\omega_i} = \\ &= \frac{1}{5} (5,0077 + 5,0544 + 5,1100 + 5,0203 + 5,0690) = \\ &= \frac{25,2614}{5} = 5,0523. \end{aligned}$$

Apskaičiuojamas porinio lyginimo matricos suderinamumo indeksas pagal formulę (2.7):

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} = \frac{5,0523 - 5}{4} = 0,0131.$$

Iš 2.6 lentelės pasirinkus $R.I.$ reikšmę skaičiuojamas porinio palyginimo matricos suderinamumo santykis pagal (2.8) formulę:

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} = \frac{0,0131}{1,12} = 0,0117.$$

Apskaičiuotas $C.R. = 0,0117 < 0,1$. Todėl galima teigti, kad šis ekspertas, pildydamas porinio palyginimo matricą, buvo nuoseklus ir nepateikė prieštaringų vertinimų.

Pagal pavyzdį, parodytą 2.7 lentelėje, apskaičiuojami kiekvieno eksperto visų rodiklių reikšmingumai taip pat $\lambda_{\max}$, $C.I.$ ir $C.R.$ visoms ekspertų užpildytoms matricoms.

Visi ekspertai, pildydami matricas, buvo nuoseklūs. Prieštaringų vertinimų nėra, nes visi apskaičiuoti $C.R. < 0,1$ (C priedas).

Apskaičiuojami galutiniai veiksnių ir rodiklių reikšmingumai. Jie pagal AHP metodą skaičiuojami išvedant vidurkį iš visų ekspertų gautų kiekvieno veiksnio ir rodiklio reikšmingumų. Apskaičiuoti veiksnių ir rodiklių reikšmin-

gumai toliau naudojami apibendrintų ir integruotų rodiklių reikšmingumui skaičiuoti. Rezultatai surašyti į 2.7 lentelę.

2.7 lentelė. Rodiklių ir veiksnių reikšmingumai, apskaičiuoti AHP metodu

Table 2.7. Significances of indicators and factors calculated using the AHP method

Veiks- niai*	Reikšmingumas	Vieta	Rodikliai**	Reikšmingumas	Vieta
A	0,2645	1	A1	0,1703	4
			A2	0,2163	2
			A3	0,1825	3
			A4	0,0962	5
			A5	0,3347	1
B	0,1505	4	B1	0,3840	2
			B2	0,4359	1
			B3	0,0924	3
			B4	0,0877	4
C	0,2045	3	C1	0,3065	2
			C2	0,3253	1
			C3	0,1664	4
			C4	0,2018	3
D	0,2422	2	D1	0,3936	1
			D2	0,3613	2
			D3	0,1424	3
			D4	0,1026	4
E	0,1383	5	E1	0,3296	1
			E2	0,2137	2
			E3	0,1760	3
			E4	0,1630	4
			E5	0,1177	5

*A – Kelionių motorinėmis transporto priemonėmis ir spūsčių mažinimo priemonės; B – Taršos mažinimo priemonės; C – Kelionių saugumo užtikrinimo ir avaringumo mažinimo priemonės; D – Eismo valdymo ir informacijos priemonės; E – Išmaniosios infrastruktūros priemonės.

**A1 – Dalijimasis automobiliais; A2 – Dalijimasis dviračiais; A3 – Dalijimasis nedidelės galios elektrinėmis transporto priemonėmis; A4 – Pavėžėjimas; A5 – „Park and Ride“ sistema; B1 – Alternatyvus kuro ir atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimas viešajam transportui; B2 – Aplinką tausojantys automobiliai; B3 – Modernūs automobilių statymo sprendimai; B4 – Išmetamųjų teršalų matavimas ir mažinimas; C1 – Išmaniosios pėsčiųjų ir dviračių perėjės; C2 – Išmaniosios greičio mažinimo priemonės; C3 – Eismo stebėjimo sistemos; C4 – Savivaldės transporto priemonės; D1 – Centralizuotos šviesoforų valdymo sistemos; D2 – Transporto priemonių ryšys tarpusavyje, su infrastruktūra ir valdymo centrais; D3 – Informacija, kelionės planavimas ir mokėjimas internetu; D4 – Informacinė sistema gatvėse; E1 – Specialios eismo juostos; E2 – Riboto eismo zonos; E3 – Elektrinių transporto priemonių įkrovimo prieigos; E4 – Išmaniosios gatvių dangos; E5 – Išmanusis gatvių apšvietimas.

AHP metodu apskaičiavus galutinius veiksmų reikšmingumus, gauta, kad, ekspertų bendra nuomone, didžiausią reikšmę turi veiksnys „Kelionių motorinėmis transporto priemonėmis ir spūsčių mažinimo priemonės“ (0,2645), antroje vietoje – „Eismo valdymo ir informacijos priemonės“ (0,2422), trečioje – „Kelionių saugumo užtikrinimo ir avaringumo mažinimo priemonės“ (0,2045), ketvirtoje – „Taršos mažinimo priemonės“ (0,1505). Mažiausią reikšmę, ekspertų nuomone, turi „Išmaniosios infrastruktūros priemonės“ (0,1383).

Lyginant veiksnio „Kelionių motorinėmis transporto priemonėmis ir spūsčių mažinimo priemonės“ rodiklius, didžiausią reikšmę turi rodiklis „„Park and Ride“ sistema“ (0,3347), o mažiausią – „Pavėžėjimas“ (0,0962). Lyginant veiksnio „Taršos mažinimo priemonės“ rodiklius, didžiausią reikšmę turi rodiklis „Aplinką tausojantys automobiliai“ (0,4359), o mažiausią – „Išmetamųjų teršalų matavimas ir mažinimas“ (0,0877). Lyginant veiksnio „Kelionių saugumo užtikrinimo ir avaringumo mažinimo priemonės“ rodiklius, didžiausią reikšmę turi rodiklis „Išmaniosios greičio mažinimo priemonės“ (0,3253), o mažiausią – „Eismo stebėjimo sistemos“ (0,1664). Lyginant veiksnio „Eismo valdymo ir informacijos priemonės“ rodiklius, didžiausią reikšmę turi rodiklis „Centralizuotos šviesoforų valdymo sistemos“ (0,3936), o mažiausią – „Informacinė sistema gatvėse“ (0,1026). Lyginant veiksnio „Išmaniosios infrastruktūros priemonės“ rodiklius, didžiausią reikšmę turi rodiklis „Specialios eismo juostos“ (0,3296), o mažiausią – „Išmanusis gatvių apšvietimas“ (0,1177).

Apskaičiuoti veiksmų ir rodiklių reikšmingumai toliau naudojami apibendrintų ir integruotų rodiklių reikšmingumui skaičiuoti.

2.4.2. Ekspertų grupės nuomonių suderinamumo praktinis tyrimas

AHP metodu apskaičiuotų veiksmų ir rodiklių reikšmingumams ω_i suteikiami rangai R_i . Suteikti rangai naudojami ekspertų nuomonių suderinamumui nustatyti.

ti. Toliau pateikiamas ekspertų nuomonių suderinamumo skaičiavimo pavyzdys pagal rangus E grupei priklausantiems rodikliams ir atsitiktinai parinkto eksperto užpildytos anketos duomenis (2.8 lentelė).

2. 8 lentelė. Ekspertų nuomonių suderinamumo skaičiavimas

Table 2.8. Calculation of expert opinions compatibility

Eksperto kodas		Rodiklio žymuo ($j = 1, 2, \dots, m$)				
		E1	E2	E3	E4	E5
$i = 1, 2, \dots, p$	1	2	3	4	5	6
	X1	4	5	3	2	1
	X2	3	2	5	4	1
	X3	2	1	3	4	5
	X4	5	4	1	3	2
	X5	2	3	1	4	5
	X6	3	1	2	4	5
	X7	5	2	3	4	1
	X8	2	1	3	4	5
	X9	1	2	4	5	3
	X10	1	5	3	4	2
	X11	2	1	3	5	4
	X12	1	3	2	5	4
	X13	1	3	4	5	2
	X14	2	3	4	5	1
	X15	2	1	3	4	5
Rangų suma		36	37	44	62	46
Vidutinis rangas		2,40	2,47	2,93	4,13	3,07
Skirtumas		-9,00	-8,00	-1,00	17,00	1,00
Skirtumo kvadratas		81	64	1	289	1

Kiekvienam j -ajam rodikliui susumuojami visi i -tųjų ekspertų rangai ir apskaičiuojamas vidutinis rodiklio rangas $\bar{R}_j$. Pagal formulę (2.16) apskaičiuojamas bendras vidurkis, kuris priklauso tik nuo rodiklių ir ekspertų skaičiaus, todėl yra pastovus dydis.

$$\bar{R} = \frac{1}{2}p(m+1) = \frac{1}{2} \cdot 15 \cdot (5+1) = 45.$$

Iš kiekvieno rodiklio rangų sumos $\bar{R}_j$ atėmus bendrą rangų vidurkį $\bar{R}$ gaunamas skirtumas. Skirtumo kvadratas gaunamas skirtumą pakėlus kvadratu. Visų rodiklių apskaičiuoti skirtumai ir jų kvadratai surašyti 2.10 lentelėje. Pagal (2.13) formulę skaičiuojamas dydis S :

$$S = \sum_{j=1}^m (R_j - \bar{R})^2 = 81 + 64 + 1 + 289 + 1 = 436.$$

Apskaičiavus skirtumų kvadratų sumą S , galima pagal (2.20) formulę skaičiuoti konkordancijos koeficientą:

$$W = \frac{12S}{p^2(m^3 - m)} = \frac{12 \cdot 436}{15^2(5^3 - 5)} = \frac{5232}{27000} = 0,1938.$$

Pagal (2.21) formulę apskaičiuojamas atsitiktinis dydis χ^2 :

$$\chi^2 = p(m-1)W = \frac{12S}{pm(m+1)} = \frac{12S}{15 \cdot 5(5+1)} = \frac{12 \cdot 436}{450} = 11,627.$$

Šią reikšmę palyginame su Pirsono (chi kvadrato) skirstinio kritine reikšme $\chi_{va}^2 = 9,4877$, kai $v = 5 - 1 = 4$ ir $\alpha = 0,05$. Gauname, kad $\chi^2 > \chi_{va}^2$, todėl galima teigti, kad visų ekspertų nuomonės yra suderintos. Šiam teiginiui patikslinti skaičiuojama mažiausia konkordancijos koeficiento reikšmė pagal formulę (2.22):

$$W_{min} = \frac{\chi_{v\alpha}^2}{p(m-1)} = \frac{9,49}{15(5-1)} = 0,1582.$$

Apskaičiuota $W = 0,1938$ reikšmė yra didesnė už $W_{min} = 0,1582$ reikšmę, todėl galime patvirtinti, kad grupės ekspertų nuomonės suderintos ir kriterijų svorių vidurkiai gali būti toliau naudojami tyrime. Visų tiriamų kriterijų apskaičiuotos konkordancijos koeficiento reikšmės bei mažiausiosios reikšmės pateiktos 2.9 lentelėje.

Akivaizdu, kad pagal apskaičiuotas konkordancijos koeficiento reikšmes ir jų palyginimą su mažiausiosiomis reikšmėmis labiausiai suderintos ekspertų nuomonės yra vertinant veiksnio „Taršos mažinimo priemonės“ rodiklių (B1, B2, B3, B4) reikšmingumą, antroje vietoje – veiksnio „Eismo valdymo ir informacijos priemonės“ (D1, D2, D3, D4), trečioje – „Kelionių saugumo užtikrinimo ir avaringumo mažinimo priemonės“ (C1, C2, C3, C4), ketvirtoje – „Kelionių motorinėmis transporto priemonėmis ir spūsčių mažinimo priemonės“ (A1, A2, A3, A4, A5), penktoje – „Išmaniosios infrastruktūros priemonės“ (A1, A2, A3, A4, A5).

2.9 lentelė. Rodiklių konkordancijos koeficientai ir jų mažiausiosios reikšmės

Table 2.9. Concordance coefficients of indicators and their minimum values

Rodiklių grupė	Konkordancijos koeficiento reikšmė W	Mažiausioji konkordancijos koeficiento reikšmė $W_{\min}$
A, B, C, D, E	0,1724	0,1581
A1, A2, A3, A4, A5	0,1956	0,1581
B1, B2, B3, B4	0,6516	0,1737
C1, C2, C3, C4	0,2090	0,1737
D1, D2, D3, D4	0,4151	0,1737
E1, E2, E3, E4, E5	0,1938	0,1581

Mažiausiai suderintos ekspertų nuomonės, t. y. daugiausia prieštarų vertinimų atsirado vertinant pačių veiksmų (A, B, C, D, E) reikšmingumą susisiekiimo sistemos infrastruktūrai. Pastebėta, kad vertinimui didelę įtaką turėjo ekspertų darbo sritys ar mokslo kryptys.

2.4.3. Rodiklių subjektyvių reikšmingumų nustatymas tiesioginio vertinimo metodu

Pildydami anketas visi penkiolika ekspertų įvertino veiksmų ir kiekvieno veiksmo rodiklių reikšmingumus procentais (iš viso 100 %) (D priedas). Pateikiami veiksmų (A, B, C, D, E) ekspertų tiesioginio vertinimo procentai ir svorio koeficientų nustatymo pavyzdys (2.10 lentelė).

2.10 lentelė. Ekspertų tiesioginio vertinimo matrica

Table 2.10. Experts direct assessment matrix

Eksperto kodas	Veiksmų žymuo				
	A	B	C	D	E
1	2	3	4	5	6
X1	35 %	5 %	20 %	15 %	25 %
X2	30 %	20 %	25 %	15 %	10 %
X3	20 %	10 %	15 %	25 %	30 %
X4	30 %	10 %	20 %	30 %	10 %
X5	27 %	10 %	17 %	39 %	7 %
X6	30 %	10 %	23 %	14 %	23 %

2.10 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6
X7	15 %	30 %	10 %	25 %	20 %
X8	20 %	22 %	16 %	24 %	18 %
X9	20 %	15 %	30 %	20 %	15 %
X10	25 %	10 %	30 %	25 %	10 %
X11	25 %	20 %	30 %	15 %	10 %
X12	22 %	25 %	20 %	18 %	15 %
X13	20 %	10 %	15 %	30 %	25 %
X14	10 %	25 %	20 %	30 %	15 %
X15	25 %	10 %	20 %	30 %	15 %
$\sum_{i=1}^p c_{ij}$	3,5400	2,3200	3,1100	3,5500	2,4800
Subjektyvus reikšmingumas	0,2360	0,1547	0,2073	0,2367	0,1653

Pirmiausia randamos visų ekspertų kiekvieno veiksnio vertinimo c_{ij} sumos. Subjektyvūs reikšmingumai apskaičiuojami pagal (2.10) formulę.

Pateikiamas pavyzdys (2.10 lentelė) A veiksnio subjektyviam reikšmingumui skaičiuoti.

$$Q_m = \frac{3,54}{3,54 + 2,32 + 3,11 + 3,55 + 2,48} = \frac{3,54}{15} = 0,2360.$$

Taip apskaičiuojami visi 2.10 lentelėje esančių veiksmų reikšmingumai. Pagal pateiktą pavyzdį apskaičiuojami rodiklių, suskirstytų į grupes pagal veiksmus, reikšmingumai. Gauti rezultatai surašyti į 2.11 lentelę.

Lyginant veiksnio „Kelionių motorinėmis transporto priemonėmis ir spūsčių mažinimo priemonės“ rodiklius, didžiausią reikšmę turi rodiklis „„Park and Ride“ sistema“ (0,2633), o mažiausią – „Pavėžėjimas“ (0,1380). Lyginant veiksnio „Taršos mažinimo priemonės“ rodiklius, didžiausią reikšmę turi rodiklis „Aplinką tausojantys automobiliai“ (0,3593), o mažiausią – „Modernūs automobilių statymo sprendimai“ (0,1360). Lyginant veiksnio „Kelionių saugumo užtikrinimo ir avaringumo mažinimo priemonės“ rodiklius, didžiausią reikšmę turi rodiklis „Išmaniosios greičio mažinimo priemonės“ (0,3711), o mažiausią – „Eismo stebėjimo sistemos“ (0,1371). Lyginant veiksnio „Eismo valdymo ir informacijos priemonės“ rodiklius, didžiausią reikšmę turi rodiklis „Centralizuotos šviesoforų valdymo sistemos“ (0,3093), o mažiausią – „Informacinė sistema gatvėse“ (0,1773). Lyginant veiksnio „Išmaniosios infrastruktūros priemonės“ rodiklius,

didžiausią reikšmę turi rodiklis „Specialios eismo juostos“ (0,2733), o mažiausią – „Išmanusis gatvių apšvietimas“ (0,1613).

2.11 lentelė. Reikšmingumai, apskaičiuoti tiesioginio vertinimo metodu

Table 2.11. Significances calculated by the direct assessment method

Veiksniai*	Reikšmingumas	Vieta	Rodikliai*	Reikšmingumas	Vieta
A	0,2360	1	A1	0,2020	3
			A2	0,2080	2
			A3	0,1887	4
			A4	0,1380	5
			A5	0,2633	1
B	0,1547	4	B1	0,3520	2
			B2	0,3593	1
			B3	0,1360	4
			B4	0,1527	3
C	0,2073	3	C1	0,3037	2
			C2	0,3711	1
			C3	0,1371	4
			C4	0,1881	3
D	0,2367	2	D1	0,3093	1
			D2	0,3007	2
			D3	0,2127	3
			D4	0,1773	4
E	0,1653	5	E1	0,2733	1
			E2	0,2233	2
			E3	0,1713	4
			E4	0,1707	5
			E5	0,1613	3

*A – Kelionių motorinėmis transporto priemonėmis ir spūsčių mažinimo priemonės; B – Taršos mažinimo priemonės; C – Kelionių saugumo užtikrinimo ir avaringumo mažinimo priemonės; D – Eismo valdymo ir informacijos priemonės; E – Išmaniosios infrastruktūros priemonės.

**A1 – Dalijimasis automobiliais; A2 – Dalijimasis dviračiais; A3 – Dalijimasis nedidelės galios elektrinėmis transporto priemonėmis; A4 – Pavėžėjimas; A5 – „Park and Ride“ sistema; B1 – Alternatyvaus kuro ir atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimas viešajam transportui; B2 – Aplinką tausojantys automobiliai; B3 – Modernūs automobilių statymo sprendimai; B4 – Išmetamųjų teršalų matavimas ir mažinimas; C1 – Išmaniosios pėsčiųjų ir dviračių perėjės; C2 – Išmaniosios greičio mažinimo priemonės; C3 – Eismo stebėjimo sistemos; C4 – Savivaldės transporto priemonės; D1 – Centralizuotos šviesoforų valdymo sistemos; D2 – Transporto priemonių ryšys tarpusavyje, su infrastruktūra ir valdymo centrais; D3 – Informacija, kelionės planavimas ir mokėjimas internetu; D4 – Informacinė sistema gatvėse; E1 – Specialios eismo juostos; E2 – Riboto eismo zonos; E3 – Elektrinių transporto priemonių įkrovimo prieigos; E4 – Išmaniosios gatvių dangos; E5 – Išmanusis gatvių apšvietimas.

Atlikus veiksmų ir rodiklių reikšmingumų skaičiavimus tiesioginio vertinimo metodu, pasirodė, kad didžiausią įtaką, vertinant išmaniąją susisiekimo sistemos infrastruktūrą, turi veiksnys „Kelionių motorinėmis transporto priemonėmis ir spūsčių mažinimo priemonės“ (0,2360), antroje vietoje – „Eismo valdymo ir informacijos priemonės“ (0,2367), trečioje – „Kelionių saugumo užtikrinimo ir avaringumo mažinimo priemonės“ (0,2073), ketvirtoje – „Taršos mažinimo priemonės“ (0,1547) Mažiausią reikšmę, ekspertų nuomone, turi „Išmaniosios infrastruktūros priemonės“ (0,1653).

2.4.4. Rodiklių subjektyvių reikšmingumų nustatymas ekspertinio rangavimo metodu

Ekspertinio rangavimo metodu pirmausia apskaičiuojamas vidutinis visų ekspertų rangas $\bar{R}_j$. Pateikiamas A1, A2, A3, A4, A5 rodiklių reikšmingumų skaičiavimo pavyzdys (2.12 lentelė).

2.12 lentelė. Rodiklių reikšmingumų skaičiavimas ekspertinio rangavimo metodu
Table 2.12. Calculation of indicators significance by expert ranking method

Eksperto kodas		Rodiklio žymuo ($j = 1, 2, \dots, m$)				
		A1	A2	A3	A4	A5
1		2	3	4	5	6
	X1	5	2	1	3	4
	X2	5	2	3	4	1
	X3	3	5	4	2	1
	X4	4	2	1	5	3
	X5	3	4	5	2	1

2.12 lentelės pabaiga

$i = 1, 2, \dots, p$	1	2	3	4	5	6
	X6	3	1	2	4	5
	X7	2	3	4	5	1
	X8	4	2	3	5	1
	X9	1	4	3	5	2
	X10	1	4	5	3	2
	X11	4	2	3	5	1
	X12	4	2	3	5	1
	X13	2	3	1	5	4
	X14	3	4	5	2	1
	X15	3	1	2	4	5
Vidutinis rangas $\bar{R}_j$		3,1333	2,7333	3,0000	3,9333	2,2000
Svorio koeficientas ω_j		0,1911	0,2178	0,2000	0,1378	0,2533

Veiksnių ir rodiklių reikšmingumas skaičiuojamas pagal (2.11) formulę:

$$\omega_{A1} = \frac{(m+1) - \bar{R}_j}{\sum_{j=1}^m \bar{R}_j} = \frac{(5+1) - 3,1333}{3,1333 + 2,7333 + 3,0000 + 3,9333 + 2,2000} = \frac{2,8667}{15} = 0,1911.$$

Tokiu pačiu būdu paskaičiuojami visi veiksmų ir jiems priklausančių rodiklių reikšmingumai (2.13 lentelė).

Atlikus veiksmų ir rodiklių reikšmingumų skaičiavimus ekspertinio rangavimo metodu, pasirodė, kad veiksmų įtaka, vertinant išmaniąją susisiekimo sistemos infrastruktūrą, pagal svarbą yra: „Kelionių motorinėmis transporto priemonėmis ir spūsčių mažinimo priemonės“ (0,2489), „Eismo valdymo ir informacijos priemonės“ (0,2356), „Kelionių saugumo užtikrinimo ir avaringumo mažinimo priemonės“ (0,2044), „Taršos mažinimo priemonės“ (0,1600), o mažiausią įtaką turi „Išmaniosios infrastruktūros priemonės“ (0,1511). Lyginant veiksmo „Kelionių motorinėmis transporto priemonėmis ir spūsčių mažinimo priemonės“ rodiklius, didžiausią reikšmę turi rodiklis „„Park and Ride“ sistema“ (0,2533), o mažiausią – „Pavėžėjimas“ (0,1378).

2.13 lentelė. Veiksnių ir rodiklių reikšmingumai, apskaičiuoti rangavimo metodu**Table 2.13.** Significances of factors and indicators calculated using the ranking method

Veiksniai*	Reikšmingumas	Vieta	Rodikliai**	Reikšmingumas	Vieta
A	0,2489	1	A1	0,1911	4
			A2	0,2178	2
			A3	0,2000	3
			A4	0,1378	5
			A5	0,2533	1
B	0,1600	4	B1	0,3333	2
			B2	0,3467	1
			B3	0,1533	4
			B4	0,1667	3
C	0,2044	3	C1	0,2867	2
			C2	0,3133	1
			C3	0,1933	4
			C4	0,2067	3
D	0,2356	2	D1	0,3333	1
			D2	0,3067	2
			D3	0,2000	3
			D4	0,1600	4
E	0,1511	5	E1	0,2400	1
			E2	0,2356	2
			E3	0,2044	3
			E4	0,1244	5
			E5	0,1954	4

*A – Kelionių motorinėmis transporto priemonėmis ir spūsčių mažinimo priemonės; B – Taršos mažinimo priemonės; C – Kelionių saugumo užtikrinimo ir avaringumo mažinimo priemonės; D – Eismo valdymo ir informacijos priemonės; E – Išmaniosios infrastruktūros priemonės.

**A1 – Dalijimasis automobiliais; A2 – Dalijimasis dviračiais; A3 – Dalijimasis nedidelės galios elektrinėmis transporto priemonėmis; A4 – Pavėžėjimas; A5 – „Park and Ride“ sistema; B1 – Alternatyvaus kuro ir atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimas viešajam transportui; B2 – Aplinką tausojantys automobiliai; B3 – Modernūs automobilių statymo sprendimai; B4 – Išmetamųjų teršalų matavimas ir mažinimas; C1 – Išma-

niosios pėsčiųjų ir dviračių perėjės; C2 – Išmaniosios greičio mažinimo priemonės; C3 – Eismo stebėjimo sistemos; C4 – Savivaldės transporto priemonės; D1 – Centralizuotos šviesoforų valdymo sistemos; D2 – Transporto priemonių ryšys tarpusavyje, su infrastruktūra ir valdymo centrais; D3 – Informacija, kelionės planavimas ir mokėjimas internetu; D4 – Informacinė sistema gatvėse; E1 – Specialios eismo juostos; E2 – Ribotos eismo zonos; E3 – Elektrinių transporto priemonių įkrovimo prieigos; E4 – Išmaniosios gatvių dangos; E5 – Išmanusis gatvių apšvietimas.

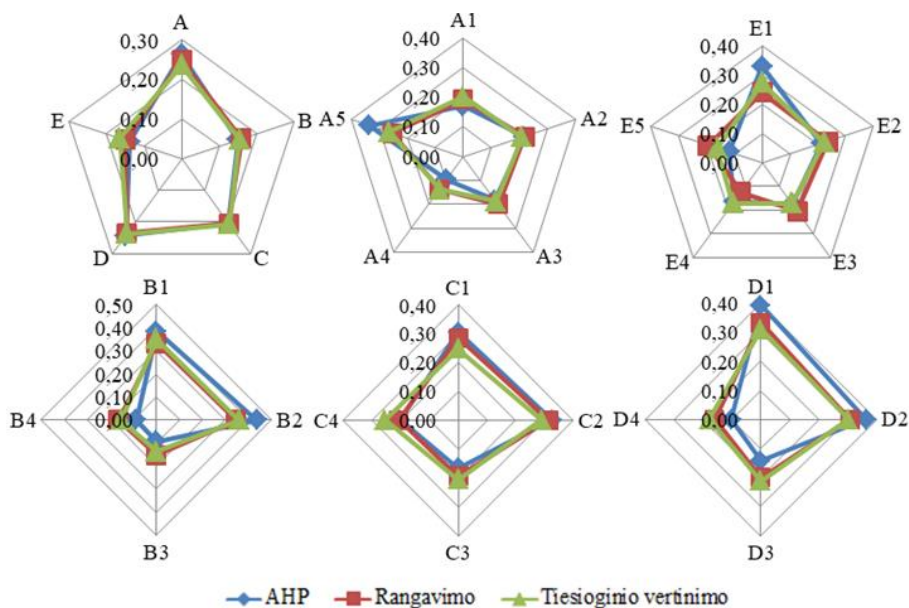
Lyginant veiksnio „Taršos mažinimo priemonės“ rodiklius, didžiausią reikšmę turi rodiklis „Aplinką tausojantys automobiliai“ (0,3467), o mažiausią – „Modernūs automobilių statymo sprendimai“ (0,1533). Lyginant veiksnio „Kelionių saugumo užtikrinimo ir avaringumo mažinimo priemonės“ rodiklius, didžiausią reikšmę turi rodiklis „Išmaniosios greičio mažinimo priemonės“ (0,3133), o mažiausią – „Eismo stebėjimo sistemos“ (0,1933). Lyginant veiksnio „Eismo valdymo ir informacijos priemonės“ rodiklius, didžiausią reikšmę turi rodiklis „Centralizuotos šviesoforų valdymo sistemos“ (0,3333), o mažiausią – „Informacinė sistema gatvėse“ (0,1600). Lyginant veiksnio „Išmaniosios infrastruktūros priemonės“ rodiklius, didžiausią reikšmę turi rodiklis „Specialios eismo juostos“ (0,2400), o mažiausią – „Išmanusis gatvių apšvietimas“ (0,1954).

Skaiciavimo rezultatai toliau naudojami apibendrintų ir integruotų rodiklių reikšmingumams, reikalingiems hierarchiniam modeliui sudaryti, skaičiuoti.

2.5. Išmaniojo miesto susisieikimo sistemos infrastruktūros hierarchinis modelis

2.4 poskyryje skirtingais metodais apskaičiuoti veiksnių ir jiems priklausančių rodiklių reikšmingumai yra nevienodi. Skaiciavimo rezultatai grafiškai pavaizduoti 2.5 paveiksle.

Veiksniams (A, B, C, D, E) suteikti rangai, apskaičiuoti visais trimis būdais, sutampa, nedaug skiriasi ir reikšmingumai. Veiksniams B, C ir D priklausančių rodiklių rangai taip pat sutampa, nors patys reikšmingumai skiriasi. Veiksnių A rodiklių rangai, apskaičiuoti AHP ir rangavimo metodais, sutampa, o tiesioginio vertinimo – skiriasi, taip pat nedaug skiriasi ir reikšmingumai. Veiksnių E visais trimis būdais apskaičiuoti rodiklių rangai skiriasi, taip pat skiriasi ir reikšmingumai. Taigi, apskaičiuoti rodiklių rangai ir reikšmingumai labiausiai skiriasi veiksnio „Išmaniosios infrastruktūros priemonės“ rodikliams.



2.5 pav. Veiksnių ir rodiklių reikšmingumai, apskaičiuoti AHP, reitingavimo ir tiesioginio vertinimo metodais

Fig. 2.5. Significances of factors and indicators calculated using AHP, ranking and direct assessment methods

Apskaičiuotos išmaniojo miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros hierarchinio vertinimo modelio skaitinės vertės, kurios gaunamos vidurkio metodu nustačius apibendrintas veiksnių ir rodiklių reikšmes (2.14 lentelė).

2.14 lentelė. Išmaniojo miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros hierarchinis vertinimo modelis

Fig. 2.14. Hierarchical model of smart city mobility system infrastructure

Veiksniai*	Reikšmingumas	Vieta	Rodikliai**	Reikšmingumas	Vieta
1	2	3	4	5	6
A	0,2498	1	A1	0,1878	4
			A2	0,2140	2
			A3	0,1904	3
			A4	0,1240	5
			A5	0,2838	1

2.14 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6
B	0,1551	4	B1	0,3564	2
			B2	0,3806	1
			B3	0,1272	4
			B4	0,1357	3
C	0,2054	3	C1	0,2806	2
			C2	0,3098	1
			C3	0,1886	4
			C4	0,2211	3
D	0,2386	2	D1	0,3454	1
			D2	0,3229	2
			D3	0,1850	3
			D4	0,1466	4
E	0,1516	5	E1	0,2809	1
			E2	0,2242	2
			E3	0,1839	3
			E4	0,1527	5
			E5	0,1582	4

*A – Kelionių motorinėmis transporto priemonėmis ir spūsčių mažinimo priemonės; B – Taršos mažinimo priemonės; C – Kelionių saugumo užtikrinimo ir avaringumo mažinimo priemonės; D – Eismo valdymo ir informacijos priemonės; E – Išmaniosios infrastruktūros priemonės.

**A1 – Dalijimasis automobiliais; A2 – Dalijimasis dviračiais; A3 – Dalijimasis nedidelės galios elektrinėmis transporto priemonėmis; A4 – Pavėžėjimas; A5 – „Park and Ride“ sistema; B1 – Alternatyvaus kuro ir atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimas viešajam transportui; B2 – Aplinką tausojantys automobiliai; B3 – Modernūs automobilių statymo sprendimai; B4 – Išmetamųjų teršalų matavimas ir mažinimas; C1 – Išmaniosios pėsčiųjų ir dviračių perėjos; C2 – Išmaniosios greičio mažinimo priemonės; C3 – Eismo stebėjimo sistemos; C4 – Savivaldės transporto priemonės; D1 – Centralizuotos šviesoforų valdymo sistemos; D2 – Transporto priemonių ryšys tarpusavyje, su infrastruktūra ir valdymo centrais; D3 – Informacija, kelionės planavimas ir mokėjimas internetu; D4 – Informacinė sistema gatvėse; E1 – Specialios eismo juostos; E2 – Riboto eismo zonos; E3 – Elektrinių transporto priemonių įkrovimo prieigos; E4 – Išmaniosios gatvių dangos; E5 – Išmanusis gatvių apšvietimas.

Apskaičiavus apibendrintas veiksmų ir rodiklių reikšmes pasirodo, kad didžiausią reikšmę išmaniajai susisieikimo sistemos infrastruktūrai turi „Kelionių motorinėmis transporto priemonėmis ir spūsčių mažinimo priemonės“ (0,2498), nedaug atsilieka „Eismo valdymo ir informacijos priemonės“ (0,2382). Mažiausią įtaką turi „Išmanios infrastruktūros priemonės“ (0,1516).

2.6. Antrojo skyriaus išvados

1. Renkantis ekspertus reikia griežtai atsižvelgti į jų kompetenciją – pageidautina ilgametę praktinę ir/ar mokslinę patirtis; gilių žinių turėjimas statybos ir/ar transporto srityse. Ekspertų apklausos metu buvo pastebėta, kad jų nuomonė dažnai priklauso nuo to, kokias pareigas jie užima, dirba viešajame ar privačiajame sektoriuje, į kokias išmaniojo miesto susisieikimo sistemos infrastruktūros temas yra labiau įsigilinę ir pan. Didesnis ekspertų skaičius iš įvairesnių aplinkų leistų atspindėti tikslesnę ir visapusišką ekspertų nuomonę.

2. Siekiant ekspertams suteikti palankias sąlygas profesionaliai vertinti kriterijų svarbą, tikslinga pasirinktus vertinimo kriterijus suskirstyti į grupes sudarant hierarchinę vertinimo struktūrą, nes lygiant iš karto daugiau nei 10 kriterijų prarandamas vertinimo tikslumas, o taikant AHP metodą rekomenduojama vienu metu vertinti ne daugiau kaip 9 kriterijus.

3. Sprendžiant sudėtingus uždavinius, kuriems panaudojami dideli informacijos kiekiai, siūloma taikyti hibridinius MCDM metodus, t. y. jų rinkinius.

4. Dažnai skirtingais metodais sprendžiant tą patį uždavinį su identiškais rodikliais, jų reikšmėmis ir reikšmingumais, gaunami skirtingi rezultatai, todėl, siekiant visapusiškai analizuoti problemą, sudėtingus uždavinius tikslinga spręsti bent keliais MCDM metodais.

5. Sprendžiant susisieikimo sistemos infrastruktūros vertinimo uždavinius pagrįstam sprendimui gauti siūloma:

- subjektyvius reikšmingumus skaičiuoti pagal AHP, tiesioginio vertinimo ir reitingavimo metodus;
- prioritetinę eilę sudaryti trimis MCDM metodais: SAW, COPRAS ir TOPSIS.

Vilniaus, Kauno, Klaipėdos ir Monrealio miestų išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros vertinimas

Šiame skyriuje pateikiami sprendimo priėmimo duomenys, reikalingi daugiatisliam vertinimui. Miestų išmaniajai susisiekimo sistemos infrastruktūrai vertinti taikomi COPRAS, SAW ir TOPSIS metodai. Remiantis apskaičiuotais veiksmų bei rodiklių reikšmingumais, palyginta trijų Lietuvos miestų – Vilniaus, Kauno ir Klaipėdos – bei Kanados miesto Monrealio išmanioji susisiekimo sistemos infrastruktūra. Atlikta gautų rezultatų jautrumo analizė pagal rodiklių reikšmingumą. Pateiktos sukurto hierarchinio vertinimo modelio naudojimo galimybės.

Skyriaus tematika paskelbtas straipsnis (Zapolskytė et al., 2020b).

3.1. Vilniaus, Kauno, Klaipėdos ir Monrealio miestų susisiekimo sistemos infrastruktūros ypatumai

Miesto susisiekimo sistemos infrastruktūra – tai susisiekimo sričiai priklausančių objektų kompleksas, užtikrinantis socialinę, ekonominę bei ūkinę veiklą. Vilnius vienas pirmųjų Lietuvos miestų pajuto susisiekimo sistemos svarbą ir kilusias problemas. Miestas užima gana didelę teritoriją, kuri apsunkina susisiekimo sistemos funkcionavimą. Dideli atstumai reikalauja didesnės apimties susisiekimo infrastruktūros bei lėšų. Susisiekimą apsunkina didelis miesto rajonų gyvenamųjų ir darbo vietų disbalansas. Didelė dalis vakarinių gyvenamųjų daugiaaukščių rajonų gyventojų kasdien į darbą važiuoja į centrinę miesto dalį, kurioje sukoncentruotos darbo vietos. Nepakankamas miesto kompaktiškumas neparankus sėkmingai realizuoti susisiekimo sistemą – didėja kelionės trukmė, mažėja kelionių pėsčiomis, dviračiais ir kitomis tvariomis TP galimybė. Vilniaus gyventojų tankis yra 1465 gyv./km². Taip pat nedidelis ir gatvių tankis siekiantis 3,53 km/km² bendro teritorijos ploto.

Kaunas yra vienas kompaktiškiausių didžiųjų Lietuvos miestų, kurio gyventojų tankis siekia 2146 gyv./km². Beveik pusė miesto teritorijos užstatyta, o gatvių tinklo tankis siekia 5,85 km/km². Tai sudaro geras efektyvaus transporto srautų paskirstymo prielaidas, lemia kelionės būdo pasirinkimą, ilgį ir trukmę. Kauno miesto susisiekimo sistemai palankus veiksnys yra kompaktiškumas: didžioji teritorijų dalis pasiekama 7 km spinduliu nuo geometrinio miesto centro. Šie makrorodikliai lemia du palankius dalykus: eismo intensyvumas gatvių tinkle ir kelionių privačiais automobiliais skaičius yra kur kas mažesnis nei Vilniuje. Dėl to TP prastovos yra gerokai mažesnės, o susisiekimo greitis didelis.

Klaipėda – išskirtinis miestas, nes jame veikia vienintelis šalyje jūrų uostas, jungiantis šalį jūrų keliais su kitomis Baltijos regiono ir pasaulio valstybėmis. Klaipėdos gatvių tinklo linijinė struktūra susiformavo išilgai jūrų uosto. Tai leidžia sėkmingai organizuoti VT magistralinį tinklą, išvengti transporto srautų vidinėse kvartalų gatvėse. Klaipėdos miesto gatvių tinklą veikia strategiškai svarbūs objektai, kurių link juda lengvasis ir sunkiasvoris tranzitinis transportas: Klaipėdos jūrų uosto, Klaipėdos laisvosios ekonominės zonos, Kuršių nerijos. Mažas gyventojų ir vidutinis gatvių tinklo tankis nesudaro palankių galimybių miestiečiams laisvai naudotis norimomis TP ir išvengti susisiekimo problemų. Klaipėdos miesto gyventojų tankis – 1543 gyv./km².

Monrealis – antras pagal dydį iš visų Kanados didmiesčių. Jame gyvena 2 014 221 gyventojų. Tai miestas, kurio gyventojų tankis didžiausias Šiaurės Amerikos žemyne – 4258,4 gyv./km² (Rahman et al., 2017). Monrealyje yra didžiausias pasaulyje 33 km požeminių tunelių tinklas, jungiantis komercinius ir gyvenamuosius kompleksus, biurus, metro stotis ir priemiestinius traukinius. Po žeme įrengtos parduotuvės, viešbučiai, restoranai ir t. t. Čia kasdien lankosi dau-

giau nei 500 000 žmonių. Šios požeminės patalpos yra miesto centre, daugiausia po aukštais pastatais.

Monrealis yra apsuptas vandens, šiaurėje ribojasi su De Prairies, pietuose – su St. Lawrence upėmis, o vakaruose – Saint-Louis ir Deux Montagnes ežerais. Monrealio saloje yra 266,6 km kranto linijų, jos plotas – 500 km². Monrealis turi uostą, sujungtą su 200 uostamiesčių visame pasaulyje, Trudeau oro uostą ir jo geležinkelius bei greitkelius. Monrealio aglomeracijoje yra 5600 km greitkelių, gatvių ir vietinių kelių, 880 km geležinkelių. Monrealis sujungtas su didmiesčių tinklu 17 tiltų, tunelio tilto ir metro sistemos, jungiančios Monrealio šiaurinę ir pietinę pakrantes.

Monrealio tikslas – tapti geriausiu Šiaurės Amerikos miestu, užtikrinančiu tvarų judumą. Iki 2025 m. numatoma, kad visi Monrealio tranzito korporacijos įsigyti autobusai bus elektriniai. 2021 m. planuojama baigti lengvojo geležinkelio liniją, apimančią 67 km didmiesčio zonos. Planuojama, kad keleiviai tarp Monrealio Trudeau oro uosto ir miesto centro bus nuvežami vos per 20 minučių.

3.2. Sprendimo priėmimo duomenys miestų daugiatisliam vertinimui

Miestų susisieikimo sistemos infrastruktūros išmanumo daugiatislio vertinimo modelį sudaro 22 rodikliai, parinkti 2 skyriuje, 2.2 poskyryje. Pasirinkti rodikliai pagal duomenų tipą suskirstyti į kiekybinius ir kokybinius. Sprendimų sistemoms naudojami tiek kiekybiniai, tiek kokybiniai rodikliai. Kiekybinių rodiklių dydžius galima nustatyti objektyviai. Kokybiniai rodikliai naudojami tada, kai nėra vieno bendro alternatyvų pranašumo mato. Tada alternatyvos vertinamos pagal balus, kurių sistema sudaroma pagal specialistų žinias. Kokybiniams rodikliams vertinti sudaryta vertinimo sistema (3.1 lentelė).

3.1 lentelė. Kokybinių rodiklių vertinimo sistema

Table 3.1. Qualitative indicators evaluation system

Vertinimo balas	Aprašymas
1	Nėra
2	Iš dalies / parengti planai, projektai
3	Patvirtinti ir pradėti įgyvendinti planai
4	Baigiami įgyvendinti planai / testavimas
5	Iki galo įgyvendinta

Tokiu atveju, kai rodiklis apima kelias atskiras viena nuo kitos nepriklausomas sudedamąsias dalis, vertinama suteikiant po balą kiekvienai daliai.

Išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros daugiakriterė analizė vykdoma tokiais etapais: apskaičiuojami alternatyvas apibūdinančių rodiklių reikšmingumai, nustatomos rodiklių reikšmės, daugiakriterės analizės metodais nustatomas lyginamų alternatyvų naudingumo laipsnis ir prioritetas. Duomenys rodiklių reikšmių nustatymui buvo renkami bei apdorojami remiantis informacija gauta iš įvairių šaltinių: Lietuvos statistikos departamento, Vilniaus, Kauno ir Klaipėdos miestų savivaldybių, UAB „Susisiekimo paslaugos“, VšĮ „Klaipėdos keleivinis transportas“, UAB „Kauno autobusai“, UAB „Vilniaus apšvietimas“, UAB „Kauno gatvių apšvietimas“, Klaipėdos UAB „Gatvių apšvietimas“. Duomenims rinkti panaudoti Vilniaus, Kauno ir Klaipėdos miestų DJP ir ataskaitos, Vilniaus miesto savivaldybės teritorijos bendrasis planas, internetinio tinklalapio <https://www.regitra.lt> teikiami atviri duomenys ir kt. Monrealio miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros pradiniai duomenys gauti dalyvaujant susitikimuose su Monrealio miesto savivaldybės Išmaniojo miesto departamentu bei įmone „Jalon“ – tai ne pelno siekianti organizacija, dirbanti prie išmaniųjų miestų iniciatyvų, kurią 2017 m. įkūrė Monrealio miestas. Taip pat bendraujant nuotoliniu būdu su Monrealio transporto tyrimo centro CIRRELT mokslininkais.

Daugiakriteriam vertinimui sudaryta sprendimų matrica (3.2 lentelė).

3.2 lentelė. Kokybinių ir kiekybinių rodiklių vertinimas ir skaitinės vertės

Table 3.2. Evaluation and numerical values of qualitative and quantitative indicators

Rodiklio žymuo	Rodiklis	Optimizavimo kryptis	Matavimo vienetai	Vilnius	Kaunas	Klaipėda	Monrealis
1	2	3	4	5	6	7	8
A1	Dalijimasis automobiliais	+	Balai	5	5	5	5
A2	Dalijimasis dviračiais	+	Skaičius / 1000 gyv.	1,26	1,04	1,14	4,47
A3	Dalijimasis nedidelės galios elektrinėmis transporto priemonėmis	+	Skaičius / 1000 gyv.	1,44	1,04	1,14	0
A4	Pavėžėjimas	+	Balai	1	1	1	1
A5	„Park and Ride“ sistema	+	Vietų /1000 gyv.	0,72	0	0,27	6,87

3.2 lentelės tęsinys

1	2	3	4	5	6	7	8
B1	Alternatyvaus kuro ir atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimas VT	+	% nuo visų VT priemonių	48,82	46,17	25,79	3,35
B2	Aplinką tausojantys automobiliai	+	% nuo visų mieste registruotų automobilių	4,22	1,99	1,85	2,00
B3	Modernūs automobilių statymo sprendimai: vietų rezervavimas, automobilių srautų valdymo sistema, automatiniai garažai	+	Po 1 balą už kiekvieną	2	2	1	1
B4	Išmetamųjų teršalų matavimas ir mažinimas	+	Balai	2	2	2	2
C1	Išmaniosios pėsčiųjų ir dviračių perėjos	+	% nuo šviesoforų reguliuojamų sankryžų	0,35	1,48	1,50	5,00
C2	Išmaniosios greičio mažinimo priemonės	+	Balai	5	5	5	5
C3	Eismo stebėjimo sistemos	-	Plotas km ² , tenkantis 1 kamerai	3,71	1,10	1,93	1,18
C4	Savivaldės TP	+	Balai	1	1	1	1
D1	Centralizuotos šviesoforų valdymo sistemos	+	% nuo reguliuojamų sankryžų	100	85	33	90
D2	TP ryšys tarpusavyje, su infrastruktūra ir valdymo centrais	+	Balai	2	2	2	3

3.2 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6	7	8
D3	Informacija, kelionės planavimas ir mokėjimas internetu	+	Po 1 balą už kiekvieną	3	3	3	1
D4	Informacinė sistema gatvėse: išmaniosios stotelės, informaciniai stendai vairuotojams	+	Po 1 balą už kiekvieną:	2	2	2	1
E1	Specialios eismo juostos	+	% nuo maršrutų ilgio	1,43	2,04	2,68	8,20
E2	Riboto eismo zonos	+	% nuo 1000 km gatvių ilgio	0,68	4,41	2,65	0
E3	Elektrinių TP įkrovimo prieigos	-	Vnt./prieigai	13,84	15,36	7,8	15,00
E4	Išmaniosios gatvių dangos	+	Balai	1	1	1	1
E5	Išmanusis gatvių apšvietimas	+	% nuo visų šviestuvų	60	59	13	95

Lentelėje pateikiami rodiklių žymėjimai ir pavadinimai, apskaičiuotos skaitinės rodiklių vertės arba priskirti balai, priskiriamos optimizavimo kryptys (minimizavimas arba maksimizavimas), nurodomi matavimo vienetai. Kai kuriems rodikliams yra išvardintos jų sudedamosios dalys, vertinant po balą už kiekvieną. Matricoje pateiktos skaitinės rodiklių reikšmės ir optimizavimo kryptys yra naudojamos miestų išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros daugiatisliam vertinimui.

3.3. Miestų išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros daugiatislis vertinimas SAW, COPRAS ir TOPSIS metodais

Daugiatikslis vertinimas atliekamas naudojantis MCDM metodais: COPRAS, SAW ir TOPSIS. Skaičiavimai atliekami pagal 2.3 skyriuje pateiktas formules. SAW metodu skaičiuojama pagal (2.30)–(2.32), COPRAS – (2.33)–(2.37), TOPSIS – (2.23)–(2.29) formules.

3.3.1. Daugiatiksliis vertinimas pagal veiksnius

Naudojantis apskaičiuotais rodiklių reikšmingumais ir sprendimo priėmimo matrica, Vilniaus, Kauno, Klaipėdos ir Monrealio miestų išmanioji susisiekimo sistemos infrastruktūra palyginta pagal kiekvieno veiksnio rodiklius. Rezultatai apskaičiuoti MCDM metodais SAW, COPRAS, TOPSIS. Skaičiavimai atlikti „Excel“ skaičiuokle. Rezultatai surašyti į 3.3 lentelę.

Atlikus daugiakriterį vertinimą pagal COPRAS, SAW, TOPSIS metodus, sudarytos prioritetų eilutės (vietos pagal išmanumą).

3.3 lentelė. Vilniaus, Kauno, Klaipėdos ir Monrealio miestų susisiekimo sistemos infrastruktūros palyginimas pagal veiksnius

Table 3.3. Comparison of Vilnius, Kaunas, Klaipėda and Montreal city mobility system infrastructure by factors

Veiksniai*	Miestas	MCDM metodas						Vidutinė reikšmė	Bendra vieta
		SAW		COPRAS		TOPSIS			
		Reikšmė	Vieta	Reikšmė	Vieta	Reikšmė	Vieta		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	Vilnius	0,5923	2	0,2138	2	0,3162	2	0,3741	2
	Kaunas	0,4991	4	0,1608	4	0,2259	4	0,2953	4
	Klaipėda	0,5283	3	0,1785	3	0,2511	3	0,3193	3
	Monrealis	0,8096	1	0,4469	1	0,7109	1	0,6558	1
B	Vilnius	1,0000	1	0,3762	1	1,0000	1	0,7921	1
	Kaunas	0,7795	2	0,2842	2	0,5779	2	0,5472	2
	Klaipėda	0,5545	3	0,1992	3	0,3501	3	0,3679	3
	Monrealis	0,4042	4	0,1404	4	0,0368	4	0,1938	4
C	Vilnius	0,6064	4	0,1645	4	0,0000	4	0,2570	4
	Kaunas	0,8025	2	0,2499	2	0,4063	2	0,4862	2
	Klaipėda	0,7225	3	0,2216	3	0,3418	3	0,4286	3
	Monrealis	0,9872	1	0,3639	1	0,9873	1	0,7795	1
D	Vilnius	1,0000	1	0,3766	1	1,0000	1	0,7922	1
	Kaunas	0,9482	2	0,3529	2	0,7761	2	0,6924	2
	Klaipėda	0,7686	4	0,2705	4	0,0000	4	0,3463	4

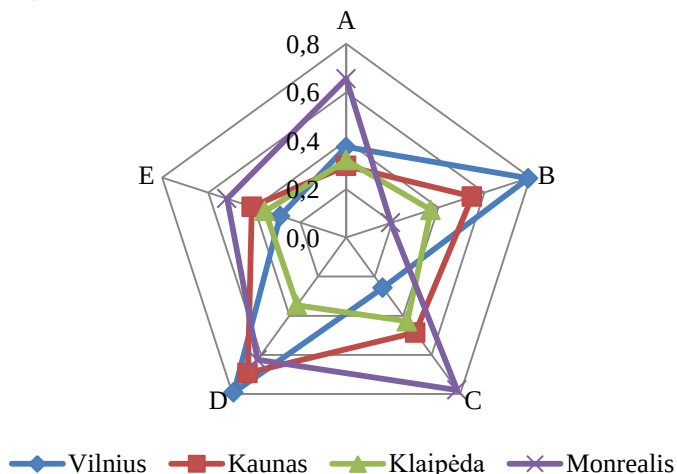
3.3 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D	Monrealis	0,9302	3	0,3491	3	0,5967	3	0,6253	3
E	Vilnius	0,4398	4	0,1617	4	0,2584	3	0,2866	4
	Kaunas	0,6384	2	0,2776	2	0,3164	2	0,4108	2
	Klaipėda	0,5848	3	0,2368	3	0,2384	4	0,3533	3
	Monrealis	0,6875	1	0,2963	1	0,5718	1	0,5185	1

* A – Kelionių motorinėmis transporto priemonėmis ir spūsčių mažinimo priemonės; B – Taršos mažinimo priemonės; C – Kelionių saugumo užtikrinimo ir avaringumo mažinimo priemonės; D – Eismo valdymo ir informacijos priemonės; E – Išmaniosios infrastruktūros priemonės.

Atskirais metodais apskaičiuotos prioritutinės eilutės nesutapo, skaičiuojant veiksnio „Išmaniosios infrastruktūros priemonės“ rodiklių verčių rezultatus. TOPSIS metodu sudaryta prioritutinė eilutė skyrėsi nuo eilutės, sudarytos SAW ir COPRAS metodais – neatitiko prioritutinės eilutės vietos Vilniaus ir Klaipėdos miestams. Gautiems rezultatams apibendrinti pritaikyti vidurkio, Borda ir Copelando metodai (Hwang & Yoon, 1981; Borda, 1781; McLean, 1990; Fishburn, 1971; Erlandson, 1978; Ustinovičius & Zavadskas, 2004). Sudarytos galutinės prioriteto eilutės pagal kiekvieną veiksnį.

Rezultatų analizei pagal apskaičiuotas vidutines reikšmes nubraižyta diagrama (3.1 pav.)



3.1 pav. Miestų išmanumo vertinimas pagal atskirus veiksnius

Fig. 3.1. Evaluation of the smartness level of cities according to separate factors

Atlikus Vilniaus, Kauno, Klaipėdos ir Monrealio miestų išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros vertinimą MCDM metodais (SAW, COPRAS ir TOPSIS) pagal veiksnus, rezultatai parodė, kad „Kelionių motorinėmis transporto priemonėmis ir spūsčių mažinimo priemonės“ labiausiai išvystytos Monrealyje, antroje vietoje – Vilnius, trečioje – Klaipėda ir ketvirtoje – Kaunas. Tokį rezultatą lėmė tai, kad Monrealyje labiau išvystyta „Park and Ride“ sistema ir dalijimasis dviračiais, o Kaune „Park and Ride“ sistemos iš viso nėra.

„Taršos mažinimo priemonės“ labiausiai išvystytos Vilniuje, antroje vietoje – Kaunas, trečioje – Klaipėda ir ketvirtoje – Monrealis. Tokį rezultatą lėmė tai, kad Vilniuje yra daugiausia aplinką tausojančių automobilių pagal gyventojų skaičių, be to, Monrealyje yra mažesnis alternatyvaus kuro ir atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimo viešajame transporte mastas.

„Kelionių saugumo užtikrinimo ir avaringumo mažinimo priemonės“ labiausiai išvystytos Monrealyje, antroje vietoje – Kaunas, trečioje – Klaipėda ir ketvirtoje – Vilnius. Tokį rezultatą suformavo tai, kad Monrealyje yra didžiausias procentas išmaniųjų pėsčiųjų ir dviračių perėjų.

„Eismo valdymo ir informacijos priemonės“ labiausiai išvystytos Vilniuje, antroje vietoje – Kaunas, trečioje – Monrealis ir ketvirtoje – Klaipėda. Taip yra dėl to, kad Vilniuje labiausiai išvystytos centralizuotos šviesoforų valdymo sistemos.

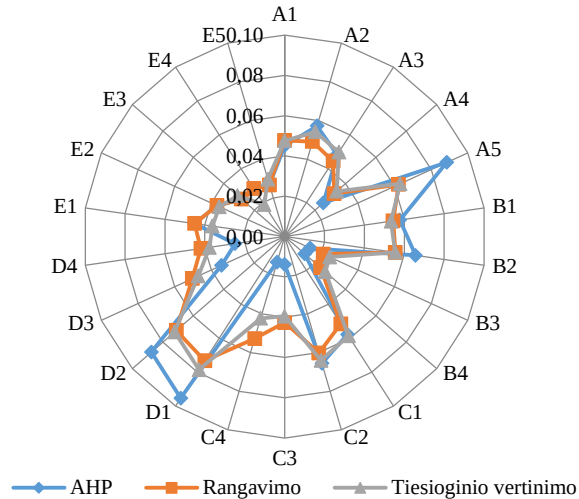
„Išmaniosios infrastruktūros priemonės“ labiausiai išsivysčiusios Monrealyje, antroje vietoje – Kaunas, trečioje – Klaipėda ir ketvirtoje – Vilnius. Tokį rezultatą lėmė tai, kad Monrealyje yra daugiausia specialių eismo juostų pagal maršrutų ilgį.

3.3.2. Daugiatiksliis vertinimas pagal apibendrintus integruotus vertinimo rodiklių reikšmingumus

Siekiant nustatyti miestą, kurio išmanioji susisiekimo sistemos infrastruktūra išvystyta labiausiai, reikia įvertinti ne tik rodiklių reikšmingumus, bet ir kiekvieno veiksnio reikšmingumą. Integruoti rodiklių reikšmingumai apskaičiuojami pagal Saaty (2008) rekomenduojamą metodą, vadinamą sinteze, kai kiekvieno rodiklio apskaičiuotas reikšmingumas yra dauginamas iš veiksnio, kuriam jis priklauso, reikšmingumo (E priedas).

Rodiklių integruotų reikšmingumų, apskaičiuotų skirtingais metodais, rangai nesutampa, išskyrus rodiklius „Centralizuotos šviesoforų valdymo sistemos“ ir „Elektrinių transporto priemonių įkrovimo prieigos“. Ekspertai vieningai didžiausią reikšmę teikia rodikliui „Centralizuotos šviesoforų valdymo sistemos“. Tiesioginio rangavimo ir reitingavimo metodais apskaičiuoti rezultatai artimesni nei apskaičiuoti AHP metodu.

Integruoti rodiklių reikšmingumai, apskaičiuoti AHP, tiesioginio vertinimo ir rangavimo metodais, pateikti 3.2 paveiksle.



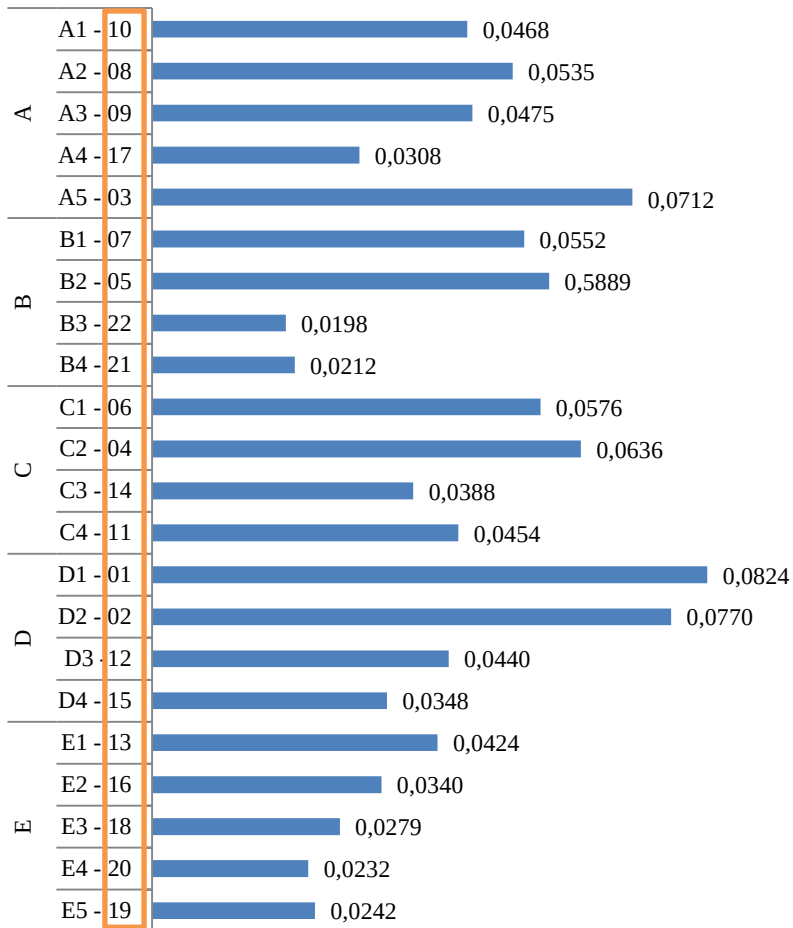
3.2 pav. Integruoti rodiklių reikšmingumai, apskaičiuoti AHP, rangavimo ir tiesioginio vertinimo metodais

Fig. 3.2. Integrated significance of indicators calculated by AHP, ranking and direct evaluation methods

Nors rodiklių reikšmingumai ir rangai, nustatyti visais būdais, nesutampa, kreivės didėjimo ir mažėjimo tendencija išlieka labai panaši.

Vilniaus, Kauno, Klaipėdos ir Monrealio miestų susisiekimo sistemos infrastruktūros išmanumui skaičiuoti naudojami apibendrinti vidurkio metodu apskaičiuotieji integruotų rodiklių reikšmingumai (3.3 pav.).

Apskaičiavus apibendrintus integruotų rodiklių reikšmingumus ir atlikus jų rangavimą, gauta, kad didžiausią įtaką, vertinant išmaniają susisiekimo sistemą infrastruktūrą, turi rodiklis „Centralizuotos šviesoforų valdymo sistemos“ (0,0824), antroje vietoje – rodiklis „Transporto priemonių ryšys tarpusavyje, su infrastruktūra ir valdymo centrais“ (0,0770), trečioje – „„Park and Ride“ sistema“ (0,0712), ketvirtoje – „Išmaniosios greičio mažinimo priemonės“ (0,0636). Mažiausią įtaką turi rodikliai „Modernūs automobilių statymo sprendimai“ (0,0198), „Išmetamųjų teršalų matavimas ir mažinimas“ (0,0212), „Išmaniosios gatvių dangos“ (0,0232) ir „Išmanusis gatvių apšvietimas“ (0,0242).



3.3 pav. Apibendrinti integruotų rodiklių reikšmingumai ir reitingai
Fig. 3.3. The summarized integrated significances of the indicators

Naudojantis apibendrintais integruotų rodiklių reikšmingumais, MCDM metodais buvo įvertintas Vilniaus, Kauno, Klaipėdos ir Monrealio miestų susisiekimo sistemos infrastruktūros išmanumas (3.5 lentelė).

Iš apskaičiuotų reikšmių matyti, kad visais trimis atvejais Monrealio miesto rezultatai yra aukščiausi. Pagal SAW ir COPRAS metodu apskaičiuotus rezultatus Vilniaus ir Kauno susisiekimo sistemos ir infrastruktūros išmanumas labai mažai skiriasi.

3.5 lentelė. MCDM metodų skaičiavimo rezultatai**Table 3.5.** Calculation results of MCDM methods

Miestas	MCDM metodas						Vidurkis	
	SAW		COPRAS		TOPSIS			
	Reikšmė	Vieta	Reikšmė	Vieta	Reikšmė	Vieta	Reikšmė	Vieta
Vilnius	0,7065	3	0,2378	2	0,4122	2	0,4522	2
Kaunas	0,7072	2	0,2371	3	0,3615	3	0,4353	3
Klaipėda	0,5865	4	0,2039	4	0,2758	4	0,3554	4
Monrealis	0,7552	1	0,3095	1	0,6249	1	0,5633	1

Atlikus daugiakriterį vertinimą pagal COPRAS, SAW, TOPSIS metodus sudarytos prioritetų eilutės (vietos pagal išmanumą). Gautiems rezultatams apibendrinti panaudoti vidurkio, Borda ir Copelando metodai (Hwang & Yoon, 1981; Borda, 1781; McLean, 1990; Fishburn, 1971; Erlandson, 1978; Ustinovičius & Zavadskas, 2004) Sudaryta galutinė prioriteto eilutė (3.6 lentelė).

3.6 lentelė. Apibendrintos miestų išmaniosios susisiekimo infrastruktūros vertinimo prioriteto eilutės**Table 3.6.** Summarized priority queues for the evaluation of urban smart mobility infrastructure

Miestas	Apskaičiuotos prioriteto eilutės			Apibendrintos prioriteto eilutės			Galutinė prioriteto eilutė
	SAW metodas	COPRAS metodas	TOPSIS metodas	Vidurkio metodas	Borda metodas	Copelando metodas	
Vilnius	3	2	2	2	2	2	2
Kaunas	2	3	3	3	3	3	3
Klaipėda	4	4	4	4	4	4	4
Monrealis	1	1	1	1	1	1	1

COPRAS ir TOPSIS metodais apskaičiuotos prioriteto eilutės sutapo ir miestai pagal susisiekimo sistemos infrastruktūros išmanumą išsidėstė taip: Monrealis – 1, Vilnius – 2, Kaunas – 3, Klaipėda – 4. SAW metodu apskaičiuoti

rezultatai skyrėsi ir eilutė išsidėstė taip: Monrealis – 1, Kaunas – 2, Vilnius – 3, Klaipėda – 4.

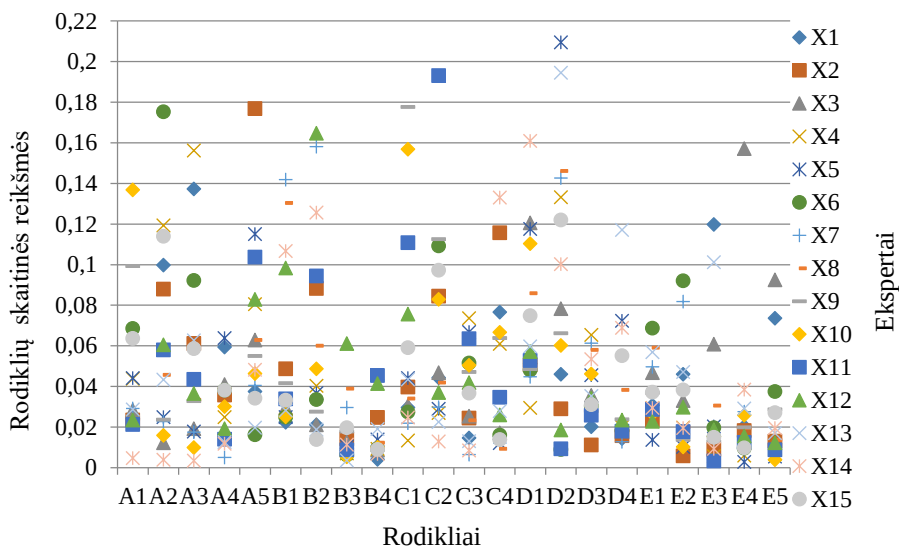
Atlikus miestų susisiekimo sistemos infrastruktūros daugiakriterių vertinimą, nustatyta, kad išmaniausia susisiekimo sistemos infrastruktūra yra Monrealyje, o mažiausiai išmani – Klaipėdoje.

3.4. Rodiklių reikšmingumų įtakos rezultatams jautrumo analizė

Daugiakriterius uždavinius sprendžiant kiekybiniais daugiatiksliais sprendimo priėmimo metodais, atliekami deterministiniai skaičiavimai, nevertinant atsitiktinumo. Sprendimus priimančias asmenys, neatsižvelgdami į galimus pradinių duomenų netikslumus, taiko turimus modelius, kurie griežtai matematiškai pagrįsti. Tuomet gautas sprendimas realią situaciją atspindi nepakankamai ir gali kelti abejonių (Simanavičienė et al., 2011). Bet kurio MCDM metodo rezultatai labai priklauso nuo kriterijų svorio. Kartais galutinė atranka gali pasikeisti, kai pasikeičia kriterijų svorio koeficientai (Biswas et al., 2020). Norint įsitikinti, kad rezultatai yra teisingi ir pritaikomi realiaame pasaulyje, būtina atlikti jautrumo analizę ir patikrinti galutinių rezultatų stabilumą. Analizuojami kriterijų svorio verčių pokyčiai, siekiant nustatyti, kaip jų reikšmė veikia rezultatus. Dinaminė jautrumo analizė rodo, kad vieno kriterijaus prioritetų pasikeitimas daro įtaką kitų kriterijų ir alternatyvų prioritetų pokyčiams pagal stebimą kriterijų (Stanković et al., 2019).

Siekiant įsitikinti, ar skaičiavimo rezultatai yra patikimi, tiriama, kaip kinta prioritetų eilė pagal rodiklių reikšmingumo reikšmių kitimą. Pagal kiekvieno eksperto vertinimus apskaičiuoti rodiklių reikšmingumai AHP ir tiesioginio vertinimo metodais, apskaičiuoti gautų reikšmių integruoti reikšmingumai. Pagal kiekvieno eksperto pateiktus vertinimus rodiklių reikšmingumai skiriasi, kai kuriais atvejais gautų rezultatų sklaida yra gana didelė (3.4 pav.).

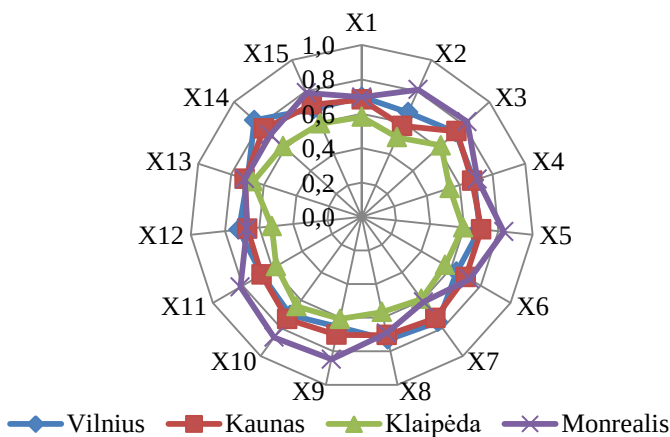
Iš pateiktos diagramos (3.4 pav.) matyti, kad mažiausią sklaidą turi rodikliai A4 (Pavėžėjimas), B3 (Modernūs automobilių statymo būdai), B4 (Išmetamųjų teršalų matavimas ir mažinimas) ir E1 (Specialios eismo juostos). Tai rodo, kad ekspertų nuomonės dėl šių rodiklių svarbos mažiausiai skyrėsi. Didžiausią sklaidą turi rodikliai A2 (Dalijimasis dviračiais), C2 (Išmaniosios greičio mažinimo priemonės), D2 (Transporto priemonių ryšys tarpusavyje, su infrastruktūra ir valdymo centrais). Tokia didelė sklaida rodo, kad ekspertų nuomonės nesutampa, o kai kuriais atvejais netgi priešingos.



3.4 pav. Integruotų rodiklių reikšmingumo sklaidos palyginimas

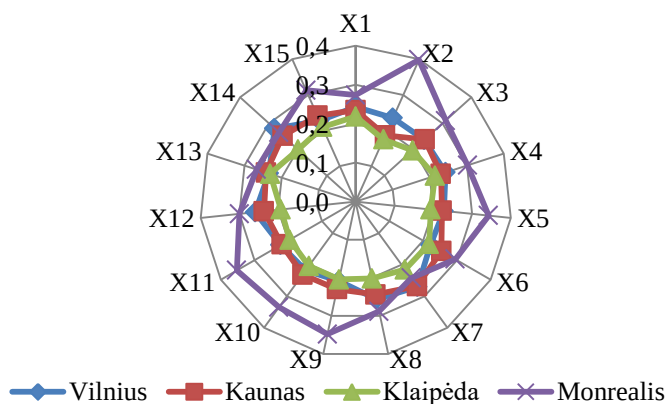
Fig. 3.4. Comparison of the distribution of integrated indicators significance

Remiantis kiekvieno eksperto vertinimui apskaičiuotais integruotų rodiklių reikšmingumais, nustatyta prioritetų eilė SAW, COPRAS ir TOPSIS metodais. Gautų rezultatų sklaida kiekvienai alternatyvai parodyta 3.5–3.7 paveiksluose.

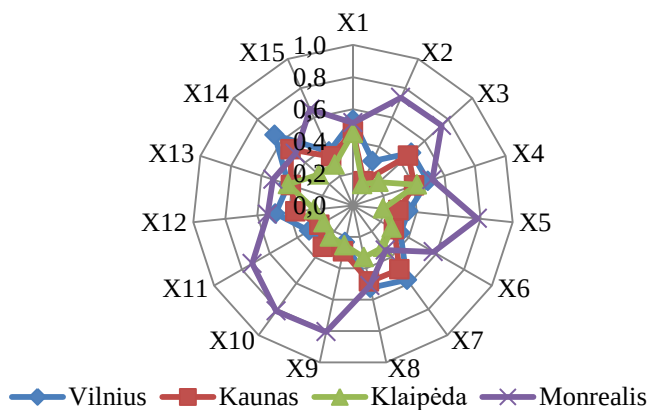


3.5 pav. Racionalumo rezultatai, apskaičiuoti SAW metodu

Fig. 3.5. The results of rationality calculated by the SAW method



3.6 pav. Racionalumo rezultatai, apskaičiuoti COPRAS metodu
Fig. 3.6. The results of rationality calculated by the COPRAS method



3.7 pav. Racionalumo rezultatai, apskaičiuoti TOPSIS metodu
Fig. 3.7. The results of rationality calculated by the TOPSIS method

Lyginant šių trijų metodų jautrumą matyti, kad TOPSIS metodo rezultatų sklaida yra didesnė nei metodų SAW ar COPRAS. Tai parodo, kad TOPSIS metodas labiau reaguoja į rodiklių reikšmingumų reikšmių pokytį. Šiuo atžvilgiu COPRAS ir TOPSIS metodai yra mažiau jautrūs.

Remiantis gautais skaičiavimo duomenimis, apskaičiuojamas šios skaitinės charakteristikos: alternatyvos racionalumo vidurkis $\bar{a}$, standartinis nuokrypis S , procentinis alternatyvos variacijos koeficientas cvp .

Racionalumų vidurkis $\bar{a}$ skaičiuojamas pagal šią formulę:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}, \quad (3.1)$$

o standartinis nuokrypis –

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{\alpha})^2}{n-1}}. \quad (3.2)$$

Variacijos koeficientas parodo standartinio nuokrypio ir vidurkio santykį, jis yra naudinga statistika, norint palyginti vienos duomenų eilės kitimo laipsnį, net jei priemonės kardinaliai skiriasi.

Procentinis alternatyvos variacijos koeficientas pateikiamas kaip alternatyvos racionalumo paklaida ir skaičiuojamas pagal formulę:

$$cvp = \frac{S}{\bar{\alpha}} \cdot 100 \%. \quad (3.3)$$

Variacijos koeficiento reikšmės parodo, kiek procentų nuo vidurkio yra pasisklidusios alternatyvos racionalumo reikšmės. Kuo didesnė variacijos koeficiento reikšmė, tuo jautresni rezultatai, apskaičiuoti MCDM metodais, pradinių duomenų pokyčiams.

Alternatyvų racionalumo įverčių, gautų trimis metodais, naudojant rodiklių subjektyvaus reikšmingumo integruotas reikšmes, analizės rezultatai pateikti 3.7 lentelėje.

Remiantis skaičiavimo rezultatais, gautais SAW metodu, rangas pagal racionalumų vidurkį nesutampa su dažniausiai pasikartojančiu rangų, tačiau alternatyvų rangavimas visais trimis metodais sutampa racionalumo vidurkių reikšmių ir 3.5 lentelėje (MCDM metodų skaičiavimo rezultatai) pateiktų rezultatų atžvilgiu.

Bendras visų miestų racionalumo reikšmių variacijos koeficientas naudojamiems MCDM metodams yra: SAW – 7,35 %, COPRAS – 8,73 %, TOPSIS – 26,21 %.

TOPSIS metodas yra apie 3,5 karto jautresnis už SAW metodą ir 3 kartus jautresnis už COPRAS metodą. Įvertinus rezultatus galima teigti, kad atsiradęs nedidelis rodiklių reikšmingumų pokytis SAW, COPRAS ir TOPSIS metodais paskaičiuotiems rezultatams – prioritetinei eilutei – įtakos neturės. Dominuojanti alternatyva turi mažiausią paklaidą apskaičiavus TOPSIS metodu. Apskaičiavus COPRAS metodu mažiausią paklaidą turi trečia alternatyva, o SAW metodu – antra alternatyva. Apskaičiuotas bendras racionalumo reikšmių variacijos koeficientas visoms alternatyvoms: Vilnius – 14,15 %, Kaunas – 13,64 %, Klaipėda – 14,60 %, Monrealis – 14,93 %.

Taigi pagal apskaičiuotą bendrą racionalumo reikšmių variacijos koeficientą mažiausią paklaidą turi antra alternatyva, o didžiausią – ketvirta (dominuojanti) alternatyva.

3.7 lentelė. Alternatyvų racionalumo skaičiavimo rezultatai
Table 3.7. Results of the calculation of the rationality of alternatives

Metodai	SAW				COPRAS				TOPSIS			
Ekspertai	Vilnius	Kaunas	Klaipėda	Monrealis	Vilnius	Kaunas	Klaipėda	Monrealis	Vilnius	Kaunas	Klaipėda	Monrealis
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
X1	0,6984	0,6820	0,5821	0,6965	0,2436	0,2349	0,2186	0,2736	0,5324	0,4616	0,4517	0,5140
	1	3	4	2	2	3	4	1	1	3	4	2
X2	0,6657	0,5790	0,5060	0,8099	0,2349	0,1860	0,1749	0,3987	0,3024	0,1644	0,1452	0,7353
	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1
X3	0,7356	0,7441	0,6209	0,8260	0,2367	0,2387	0,1962	0,3107	0,4906	0,4634	0,2165	0,7439
	3	2	4	1	3	2	4	1	2	3	4	1
X4	0,6882	0,6763	0,5391	0,7080	0,2425	0,2300	0,2141	0,3020	0,4915	0,4021	0,4201	0,5199
	2	3	4	1	2	3	4	1	2	4	3	1
X5	0,6905	0,6994	0,5941	0,8320	0,2274	0,2223	0,1935	0,3429	0,3485	0,2850	0,1894	0,7808
	3	2	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1
X6	0,6382	0,6999	0,5601	0,7252	0,2218	0,2539	0,2173	0,2952	0,3417	0,2966	0,2797	0,5794
	3	2	4	1	3	2	4	1	2	3	4	1
X7	0,7558	0,7291	0,5910	0,6125	0,2701	0,2681	0,2153	0,2425	0,5740	0,4936	0,3213	0,3446
	1	2	4	3	1	2	4	3	1	2	4	3
X8	0,7304	0,7042	0,5667	0,6919	0,2561	0,2436	0,2016	0,2884	0,5252	0,4855	0,3303	0,5113
	1	2	4	3	2	3	4	1	1	3	4	2

3.7 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
X9	0,6555	0,7019	0,6073	0,8470	0,2086	0,2299	0,2043	0,3478	0,2345	0,2930	0,2544	0,8057
	3	2	4	1	3	2	4	1	4	2	3	1
X10	0,7074	0,7360	0,6442	0,8670	0,2184	0,2316	0,2043	0,3351	0,2907	0,3190	0,2411	0,8143
	3	2	4	1	3	2	4	1	3	2	4	1
X11	0,6718	0,6729	0,5748	0,8161	0,2225	0,2194	0,1958	0,3529	0,3151	0,2418	0,2100	0,7248
	3	2	4	1	2	3	4	1	2	4	3	1
X12	0,7199	0,6694	0,5257	0,6731	0,2596	0,2368	0,19326	0,3002	0,4859	0,3595	0,2428	0,5354
	1	3	4	2	2	3	4	1	2	3	4	1
X13	0,7001	0,7151	0,6643	0,7150	0,2345	0,2422	0,2309	0,2675	0,4228	0,4062	0,4258	0,5243
	3	2	4	1	3	2	4	1	3	4	2	1
X14	0,8399	0,7669	0,6155	0,7151	0,2803	0,2522	0,1992	0,2648	0,6571	0,5218	0,2867	0,4827
	1	2	4	3	1	3	4	2	1	2	4	3
X15	0,6868	0,7142	0,5941	0,7898	0,2278	0,2412	0,2097	0,3127	0,3662	0,3335	0,2777	0,6560
	3	2	4	1	3	2	4	1	2	3	4	1
Racionalumų vidurkis $\bar{a}$	0,7054	0,6994	0,5857	0,7550	0,2390	0,2354	0,2046	0,3090	0,4252	0,3685	0,2862	0,6182
Racionalumų stand. nuokr. S	0,0469	0,0417	0,0413	0,0733	0,0193	0,0178	0,0131	0,0395	0,1176	0,1007	0,0867	0,1377
Rac. variacijos koeficientas cvp	6,65 %	5,97 %	7,06 %	9,71 %	8,11 %	7,59 %	6,43 %	12,78 %	27,67 %	27,35 %	30,32 %	22,29 %
Rangas pagal rac. vid.	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1
Dažniausia rango reikšmė	3	2	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1

Visi jautrumo analizės rezultatai rodo, kad geriausiai alternatyvai nustatyti rezultatai yra ganėtinai patikimi ir gali būti naudojami skaičiavimams.

3.5. Išmaniojo miesto susisiekimo sistemos infrastruktūros hierarchinio vertinimo modelio praktinis pritaikymas

Šiuo metu visame pasaulyje sparčiai diegiami ITS projektai. Jiems įgyvendinimui sudaroma palanki infrastruktūra, todėl tyrimo metu surinkti ir apdoroti duomenys, nusakantys rodiklių skaitines vertes, labai greitai gali tapti nebeatitinkantys tikrovės. Norint sėkmingai pasinaudoti modeliu ir neatlikti sudėtingų skaičiavimų galima pasinaudoti sukurta skaičiuokle „Excel“ programoje, kurioje įrašius lyginamų miestų rodiklių skaitines vertes, galima iškart gauti miestų išmanumo indeksą bei išmanumą pagal veiksmus.

Sukurta vertinimo sistema yra lanksti – rodiklių matavimo vienetus gali keisti patys šios skaičiuoklės naudotojai, priklausomai nuo galimybės gauti atitinkamus duomenis, reikalingus rodiklių skaitinėms vertėms apskaičiuoti. Svarbu, kad visiems lyginamiems miestams matavimo vienetai būtų vienodi. Jei yra poreikis, galima kai kuriuos kokybinius rodiklius vertinti kaip kiekybinius ir atvirkščiai, tačiau negalima keisti optimizacijos krypties.

Šiuo metu yra paruoštas demonstracinis variantas interaktyvaus kūrimo programoje – „Google Sites“.

https://sites.google.com/d/1nlDYNslMjdQMjLAsihPU_kPuq15nWaV6/p/1vvIAexz4uV6IAKKlncF5ZCFslj3bawy/edit nuoroda iškviečia „Google sites“ aplinką (3.8 pav.).



Sparčiai vystantis išmaniosiomis technologijomis kasdien pasaulio miestai ir jų gyventojai tampa vis išmanesni. Ši tendencija miestuose skatina kurti išmaniuosius technologinius sprendimus, pagal kuriuos plėtojama viešųjų paslaugų infrastruktūra. Įgyvendindamas išmaniųjų technologijų srities darnaus vystymosi principus ir užtikrindamas geresnę gyvenimo kokybę kiekvienas miestas turi rasti, kaip kuo racionaliau gyvenamajame aplinkoje pritaikyti ir panaudoti išmaniąsias sistemas.

Miestai konkuruoja tarpusavyje norėdami būti inovacijų lyderiais, todėl sukurta modelis leidžiantis palyginti konkuruojančių miestų išmaniąsias susisiekimo sistemas ir jų infrastruktūrą tarpusavyje.

3.8 pav. Interaktyvaus kūrimo programos puslapis
Fig. 3.8. Page in the interactive authoring program

Kadangi variantas yra tik demonstracinis, norint naudotis sukurtomis „Excel“ programomis, reikia gauti autoriaus leidimą, nes duomenys nėra apsau-

goti nuo redagavimo. Pasitelkus į pagalbą informacinių technologijų specialistus, prireikus galima sukurti laisvai prieinamą internetinį tinklalapį.

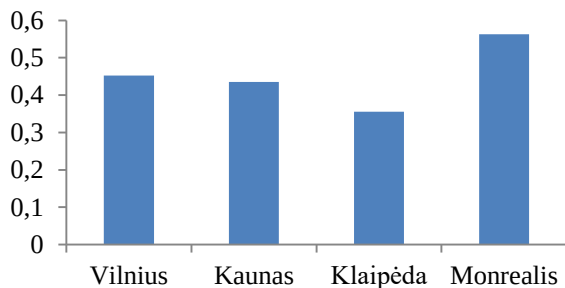
Pasirinkus lyginamų miestų skaičių, atsidaro „Excel“ programa, kurioje vartotojas turi suvesti lyginamų miestų pavadinimus ir rodiklių skaitines vertes (3.9 pav.).

Rodiklio žymuo	Įveskite lyginamų miestų pavadinimus			Įveskite rodiklių skaitines reikšmes
A1				
A2				
A3				
A4				
A5				
B1				
B2				
B3				
B4				
C1				
C2				
C3				
C4				
D1				
D2				
D3				
D4				
E1				
E2				
E3				
E4				
E5				

3.9 pav. Duomenų matricos užpildymo lentelė

Fig. 3.9. Data matrix filling table

Užpildžius duomenų matricą pateikiamas sprendinys grafiniu pavidalu (3.10 pav.).



3.10 pav. Lyginamų miestų išmanumo indeksas

Fig. 3.10. Smartness index of comparable cities

Vertinimo modelį galima taikyti visų tipų miestams, tačiau nei rodiklių rinkinio, nei jų reikšmingumų keitimo nenumatyta.

Šis vertinimo modelis yra universalus, todėl miestams, kurių susisiekimo sistemos ir infrastruktūros išmanumas bus lyginamas, nekeliama jokie ypatingi reikalavimai.

3.6. Trečiojo skyriaus išvados

1. Atlikus Vilniaus, Kauno, Klaipėdos ir Monrealio miestų išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros vertinimą MCDM metodais (SAW, COPRAS ir TOPSIS) pagal veiksnus, rezultatai parodė, kad Monrealyje labiausiai išvystytos „Kelionių motorinėmis transporto priemonėmis ir spūsčių mažinimo priemonės“, „Kelionių saugumo užtikrinimo ir avaringumo mažinimo priemonės“ ir „Išmaniosios infrastruktūros priemonės“, Vilniuje labiausiai išvystytos „Taršos mažinimo priemonės“ ir „Eismo valdymo ir informacijos priemonės“.

2. Atlikus miestų išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros kompleksinį vertinimą pagal integruotus rodiklius, gauta, kad išmaniausia susisiekimo sistemos infrastruktūra yra Monrealyje, o mažiausiai išmani – Klaipėdoje. Tokius rezultatus galėjo lemti susisiekimo sistemos infrastruktūrai skiriamos lėšos. Labiau pasiturinčiose šalyse yra daugiau galimybių pritraukti investicijų plėtrai.

3. Atlikta rodiklių reikšmingumų įtakos rezultatams jautrumo analizė parodė, kad geriausiai alternatyvai nustatyti rodiklių reikšmingumo rezultatai yra patikimi ir gali būti naudojami tolimesniems skaičiavimams. Pagal apskaičiuotą bendrą racionalumo reikšmių variacijos koeficientą alternatyvų paklaida yra: Vilnius – 14,15 %, Kaunas – 13,64 %, Klaipėda – 14,60 %, Monrealis – 14,93 %.

4. Parenkant modelio veiksnus bei rodiklių rinkinį, buvo orientuotasi ne vien į Lietuvos miestus, todėl šio mokslinio tyrimo metu parengtas išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros vertinimo modelis gali būti taikomas ne tik Lietuvos, bet ir užsienio miestams vertinti.

Bendrosios išvados

1. Išanalizavus mokslinę literatūrą ir taikant ekspertinio vertinimo metodus, sudaryta susisiekimo sistemos infrastruktūros rodiklių sistema. Šios sistemos rezultatas – atrinkti 22 svarbiausi rodikliai. Jie suskirstyti į penkias grupes, taikant Europos Komisijos žaliajoje knygoje pateiktus pagrindinius miestų susisiekimo sistemų vystymo tikslus: spūsčių ir taršos mažinimą, išmaniųjų technologijų diegimą, prieinamumo didinimą, saugos ir saugumo gerinimą.

2. Susisiekimo sistemos ir infrastruktūra turi būti analizuojama atsižvelgiant į darnios plėtros principus. Sudarytas susisiekimo sistemos infrastruktūros hierarchinis vertinimo modelis leidžia atlikti daugiakriterę analizę, kompleksiskai vertinti susisiekimo sistemos infrastruktūros išmanumą.

3. Įvertinti susisiekimo sistemas ir jų infrastruktūrą bei palyginti miestus galima dviem būdais:

- kai daugiakriteris vertinimas vykdomas pagal kiekvieno veiksnio rodiklius atskirai. Tuomet nustatomos stipriosios ir silpnosios kiekvieno miesto išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros pusės;
- kai vykdomas kompleksinis išmaniosios susisiekimo sistemos ir jos infrastruktūros vertinimas pagal integruotus rodiklių reikšmingumus, kai kiekvieno rodiklio reikšmingumas dauginamas iš veiksnio, kuriam jis priklauso, reikšmingumo. Nustatomas lyderiaujantis miestas ir sudaroma seka pagal išmanumą.

4. Apibendrinus skirtingais metodais apskaičiuotus veiksmų reikšmingumus, nustatyta, kad pagal ekspertų vertinimus išmaniosios susisiekimo sistemos infrastruktūros išmanumui veiksmų daroma įtaka žymiai skiriasi:

- „Kelionių motorinėmis transporto priemonėmis ir spūsčių mažinimo priemonės“ (0,2724);
- „Eismo valdymo ir informacijos priemonės“ (0,2382);
- „Kelionių saugumo užtikrinimo ir avaringumo mažinimo priemonės“ (0,2054);
- „Taršos mažinimo priemonės“ (0,1551);
- „Išmaniosios infrastruktūros priemonės“ (0,1516).

5. Norint pasiekti aukštesnių išmanumo rezultatų miestams pirmiausiai reikėtų skatinti žmones darniai judėti, nes veiksnyje „Kelionių motorinėmis transporto priemonėmis ir spūsčių mažinimo priemonės“, ekspertų įvertintas kaip didžiausią įtaką darantis miesto išmanumui, reikalauja didelio žmonių sąmoningumo ir noro naudotis darniomis transporto priemonėmis. Prie šio veiksnio priemonių įgyvendinimo gali prisidėti privataus kapitalo įmonės, tokiu atveju yra mažiau išnaudojama miesto lėšų.

6. Apibendrinus skirtingais metodais apskaičiuotus integruotus rodiklių reikšmingumus, paaiškėjo, kad didžiausią įtaką darnios susisiekimo sistemos infrastruktūros išmanumui turi „Centralizuotos šviesoforų valdymo sistemos“ (0,0824), „Transporto priemonių ryšys tarpusavyje, su infrastruktūra ir valdymo centrais“ (0,0770), „Park and Ride“ sistema“ (0,0712), „Išmaniosios greičio mažinimo priemonės“ (0,0636), „Aplinką tausojantys automobiliai“ (0,0589). Mažiausią įtaką išmaniajai susisiekimo sistemos infrastruktūrai turi „Modernūs automobilių statymo sprendimai“ (0,0198), „Išmetamųjų teršalų matavimas ir mažinimas“ (0,0212), „Išmaniosios gatvių dangos“ (0,0232), „Išmanusis gatvių apšvietimas“ (0,0242), „Elektrinių transporto priemonių įkrovimo prieigos“ (0,0279).

7. Kompleksiškai įvertinus miestų išmaniają susisiekimo sistemos infrastruktūrą pagal apibendrintus integruotus rodiklius, gauta, kad išmaniausia susisiekimo sistemos infrastruktūra yra Monrealyje, antroje vietoje – Vilnius, trečioje – Kaunas, ketvirtoje – Klaipėda.

8. Sukurtas vertinimo modelis yra universalus, todėl miestams, kurių susisiekimo sistemos infrastruktūros išmanumas bus lyginamas, nekeliami jokie ypatingi reikalavimai. Lyginami miestai neprivalo būti vienodo ar panašaus dydžio.

9. Sukurtas modelis yra lankstus, jį galima pritaikyti prie konkrečių lyginamų (vertinamų) miestų sąlygų. Modelio pranašumai:

- detalus rodiklių rinkinys;
- rodikliai pagal poreikį gali būti keičiami iš kiekybinių į kokybinius ir atvirkščiai, galima kai kuriuos rodiklius vertinti balais.

Rekomendacijos

Pritaikius disertacijoje siūlomą metodiką, tikslinga nustatyti svarbiausias priemonių grupes ir jų prioritetus grupėse. Rekomendacijose nurodytas išmaniosios susisiekimo sistemos priemonės siūlomos diegti nurodyta tvarka.

1. Pagal atskirų rodiklių reikšmingumą nustatyta, kad pirmiausia būtina mažinti motorinio transporto srautus centrinėje miesto dalyje, o tam taikomos inovatyvios „Park and Ride“, „Park and Bike“, „Bike and Ride“, „Bikesharing“ sistemos. Jų įdiegimas skatintų naudotis alternatyviais ir aplinkai žalos nedarančiais susisiekimo būdais, tokiais kaip dviratis, ėjimas pėsčiomis ir VT. Be to, skatinant keliautojus taikyti alternatyvius susisiekimo būdus, siūloma naudoti ekonomines priemones, tokias kaip lengvųjų automobilių statymo miesto centre draudimas ar didelė automobilių stovėjimo kaina, prieinamas nemokamas ar pigus keliavimas VT.

2. Vienas svarbiausių išmaniųjų susisiekimo sistemų uždavinių – užtikrinti eismo dalyvių saugumą ir avaringumo mažinimą, naudojant išmaniąsias greičio mažinimo priemones, kuriant „nuraminto eismo zonas“ ir „nuraminto eismo gatves“, kuriose mažinamas transporto eismo greitis, įrengiami kintamieji ženklai, reversinis valdymas. Rekomenduojama mieste įrengti koordinuotą eismo valdymo sistemą, kurioje būtų stebimi transporto eismo srautai, valdomas šviestofojų tinklas, koordinuojamas eismas pagrindinėse gatvėse ir prisitaikoma prie kintančių eismo sąlygų paros metu. Judrioje sankryžose rekomenduojama įdiegti

VT prioritetą teikiančias ITS, kurių įdiegimas užtikrintų sklandesnes VT keliones ir didesnę VT veiklos efektyvumą.

3. VT teikti prioritetą, hierarchizuojant VT maršrutų sistemą mieste arba diegti didelio pajėgumo VT (metro, tramvajus, greitieji autobusai). VT stotelėse turėtų būti teikiama informacija realiuoju laiku apie VT maršrutus, o intensyviai apkrautose stotelėse turėtų būti įrengtos išmaniosios švieslentės. Didelių pajėgumų VT maršrutuose stotelės išdėstomos rečiau, lyginant su įprastais maršrutais, naudojamos didesnės talpos TP, sukurtas prioritetas naudojantis transporto infrastruktūra ir judant VT maršrutais bei pravažiuojant visas sankryžas, kur įmanoma fiziškai atskirtomis eismo juostomis.

4. Siekiant užtikrinti švarią gyvenamąją aplinką, rekomenduojama skatinti ekologiškų TP naudojimą. Visų pirma siūloma plėsti elektromobilių infrastruktūrą: ją tikslinga įrengti tankiai apgyvendintuose gyvenamuosiuose rajonuose, automobilių stovėjimo aikštelėse ar po namais esančiose požeminėse aikštelėse. Prie viešųjų objektų elektromobilių infrastruktūrą tikslinga įrengti ten, kur yra didžiausia jų koncentracija – centrinėje miesto dalyje, pramonės rajonuose. Elektromobilių krovimo stotelės prie verslo objektų galėtų būti įrengiamos uždarose stovėjimo aikštelėse, įmonių, biurų teritorijose. Taip pat rekomenduojama plėsti įkrovimo stoteles elektriniams dviračiams ir paspirtukams.

5. Atskirų miesto dalių vidinėse jungtyse, tankiai gyvenamuose rajonuose ir prie traukos centrų rekomenduojama įrengti patogią ir saugią infrastruktūrą bevariklio transporto plėtrai (ėjimas pėsčiomis, dviračiai, riedėjimo priemonės). Sutvarkyta infrastruktūra leistų keliautojams patogiai ir laiku pasiekti tikslą ir kartu keistų gyventojų keliavimo įpročius, teikiant prioritetą ekologiškiems keliavimo būdams.

6. Rekomenduojama įrengti automobilių stovėjimo vietų ITS sistemą (jei nėra įrengta), kuri padėtų vairuotojams rasti laisvas vietas ten, kur jos vairuotojui nėra ar sunkiai matomos, tiek antžeminėse, tiek požeminėse automobilių stovėjimo aikštelėse. Ši sistema padėtų sutaupyti laiko ir kuro, padėtų išvengti nereikalingos tuščios ridos ieškant stovėjimo vietos. Informacija gali būti atvaizduojama nukreipiamosiose švieslentėse arba integruojama į kelionių planavimo programėles.

Literatūra ir šaltiniai

Adiyarta, K., Napitupulu, D., Mohammad Syafrullah, M., Mahdiana, D., Rusdah, R. 2020. Analysis of smart city indicators based on prisma : systematic review, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 725. doi:10.1088/1757-899X/725/1/012113

Albino, V.; Berardi, U.; Dangelico, R. M. 2015. Smart Cities: Definitions, Dimensions, Performance, and Initiatives, *Journal of Urban Technology* 22 (1): 3–21. <http://dx.doi.org/10.1080/10630732.2014.942092>

Alkandari, A.; Alnasheet, M.; Alshekhly, I. F. T. 2012. Smart cities: survey, *Journal of Advanced Computer Science and Technology Research* 2(2): 79–90.

Alexopoulos, C.; Pereira, G. V.; Charalabidis, Y.; Madrid, L. 2019. A Taxonomy of Smart Cities Initiatives, in *Proceedings of the 12th International Conference on Theory and Practice of Electronic Governance (ICEGOV2019)*, Melbourne, VIC, Australia, 281–290. <https://doi.org/10.1145/3326365.3326402>

Appleton, B.; Davies, M.; Tansey, J. 2008. *Green Apple Canada 2008: SMART transportation ranking report*, Sauder School of Business, University of British Columbia.

Autonomous driving in Japan – part 1: road traffic law. August 28, 2020. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 25 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.lexology.com/library/detail.aspx?g=f84441bd-758d-475c-a1b2-8f48ca68102a>

Balducci, F.; Ferrara, A. 2018. Using urban environmental policy data to understand the domains of smartness: An analysis of spatial autocorrelation for all the Italian chief towns, *Ecological Indicators* 89: 386–396.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.064>

Balezentis, T.; Chen, X.; Galnaityte, A.; Namiotko, V. 2020. Optimizing crop mix with respect to economic and environmental constraints: An integrated MCDM approach, *Science of the Total Environment* 705. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135896>

Battarra, R.; Gargiulo, C.; Tremittera, M. R.; Zucaro, F. 2018a. Smart mobility in Italian metropolitan cities: A comparative analysis through indicators and actions, *Sustainable Cities and Society* 41: 556–567. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.06.006>

Battarra, R.; Zucaro, F.; Tremittera, M. R. 2018b. Smart Mobility and Elderly People. Can ICT Make City More Accessible for Everybody? *Journal of Land Use, Mobility and Environment*, 23–42. <http://dx.doi.org/10.6092/1970-9870/5768>

Batty, M. 2017. *The Age of the Smart City*. Unpublished. Affiliation: CASA, UCLState: In Progress Project: Smart cities. <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.34783.87204>

Benevolo, C.; Dameri, R. P.; D'Auria, B. 2016. Smart Mobility in Smart City. Action taxonomy, ICT intensity and public benefits. In: T. Torre, A. M. Braccini and R. Spinelli (Eds.), *Empowering Organizations. Lecture Notes in Information Systems and Organisation*. vol 11. Springer, 13–28. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23784-8_2

Bielinskas, V.; Burinskienė, M.; Podvieszko, A. 2018. Choice of abandoned territories conversion scenario according to MCDA methods, *Journal of Civil Engineering and Management* 24 (1): 79–92, <https://doi.org/10.3846/jcem.2018.30>

Bhandari, S. B.; Nalmpantis, D. 2018. Application of Various Multiple Criteria Analysis Methods for the Evaluation of Rural Road Projects, *the Open Transportation Journal* 12: 57–76. DOI: 10.2174/1874447801812010057

Biswas, T.; Chatterjee, P.; Choudhuri, B. 2020. Selection of commercially available alternative passenger vehicle in automotive environment, *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications* 3(1): 16–27.

Borda, J. C. 1781. *Memoire sur les Elections au scrutin*. Paris: Histoire de l'Academie Royale des Sciences. 79 p.

Broniewicz, E.; Ogrodnik, K. 2020. Multi-criteria analysis of transport infrastructure projects. *Transportation Research, Part D: Transport and Environment* 83. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102351>

Boselli, R.; Cesarini, M.; Mercorio, F.; Mezzananza, M. 2015. Applying the AHP to Smart Mobility Services: A Case Study, in *Proceedings of 4th International Conference on Data Management Technologies and Applications (KomIS-2015)*, Colmar, Alsace, France.

Boukerche, A.; Coutinho, R. W. L. 2019. Crowd Management: The Overlooked Component of Smart Transportation Systems, *IEEE Communications Magazine*, 48–53. DOI: 10.1109/MCOM.2019.1800641

Bradley, S. 2015. Driverless buses hit the streets of Sion, December 17, 2015. [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. lapkričio mėn. 13 d.]. Prieiga per internetą:

https://www.swissinfo.ch/eng/hop-on-board_driverless-buses-hit-the-streets-of-sion/41846698

Buntz, B. 2016. *The World's 5 Smartest Cities*. IoT World Today. [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. gruodžio mėn. 30 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.iotworldtoday.com/2016/05/18/world-s-5-smartest-cities/#>

Carli, R.; Dotoli, M.; Pellegrino, R.; Ranieri, L. 2013. Measuring and Managing the Smartness of Cities: a Framework for Classifying Performance Indicators, *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 1288–1293. DOI: 10.1109/SMC.2013.223

Castillo, H.; Pitfield, D. E. 2010. ELASTIC – A methodological framework for identifying and selecting sustainable transport indicators, *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 15: 179–188. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2009.09>.

Chao, A. L., Gallego, A. C., Lopez-Chao, V., 2020. Alvarelllos, A. Indicators Framework for Sustainable Urban Design, *Atmosphere* 11, 1143. doi:10.3390/atmos11111143

Committee on Autonomous Road Transport for Singapore. 27 Aug. 2014. [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. gruodžio mėn. 30 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.mot.gov.sg/news-centre/news/Detail/Committee-on-Autonomous-Road-Transport-for-Singapore>

Costa, P. B.; Morais Neto, G. C.; Bertolde, A. I. 2017. Urban Mobility Indexes: A Brief Review of the Literature, *Transportation Research Procedia* 25C: 3649–3659. DOI:10.1016/j.trpro.2017.05.330

Dameri, R. P. 2013. Searching for Smart City definition: a comprehensive proposal, *International Journal of Computers & Technology* 11(5): 2544–2551. <http://cirWorld.com/index.php/ijct/article/view/1142ijct>

Damidavičius, J.; Burinskienė, M.; Antuchevičienė, J. 2020. Assessing Sustainable Mobility Measures Applying Multicriteria Decision Making Methods, *Sustainability* 12, 6067. doi:10.3390/su1215606

Delft University of Technology. 2019. The Netherlands 'best prepared' for autonomous cars. News. [interaktyvus], [žiūrėta 2019 m. gruodžio mėn. 30 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.tudelft.nl/en/2019/transport-institute/the-netherlands-best-prepared-for-autonomous-cars/>

Debnath, A. K.; Chin, H. C.; Haque, M. M.; Yuen, B. 2014. A methodological framework for benchmarking smart transport cities. *Cities* 37: 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.11.004>

Erlandson, R. 1978. System Evaluation Methodologies: Combined Multi-dimensional Scaling and Ordering Techniques, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 8(6): 421–432.

EK. 2007. Žalioji Knyga. Nauja mobilumo miesto kultūra. Briuselis, 25.09.2007. [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. gruodžio mėn. 30 d.]. Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52007DC0551&qid=1488204560202&from=LT>

EK. 2011. Baltoji knyga. Bendros Europos transporto erdvės kūrimo planas. Konkurencingos efektyviu išteklių naudojimu grindžiamos transporto sistemos kūrimas. Briuselis, 2011.3.28. [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. gruodžio mėn. 30 d.]. Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0144&from=en>

Europos sąveikiųjų intelektinių transporto sistemų strategija – svarbus žingsnis į sąveikų, susietąjį ir automatizuotą judumą, Briuselis, 2016 11 30. [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. gruodžio mėn. 30 d.]. Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52016DC0766&from=EN>

Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2010/40/ES, 2010 07 07 d., dėl kelių transporto ir jo sąsajų su kitų rūšių transportu srities intelektinių transporto sistemų diegimo sistemos. [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. gruodžio mėn. 30 d.]. Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0040&from=LT>

Experiments on autonomous and automated driving: an overview 2015. [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. gruodžio mėn. 30 d.]. Prieiga per internetą: https://www.anwb.nl/binaries/content/assets/anwb/pdf/over-anwb/persdienst/rapport_inventarisatie_zelfrijdende_auto.pdf

European Commission, Smart Cities – Smart Living. [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. gruodžio mėn. 30 d.]. Prieiga per internetą: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/smart-cities-smart-living>

Europeansmartcities 4.0. 2015. [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. gruodžio mėn. 30 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.smart-cities.eu/>

Erdogan, M.; Kaya, I. 2019. Prioritizing failures by using hybrid multi criteria decision making methodology with a real case application, *Sustainable Cities and Society* 45: 117–130. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.027>

Farooq, A.; Xie, M.; Stoilova, S.; Ahmad, F. 2019. Multicriteria Evaluation of Transport Plan for High-Speed Rail: An Application to Beijing-Xiongan, *Mathematical Problems in Engineering*. Special Issue: *Building Mathematical Models for Multicriteria and Multiobjective Applications*. 23 p. <https://doi.org/10.1155/2019/8319432>

Foltýnová, H. B.; Attard, M.; Melo, S. 2018. Topical collection on the role of planning towards sustainable urban mobility. *European Transport Research Review*: 10, 38. <https://doi.org/10.1186/s12544-018-0310-z>

Foltýnová, H. B.; Vejchodská, E.; Rybová, K.; Květoň, V. 2020. Sustainable urban mobility: One definition, different stakeholders' opinions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*: 87, 102465. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102465>

Field operational tests for automated driving services in rural areas aiming for the improvement of the social environment. FY2018-FY2019 Final Report (Overview). [interaktyvus], [žiūrėta 2019 m. gruodžio mėn. 30 d.]. Prieiga per internetą: <https://en.sip-adus.go.jp/rd/rddata/rd03/e101.pdf>

Fishburn, P. 1971. A Comparative Analyses of Group Decision Methods, *Behavioral Sciences* 16(6): 538–544.

Francini, M.; Chieffallo, L.; Palermo, A.; Viapiana, M. F. 2021. Systematic Literature Review on Smart Mobility: A Framework for Future “Quantitative” Developments, *Journal of Planning Literature* 36(3): 283–296. <https://doi.org/10.1177/0885412221994246>

Garau, C.; Masala, F.; Pinna, F. 2016. Cagliari and smart urban mobility: Analysis and comparison, *Cities* 56: 35–46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cities.2016.02.012>

Giffinger, R.; Fertner, C.; Karmar, H.; Meijers, L. 2007. Smart cities Ranking of European medium-sized cities. Final report, Centre of Regional Science, Vienna UT. www.smart-cities.eu

Ginkutė, L.; ir Siavris, M. 2017. Teminio tyrimo „Ko reikia Lietuvai norint sukurti patrauklią investuotojui ir saugią vartotojui savivaldžių automobilių ir jų įrangos ekosistemą?“ ataskaita. Vilnius. [interaktyvus], [žiūrėta 2019 m. gruodžio mėn. 30 d.]. Prieiga per internetą: <http://kurkl.lt/wp-content/uploads/2017/04/Teminio-tyrimo-ataskaita-L.Ginkut%C4%97-M.Siavris.pdf>

Girardi, P.; Temporelli, A. 2017. Smartainability: a methodology for assessing the sustainability of the smart city. *Energy Procedia* 111: 810–816. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.243>

Goswami, S. S.; Mitra, S. 2020. Selecting the best mobile model by applying AHP-COPRAS and AHP-ARAS decision making methodology. *International Journal of Data and Network Science* 4: 27–42. doi: 10.5267/j.ijdns.2019.8.004

Gunawan, F.; Triayudi, A.; Handayani, E. T. E. 2020. Collaboration of the Analytical Hierarchy Process (AHP) Method with Simple Additive Weighting (SAW) in Determining the Recipients of Direct Cash Assistance (BLT), *Jurnal Mantik* 4(3): 2155–2163. <https://doi.org/10.35335/mantik.Vol4.2020.1095.pp2155-2163>

Hall, R. E. 2000. The vision of a smart city, in *2nd International Life Extension Technology Workshop*. Paris. https://WWW.researchgate.net/publication/241977644_The_vision_of_a_smart_city

HaWkins, A. J. 2017. *This map shoWs hoW feW self-driving cars are actually on the road today*. [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. gruodžio 14 d.]. Prieiga per internetą: <https://WWW.theverge.com/2017/10/23/16510696/self-driving-cars-map-testing-bloomberg-aspen>

Hickman, R.; Hall, P.; Banister, D. 2013. Planning more for sustainable mobility, *Journal of Transport Geography* 33: 210–219. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.07.004>

Hwang, C. L.; Yoon, K. 1981. Multiple Attribute Decision Making. Methods and Applications A State-of-the-Art Survey. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 186. Springer Berlin Heidelberg, 269 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>

Ilgalaikė (iki 2025 metų) Lietuvos transporto sistemos plėtros strategija, patvirtinta Lietuvos Respublikos Vyriausybės 2005 m. birželio 23 d. nutarimu Nr. 692. [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. gruodžio mėn. 30 d.]. Prieiga per internetą: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.258496>

Informacinių sistemų plėtros galimybių studija. 2014. [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. gruodžio mėn. 30 d.]. Prieiga per internetą: https://lakd.lrv.lt/uploads/lakd/documents/files/Paslaugos/Inforinkmenos/IS_pletros_galimybiu_studija.pdf

Yadav, P.; Hasan, S.; Ojo, A.; Curry, E. 2017. The Role of Data in Driving Sustainable Mobility in Nine Smart Cities, in *Proceedings of the 25th European Conference on Information Systems (ECIS)*, Guimarães, Portugal, 1248–1263. http://aisel.aisnet.org/ecis2017_rp/81

ITS Architecture For Canada Version 3. 2019. [interaktyvus], [žiūrėta 2019 m. gruodžio mėn. 30 d.]. Prieiga per internetą:

<https://www.itscanada.ca/it/architecture/itsarchv3/index.html>

Jiang, T.; Wu, Z.; Song, Y.; Liu, X.; Liu, H.; Zhang, H. 2013. Sustainable transport data collection and application: china urban transport database, *Mathematical Problems in Engineering*, 1–10. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/879752>

Jucevičius, R. 2014. Sumaniojo miesto vystymo strateginės dimensijos. *Viešojo politika ir administravimas* 13(3): 427–441. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.ppaa.13.3.8299>

Kendall, M. G. 1970. Rank Correlation methods. 4th edition. London: Griffin and Co. 365 p.

Kristiningrum, E., Kusumo, H. 2021. Indicators of Smart City Using SNI ISO 37122:2019, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 1096 012013. doi:10.1088/1757-899X/1096/1/012013

Komninos, N. 2006. The Architecture of Intelligent Cities, *Intelligent Environments 06*, Institution of Engineering and Technology, pp. 13–20.

Komninos, N.; Mora, L. 2018. Exploring the Big Picture of Smart City Research, *Scienze Regionali* 17(1): 33–56. DOI: 10.14650/88815

Krmac, E.; Djordjević, B. 2019. Evaluation of the TCIS Influence on the capacity utilization using the TOPSIS method: Case studies of Serbian and Austrian railways, *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications* 2(1): 27–36. <https://doi.org/10.31181/oresta1901030k>

Kusumawardani, D., Saintika, Y., Romadlon, F. 2021. *The Smart Mobility Insight of Bus Rapid Transit (BRT) Trans Jateng Purwokerto-Purbalingga Ridership*. Conference Paper 1-5. DOI:10.1109/ICISS53185.2021.9533253.,

Lakamp, B. 2017. *What are the 10 key things that make a city smart?* Smart Cities. [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. lapkričio mėn. 6 d.]. Prieiga per internetą: <https://readWrite.com/2017/07/17/brian-lakamp-What-makes-cities-smart-cl1/>

Land Transport Authority (LTA). Green Link Determining System (GLDE). [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. lapkričio mėn. 6 d.]. Prieiga per internetą: https://www.lta.gov.sg/content/ltagov/en/getting_around/driving_in_singapore/intelligent_transport_systems/green_link_determining_system.html

Li, X.; Fong, P. S. W.; Dai, S.; Li, Y. 2019. Towards sustainable smart cities: An empirical comparative assessment and development pattern optimization in China, *Journal of Cleaner Production* 215: 730–743. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.046>

Litman, T. 2008. *Sustainable transportation indicators*. A recommended program to define a standard set of indicators for sustainable transportation planning. 13 p.

Litman, T. 2019. *Developing Indicators for Sustainable and Livable Transport Planning*. Victoria Transport Policy Institute: Victoria, BC, Canada.

Lopez-Carreiro, I.; & Monzon, A. 2018. Evaluating sustainability and innovation of mobility patterns in Spanish cities. Analysis by size and urban typology, *Sustainable Cities and Society* 38: 684–696. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.029>

Macedo, J.; Fernanda Rodrigues, F.; Tavares, F. 2017. Urban sustainability mobility assessment: indicators proposal, *Energy Procedia* 134: 731–740. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.569

MacCrimmon, K. R. 1968. *Decision making among multiple-attribute alternatives: Survey and consolidated approach*. RAND Memorandum, The Rand Corporation, Santa Monica, 72 p.

Mandžuka, S.; Žura, M.; Horvat, B.; Bicanic, D.; Mitsakis, E. 2013. Directives of the European Union on ITS and their Impact on the Republic of Croatia, *Promet – Traffic & Transportation* 25(3): 273–283.

Marletto, G.; & Mameli, F. 2012. A participative procedure to select indicators of policies for sustainable urban mobility. Outcomes of a national test, *European Transport Research Review* 4(2): 79–89. <http://dx.doi.org/10.1007/s12544-012-0075-8>

McLean, I. 1990. The Borda and Condorcet principles: three medieval applications, *Social Choice and Welfare* 7(2): 99–108.

Milošević, M. R.; Milošević, D. M.; Stević, D. M.; Stanojević, A. D. 2019. Smart City: Modeling Key Indicators in Serbia Using IT2FS, *Sustainability* 11(13), 3536. <https://doi.org/10.3390/su11133536>

Modelewski, K. 2008. *Czym jest ITS? ITS Polska*. [interaktyvus], [žiūrėta 2019 m. balandžio mėn. 30 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.itspolska.pl/index.php?page=11>

Mohammed, A. G. M.; Osman, S. E. F. 2017. Smart City & Internet of Things, *International Research Journal of Computer Science (IRJCS)* 5(4): 238–241.

Mohan, D. 2008. Intelligent Transportation Systems (ITS) and the Transportation System. In: A. Jhunjhunwala (Eds.), *Information and Communication Technology for Sustainable Development*. in *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford, UK

Mohanty, S. P.; Choppali, U.; Kougianos, E. 2016. Everything you wanted to know about smart cities: The Internet of things is the backbone, in *IEEE Consumer Electronics Magazine* 5(3): 60–70. DOI: 10.1109/MCE.2016.2556879

Montazer, G. A.; Nourianfar K.; Shayganmehr, M. 2020. Selecting Strategic Partner for Iranian Official Airline Based on Mixed Fuzzy AHP and COPRAS Methods. In: Kahraman C., Cebi S., Cevik Onar S., Oztaysi B., Tolga A., Sari I. (eds) *Intelligent and Fuzzy Techniques in Big Data Analytics and Decision Making*. INFUS 2019. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1029. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23756-1_90

Nacionalinė susisiekimo plėtros 2014–2022 metų programa, patvirtinta Lietuvos Respublikos Vyriausybės 2013 m. gruodžio 18 d. nutarimu Nr. 1253 (Lietuvos Respublikos Vyriausybės 2014 m. gruodžio 15 d. nutarimo Nr. 1443 redakcija). [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. gruodžio mėn. 30 d.]. Prieiga per internetą: <https://sumin.lrv.lt/lt/administracine-informacija/nacionaline-susisiekimo-pletros-2014-2022-metu-programa>

Nagy, S., Csiszár, C. 2020. The quality of smart mobility: a systematic review, *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport* 109: 117–127. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2020.109.11>.

Nosal Hoy, K.; Solecka, K.; Szarata, A. 2019. The Application of the Multiple Criteria Decision Aid to Assess Transport Policy Measures Focusing on Innovation, *Sustainability* 11, 1472. doi:10.3390/su11051472

Nutarimas dėl Lietuvos Respublikos saugaus eismo automobilių keliais įstatymo nr. VII-I-2043 2, 10 ir 13 straipsnių pakeitimo įstatymo projekto nr. XIII-P-391, 2017 m. birželio 14 d. Nr. 447 Vilnius. [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. gruodžio mėn. 30 d.]. Prieiga per internetą:

<https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/b41c784154e811e78869ae36ddd5784f?jfwid=a82o4zbf>

Neirotti, P.; De Marco, A.; Cagliano, A. C.; Mangano, G.; Scorrano, F. 2014. Current trends in Smart City initiatives: Some stylised facts, *Cities* 38; 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.12.010>

Ogrodnik, K. 2020. Multi-criteria Analysis of Smart Cities in Poland, *Geographia Polonica* 93 (2): 163–181. <https://doi.org/10.7163/GPol.0168>

Orlowski, A.; Romanowska, P. 2019. Smart Cities Concept: Smart Mobility Indicator, *Cybernetics and Systems: an International Journal* 50(2): 118–131. <https://doi.org/10.1080/01969722.2019.1565120>

Overview of California's Final Autonomous Vehicle Testing and Deployment Regulations – Fully Driverless Vehicles Permitted. March 13, 2018. [interaktyvus], [žiūrėta 2019 m. gruodžio mėn. 30 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.jdsupra.com/legalnews/overview-of-california-s-final-36985/>

Paiva, S., Ahad, M. A., Tripathi, G., Feroz, N., Casalino, G. 2021. Enabling Technologies for Urban Smart Mobility: Recent Trends, Opportunities and Challenges, *Sensors* 21, 2143. <https://doi.org/10.3390/s21062143>

Paulauskas, R.; Bernhard, O.; Glemža, A.; Nabil, A. R.; Kapočius, J.; Docka, P.; Mickaitis, G. 2011. *Intelektinių (pažangių) transporto sistemų įgyvendinimo Lietuvoje galimybių studija*. Vilnius. 250 p. https://sumin.lrv.lt/uploads/sumin/documents/files/Teisine_informacija/Tyrimai_ir_analizes/20110215%20ITS%20Studija%20final%20v6.pdf

Pendolovska, V.; Fernandez, R.; Mandl, N.; Gugele, B.; Ritter, M. 2013. *Annual European Union Greenhouse Gas Inventory 1990–2011 and Inventory Report 2013*, European Environment Agency: Copenhagen, Denmark.

Pereira, R. C.; Branchi, B. A.; Ferreira, D. H. L. 2021. Sustainable urban mobility diagnosis: applicability of a composite index, *RISUS – Journal on Innovation and Sustainability* 12(1): 16–29

Petrova-Antonova, D.; Ilieva, S. 2018. Smart Cities Evaluation – A Survey of Performance and Sustainability Indicators, *44th Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications*, Prague, Czech Republic. DOI: 10.1109/SEAA.2018.00084

Pinna, F.; Masala, F.; Garau, C. 2017. Urban Policies and Mobility Trends in Italian Smart Cities, *Sustainability* 9, 494. doi:10.3390/su9040494

Podvezko, V. 2005. Ekspertų įvertių suderinamumas, *Ūkio technologinis ir ekonominis vystymas*, 11(2), 101–107. <https://doi.org/10.3846/13928619.2005.9637688>

Podvezko, V.; Sivilevičius, H. 2013. The use of AHP and rank correlation methods for determining the significance of the interaction between the elements of a transport system having a strong influence on traffic safety, *Transport* 28(4): 389–403. <https://doi.org/10.3846/16484142.2013.866980>

Podvezko, V.; Podvezko, A. 2014. Kriterijų reikšmingumo nustatymo metodai. *Lietuvos matematikos rinkinys. Lietuvos matematikų draugijos darbai* 55: 111–116. www.mii.lt/LMR/

Podvezko, V.; Sivilevičius, H.; Podvezko, A. 2014. Scientific applications of the AHP method in transport problems, *Archives of Transport* 29(1): 47–54. DOI: 10.5604/08669546.1146966

Quiroga, E., Gutiérrez, K. 2021. Smart Mobility: Opportunities and Challenges for Colombian Cities. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal* 6(3): 332–338. <https://dx.doi.org/10.25046/aj060338>

Sojda, A. 2020. Smart city index based on TOPSIS method, *Scientific papers of Silesian University of Technology* 148. <http://dx.doi.org/10.29119/1641-3466.2020.148.52>

Rahman, R.; Hossain, M.; Azam, S.; Hossain, M. 2017. Do People Like to Live in a Compact City? *Proceedings of the 12th International Conference of Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vietnam

Raskeyn, C. A. 2021. *Evaluating Strategies for Sustainable Mobility* : A qualitative comparison of Amsterdam, Delft and Leiden. Bachelor thesis.

Razmjoo, A., Nezhad, M. M., Kaigutha, L. G., Marzband, M., Mirjalili, S., Pazhoohesh, M., Memon, S., Ehyaei, M.A., Piras, G. 2021. Investigating Smart City Development Based on Green Buildings, Electrical Vehicles and Feasible Indicators, *Sustainability* 13, 7808. <https://doi.org/10.3390/su13147808>

Reiber, L.; Huang, G. 2018. Comparing Study on Smart City Strategies in Berlin and Shanghai, *Advances in Economics, Business and Management Research* 56: 419–422. <https://doi.org/10.2991/feb18.2018.96>

Saaty, T. L. 1980. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York: McGraw-Hill. 287 p.

Saaty, T. L. 2008. Decision making with the analytic hierarchy process, *Int. J. Services Sciences* 1(1): 83–98. <https://doi.org/10.1504/IJSSci.2008.01759>

Saaty, T. L.; Ozdemir, M. S. 2003. Why the magic number seven plus or minus two, *Mathematical and Computer Modelling* 38: 233–244. doi: 10.1016/S0895-7177(03)00216-4

Savelson, A.; Colman, R.; Litman, T.; Walker, S.; Parmenter, R. 2006. *The GPI transportation accounts: Sustainable transportation in Nova Scotia*. Measuring sustainable development GPI Atlantic: Genuine progress index for Atlantic Canada. <http://www.gpiatlantic.org/pdf/transportation/transportation.pdf>

Schaffers, H.; Komninos, N.; Marc Pallot, M.; Trousse, B.; Nilsson, M.; Oliveira, A. 2011. Smart Cities and the Future Internet: Towards Cooperation Frameworks for Open Innovation. J. Domingue et al. (Eds.): *Future Internet Assembly*, LNCS 6656, 431–446. DOI: 10.1007/978-3-642-20898-0_31

Schuetze, C. F. 2011. Hip Cities That Think About How They Work. The New York Times. Nov. 17, 2011. [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. gruodžio mėn. 30 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.nytimes.com/2011/11/18/business/global/hip-cities-that-think-about-how-they-work.html>

Sdoukopoulos, A.; Nikolaidou, A.; Pitsiava-Latinopoulou, M.; Papaioannou, P. 2017. A methodological approach for the assessment of sustainable urban mobility indicators using social media data, *Proceedings of the Sixth International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning & Economics* 1015–1024, Thessaloniki, Greece. <https://www.researchgate.net/publication/320614937>

Sharifi, A., Kawakubo, S., Milovidova, A. 2020. Urban sustainability assessment tools: toward integrating smart city indicators. In: Y. Yamagata and P. P.J. Yang (Eds.), *Urban Systems Design*. Chapter 11. Elsevier, 345–372. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816055-8.00011-7>

Simanavičiene, R.; Ustinivičius, L. 2011. Daugiatikslių sprendimo priėmimo metodų jautrumo analizė taikant Monte Karlo modeliavimą, *Informacijos mokslai* 56: 182–190. <https://doi.org/10.15388/Im.2011.0.3138>

Sisson, P. 2017. Driverless bus line coming to Helsinki this fall. Jun 15, 2017. [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. gruodžio mėn. 30 d.]. Prieiga per internetą: <https://archive.curbed.com/2017/6/15/15810912/driverless-self-driving-bus-finland-helsinki-transportation>

Sivilevičius, H. (2011). Application of expert evaluation method to determine the importance of operating asphalt mixing plant quality criteria and rank correlation, *The Baltic journal of road and bridge engineering* 6(1): 48–58. DOI: 10.3846/bjrbe.2011.07

Siwa, N. N. A. P.; Putrama, I. M.; Santyadiputra, G. S. 2020. Development of car rental system based on geographic information system and decision support system with AHP (Analytical Hierarchy Process) and SAW (Simple Additive Weighting) method, *Journal of Physics: Conference Series* 1516: 012013. doi:10.1088/1742-6596/1516/1/012013

Stanković, M.; Gladović, P.; Popović, V. 2019. Determining the Importance of the Criteria of Traffic Accessibility Using Fuzzy AHP and Rough AHP Method, *Decision Making: Applications in Management and Engineering* 2(1): 86–104. <https://doi.org/10.31181/dmame1901086s>

Stojić, M.; Zavadskas, E. K.; Pamucar, D.; Stević, Ž.; Mardani, A. 2019. Application of MCDM Methods in Sustainability Engineering: A Literature Review 2008–2018, *Symmetry* 11: 350. doi:10.3390/sym11030350

Sunardi, H., Sulisty, S., Mustika, I. 2020. Analysis of Smart Mobility Readiness in Banjarmasin City, In Proceedings of the International Conference on Creative Economics, Tourism and Information Management (ICCETIM 2019) - Creativity and Innovation Developments for Global Competitiveness and Sustainability, p. 158-162. DOI: 10.5220/0009866401580162

Sureshchandra, S. M.; Bhavsar, J. J.; Pitroda, J. R. 2016. Review on Identification of Success Factors for Designing of Smart Cities, *IJSTE - International Journal of Science Technology & Engineering* 2(9): 125–133.

Šiupšinskas, M. 2014. Kritiniai išmaniojo miesto aspektai. *Mokslas – Lietuvos Ateitis* 6(3): 333–339. <https://doi.org/10.3846/mla.2014.45>

Tafidis, P.; Sdoukopoulos, A.; Pitsiava-Latinopoulou, M. 2017. Sustainable urban mobility indicators: Policy versus practice in the case of Greek cities, *Transportation Research Procedi*, 24: 304–312. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.122>

Turcksin, L.; Bernardini, A.; Macharis, C. 2011. A combined AHP-PROMETHEE approach for selecting the most appropriate policy scenario to stimulate a clean vehicle fleet. *Procedia Social and Behavioral Sciences* 20: 954–965. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.104>

United States Department of Transportation. Intelligent Transportation System. 2019. [interaktyvus], [žiūrėta 2019 m. spalio mėn. 2 d.]. Prieiga per internetą: https://www.its.dot.gov/its_deployments.htm

Ustinovičius, L.; Zavadskas, E. K. 2004. Statybos investicijų efektyvumo sistemotechninis įvertinimas. Vilnius: Technika, 219 p.

Valstybės pažangos strategija „Lietuvos pažangos strategija „Lietuva 2030“, patvirtinta Lietuvos Respublikos Seimo 2012 m. gegužės 15 d. nutarimu Nr. XI-2015. [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. lapkričio mėn. 6 d.]. Prieiga per internetą: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.425517>

Vilnius becomes one of Europe's smartest cities. *Neweconomy* 2014 m. liepos mėn. 21 d. [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. spalio mėn. 2 d.]. Prieiga per internetą: <https://WWW.theneWeconomy.com/business/vilnius-becomes-one-of-europes-smartest->

Vilutienė, T.; Kumetaitis, G.; Kiaulakis, A.; Kalibatas, D. 2020. Assessing the Sustainability of Alternative Structural Solutions of a Building: A Case Study, *Buildings* 10(2): 36. <https://doi.org/10.3390/buildings10020036>

Volvo Car Group initiates world unique Swedish pilot project with self-driving cars on public roads. Dec 02, 2013. [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. gruodžio mėn. 30 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/136182/volvo-cargroup-initiates-world-unique-swedish-pilot-project-with-self-driving-cars-on-publicroads>

- Wibowo, S.; Grandhi, S. 2015. A Multicriteria Analysis Approach for Benchmarking Smart Transport Cities, *Science and Information Conference*, London, UK. DOI: 10.1109/SAI.2015.7237131
- Zavadskas, E. K.; Pamucar, D.; Stevic, Z.; Mardani, A. 2020. Multi-Criteria Decision-Making Techniques for Improvement Sustainability Engineering Processes, *Symmetry* 12(6): 986. doi:10.3390/sym12060986
- Zavadskas, E. K.; Antucheviciene, J.; Vilutiene, T.; Adeli, H. 2018. Sustainable Decision-Making in Civil Engineering, Construction and Building Technology, *Sustainability* 10(1): 14. doi:10.3390/su10010014
- Zavadskas, E. K.; Antucheviciene, J.; Turskis, Z.; Adeli, H. 2016a. Hybrid multiple-criteria decision-making methods: A review of applications in engineering, *Scientia Iranica* 23(1): 1–20. DOI: 10.24200/sci.2016.2093
- Zavadskas, E. K.; Govindan, K.; Antucheviciene, J.; Turskis, Z. 2016b. Hybrid multiple criteria decision-making methods: a review of applications for sustainability issues, *Economic Research-Ekonomska Istraživanja* 29(1): 857–887. <http://dx.doi.org/10.1080/1331677X.2016.1237302>
- Zavadskas, E. K.; Kaklauskas, A. 1996. *Pastatų sistemotechninis įvertinimas*. Vilnius: Technika. 275 p.
- Zear, A.; Singh, P. K.; Singh, Y. 2016. Intelligent Transport System: A Progressive Review, *Indian Journal of Science and Technology* 9(32): 1–8. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i32/100713, August 2016
- Zhu, S.; Li, D.; Feng, H. 2019. Is smart city resilient? Evidence from China, *Sustainable Cities and Society* 50, 101636. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101636>

Autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Zapolskytė, S.; Palevičius, V. 2018. Išmaniųjų miestų apžvalga ir analizė, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 10: 1–7. ISSN 2029–2341.

Zapolskytė, S.; Damidavičius, J.; Palevičius, V. 2019. Evaluation of concepts related to travels by autonomous vehicles, *Автомобильные дороги и мосты* 1(23): 49–55. ISSN 2225–9082.

Zapolskytė, S.; Burinskienė, M.; Trepanier, M. 2020 a. Evaluation criteria of smart city mobility system using MCDM method, *The Baltic journal of road and bridge engineering* 15(4): 196–224. ISSN 1822-427X.

Zapolskytė, S.; Vabuolytė, V.; Burinskienė, M.; Antuchevičienė, J. 2020b. Assessment of Sustainable Mobility by MCDM Methods in the Science and Technology Parks of Vilnius, Lithuania, *Sustainability* 12(23): 9947. ISSN 2071-1050.

Straipsniai kituose leidiniuose

Palevičius, V.; Zapolskytė, S.; Damidavičius, J. 2018. Alternative travel planning by autonomous vehicles, in *International scientific and technical conference, dedicated to*

the ninetieth anniversary of Belarusian road science „Highways: safety and reliability“, 22–23 November, 2018 Minsk: conference reports, 1: 213–222.

Zapolskytė, S.; Burinskienė, M. 2020. The smart mobility system and its infrastructure evaluation factors and indicators, *in ATINER's conference paper proceedings series: 10th Annual international conference on urban studies & planning*, 1–4 June 2020, Athens, Greece. Athens: ATINER, 1–13. ISSN 2529-167X

Summary in English

Introduction

Problem formulation

The ever-increasing urban population and complex urban governance require city governments and institutions to introduce new technologies to maintain a higher quality of urban space and deliver public services better. In recent years, smart city projects have become increasingly popular and widespread around the world, although the concept of a “smart city” is far from unambiguous. A smart city is an increasingly common urban development strategy that addresses urban problems through new technological advances.

As cities grow, inefficient and environmentally unfriendly transport has many consequences: negative effects on quality of life, productivity, energy consumption, congestion, air pollution and personal safety. In many cities, under-modernized transport infrastructure reduces the speed of transport and increases the number of accidents. Regulated intersections have a significant impact on traffic. Improperly set phases and time intervals that are not adapted to changing traffic conditions increase the problems caused by congestion. Factors such as the increase in the number of vehicles, public transport downtime, delays, major accidents and high levels of air pollution from car emissions are contributing to the need to modernize transport infrastructure. The problems of the mobility system directly affect not only the urban population but also the environment, businesses and city visitors.

Mobility is one of the most difficult problems metropolitan areas are facing. This includes both environmental and economic aspects and requires high-tech and fair human behaviour (Benevolo et al. 2016).

Relevance of the thesis

The mobility system is one of the most important sectors of the economy, determining the social and economic well-being of the population, ensuring the smooth movement of people and the supply of goods and services. Therefore, each city must adapt the various technological solutions to the development and modernization of the mobility system as rationally as possible to make the mobility system competitive and cost-effective and to ensure sustainable transport for the environment and society.

The relevance of the dissertation can be substantiated by European Parliament documents. 2010 The Directive of the European Parliament and the Council states that the use of ICT in the road transport sector and its interfaces with other modes of transport will make a significant contribution to environmental efficiency, including energy efficiency, road safety and security, public safety, passenger and freight mobility. It will also ensure the functioning of the internal market and greater competitiveness.

The European Union White Paper identifies ITS as a means of increasing the efficiency of mobility systems and reducing pollution and accidents. A technology plan and strategy for the deployment of ITS and the next generation multimodal traffic management and information systems is presented.

The recommendations of the international organizations for the transport sector set goals, which mainly concern the acquisition of sustainable vehicles, the promotion of sustainable mobility, the creation and development of alternative fuels infrastructure, and the promotion of ICT.

Research object

The object of the research is the technological and technical solutions of the urban mobility system infrastructure, which make cities smart.

Aim of the thesis

The aim of the thesis is to determine the complex evaluation criteria of the smart urban mobility system infrastructure for the hierarchical evaluation model creation and to compare the urban smart mobility systems with MCDM methods.

Tasks of the thesis

To achieve the aim of the thesis, the following objectives were formulated:

1. To analyse the scientific literature related to the development of smart cities in Lithuanian and foreign cities.
2. To perform the analysis of scientific literature related to criteria used for the ranking of the smart mobility system infrastructure.
3. To determine the factors and indicators for the complex evaluation of the smart urban mobility system infrastructure in accordance with the recommendations

of the European Commission documents and taking into account the ranking models provided by the researchers.

4. To determine the numerical values of the factors and indicators for the evaluation of the smart urban mobility system infrastructure.
5. Evaluate the quantitative and qualitative parameters of the urban mobility system infrastructure using the developed hierarchical model.
6. To perform the multi-criteria evaluation of Vilnius, Kaunas, Klaipėda and Montreal cities according to separate factors - groups of criteria (indicators).
7. To compare the smart urban mobility systems of Vilnius, Kaunas, Klaipėda and Montreal based on the city estimates obtained by multi-criteria methods.

Research methodology

The thesis was based on publications, research and scientific study materials of foreign and Lithuanian researchers. A review of modern scientific literature, European Commission publications and other legal sources was performed using the method of scientific theoretical analysis.

The factors and indicators significance of the smart urban mobility system infrastructure evaluation was determined by the expert methods according to their importance. Afterwards, the following multi-criteria methods were used: AHP, SAW, COPRAS, TOPSIS. Their results allow to assess the smartness level of cities and compare them with each other. The averaging, Borda and Copeland methods are used to establish a priority queue. The methods of mathematical statistics were also applied - the sensitivity analysis of the final results was performed.

Scientific novelty of the thesis

The novelty of this thesis is characterised by the following aspects:

1. Selected factors and indicators for the assessment of the smart urban mobility system infrastructure, defining the smartness level of the mobility system infrastructure.
2. Numerical estimates of the significance of indicators and factors were calculated using criteria weighting methods.
3. A proposed practical multi-criteria evaluation methodology for the evaluation of the smart mobility system infrastructure could be used to evaluate and compare smart cities.

Practical value of the research findings

The evaluation model of the smart mobility system infrastructure proposed in the thesis could be applied to assess the smartness level of the urban mobility system in a complex way and according to individual factors (groups of indicators). The proposed evaluation criteria could be used to monitor, evaluate and compare Sustainable Urban Mobility Plans.

Defended statements

1. The smartness of the urban mobility system infrastructure is determined by 22 measures (indicators), divided into 5 groups (factors): Motor travel and congestion reduction measures; Pollution abatement measures; Travel safety and accident reduction measures; Traffic management tools and services; Smart infrastructure measures.
2. The chosen multi-criteria evaluation methodology allows assessing with sufficient accuracy the impact of individual indicators on the smart urban mobility system infrastructure.
3. The model can be applied in practice to identify the level of smartness of the smart urban mobility system infrastructure and to compare cities with each other.

Approval of the research findings

Six scientific publications were published on the subject of the thesis: two in scientific journals, included in the *Clarivate Analytics Web of Science* database (Zapolskytė et al. 2020 a, b); one in a periodical peer-reviewed scientific journal (Zapolskytė et al. 2019); one in the publication of other international databases (Zapolskytė and Palevičius 2018); two in the peer-reviewed conference proceedings (Palevičius et al. 2018; Zapolskytė and Burinskienė 2020).

Research results were presented at two international scientific conferences abroad:

- International Scientific and Technical Conference to Commemorate the Ninetieth Anniversary of Belarusian Road Science "Highways: safety and reliability", 2018. November 22-23, Minsk, Belarus;
- International Conference „10th Annual international conference on urban studies & planning“, 2020. June 1-4, Athens, Greece.

Structure of the dissertation

The thesis consists of an introduction, three chapters, general conclusions, a list of references, a list of scientific publications by the author on the topic of the dissertation and 7 annexes.

The overall work fits in 130 pages and consists of 144 references, 29 figures, 28 tables and 40 numbered formulas.

1. Review of the scientific literature on smart cities and urban mobility system infrastructure

The chapter presents the analysis of a smart city, its components and characteristics, development in foreign and Lithuanian cities and the importance of a smart mobility system in a smart city. It provides a review of the smart mobility system literature for 2006–2021, an analysis of indicators and factors, and an overview of ITS by activity in different countries.

Smart cities are a recent phenomenon, but their number and spread have been growing rapidly in recent years. On all continents, cities are moving towards a more ad-

vanced urban space, using high technology to address key issues in urban life, such as traffic, pollution, poverty (Dameri 2013).

A smart city is characterised not just by components. To describe a smart city and its six characteristics, it is necessary to create a transparent and light hierarchical structure in which each level is described by the results of the level below. Therefore, each characteristic is characterised by a number of factors, and each factor is characterised by several indicators.

The smart mobility examined in the dissertation is one of the components of a smart city (Fig. S.1.1).

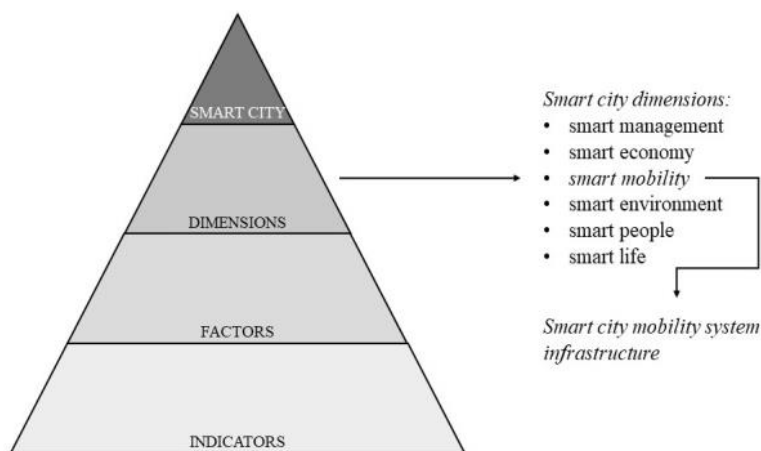


Fig. S.1.1. An intelligent transportation system in the context of a smart city

The countries of the world compete to be innovation leaders. Some cities have already done a lot in the field of intelligence – Singapore, Dubai, New York, Barcelona, Amsterdam and others. Lithuania does not lag behind other European countries in its smart decisions.

The infrastructure of a smart city consists of three parts: physical, ICT, and service (Mohanty et al. 2016). A smart mobility system also has the same structure. Therefore, smart mobility systems are important for the development of a smart urban mobility system. The architecture of intelligent transport systems varies from country to country but has many features in common. The development of ITS ensures effective reduction of congestion and accidents, traffic control and solves public transport problems.

After the review of the articles, it was established that the number of articles on the topic of smart mobility evaluation criteria is growing. In the period of 2006–2019, the largest number of articles was published in 2017. Among European countries, most articles were published in Italy. An analysis of the literature shows that even countries that are extensively researching urban mobility systems do not have a single model for evaluating these systems.

2. Development of a hierarchy model of a smart city mobility system infrastructure

In this chapter, the selection of factors and indicators for the evaluation of the smart mobility system infrastructure is performed, the research methodology is selected. According to the results of the expert survey, the significance of factors and indicators was determined, and a hierarchical evaluation model was developed.

The evaluation indicators used in the publications analysed in the first chapter were used to select the evaluation indicators of the smart mobility system infrastructure. The indicators were selected according to a hierarchical system (Fig. S.2.1) consisting of three levels.

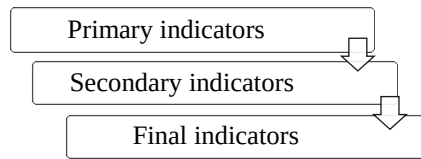


Fig. S.2.1. Hierarchical structure of evaluation indicators selection

Most of the indicators have been mentioned several times in the scientific literature. First, the number of primary indicators was calculated – 599. Primary indicators are indicators found in scientific publications, regardless of their recurrence. The names of the indicators with the same meaning have been harmonized. Duplicate indicators were eliminated leaving one at a time. A set of secondary indicators has been compiled – 194.

After selecting the evaluation factors and indicators, a hierarchical evaluation model of the smart city mobility system infrastructure was created (Fig. S.2.2).

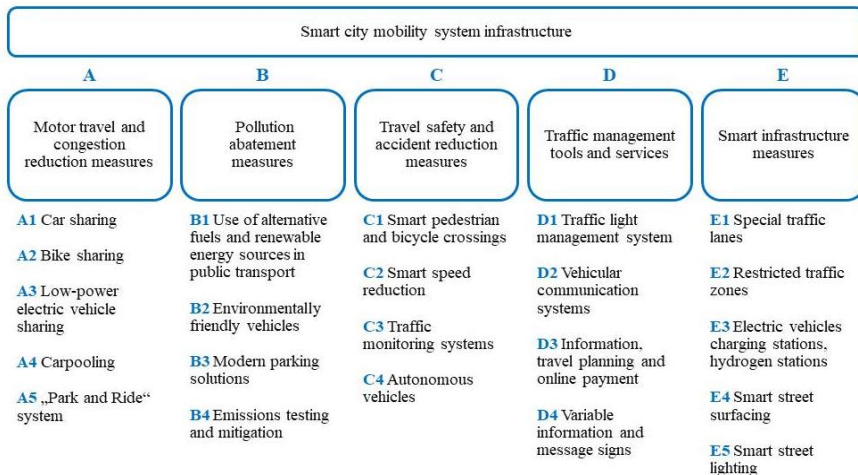


Fig. S.2.2. Hierarchical model of intelligent urban transport system infrastructure evaluation

The final set of indicators was compiled under the recommendations of the European Commission documents. Meetings with experts with scientific and/or professional experience in the field of mobility system infrastructure were also organised. To create a model that could be applied not only in Lithuania but also abroad, discussions were held on the importance of relevant indicators and on how specific indicators will affect the results at different city sizes, climatic conditions, public transport modes, etc. Finally, 22 indicators were selected. Also, taking into account the comments and recommendations of the experts, five factors were selected (A, B, C, D, E) and indicators were assigned to each of them.

3. Evaluation of the smart mobility system infrastructure of Vilnius, Kaunas, Klaipėda and Montreal cities

This section provides the decision-making data required for a multi-objective assessment. COPRAS, SAW and TOPSIS methods are used. Based on the results of the research performed in Chapter 2 and the calculated significance of factors and indicators, as well as the generalized significance of indicators, a comparison of the smart mobility system infrastructure in Vilnius, Kaunas, Klaipėda and Montreal were performed. Sensitivity analysis of the obtained results, depending on the significance of the indicators, was performed.

The infrastructure of the mobility system is the basis of communication, ensuring the social and economic activities of the city and the country. Vilnius was one of the first Lithuanian cities to feel the importance of the mobility system and the problems that arose. The network of city streets is unfavourable for the successful implementation of the mobility system due to its density and connectivity. The population density of Vilnius is 1465 inhabitants/km². The total density of streets is low and reaches 3.53 km/km² of the total area.

Kaunas is one of the most compact large cities in Lithuania, with a population density of 2146 inhabitants/km². Almost half of the city's territory is built up, and the density of the street network is 5.85 km/km². This creates good prospects for efficient distribution of traffic flows, determines the choice of travel method, length and duration. Another favourable factor for the mobility system is compactness: most of the territories are reached within a radius of 7 km from the geometric city centre. These macro-indicators determine two favourable things: the traffic intensity in the street network and the number of trips by private cars is much lower than in Vilnius. This results in significantly lower vehicle downtime costs and high traffic speeds.

Klaipėda is an exceptional city, as it is the only seaport in the country, connecting the country by the sea with other countries of the Baltic region and the world. The linear structure of Klaipėda's street network was formed along the seaport. This allows for the successful organization of the public transport arterial network, avoiding traffic flows on the inner streets of the quarters. The average density of the Klaipėda city street network does not create favourable opportunities for citizens to freely use the desired type of transport and avoid communication problems. The low population density (1543 inhabitants/km²) makes mobility in the city difficult.

Montreal is the second-largest of all Canadian cities. It has a population of 2014221. It is the city with the highest population density on the North American conti-

ment (Rahman et al. 2017). The population density reaches 4258.4 inhabitants/km². Montreal is one of the largest cities in the world, with a network of 33 km of underground tunnels connecting commercial and residential complexes, offices, subway stations and commuter trains. Underground shops, hotels, restaurants, etc. More than 500,000 people visit every day. This underground network is located in the city centre, mostly under tall buildings.

Montreal is a city surrounded by water, bordering the De Prairies River to the north, the St. Lawrence River to the south, Saint-Louis and Deux Montagnes lakes on the west. The island of Montreal has 266.6 km of coastline. The island of Montreal covers an area of 500 km². It has a port connected to 200 port cities around the world, Trudeau Airport and its railways and highways. The Montreal agglomeration has 5,600 km of highways, streets and local roads, and 880 km of railroads. It is connected to the metropolitan network by 17 bridges, a tunnel bridge and a metro system that connects the north and south coasts of Montreal.

Montreal aims to become the best city in North America for sustainable mobility. Until 2025 all buses purchased by the Montreal Transit Corporation are expected to be electric. In 2021, a light rail line covering 67 km of the metropolitan area is planned to be completed. It is planned that passengers will be transported between Montreal Trudeau Airport and the city centre in just 20 minutes.

(Zavadskas et al. 2016 a) proposed to solve a complex task with a large amount of information by a hybrid MCDM method, which was chosen for better calculation accuracy. The AHP method is one of the most commonly used when combined with other MCDM methods (Stojčić et al. 2019).

To obtain a reasonable solution to the complex challenges of the mobility system infrastructure, it is proposed to:

- Calculate the significance of factors and indicators according to expert assessment using AHP, direct assessment and rating methods. Apply integrated and generalized significances to the selection of the best alternative.
- Apply three MCDM methods to prioritize: SAW, COPRAS, and TOPSIS.

The model of multi-objective assessment of the smart mobility system infrastructure of Vilnius, Kaunas, Klaipėda and Montreal city consists of 5 factors and 22 indicators. Selected indicators are divided into quantitative and qualitative by data type. Decision systems use both quantitative and qualitative indicators. Quantitative indicators can be determined objectively. Qualitative indicators are used when there is no single measure of the advantage of alternatives. Their alternatives are then evaluated based on points, the system of which is based on the knowledge of specialists. An evaluation system has been developed for the evaluation of qualitative indicators.

Calculated significance of factors and indicators by AHP, direct estimation and ranking methods. The calculation results presented in Tables S.3.1 are further used to calculate the significance of the generalised and integrated indicators.

For the multi-criteria evaluation, a matrix of decisions was created, in which the calculated numerical values of the indicators or the assigned points were listed.

Table S.3.1. Calculated significances of indicators and factors

Factors	Methods			Indicators	Methods		
	AHP	Direct assessment	Ranking		AHP	Direct assessment	Ranking
A	0.2645	0.2360	0.2489	A1	0.1703	0.2020	0.1911
				A2	0.2163	0.2080	0.2179
				A3	0.1825	0.1887	0.2000
				A4	0.0962	0.1380	0.1378
				A5	0.3347	0.2633	0.2533
B	0.1505	0.1547	0.1600	B1	0.3840	0.3520	0.3333
				B2	0.4359	0.3593	0.3467
				B3	0.0924	0.1360	0.1533
				B4	0.0877	0.1527	0.1667
C	0.2045	0.2073	0.2044	C1	0.3065	0.3037	0.2867
				C2	0.3253	0.3711	0.3133
				C3	0.1664	0.1371	0.1933
				C4	0.2018	0.1881	0.2067
D	0.2422	0.2367	0.2356	D1	0.3936	0.3093	0.3333
				D2	0.3613	0.3007	0.3067
				D3	0.1424	0.2127	0.2000
				D4	0.1026	0.1773	0.1600
E	0.1383	0.1653	0.1511	E1	0.3296	0.2733	0.2400
				E2	0.2137	0.2233	0.2356
				E3	0.1760	0.1713	0.2044
				E4	0.1630	0.1707	0.1244
				E5	0.1177	0.1613	0.1956

To compare cities by factors, factor significance coefficients were calculated using AHP, direct estimation, and ranking methods. Generalised coefficients of the significance of the factors are used for the calculations (Fig. S.3.1).

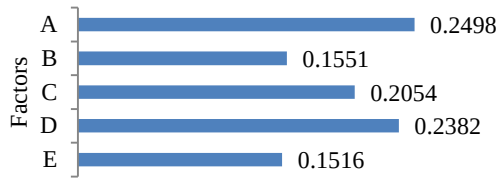


Fig. S.3.1 Factors significance of the smart mobility system infrastructure

The results of the calculation show that “Motor vehicle travel and congestion reduction measures” (0.2724) are of the greatest importance for the smartness level of a sustainable mobility system infrastructure, while “Traffic management and information measures” (0.2386) lags slightly behind. “Smart infrastructure measures” (0.1516) and “Pollution abatement measures” (0.1551) have the least impact.

The significances of the indicators in all three methods were also calculated and the significances were summarized (Fig. S.3.2).

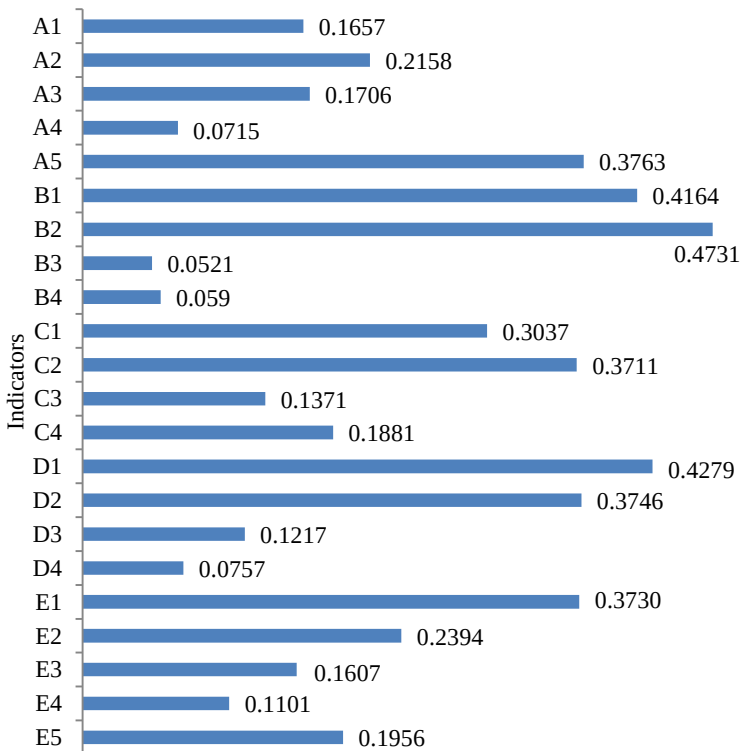


Fig. S.3.2. Indicators significance of the smart mobility system infrastructure

The smart mobility system infrastructure of cities Vilnius, Kaunas, Klaipėda and Montreal were compared according to each factor. Results for comparison of alternatives were calculated by MCDM methods SAW, COPRAS, TOPSIS.

Calculations were performed using an Excel spreadsheet. After a multi-criteria evaluation, the average value of the obtained results was calculated. The results are shown in the diagram (Fig. S.3.3).

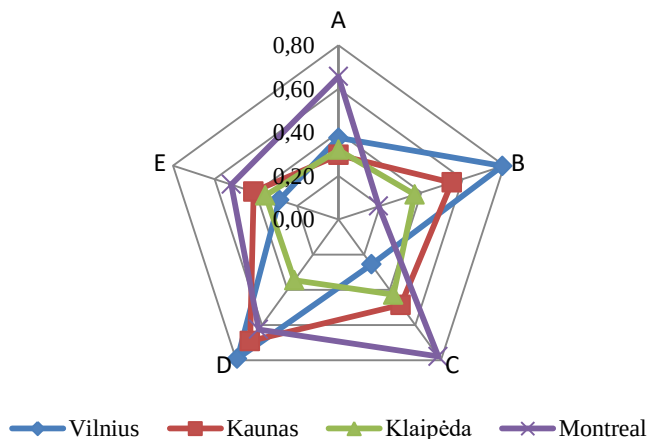


Fig. S.3.3. Evaluation of the intelligence of Vilnius, Kaunas, Klaipėda and Montreal cities according to separate factors

After the evaluation of the smart mobility system infrastructure in Vilnius, Kaunas, Klaipėda and Montreal by MCDM methods (SAW, COPRAS and TOPSIS) according to the factors, the results showed that “Motor travel and congestion reduction measures” are the most developed in Montreal, then in Vilnius, in the third – in Klaipėda and the fourth – in Kaunas. This result was determined by the fact that the Park and Ride system and bicycle sharing are more developed in Montreal, while the Park and Ride system does not exist in Kaunas at all.

“Pollution abatement measures” are most developed in Vilnius, in the second place – in Kaunas, in the third place – in Klaipėda and the fourth place – in Montreal. This result was determined by the fact that Vilnius has the largest number of environmentally friendly cars in terms of population, and Montreal has a lower use of alternative fuels and renewable energy sources in public transport.

“Travel safety and accident reduction measures” are most developed in Montreal, in the second place – in Kaunas, in the third place – in Klaipėda and the fourth place – in Vilnius. This result was due to the fact that Montreal has the highest percentage of smart pedestrian and bicycle crossings.

“Traffic management tools and services” are most developed in Vilnius, in the second place – in Kaunas, in the third place – in Montreal and the fourth place – in Klaipėda. This result was determined by the fact that Vilnius has the most developed centralized traffic light control systems.

“Smart infrastructure measures” are most developed in Montreal, in second place – in Kaunas, in third place – in Klaipėda and fourth place – in Vilnius. This result was due to the fact that Montreal has the largest number of special lanes in terms of route length.

To identify the city with the most developed smart mobility system infrastructure in a complex way, it is necessary to assess not only the significance of the indicators but also the significance of each factor. When completing the questionnaires, the experts were asked to evaluate not only the indicators assigned to each factor but also to assess the interrelationships between the factors.

Integrated significances were calculated using the calculated significances of factors and indicators according to the AHP, ranking and direct valuation methods. The calculation is performed according to the method recommended by Saaty (2008), called synthesis, where the significances of the indicators are multiplied by the significances of the factors to obtain the integrated significances of the indicators for each method. Summarizing the integrated significance of the indicators calculated by all three methods, the coefficients are obtained, which are used for the calculation and comparison of the smart urban mobility system infrastructure (Fig. S.3.4).

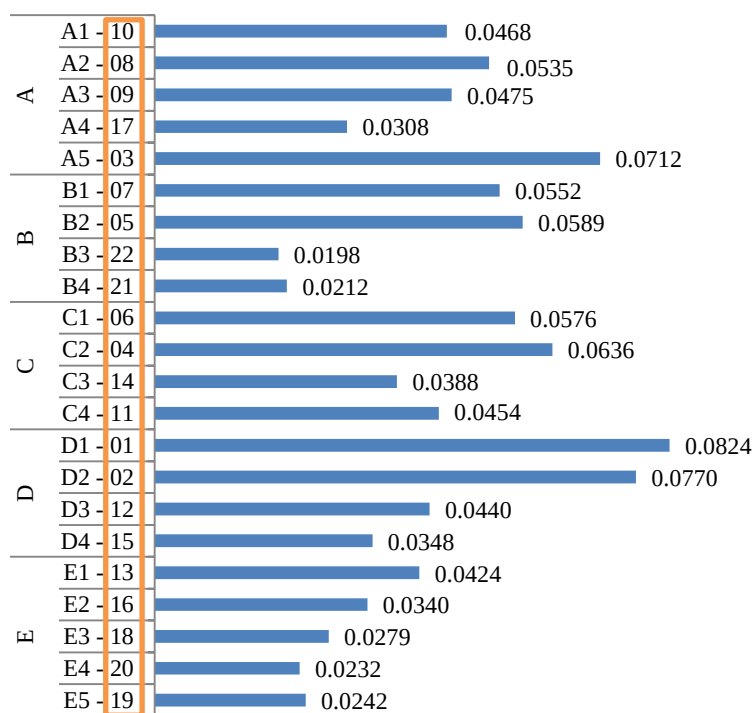


Fig. S.3.4. The integrated significances of the indicators are summarized

Using the generalised significance of integrated indicators in MCDM methods, the smartness of Vilnius, Kaunas, Klaipėda and Montreal mobility system infrastructure was assessed (Table S.3.2).

Table S.3.2. Calculation results of MCDM methods

City	MCDM metodos							
	SAW		COPRAS		TOPSIS		Average	
	Signi- fiance	Point	Signi- fiance	Point	Signi- fiance	Point	Signi- fiance	Point
Vilnius	0.7065	3	0.2378	2	0.4122	2	0.4522	2
Kaunas	0.7072	2	0.2371	3	0.3615	3	0.4353	3
Klaipėda	0.5865	4	0.2039	4	0.2758	4	0.3554	4
Montreal	0.7552	1	0.3095	1	0.6249	1	0.5632	1

After performing the multi-criteria assessment according to the COPRAS, SAW, TOPSIS methods, priority queues were formed (places according to smartness level). The calculated values show that in all three cases, the city of Montreal has the highest scores. According to the results calculated by the SAW and COPRAS methods, the smartness level of Vilnius and Kaunas mobility system infrastructure differs very little. The priority rankings calculated by COPRAS and TOPSIS methods coincided and the cities according to the smartness level of the mobility system infrastructure were arranged as follows: Montreal – 1, Vilnius – 2, Kaunas – 3, Klaipėda – 4. The results calculated by the SAW method differed and the order was as follows: Montreal – 1, Vilnius – 3, Kaunas – 2, Klaipėda – 4. Summarizing the results of the multi-criteria assessment, it was established that the smartest mobility system infrastructure is in Montreal and the least smart - in Klaipėda.

Sensitivity analysis was performed to ensure the reliability of the calculation results. The order of priorities changes depending on the change of the significance values of the indicators. According to the significance of the indicators calculated by each expert using AHP and direct assessment methods, the integrated significances of the obtained values were calculated. The integrated values of the indicators calculated for each expert were prioritized using SAW, COPRAS and TOPSIS methods. Based on the obtained calculation data, the following numerical characteristics are calculated: the mean of the alternative rationality ($\bar{a}$), the standard deviation (S), the percentage coefficient of variation of the alternative (cvp).

The coefficient of variation of the rationality values of all cities for the used MCDM methods is: SAW – 7.35%, COPRAS – 8.73%, TOPSIS – 26.21%.

The TOPSIS method is about 3.5 times more sensitive than the SAW method and 3 times more sensitive than the COPRAS method. After evaluating the results, it can be

stated that the small change in the significance of the indicators will not affect the results calculated by the SAW, COPRAS and TOPSIS methods.

The coefficient of variation of rationality values for all alternatives was calculated: Vilnius – 14.15%, Kaunas – 13.6 %, Klaipėda – 14.60%, Montreal – 14.93%.

Thus, according to the calculated total variation coefficient of rationality values, the second alternative (13.64%) has the smallest error, and the fourth (dominant) alternative has the largest error (14.93%).

The sensitivity analysis of the influence of the indicator significance on the results showed that the results for the determination of the best alternative are sufficiently reliable and can be used in the calculations.

General conclusions

1. Using the analysis of scientific literature and applying the method of expert evaluation, a system of indicators of the mobility system infrastructure was created. As a result of this system, 22 key indicators were selected. They are divided into five groups: factors in applying the main objectives of the European Commission's Green Paper for the development of urban transport systems: reducing congestion; pollution reduction; implementation of smart technologies; increasing accessibility; improving safety and security.

2. The mobility system infrastructure must be analysed in light of the principles of sustainable development. The developed conceptual evaluation model of the mobility system infrastructure allows performing multi-criteria analysis, comprehensively assessing the smartness level of the mobility system infrastructure.

3. Using the proposed evaluation model, the evaluation of the mobility system infrastructure and the comparison of cities can be performed in two stages:

- When the multi-criteria evaluation is performed for each factor (group of indicators) separately. The weak and strong sides of each city's Smart mobility system and infrastructure are then identified.
- When a comprehensive assessment of a smart mobility system infrastructure is carried out according to the integrated significance of indicators, then the significance of each indicator is multiplied by the factor to which it belongs. A leading city is identified and ranked according to smartness level.

4. Summarizing the significance of the factors calculated by different methods, it was found that the influence of the factors on the smart mobility system infrastructure differs significantly according to the experts' assessments: "Motor travel and congestion reduction measures" (0.2724), "Traffic management tools and services" (0.2382), "Travel safety and accident reduction measures" (0.2054), "Pollution abatement measures" (0.1551), "Smart infrastructure measures" (0.1516).

5. Cities should first and foremost encourage people to move more sustainably to achieve high levels of smartness, as the factor "Motor travel and congestion reduction measures", assessed by experts as having the greatest impact on smart city mobility system infrastructure. It requires a high level of people awareness and desire for sustainable transport. Private capital companies can contribute to the implementation of these factor measures, in which case the use of city funds is less.

6. Summarizing the integrated significance of the indicators calculated by different methods, it turned out that the greatest influence on the intelligence of the smart mobility system infrastructure has: "Traffic light management system" (0.0824), "Vehicular communication systems" (0.0770), "Park and Ride system" (0.0712), "Smart speed reduction" (0.0636), "Environmentally friendly vehicles" (0.0589). The following have the least impact on the smart mobility system: "Modern parking solutions" (0.0198), "Emissions testing and mitigation" (0.0212), "Smart street pavements" (0.0232), "Smart street lighting" (0.0242), "Electric vehicles charging stations, hydrogen stations" (0.0279).

7. After a comprehensive assessment of the urban mobility system infrastructure according to the generalised integrated indicators, it was found that the smartest mobility system infrastructure is in Montreal, in the second place – in Vilnius, in the third – in Kaunas, in the fourth – in Klaipėda.

8. The developed evaluation model is universal, therefore there are no special requirements for the cities, whose smartness level of mobility system infrastructure will be compared. The cities to be compared do not have to be the same or similar size.

9. The developed model is flexible, which can be adapted to the real conditions of the cities being compared (evaluated). Advantages of the model:

- Detailed set of indicators;
- Indicators can be changed from quantitative to qualitative and vice versa as needed. Some indicators can be assessed by scoring.

Recommendations

After applying the methodology proposed in the dissertation, it is expedient to determine the most important groups of measures and their priorities in groups. The smart mobility system measures specified in the recommendations are proposed to be implemented in the order indicated.

1. According to the significance of individual indicators, it has been determined that, firstly, the reduction of motor traffic flows in the central part of the city is necessary, and this is done by innovative Park and Ride, Park and Bike, Bike and Ride, Bikesha-ring systems. Their implementation would encourage the use of alternative and environmentally friendly modes of transportation, such as cycling, walking and public transport. In addition, economic measures are proposed to encourage travellers to use alternative modes of transportation, such as a ban on parking cars in the city centre or high parking costs, free or cheap public transport.

2. One of the most important tasks of smart mobility systems is to ensure the safety of road users and the reduction of accidents, through the use of smart speed reduction measures, the creation of quiet areas and calm streets with reduced speeds, variable signs, reverse management. It is recommended to install a coordinated traffic management system in the city, which would monitor traffic flows, control the network of traffic lights, coordinate traffic on the main streets and adapt to changing traffic conditions during the day. It is recommended to install ITS at congested intersections, which would give priority to public transport, the implementation of which would ensure smoother public transport journeys and higher efficiency of operational public transport.

3. Prioritize public transport by hierarchizing the system of public transport routes in the city or implementing high-capacity public transport (metro, tram, high-speed

buses). Public transport stops should provide real-time information on public transport routes, and busy stops should be equipped with smart displays. On high-capacity public transport routes, stops are less frequent than on conventional routes, higher-capacity vehicles are used, priority is given to using transport infrastructure and public transport routes, and passing all intersections where physically separated lanes are possible.

4. Promote the use of environmentally friendly vehicles to ensure a sustainable living environment. In particular, to expand the infrastructure of electric vehicles: it is appropriate to install them in densely populated residential areas, parking lots or underground parking spaces. Near public facilities, it is expedient to install the infrastructure of electric vehicles where their greatest concentration is – in the central part of the city, in industrial districts. Electric vehicle charging stations at business objects could be installed in closed parking lots, corporate, office areas. It is also recommended to expand charging stations for electric bicycles and scooters.

5. It is recommended to install convenient and safe infrastructure for the development of non-motorized transport (walking, cycling and other means) in the internal connections of individual parts of the city, in densely populated areas and near attraction centres. Well-organized infrastructure would allow travellers to reach their destination comfortably and on time and at the same time change the travel habits of the population, giving priority to ecological ways of travelling.

6. It is recommended to install parking ITS system to help drivers find available spaces where they are difficult for the driver to see, in both above-ground and underground car parks. This system would save time and fuel, help avoid unnecessary idling when searching for a parking space. Information can be displayed on signposts or integrated into travel planning apps.

Priedai³

- A priedas.** Ekspertų apklausos anketų pavyzdžiai
- B priedas.** AHP metodu apskaičiuoti veiksnų ir rodiklių reikšmingumai
- C priedas.** Porinio palyginimo matricų suderinamumo santykiai C.R.
- D priedas.** Veiksnų ir rodiklių reikšmingumai pagal ekspertų tiesioginį vertinimą
- E priedas.** Integruoti rodiklių reikšmingumai, apskaičiuoti trimis skirtingais metodais
- F priedas.** Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija
- G priedas.** Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

³ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Simona ZAPOLSKYTĖ

IŠMANIOJO MIESTO SUSISIEKIMO SISTEMOS
INFRASTRUKTŪROS KOMPLEKSINIS VERTINIMO MODELIS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
statybos inžinerijos (T 002)

COMPLEX EVALUATION MODEL OF SMART CITY
MOBILITY SYSTEM INFRASTRUCTURE

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Civil Engineering (T 002)

2021 12 16. 12,5 sp. l. Tiražas 20 egz.
Leidinio el. versija <https://doi.org/10.20334/2021-055-M>
Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius
Spausdino BJ UAB „Baltijos kopija“,
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius