

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultāte
Informācijas tehnoloģijas institūts

Nadežda ZENINA

Doktora studiju programmas „Informācijas tehnoloģija” doktorante

**TRANSPORTA PIEPRASĪJUMA MODEĻA IZSTRĀDE AR
MAŠĪNMĀCĪŠANĀS UN IMITĀCIJAS MODELĒŠANAS METODĒM**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs:
profesors *Dr. habil. sc. ing.*
J. MERKURJEVS

Zinātniskie konsultanti:
profesors *Dr. habil. sc. comp.*
A. BORISOVS
asoc. profesors *Dr. sc. ing.*
A. ROMĀNOVS

RTU Izdevniecība
Rīga 2017

Zeņina N. Transporta pieprasījuma modeļa izstrāde ar mašīnmācīšanās un imitācijas modelēšanas metodēm. Promocijas darba kopsavilkums. – R.: RTU Izdevniecība, 2017. – 46 lpp.

Iespiests saskaņā ar 2017. gada 13. janvāra lēmumu, protokols Nr. 12100-2/1.

Šis darbs ir sagatavots ar valsts pētījuma programmas atbalstu. Programmas nosaukums: "Nākamās paaudzes informācijas un komunikāciju tehnoloģiju (IKT) pētniecības valsts programma (*NexIT*)".

ISBN 978-9934-10-941-6

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2017. gada 12. jūnijā plkst. 14.30 Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultātē, Sētas ielā 1, 202. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Zigurds Markovičs
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors Dr. Manfred Gronalt
BOKU – University of Natural Resources and Life Sciences, Austria

Docents *Dr. sc. ing.* Mihails Savrasovs
Transporta un sakaru institūts, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Nadežda Zeņina (Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, rezultātu analīze un secinājumi, literatūras saraksts, septiņi pielikumi, 55 attēli, 38 tabulas, kopā 163 lappuses. Literatūras sarakstā ir 158 nosaukumi.

VISPĀRĪGS DARBA RAKSTUROJUMS

Ievads un tēmas aktualitāte

Mūsdienās dinamiski mainīgajos apstākļos pilsētas transporta plānošanas inženieriem jāspēj pilnvērtīgāk novērtēt plānotās transporta infrastruktūras izmaiņas, ko ietekmē transporta plūsmu intensitāšu pieauguma, jaunu būvju celtniecības un esošo būvju apjomu un funkciju pārmaiņas. Transporta pieprasījumu modeļus izmanto, lai atspoguļotu ceļotāja braucienu izvēles ceļojuma laikā. Braucienu izvēles atspoguļošanu ietekmē dažādi transporta sistēmas raksturojumi: satiksmes intensitāte, krustojumu ģeometrija, apbūves objekta platība, funkcionalitāte, sociāli ekonomiskie rādītāji u. c. Transporta pieprasījuma modeļi ļauj novērtēt nākotnes satiksmes izmaiņas pēc apbūves teritorijas funkcionalitātes pārmaiņām un identificēt potenciālās transporta sistēmas infrastruktūras šaurās vietas. Balstoties uz modeļa izpildes rezultātiem, transporta plānotāji var secināt par transporta risinājumu efektivitāti pirms to realizācijas. Neskatoties uz pieejamo transporta pieprasījuma modeļa veidu dažādību [7, 20, 24, 80, 83, 93, 103, 104, 155], joprojām ir aktuāla problēma par piemērota transporta pieprasījuma modeļu veidu un metožu izvēli, lai būvētu modeli satiksmes plūsmu ietekmes analīzei. Izstrādātajam transporta pieprasījuma modelim ir jābūt viegli pielāgojamam dažādām teritorijām, izmaksu ziņā adekvātam, izstrādātam prognozējamā laika periodā un spējīgam novērtēt atsevišķu ceļotāju braucienu uzvedību ceļojuma laikā [24, 126, 134].

Promocijas darbā ir veikts pētījums par transporta pieprasījuma imitācijas modeļa izstrādi satiksmes plūsmu ietekmes analīzei, izmantojot imitācijas modelēšanas un mašīnmācīšanās metodes, lielāko uzmanību pievēršot imitācijas modelī ģenerēto braucienu skaita noteikšanas un satiksmes veida izvēles soļiem. Ģenerēto braucienu skaitu nosaka, izmantojot regresijas vienādojumus balstītas informācijas sistēmas. Zināmās informācijas sistēmās atrodami mērījumi par izolētām teritorijām, kurām apkārt nav pieejama gājēju infrastruktūra un sabiedriskais transports un kurās apbūves objektam ir tikai viena funkcionalitāte vai arī ir pieejams mazs mērījumu skaits, un tā rezultātā ģenerētais braucienu skaits ir novērtēts par mazu vai par lielu. Promocijas darbā ir veikta analīze par viedo izaugsmes metožu lietojumu ģenerēto braucienu skaita noteikšanā, lai noteiktie ģenerētie transporta braucieni būtu tuvāk novērotajai transporta sistēmai. Savukārt, nosakot satiksmes veida izvēli braucienos bāzētā transporta pieprasījuma modelī, netiek ietvertas atsevišķa ceļotāja vēlmīes satiksmes veida izvēlē, jo satiksmes veida izvēle ir balstīta uz nejaušas derīguma maksimizācijas principu, kas noved pie ierobežotas indivīda ceļojuma uzvedības analīzes un pilnā mērā nenodrošina iespēju novērtēt transporta infrastruktūras izmaiņas. Promocijas darbā veiktajos pētījumos ir risināts satiksmes veida izvēles uzdevums ar datizraces metodēm un lēmumu koku algoritmiem, kuriem ir elastīgākas struktūras, lai reprezentētu attiecības starp satiksmes veida kategorijām, pretēji

tradicionālajiem *logit* regresijas modeļiem, un nav nepieciešamas arī zināšanas par sākotnējo specifisko modeļa datu struktūru.

Pēdējais transporta pieprasījuma imitācijas modeļa solis ir modeļa validācija, kas ietver verifikāciju un kalibrēšanu. Transporta pieprasījuma imitācijas modeļa validāciju un kalibrēšanu parasti veic tā izstrādes gaitā, lai pārliecinātos, vai izstrādāšanas procesā aplūkojamajā posmā modelēšanas rezultāti atbilst tā sākumā definētajiem noteikumiem un prasībām. Promocijas darbā apkopoti vairāku pētnieku [26, 41, 54, 92] transporta pieprasījuma imitācijas modeļu validācijas, verifikācijas un kalibrēšanas jēdzienu definīcijas, kas norāda, ka nepastāv vienotas definīcijas katram jēdzienam. Imitācijas modeļa pārbaudē par atbilstību novērotajai transporta sistēmai atsevišķi veic validāciju, kalibrēšanu un verifikāciju. Pētnieki [26] ietver imitācijas modeļa verifikāciju validācijas posmā. Imitācijas modeļu kalibrēšanas parametru izvēle un to vērtību noteikšana ir atkarīga no imitācijas modeļa uzbūves mērķa, sarežģītības, savākto satiksmes datu kvalitātes, daudzuma un no izvēlēta imitācijas modeļa veida. Promocijas darbā veiktajos pētījumos ir risināts globālo kalibrēšanas parametru vērtības noteikšanas uzdevums ar grupēšanas algoritmiem, kas ātri var apstrādāt lielu transporta datu apjomu un prot strādāt ar nepārtrauktiem un kategoriskiem mainīgiem, kad nepieciešamais klasteru skaits nav zināms.

Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir transporta pieprasījuma imitācijas modeļa uzbūves pieejas izstrādāšana, balstoties uz mašīnmācīšanās un imitācijas modelēšanas metodēm, satiksmes plūsmu ietekmes analīzei. Mērķa sasniegšanai tiek izvirzīti šādi uzdevumi.

1. Izpētīt transporta pieprasījuma modeļu veidus un to lietošanu satiksmes plūsmu ietekmes analīzē.
2. Izanalizēt transporta pieprasījuma imitācijas modeļa validācijas procedūras satiksmes plūsmu ietekmes analīzei.
3. Veikt mašīnmācīšanās un imitācijas modelēšanas metožu izmantojamības analīzi transporta pieprasījuma modeļos.
4. Noteikt mašīnmācīšanās un imitācijas modelēšanas metodes transporta pieprasījuma imitācijas modeļa uzbūvei.
5. Izstrādāt transporta pieprasījuma imitācijas modeli balstītu satiksmes veida izvēles metodiku, kurā satiksmes veida izvēle ietver ceļotāja transporta veida vēlmīes brauciena laikā.
6. Izstrādāt transporta pieprasījuma imitācijas modeļa kalibrēšanas procedūru, kas nosaka tās parametru vērtības ar grupēšanas algoritmu.
7. Uzbūvēt transporta pieprasījuma imitācijas modeli jauktai apbūvei.

Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes

1. Transporta viedās izaugsmes metodes uzlabo ģenerēto transporta braucienu skaita noteikšanu, analizējot transporta sistēmas elementus.
2. Satiksmes veida izvēle ar datizraces metodēm uzlabo satiksmes veida izvēles klasifikācijas rezultātus transporta pieprasījuma imitācijas modelī un ietver ceļotāja transporta veida vēlmes brauciena laikā.
3. Transporta pieprasījuma imitācijas modeļa kalibrēšanas procedūras izstrādāšana nodrošina kalibrēšanas parametru vērtību noteikšanas uzdevuma atrisināšanu ar grupēšanas metodēm.

Pētījuma objekts un priekšmets

Promocijas darba pētījuma objekts ir transporta pieprasījuma imitācijas modelis.

Pētījuma priekšmets ir mašīnmācīšanās un imitācijas modelēšanas metodes.

Darbā izmantotās pētījumu metodes

Promocijas darba pamatā ir zinātniskie pētījumi, kas balstās uz vispārējās un speciālas literatūras analīzi, Latvijas Republikas likumiem, Rīgas pilsētas normatīvajiem dokumentiem un statistisko datu analīzi. Darba teorētisko pētījumu pamatu transporta pieprasījuma imitācijas modeļa uzbūvei veido vairāku ārzemju zinātnieku – *J. D. Ortúzar, L. G. Willumsen, M. E. Ben-Akiva, M. D. Meyer, E. J. Miller u. c.* – darbi. Promocijas darbā ir izmantotas mašīnmācīšanās, datizraces un transporta imitācijas modelēšanas metodes. Transporta pieprasījuma imitācijas modeļu analīzei ir lietoti lineārās regresijas vienādojumi, viedās izaugsmes metodes, multinomiālie logit modeļi, diskriminantu analīze un divu līmeņu pieeja (angļu val. *Bi-level approach*). Satiksmes veida izvēles paraugkopas noteikšanā izmantoti minimālā apjoma elipsoīds, minimālais kovariācijas determinantes novērtējums, entropija un informācijas ieguvums un citas datizraces metodes. Satiksmes veida izvēles metodikas izstrādē ir izmantoti lēmumu koki un statistiskās metodes iegūto rezultātu novērtēšanai. Transporta pieprasījuma imitācijas modeļa kalibrēšanas procedūras izstrādes gaitā ir izmantota kombinētā sistēmu imitācijas modelēšanas tehnoloģija, kā arī imitācijas modelēšanas un grupēšanas algoritmi – divsoļu grupēšanas un aglomeratīvais hierarhiskais algoritms.

Darba zinātniskais jaunieguvums

Promocijas darba zinātniskais jaunieguvums ir izstrādātā transporta pieprasījuma imitācijas modeļa uzbūves pieeja, kas ļauj pilnvērtīgāk novērtēt transporta infrastruktūras izmaiņas pirms to īstenošanas, ietverot atsevišķa ceļotāja vēlmes satiksmes veida izvēlē. Izstrādātā transporta pieprasījuma imitācijas modeļa uzbūves pieeja ietver:

1. veikto ģenerēto transporta braucienu pielāgošanas viedās izaugsmes metožu analīzi;

2. izstrādāto satiksmes veida izvēles metodiku satiksmes plūsmu ietekmes analīzei;
3. izstrādāto transporta pieprasījuma imitācijas modeļa kalibrēšanas procedūru satiksmes plūsmu ietekmes analīzei.

Pētījumu izstrādes gaitā ir sasniegti arī citi starprezultāti, kas attiecināmi uz braucienos bāzētu transporta pieprasījuma imitācijas modeļa uzbūves pieejas izstrādi: veikta transporta pieprasījuma modeļu veidu izpēte un modeļu izmantošanas salīdzinošā analīze, izanalizētas transporta pieprasījuma imitācijas modeļa validācijas procedūras, veikta datizraces metožu kombinēšana paraugkopas izvēlei trokšņainu datu mazināšanai, veikts gradienta un šķērsošanas izcelsmes un galamērķa sākotnējās matricas novērtējums transporta braucienu noteikšanai, uzbūvēts transporta pieprasījuma imitācijas modelis jauktās apbūves objektam Rīgā, Hanzas ielas apkārtnē.

Darba praktiskā nozīmība un aprobācija

Darba praktiskā nozīmība – ir piedāvāta transporta pieprasījuma izstrādes pieeja, kas nodrošina imitācijas modeļa uzbūvi, sākot no konceptuālā modeļa izveides līdz modelējamās transporta sistēmas rādītāju ticamu novērtējumu satiksmes plūsmu ietekmes analīzei. Izstrādātie risinājumi ir aprobēti vairākos industriālos satiksmes plūsmu ietekmes analīzes projektos, kurus promocijas darba autore realizēja, 10 gadu strādājot vadošā transporta infrastruktūras plānošanas un modelēšanas inženiera amatā, piemēram, “**Transporta plūsmas** izpētes ziņojums Tirdzniecības centra “Alfa” rekonstrukcijai (2015, SIA “*Solvers*”)”, “**Transporta plūsmas** izpēte un prognozes projekts daudzfunkcionālajam biroju centram “*New Hanza City*” teritorijā starp Pulkveža Brieža, Hanzas un Skanstes ielām (2011, SIA “*Solvers*”)”, “**Transporta plūsmu** un satiksmes infrastruktūras nodrošinājuma izpētes, analīzes un priekšlikuma projekts Rīgas pilsētas teritorijas daļai, kas ietver Hanzas šķērsojuma trasi (2010, SIA “*Solvers*”)”, “**Transporta plūsmas** izpēte un prognozes projekts ēku kompleksam teritorijā starp Rūpniecības, Pētersalas un Katrīnas ielām (2008, SIA “*Solvers*”)”, nosakot satiksmes veida izvēles alternatīvas uz perspektīvo attīstības objektu, kalibrējot transporta pieprasījuma imitācijas modeļus un novērtējot transporta attīstības alternatīvas ar imitācijas modelēšanas līdzekli.

Izstrādātās transporta pieprasījuma imitācijas modeļa uzbūves pieejas starprezultāti un izstrādnes ir izmantoti Latvijas valsts pētījumu programmas "Nākamās paaudzes informācijas un komunikāciju tehnoloģiju (IKT) pētniecības valsts programma (*NexIT*)" projekta "Sensoru tīklu un signālu apstrādes pielietojumi tautsaimniecībā" (2014. g. – 2017. g.).

Promocijas darba rezultāti ir izmantoti Rīgas Tehniskās universitātes praktiskajās un laboratorijas nodarbībās mācību priekšmetos „Loģistikas informācijas sistēmas” un “*Information technologies in logistics*”, kā arī vieslekcijās „IM pielietošana pilsētas transporta infrastruktūras attīstībā”, kuras

autore kopš 2011. gada regulāri pasniedz studiju programmas „Informācijas tehnoloģija” maģistriem kursā „Sistēmu imitācijas un modelēšanas tehnoloģija”.

Uzstāšanās starptautiskās konferencēs

Darba rezultāti tika ziņoti un guva pozitīvu vērtējumu deviņās zinātniskajās konferencēs: RTU 57. starptautiskajā zinātniskajā konferencē (Latvija, 2016), RTU 56. starptautiskajā zinātniskajā konferencē (Latvija, 2015), starptautiskajā konferencē “*The 17th International Conference on Harbor, Maritime & Multimodal Logistics Modelling and Simulation*” (Itālija, 2015), starptautiskajā konferencē “*The 8th International Conference on Urban Planning and Transportation*” (Spānija, 2015), starptautiskajā konferencē “*Reliability and Statistics in Transportation and Communication (RelStat'14)*” (Latvija, 2014), RTU 55. starptautiskajā zinātniskajā konferencē (Latvija, 2014), starptautiskajā konferencē “*The 17th International Conference Transport Means*” (Lietuva, 2013), RTU 53. starptautiskajā zinātniskajā konferencē (Latvija, 2011), RTU 51. starptautiskajā zinātniskajā konferencē (Latvija, 2009).

Publikācijas

Promocijas darba pamatzinātniskos rezultātus autore atspoguļoja 13 zinātniskajās publikācijās:

1. Zenina N., Romanovs A., Merkuryev J. Trip-based transport travel demand model for intelligent transport system measure evaluation based on micro simulation // International journal of Simulation and Process Modelling, 2017 (accepted for publication).
2. Zenina N., Romanovs A., Merkuryev J. Transport simulation model calibration with two-step cluster // Scientific Journal of RTU, Computer Science. Information Technology and Management Science. – vol. 18, 2015, pp. 49–57. <EBSCO, CSA/ProQuest, VINITI>.
3. Zenina N., Romanovs A., Merkuryev J. Modelling Based Approach for Attracted Transport Readiness Trips Estimation to the Site // International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, Vol. 9, 2015, pp. 410–417. <SCOPUS>.
4. Merkuryev J., Zenina N., Romanovs A. Intelligent Transport Measures as a Component of Cyber-Physical Systems: Case Study for Adazi City // Proceedings of the 17th International Conference on Harbor, Maritime & Multimodal Logistics Modelling and Simulation, Itālija, Bergeggi, Genova: DIME Università di Genova, 2015, pp. 57.–65. <SCOPUS>.
5. Zenina N., Romanovs A., Merkuryev J. Incoming Generated Traffic Flow Estimation based on Transport Access Design and Level of Service // In: Advances in Environmental Science and Energy Planning: Proceedings of the WSEAS 8th International Conference on Urban Planning and Transportation, Spain, Tenerife: WSEAS Press, 2015, pp. 195–201.

6. Zenina N., Merkurjev J. The impact of accessibility on transport infrastructure within commercial site // Reliability and Statistics in Transportation and Communication (RelStat'14), Latvia, Riga, 2014.
7. Zenina N., Borisovs A. Regression Analysis for Transport Trip Generation // Scientific Journal of RTU, Computer Science. Information Technology and Management Science. – vol. 16, 2013, pp. 89–94. <EBSCO, CSA/ProQuest, VINITI, Google Scholar>.
8. Zenina N., Borisovs A. Clustering algorithm for travel distance analysis // Scientific Journal of RTU, Computer Science. Information Technology and Management Science. – vol. 16, 2013, pp. 85–88. <EBSCO, CSA/ProQuest, VINITI, Google Scholar>.
9. Zenina N. Origin destination matrix estimation from traffic counts based on Bi level approach // Transport means 2013, Kaunas, Lithuania. <Web of Science (Conference Proceedings Citation Index), SCOPUS>.
10. Zenina N., Borisovs A. Transportation Mode Choice Analysis Based on Classification Methods // Scientific Journal of RTU, Computer Science. Information Technology and Management Science. – vol. 16, 2011, pp. 49–53. <EBSCO, CSA/ProQuest, VINITI>.
11. Zenina N., Borisovs A. Artificial neural network for analysis of the traffic flow // Proceedings of 16th International Conference on Soft Computing – MENDEL 2010, Czech Republic, Brno, Brno University of Technology, 2010, pp. 25–25. <Thomson Reuters ISI Web of Science, SCOPUS>.
12. Zenina N., Merkurjevs J. Analysis of Simulation input and output to compare simulation tools // Mechanics Transport Communication, Bulgaria, Sofia, 2009, pp. V-4 – V-10.
13. Zenina N., Merkurjev J. An overview of Artificial neural networks application in transportation // Proceedings of 14th International Conference on Soft Computing, Czech Republic, Brno, Brno University of Technology, 2008, pp. 2–15. <Thomson Reuters ISI Web of Science, SCOPUS>.

Darba struktūra un apjoms

Promocijas darbā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts un septiņi pielikumi. Promocijas darba pamatteksts ir izklāstīts 163 lappusēs un paskaidrots ar 55 attēliem un 38 tabulām. Literatūras sarakstā ir iekļautas 158 atsauces. Promocijas darba struktūra ir aprakstīta tālāk tekstā.

Pirmajā nodaļā **“Transporta pieprasījuma modeļi un to lietojamība satiksmes plūsmu ietekmes analīzē”** sniegts apskats par satiksmes plūsmu ietekmes analīzi. Izpētīti transporta pieprasījuma modeļu veidi satiksmes plūsmu ietekmes analīzei un veikta modeļu izmantošanas salīdzinoša analīze. Apkopotas transporta pieprasījuma imitācijas modeļu validācijas, verifikācijas un kalibrēšanas jēdzienu definīcijas. Izanalizētas transporta pieprasījuma modeļu validācijas procedūras.

Otrajā nodaļā “**Mašīnmācīšanās metožu lietojums satiksmes plūsmu ietekmes analīzei transporta pieprasījuma modeļos**” veikta mašīnmācīšanās un imitācijas modelēšanas metožu izmantojamības analīze transporta pieprasījuma modeļos. Aprakstītas metodes, kas tiek izmantotas transporta pieprasījuma imitācijas modeļa uzbūvei.

Trešajā nodaļā “**Satiksmes veida izvēles metodikas izstrāde satiksmes plūsmu ietekmes analīzei**” ir piedāvāta satiksmes veida izvēles metodika ar datizraces metodēm un lēmumu koku algoritmiem, kurā satiksmes veida izvēle ietver ceļotāja transporta veida vēlmes brauciena laikā. Nodaļa ir veltīta transporta pieprasījuma imitācijas modeļa uzbūvei. Veikta ģenerēto transporta braucienu pielāgošanas viedās izaugsmes metožu analīze. Veikts gradienta un šķērsošanas izcelsmes un galamērķa sākotnējās matricas novērtējums transporta braucienu noteikšanai.

Ceturtajā nodaļā “**Transporta pieprasījuma imitācijas modeļa kalibrēšanas procedūras izstrāde satiksmes plūsmu ietekmes analīzei**” ir piedāvāta imitācijas modeļa kalibrēšanas procedūra modeļa kalibrēšanas parametru vērtību izvēlei ar grupēšanas algoritmiem. Kalibrēšanas procedūra nodrošina trešajā nodaļā uzbūvētā transporta pieprasījuma imitācijas modeļa adekvātuma pārbaudi.

Piektajā nodaļā “**Transporta pieprasījuma imitācijas modeļa uzbūve jauktai apbūvei**” ir izstrādāts transporta pieprasījuma imitācijas modelis jauktās apbūves objektam Rīgā, Hanzas ielas apkārtnē, kura uzbūvē izmantota promocijas darbā piedāvātā pieeja.

Promocijas darba nobeigumā ir apkopoti darba rezultāti un secinājumi, literatūras saraksts un pielikumi.

Promocijas darba **pirmais pielikums** attēlo transporta braucienu norīkošanas parametru uzstādīšanas piemēru transporta braucienu norīkošanai transporta pieprasījuma imitācijas modelī. Transporta attīstības eksperimentu raksturojums “Ādažu pilsētas centrālās daļas pieejamības ” piemēram sniegts **otrajā pielikumā**. Modeļa validācijai un kalibrēšanai izmantotie transporta savākto datu piemērs sniegts **trešajā pielikumā**. Transporta braucienu norīkošanas rezultāts satiksmes plūsmu ietekmes analīzes teritorijai Rīgā, Hanzas ielas apkārtnē, sniegts **ceturtajā pielikumā**. Ceļojuma laiks vakara maksimālās slodzes stundai izpētes teritorijā Hanzas ielas apkārtnē sniegts **piektajā pielikumā**. Transporta sistēmas efektivitātes rādītāji transporta pieprasījuma imitācijas modeļa eksperimentiem sniegti **sestajā pielikumā**. Uzņēmuma „Solvers” atsauksme par pētījuma rezultātiem promocijas darba gaitā sniegta **septītajā pielikumā**.

DARBA ATSEVIŠĀ NODAĻU ĪSS IZKLĀSTS

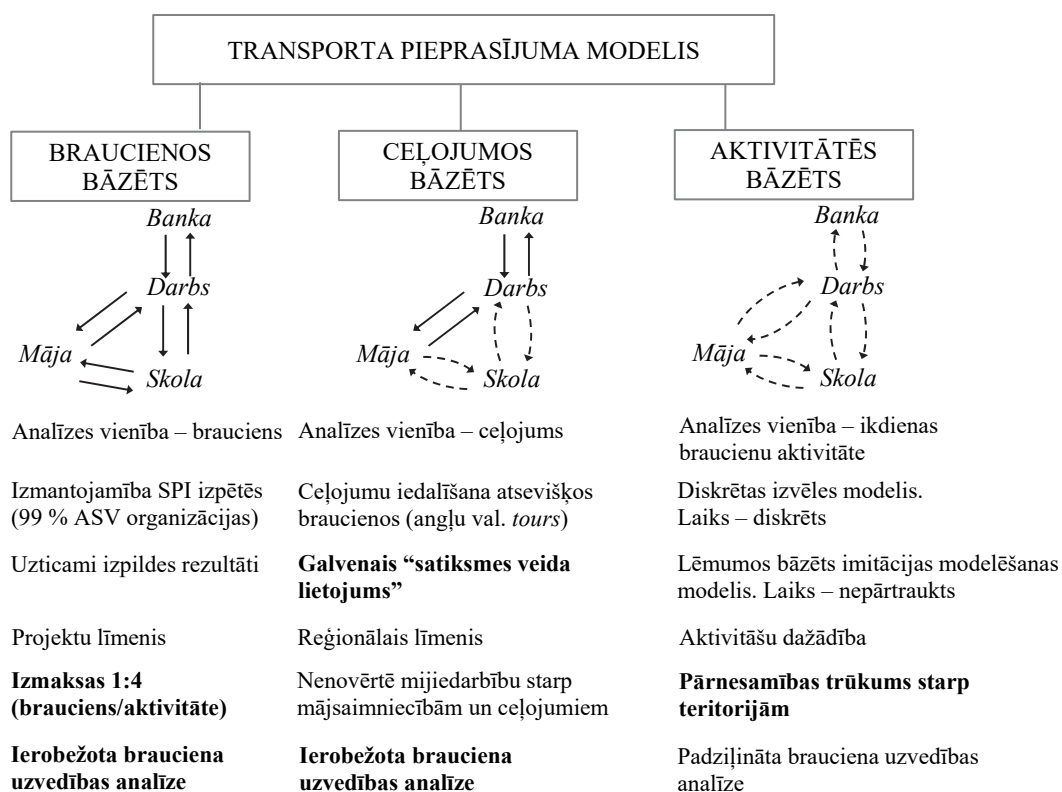
Promocijas darba **pirmajā daļā „Transporta pieprasījuma modeļi un to lietojamība satiksmes plūsmu ietekmes analīzē”** ir sniegts ievads pētījuma tematikā.

Satiksmes plūsmu ietekmes analīze

Satiksmes plūsmu ietekmes analīzi [36, 126, 136] veic, lai prognozētu, aprakstītu un analizētu nākotnes transporta sistēmas uzvedību pēc ierosinātā apbūves objekta nodošanas ekspluatācijā un noskaidrotu satiksmes apjoma ietekmi uz pieguļošo ielu tīklu, tostarp saistītos ietekmes samazināšanas pasākumus, kas kompensētu šo ietekmi [45, 50, 55, 69, 81, 102]. Apbūves objekts var būt “būvniecības objekts”, piemēram, jauna ēka vai transporta infrastruktūras objekts – jauna krustojuma vai pievedceļa organizācija, esošo ielu krustojumu rekonstrukcija u. c.

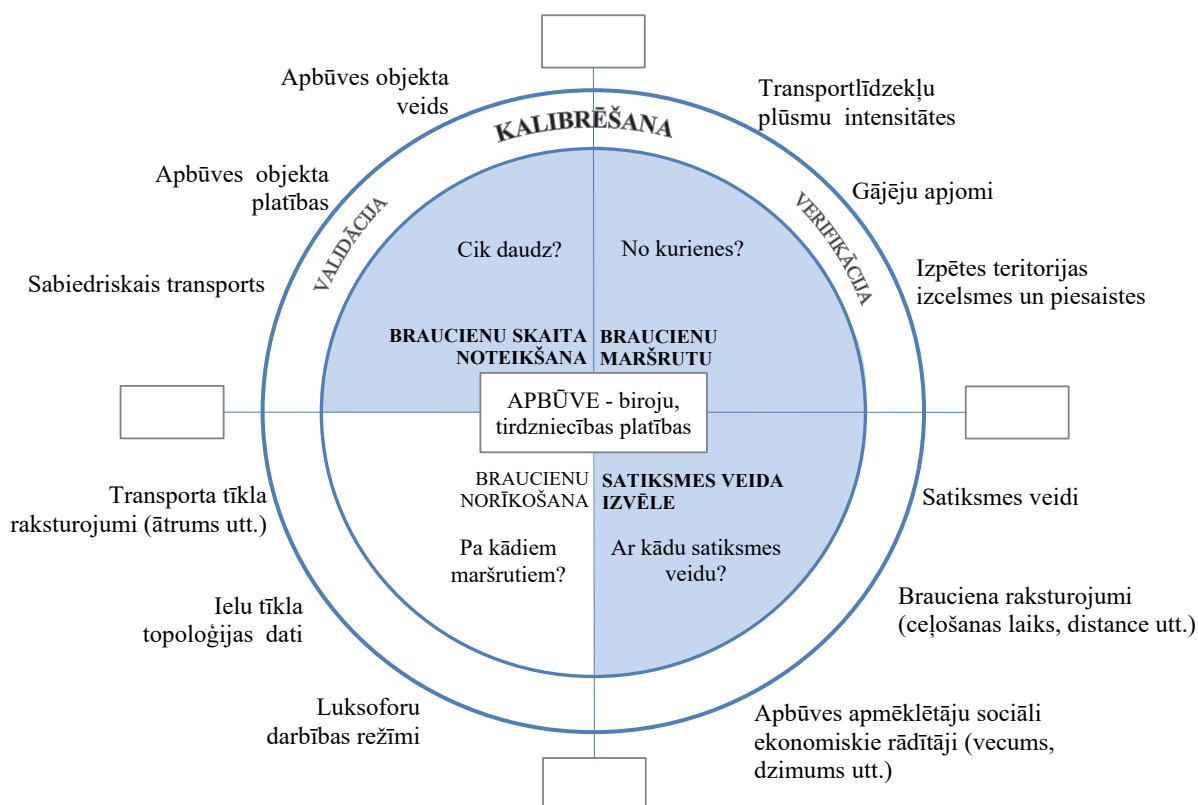
Transporta pieprasījuma modeļi

Transporta pieprasījuma modelis simulē indivīda uzvedību ceļojuma laikā, nodrošinot cilvēku pārvietošanos no viena punkta līdz otram, veicot dažādas aktivitātes un izmantojot noteiktu transporta infrastruktūru, ar mērķi prognozēt nākotnes transporta pieprasījumu [93, 104]. Transporta pieprasījuma modeļi [7, 11, 22, 25, 31, 48, 52, 63, 64, 80, 82, 83, 103, 135, 155] var būt izteikti dažādās formās un veidos (skat. 1. attēlu).



1. attēls. Transporta pieprasījuma modeļu pamatraksturojumi.

Braucienos bāzēta transporta pieprasījuma modeļa (skat. 2. attēlu) **trūkumi** ir saistīti ar modeļa īpašību koncentrēties uz agregētu uzvedību, nevis individuālā ceļotāja uzvedību, un **nespēju novērtēt kombinētos satiksmes veidus** [103]. Salīdzinot ceļojumos un braucienos bāzētus transporta pieprasījuma modeļus dažādiem scenārijiem reģionālā un projektu līmenī, tika konstatēts, ka braucienos bāzēti transporta pieprasījuma modeļi nodrošina pieņemamākus rezultātus transporta plūsmu prognozēšanā projekta līmeņa satiksmes plūsmu ietekmes analīzes uzdevumiem [47, 83]. **Aktivitātēs bāzēti transporta pieprasījuma modeļi** netiek plaši lietoti praksē [20]. Ir gadījumi, kad aktivitātēs bāzēti transporta pieprasījuma modeļi ir izstrādāti, bet netiek praktiski izmantoti, vai arī aktivitātēs bāzēta modeļa izstrāde ilgst vairākus gadus un vēl joprojām nav pabeigta, jo nav pieejami detalizēti aptaujas dati ar nozīmīgu datu kopas lielumu [24, 99, 134].



2. attēls. Tradicionāls braucienos bāzēts transporta pieprasījuma modelis satiksmes plūsmu ietekmes analīzei.

Promocijas darbā braucienos bāzēts transporta pieprasījuma imitācijas modelis ir izvēlēts imitācijas modeļa uzbūvei, ņemot vērā, ka ceļojumos un aktivitātēs bāzētu transporta pieprasījuma imitācijas modeļiem ir sarežģīta pielāgojamība dažādām attīstības teritorijām un izstrādes laiks un izmaksas vairākas reizes pārsniedz braucienos bāzētu transporta pieprasījuma modeļu izmaksas un izstrādes laiku.

Transporta pieprasījuma modeļu validācija

Imitācijas modelēšana mūsdienās kļuvusi par vienu no izplatītākajām vadības pētīšanas metodēm transporta jomā, kas ļauj aplūkot dažādus procesus un sistēmas vispusīgi un novērtēt gaidāmos rezultātus pirms lēmuma pieņemšanas [40, 73, 92, 149]. Promocijas darbā integrētais transporta sistēmu modelēšanas līdzeklis tiek lietots, lai veidotu un analizētu paplašinātu, braucienos bāzētu transporta pieprasījuma modeli satiksmes plūsmu ietekmes analīzes ietvaros projektu līmenī.

Transporta pieprasījuma **imitācijas modeļa (TPIM) validāciju un kalibrēšanu** parasti veic tās izstrādes gaitā, lai pārliecinātos, vai izstrādāšanas procesā aplūkojamā posmā modelēšanas rezultāti atbilst tā sākumā definētajiem noteikumiem un prasībām [26, 127]. Nepastāv vienotas imitācijas modeļu validācijas, verifikācijas un kalibrēšanas jēdzienu definīcijas [26, 41, 54, 92]. Promocijas darbā transporta pieprasījuma **imitācijas modeļu validācija** tiek definēta kā process, kura ietvaros tiek pārbaudīts, cik labi transporta pieprasījuma imitācijas modelis atbilst novērotajai transporta sistēmai, salīdzinot modelēto un novēroto transporta sistēmas loģiku un struktūru, **pielāgojot TPIM kalibrēšanas parametrus** tādā veidā, lai tie **atbilstu novērotajai transporta sistēmai**, un pārliecinoties, ka imitācijas modeļa efektivitātes rādītāji adekvāti raksturo novēroto transporta situāciju. TPIM modeļu validācija ietver sevī validācijas un kalibrēšanas posmu apvienojumu, kur modeļu verifikācija notiek validācijas procesā. Validācijas metodes iedala [26, 79, 91, 111]:

- 1) kvalitatīvajās metodēs (piemēram, animācija, histogrammas);
- 2) kvantitatīvajās metodēs (piemēram, procentuālā kļūda, vidējā kvadrātiskā kļūda, vidējā procentuālā kļūda, *GEH* statistika vai Teila nevienlīdzības koeficients).

Validācijas un kalibrēšanas parametru un transporta sistēmas efektivitātes **rādītāju izvēle** ir atkarīga no analizējamā uzdevuma sarežģītības, sākotnējo ieejas datu daudzuma un kvalitātes. Validācijas, kalibrēšanas parametru un rādītāju izvēle vairākumā gadījumos ir liels izaicinājums, jo atsevišķu parametru noteikšana prasa novērošanas metodes, kas nav pieejamas modeļa lietotājiem (piemēram, detalizēta informācija par autovadītāja atrašanās vietu un mašīnas ātrums analizējamā periodā un laikā ar noteiktu intervālu). TPIM izstrādātājam vienmēr jāmeklē kompromiss starp modeļa izstrādes izmaksām un sagaidāmo modeļa detalizāciju un precizitāti [133]. No validācijas metožu un parametru apkopojuma [13, 17, 35, 38, 72, 75, 76, 94, 95, 96, 98, 100, 105, 106, 110, 122, 133, 138] ir secināms, ka autori modeļu validāciju un kalibrēšanu veic, balstoties uz vienu modeļa parametru apakškopu, pārbaudot starpību starp novērotajiem un modelētajiem datiem noteiktā laika periodā tipiskā dienā un novērtējumam izmanto atsevišķus transporta sistēmas efektivitātes rādītājus, vai arī pieprasījuma šablons jau ir iepriekš kalibrēts. Pastāv vairākas TPIM kalibrēšanas procedūras,

bet, balstoties uz literatūras apkopojumu, biežāk izmantotās ir avotos [14, 19, 39, 41, 42, 57, 65, 79, 127]. Praksē visbiežāk izmanto eksperta viedokli kalibrēšanas parametru atlasei, jo pārējās metodes ir pārāk laikietilpīgas [124].

Promocijas darba pirmās daļas secinājumi

- 1) Ceļojumos bāzētu un aktivitātēs bāzētu transporta pieprasījuma modeļu lietošana projekta līmeņa satiksmes plūsmu ietekmes analīzes uzdevumiem ir apgrūtināta, ņemot vērā, ka izstrādes un izmaksu ziņā šie modeļi vairākas reizes pārsniedz tipveida braucienos bāzētu transporta pieprasījuma modeļu izmaksas un izstrādes laiku.
- 2) Paplašināta, braucienos bāzēta transporta pieprasījuma modeļa uzbūve satiksmes plūsmu ietekmes analīzei prasa jaunu metožu un pieeju lietošanu, kas ļautu satiksmes veida izvēlē ietvert ceļotāja transporta veida vēlmes un faktorus, kas ietekmēja šo izvēli.
- 3) Veicot kalibrēšanas parametru vērtības izvēli, aktuāla nepieciešamība ir pēc tādām metodēm, kas nodrošinātu pieņemamu TPIM modelēšanas rezultātu precizitāti un laika izpildes ziņā atbilstu satiksmes plūsmu ietekmes analīzes definētām prasībām.

Promocijas darba otrā nodaļa “**Mašīnmācīšanās metožu lietojums satiksmes plūsmu ietekmes analīzei transporta pieprasījuma modeļos**” ir veltīta imitācijas modelēšanas un mašīnmācīšanās metožu lietojuma analīzei transporta pieprasījuma imitācijas modeļa uzbūvei satiksmes plūsmu ietekmes analīzei.

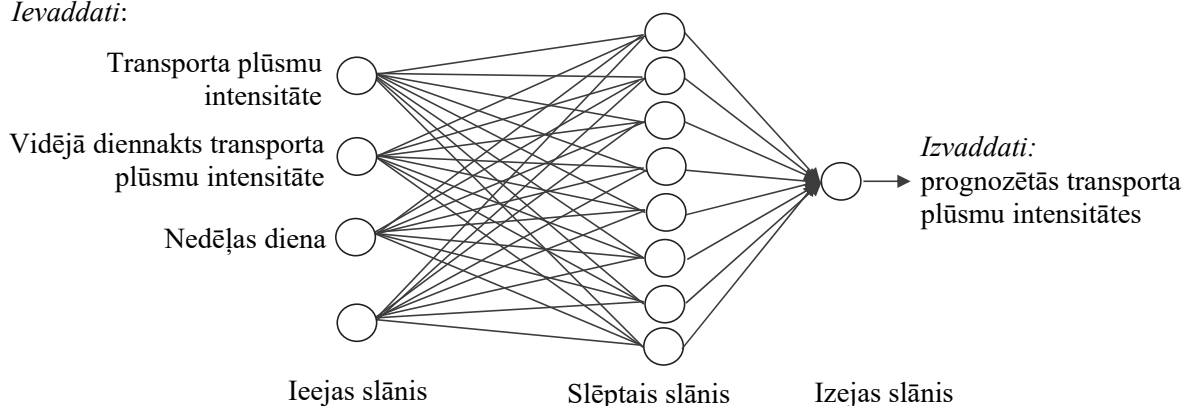
Katrā no četriem transporta pieprasījuma modeļa soļiem – ģenerēto transporta braucienu skaita noteikšana, braucienu maršrutu noteikšana, satiksmes veida izvēle un braucienu norīkošana – izmanto dažādas matemātiskās, analītiskās un imitācijas modelēšanas metodes atkarībā no satiksmes plūsmu ietekmes analīzes mērķa un uzdevumiem [60].

Šķērsklasifikācijas metode, neironu tīkli un lineārās regresijas vienādojumi [6, 27, 59, 89, 123] ir izmantoti **ģenerēto transporta braucienu skaita noteikšanā** [32]. **Šķērsklasifikācijas metodes** izmanto transporta braucienu noteikšanā stratēģiskajā un taktiskajā līmenī [66], un metodes trūkumi ir plaši aprakstīti šo autoru darbos [33, 68, 118].

Neironu tīkli tiek plaši izmantoti kā datu analīzes metodika transporta braucienu noteikšanas kontekstā [6, 59]. Promocijas darbā daudzslāņu perceptrons ar kļūdu atgriezeniskās izplatīšanās apmācības metodi (skat. 3. attēlu) tika lietoti, lai risinātu transporta braucienu skaita noteikšanas uzdevumu [145] un prognozētu transporta braucienu skaitu septiņām dienām uz priekšu. Eksperimenti parādīja, ka transporta braucienu prognozēšanas precizitāte ir 15 % – 40 % atkarībā no apmācības datu kopas lieluma. Svaru analīze starp neironiem un klasteru analīze svaru savienojumiem parādīja, ka katrs svaru

savienojums neviennozīmīgi ietekmē prognozēšanas rezultātu – ar pozitīvo un negatīvo ieguldījumu. Prognozēšanas risinājuma jutīguma analīze parādīja pozitīvu neironu tīkla mainīgo ietekmi.

Ievaddati:



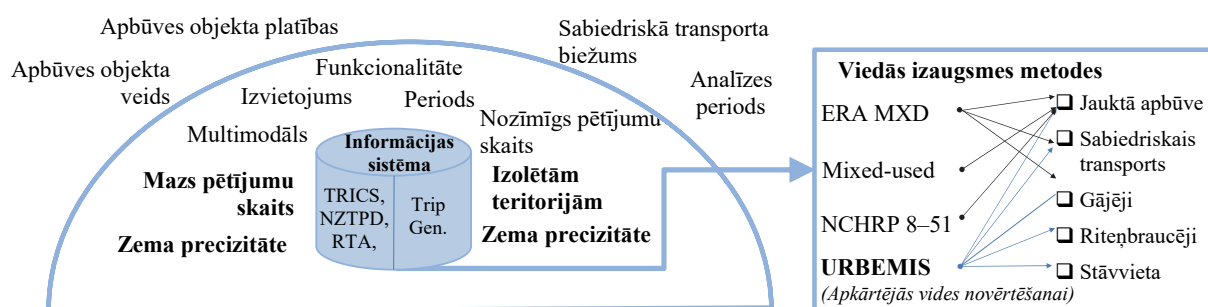
3. attēls. Neironu tīkla apmācības algoritms [145].

Lineārās regresijas metode plaši izmantota, lai noteiktu ģenerētos transporta braucienus, balstoties uz vēsturiskiem datiem satiksmes plūsmu ietekmes analīzē [61, 93]. Lineārās regresijas metožu trūkumi saistīti ar to, ka, nosakot ģenerēto transporta braucienu skaitu, netiek ņemts vērā apbūves objekta izvietojums pret līdzīgu izvietojumu izpētes reģionā, kas ir attālums starp galamērķiem, sabiedriskā transporta un gājēju esamība, ielu tīkla pievilcīgums gājējiem un zonas veids (pilsēta, piepilsēta). Neskatoties uz **lineārās regresijas metožu** trūkumiem, tai piemīt arī nozīmīgas **priekšrocības** [60] ģenerēto transporta braucienu skaita noteikšanā:

- 1) tiek ņemti vērā zemes jauktas izmantošanas tipi un izmēri, nosakot ģenerēto transporta braucienu skaitu un aprēķinot iekšējo uztveršanas intensitāti, kas samazina kopējo ģenerēto transporta braucienu skaitu;
- 2) nodrošināts elastīgums rezultātu noteikšanā, ņemot vērā transporta plānošanas inženiera apsvērumus, kā rezultātā ir viegli piešķirt un interpretēt transporta braucienu ģenerēšanas intensitātes;
- 3) nodrošināts kvalitatīvs risinājums, neizmantojot specializētu un dārgu programmatūru.

Pastāv vairākas **informācijas sistēmas** – *TRICS* [86, 128], *NZTPD* un *RTA* [130], *ITE Trip Generation* [60, 61] – ģenerēto transporta braucienu noteikšanai, balstoties uz regresijas vienādojumiem un vidējām likmēm. Promocijas darbā ģenerēto transporta braucienu skaita noteikšanai tiek izmantota informācijas sistēma *ITE Trip Generation* ar papildu korekcijām uz automobilizācijas līmeni vietējiem apstākļiem [114], ņemot vērā, ka pārējās informācijas sistēmas nodrošina līdzīgus transporta brauciena skaita noteikšanas rezultātus vai arī informācijas sistēmai ir nepietiekams pētījumu skaits zemes izmantošanas tipiem.

Ar informācijas sistēmu *ITE Trip Generation* pārsvarā tiek **noteikti** ģenerētie transporta **braucieni izolētām teritorijām** bez sabiedriskā transporta pieejamības un gājēju infrastruktūras. Lai uzlabotu ģenerēto transporta braucienu skaita noteikšanas precizitāti, piedāvāts izmantot viedās izaugsmes metodes. Pastāv vairākas **viedās izaugsmes metodes** (skat. 4. attēlu) ģenerēto transporta braucienu noteikšanai *ITE Trip Generation* informācijas sistēmā: jauktā apbūve, *Urbemis*, *ERA MXD*, *NCHRP 8–51* [43, 61, 89, 90].



4. attēls. Informācijas sistēmas un viedās izaugsmes metodes ģenerēto braucienu skaita noteikšanai.

Vairums viedo izaugsmes metožu koncentrējas uz vienu ģenerēto transporta braucienu samazināšanas parametru, piemēram, zemes jaukto izmantošanu. Savukārt viedās izaugsmes metodes *Urbemis*, neskatoties uz to, ka ir paredzētas galvenokārt gaisa kvalitātes vērtēšanai, ļauj novērtēt apbūves objekta ietekmi dažādiem zemes izmantošanas tiptiem, sabiedriskajam transportam, stāvvietām, gājēju aktivitātei un citiem rādītājiem.

Braucienu maršrutu noteikšanu veic, **konvertējot** izcelsmes un piesaistes transporta plūsmu **intensitātes**, tai skaitā, ģenerēto transporta braucienu konvertēšanu uz **izcelsmes-galamērķa matricām** ar imitācijas modelēšanas metodēm [60], tādām kā Frataras metode, gravitācijas metode [30, 119], tīkla līdzsvara metode, entropijas maksimizēšanas un informācijas minimizēšanas metode [74, 116, 140, 141, 156], Beijesa izveduma metode [78], mazāko kvadrātu metode [12, 23, 29], iekļaušanās-iespēju metode [1, 19, 49, 139] un maršrutu iedalīšanas-norīkošanas, divu-līmeņu pieeja [15, 21, 117]. Braucienu maršrutu noteikšanas metodes klasificē pēc [34] transporta tīkla raksturojumiem. Promocijas darbā veikta divu-līmeņu braucienu maršrutu noteikšana satiksmes plūsmu ietekmes analīzei, kas nodrošina izcelsmes-galamērķa matricas noteikšanu pārslogotā ielu tīklā, ņemot vērā ceļotāja maršrutu izvēli.

Satiksmes veida izvēles rezultātā tiek izveidota izcelsmes-galamērķa matrica, kurā ir noteikts, cik daudz braucienu veiks ceļotāji no vienas zonas uz citu ar katru pieejamo satiksmes veidu izpētes teritorijas robežās. Satiksmes veida izvēle ietver paraugkopas izvēli un piemērota modeļa izvēli ceļotāja uzvedības modelēšanai transporta braucienu kontekstā [80]. **Paraugkopas izvēle** iekļauj satiksmes plūsmu ietekmes analīzes mērķa objektu noteikšanu, trūkstošo un trokšņaino [5, 53] iegūto transporta datu analizēšanu un ierakstu atlasīšanu [56, 70].

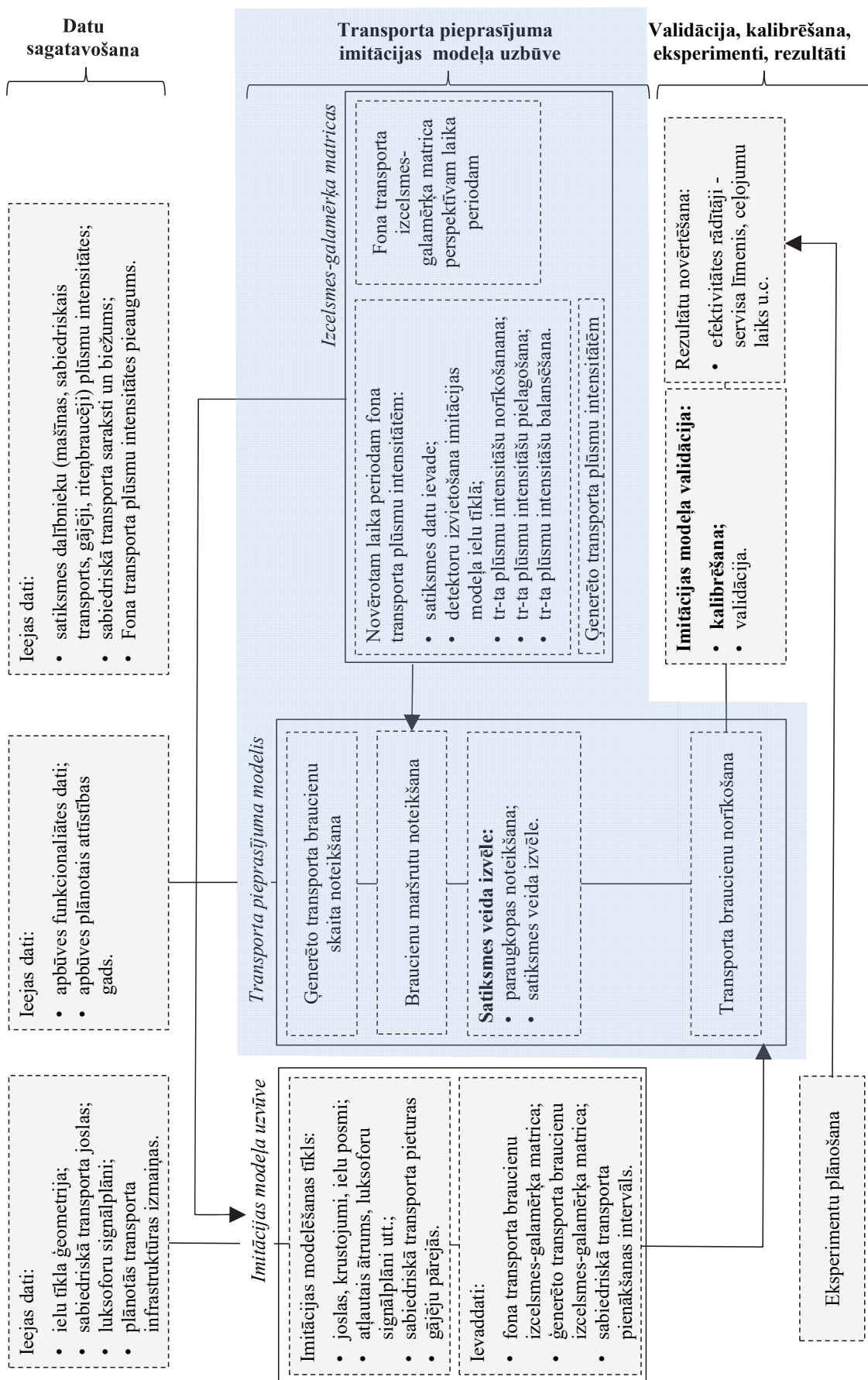
Tradicionālās transporta **satiksmes veida izvēles metodes un modeļi**, piemēram, multinomiālais loģistiskais regresijas modelis [18, 44, 93, 97] un diskriminantu analīze [88, 120, 121, 157, 158] ir bāzēti uz derīguma nejaušās maksimizācijas principu un neatspoguļo vairākmērķu braucienu uzvedību ceļojuma laikā. **Apkopojot** mūsdienīgas **mašīnmācīšanās metodes** [108, 112, 142] **satiksmes veida izvēlei** dažādiem transporta pieprasījuma modeļa veidiem, var secināt, ka ir aktuāls jautājums par mašīnmācīšanās metožu lietojumu satiksmes veida izvēlē, ņemot vērā, ka tām ir elastīgākas struktūras attiecību starp satiksmes veida kategorijām reprezentēšanai nekā tradicionālajiem loģistiskiem regresijas modeļiem un nav nepieciešamas zināšanas par sākotnējo specifisko modeļa datu struktūru. Lēmumu koku algoritmu lietošana ceļojumos un aktivitātes bāzētos TPIM modeļos satiksmes veida izvēlē parādīja labus izpildes rezultātus [62, 144]. Promocijas darba autore piedāvā izmantot lēmumu koku algoritmus *C4.5* un *CART* braucienos bāzēta TPIM uzbūvē [101].

Transporta braucienu norīkošanas rezultātā transporta braucieni ir sadalīti pa satiksmes maršrutiem. Integrētajā transporta modelēšanas līdzeklī realizētā dinamiskā norīkošana ļauj pielāgot transporta maršrutus brauciena laikā un analizēt vairākus transporta scenārijus bez transporta sastrēgumiem un ielu krustojumu caurlaidspējas pārslogotības gadījumos [60, 131].

Promocijas darba otrās daļas secinājumi

- 1) Braucienos bāzētam transporta pieprasījuma modelim transporta braucienu skaita noteikšanai izmantotās informācijas sistēmas neņem vērā satiksmes dalībnieku esamību analizējamajā teritorijā, vai arī pieejamo mērījumu skaits ir ļoti mazs, tāpēc braucienu noteikšanā ir aktuāls jautājums par viedo izaugsmes metožu izmantošanu, kas ļautu pietuvināt ģenerētos braucienus tuvāk novērotajai transporta sistēmai.
- 2) Lineārās regresijas un viedās izaugsmes metožu lietojums neprasa dārgas speciālas programmatūras izmantošanu.
- 3) Satiksmes veida izvēlē ar tradicionālajām metodēm (loģistiskie regresijas modeļi, diskriminantu analīze) braucienos bāzētā modelī netiek ietvertas atsevišķa ceļotāja transporta veida vēlmes satiksmes veida izvēlē, kas savukārt rada ierobežotu indivīda ceļojuma uzvedības analīzi un pilnā mērā nenodrošina iespējas novērtēt TPIM transporta infrastruktūras izmaiņas pirms to īstenošanas.

Promocijas **darba trešā nodaļa “Satiksmes veida izvēles metodikas izstrāde satiksmes plūsmu ietekmes analīzei”** veltīta transporta pieprasījuma imitācijas modeļa uzbūvei un transporta pieprasījuma imitācijas modeļa satiksmes veida izvēles metodikas izstrādes atbalstam. Transporta pieprasījuma **konceptuālā modeļa uzbūve** sniegta 5. attēlā.



5. attēls. Transporta pieprasījuma konceptuālais modelis satiksmes plūsmu ietekmes analīzei.

Promocijas darbā izstrādātā transporta pieprasījuma imitācijas modeļa uzbūves pieeja balstīta uz imitācijas modelēšanu un mašīnmācīšanās metodēm [80, 112, 125, 142], kas ļauj pielāgot noteiktus ģenerētos transporta braucienus novērotajai transporta sistēmas uzvedībai, ietvert ceļotāja transporta veida vēlmes satiksmes veida izvēlē, nodrošinot precīzākus klasifikācijas rezultātus, salīdzinot ar tradicionālajām metodēm satiksmes veida izvēlei.

Ģenerēto transporta braucienu skaita noteikšana

Lai pārbaudītu hipotēzi, ka transporta viedās izaugsmes metodes uzlabo ģenerēto transporta braucienu skaita noteikšanu, analizējot transporta sistēmas elementus, tika veikta ģenerēto braucienu skaita noteikšana dažādiem apbūves objektiem (skat. 1. tabulu).

1. tabula

Attiecība starp ģenerētajiem un savāktajiem transporta braucieniem vakara maksimālās satiksmes slodzes stundai

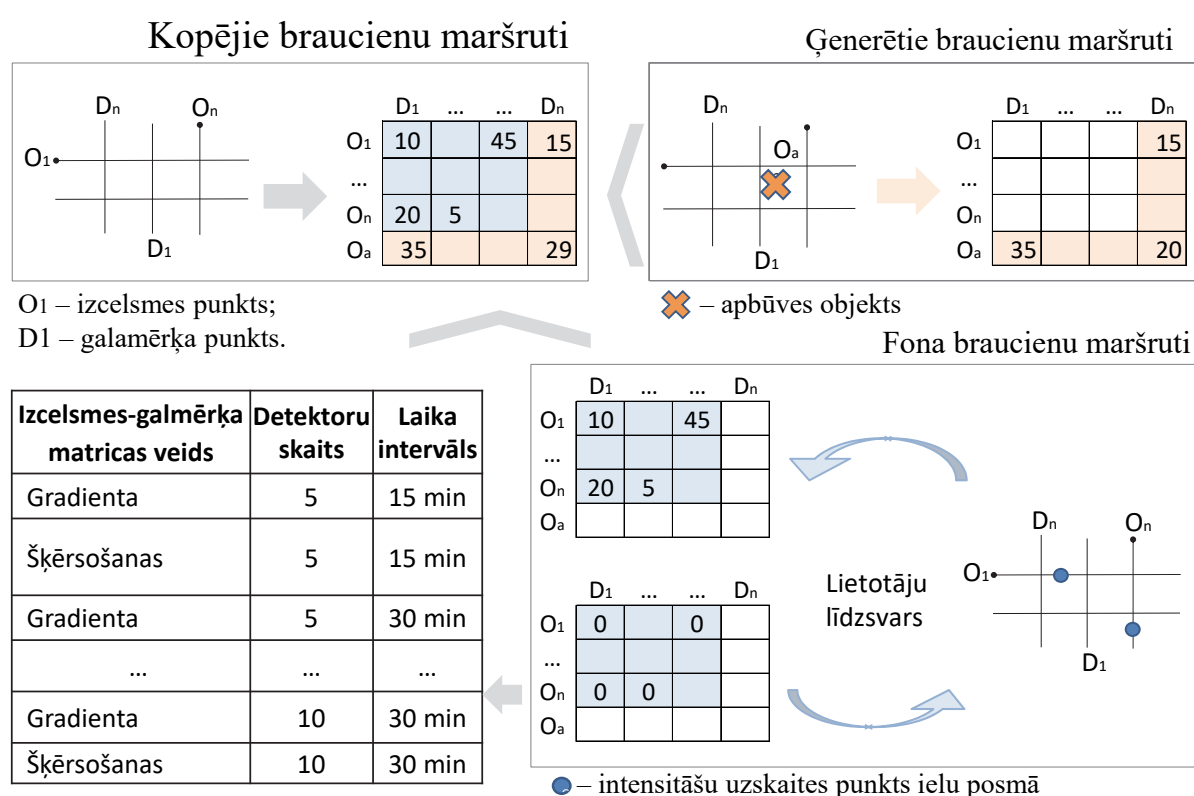
Jauktā apbūve	Informācijas sistēma <i>ITE Trip Generation</i>	Informācijas sistēma <i>ITE Trip Generation</i> ar korekcijām			Informācijas sistēma <i>TRICS</i>	Informācijas sistēma <i>NZTPD</i>
		<i>Urbemis</i>	<i>ERA MXD</i>	<i>NCHRP 8-51</i>		
1	34 %	31 %	17 %	30 %	10 %	22 %
1a	0 %	3 %	38 %	3 %	18 %	9 %
2	5 %	9 %	28 %	6 %	31 %	6 %
3	6 %	0 %	13 %	1 %	6 %	4 %
3a	10 %	3 %	13 %	7 %	10 %	23 %

Ekspperimentu rezultāti parādīja, ka transporta braucienu skaita ģenerēšanas precizitāte [26] ir atkarīga ne tikai no apbūves objekta funkcionalitātes raksturojumiem, bet arī no apbūves objekta izvietojuma ielu tīklā, sabiedriskā transporta pieejamības apbūves objekta apkārtnē, kā arī no gājēju un riteņbraucēju infrastruktūras esamības. Tādi transporta infrastruktūras parametri kā darbinieku skaits izpētes teritorijā, sabiedriskais transports, gājēju skaits, zemes izmantošanas tips un stāvvietu esamība var nozīmīgi uzlabot vai pasliktināt transporta braucienu skaita ģenerēšanas precizitāti. Ja apbūves objekts ir izvietots blakus maģistrālēm ar neattīstītu sabiedriskā transporta tīklu un gājēju infrastruktūru, informācijas sistēmu *ITE Trip Generation* var izmantot ģenerēto transporta braucienu skaita noteikšanai apbūves objektos satiksmes plūsmu ietekmes analīzei. Ja apbūves objekta pieguļošajā teritorijā ir labi attīstīts sabiedriskā transporta tīkls un arī gājēju un riteņbraucēju infrastruktūra, var izmantot informācijas sistēmu *ITE Trip Generation* ar pielāgošanu vietējiem nosacījumiem un ar *Urbemis* viedās izaugsmes metodēm ģenerēto transporta braucienu skaita noteikšanai apbūves objektiem satiksmes plūsmu ietekmes analīzei. Viedās izaugsmes metodes *Urbemis* lietošana ģenerēto transporta braucienu skaita noteikšanā ļāva pielāgot ģenerētos transporta braucienus, ņemot

vērā sabiedriskā transporta, gājēju un riteņbraucēju infrastruktūras esamību izpētes teritorijā.

Braucienu maršrutu noteikšana

Braucienu maršrutu noteikšanas process sniegts 6. attēlā. Divu-līmeņu pieeja, kas aprakstīta 2. nodaļā, tiek izmantota fona transporta plūsmu intensitātes konvertēšanai uz izcelsmes-galamērķa matricām. Lai veiktu izcelsmes un galamērķa piesaistes punktu konvertāciju, vispirms jānedefinē sākotnējo matricu, no kuras sāksies iteratīvs pielāgošanas process. Darbā tika **analizēti divu sākotnējo O-D matricu veidi**: šķērsošanas un gradienta matricas ar dažādiem transporta plūsmu intensitāšu laika un skaita mērījumiem [137].



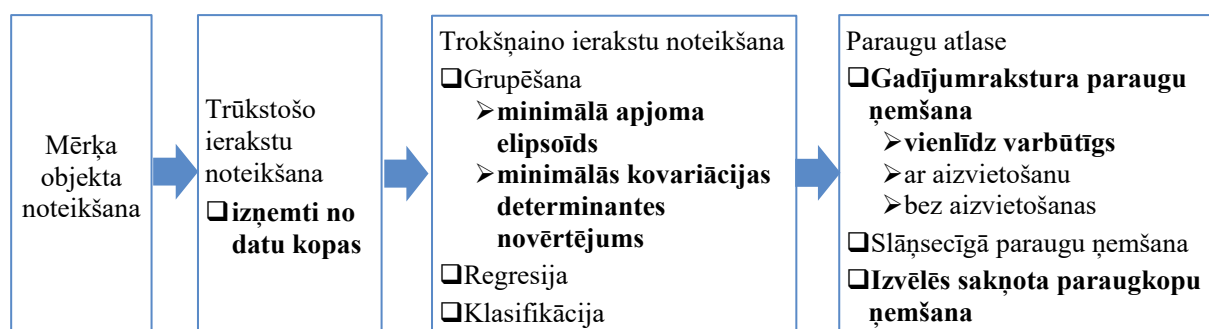
6. attēls. Braucienu maršrutu noteikšanas procedūra apbūves objektam satiksmes plūsmu ietekmes pētījumā.

Braucienu maršrutu noteikšanas rezultāti dažādam detektoru skaitam un laika intervāliem parādīja, ka O-D matricas transporta plūsmu intensitātes ir nedaudz nenovērtētas gadījumos, kad sākotnējā O-D matrica ir izveidota, izmantojot gradienta metodi ar detektoru skaitu, kas mazāks par piecām vienībām. Savukārt, ja detektoru skaits autoceļu tīklā pārsniedz piecas vienības, transporta plūsmu intensitātes kļūs nedaudz pārvērtētas.

Satiksmes veida izvēle. Paraugkopas noteikšana

Satiksmes veida izvēles metodika ietver paraugkopas noteikšanu un satiksmes veida izvēli. Paraugkopas noteikšana jeb datu sagatavošana ar

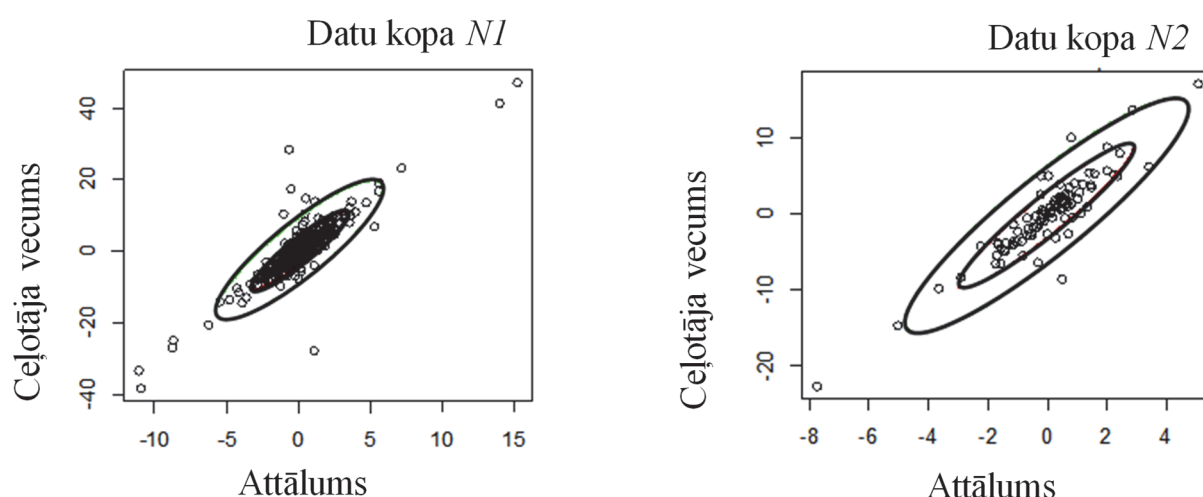
datizraces metodēm ir pirmais solis satiksmes veida izvēles metodikā. **Paraugkopas noteikšanas diagramma** satiksmes veida izvēlei sniegta 7. attēlā.



7. attēls. Paraugkopas noteikšana.

Paraugkopas noteikšanai ir pieejama datu kopa ar 7171 respondentu. Datu kopa ietver deviņus atribūtus: ceļotāju vecums, ceļojuma laiks, izmantotais satiksmes veids, vieta, no kurienes respondenti atbraukuši, vieta, uz kurieni respondenti plāno braukt pēc apbūves objekta apmeklējuma, apbūves objekta funkcionalitāte – tirdzniecības, biroju, dzīvojamās platības, respondenta kustības virziens – respondents dodas apbūves objektā iekšā vai ārpus tā, laika apstākļi, nedēļas diena.

Paraugkopas trokšņaino datu noteikšanai kopā ar minimālā apjoma elipsoīdu un minimālās kovariācijas determinantes novērtējumu izmantotas vairākas metodes [148]. Minimālā apjoma elipsoīda lietošanas piemērs dažādām ceļotāja vecuma paraugkopām sniegts 8. attēlā.



8. attēls. Minimālā apjoma elipsoīda piemērs trokšņaino datu noteikšanai.

Paraugkopu noteikšanas rezultātā iegūtais datu kopas izmēru un satiksmes veida atribūta procentuālais sadalījums sniegts 2. tabulā. Lai uzlabotu paraugkopas ierakstu noteikšanu un klasifikācijas precizitāti, sākotnēji datu kopas ieraksti tika apstrādāti, ņemot vērā informācijas ieguvumu un izmaksu-jūtīguma novērtējumu [148]. Izslēdzot no datu kopas N1 atribūtus ar informācijas ieguvumu zem 0,40 (šim nosacījumam atbilda trīs atribūti: nedēļas diena, kad tika

iegūti dati; vietas, kur tika iegūti dati, un respondenta kustības virziens apbūves objektā, kur tika iegūti dati), datu klasifikācijas precizitāte uzlabojās nebūtiski 1 % – 2 % robežās un atsevišķām datu izlasēm pasliktinājās par 2 % – 3 %.

2. tabula

Atribūta “Satiksmes veids” ierakstu sadalījums pa atribūta vērtībām

Atribūta “Satiksmes veids” vērtības	Sākotnējā datu kopa <i>N0</i>	Datu kopa <i>N1</i>	Datu kopa <i>N2</i>	Datu kopa <i>N3</i>
Mašīna	47 %	22 %	25 %	34 %
Gājējs	30 %	22 %	24 %	33 %
Velosipēds	1 %	17 %	25 %	<i>Izslēgts no datu kopas</i>
Sabiedriskais transports	20 %	22 %	26 %	33 %
Taksis	1 %	17 %	<i>Apvienots ar mašīnām</i>	<i>Apvienots ar mašīnām</i>
Kopā:	100 % (7 171 ieraksts)	100 % (498 ieraksti)	100 % (560 ierakstu)	100 % (1 380 ierakstu)

Datu klasifikācijas uzlabošana vai pasliktināšana dažādām datu izlasēm 1 % – 3 % robežās saistīta ar varbūtību. Pēc izmaksu matricas jutīguma novērtējuma ar 3. tabulā dotajām minimālā apjoma elipsoīdu datu kopām *N2* un *N3* pareizi klasificēto ierakstu skaits palielinājās vidēji par 5 % procentiem.

3. tabula

Klasifikācijas rezultātā pareizi klasificēto ierakstu skaits paraugkopām *N2* un *N3* uz *C4.5* algoritma piemēra, kombinējot vairākas datizraces metodes

Peraugkopas izvēlei izmantotās metodes	Sākotnējā datu kopa <i>N2</i>			Sākotnējā datu kopa <i>N3</i>		
	Bez 1 atribūta ¹⁾	Bez 3 atribūtiem ²⁾	Izmaksu- jutīguma novērtējums	Bez 1 atribūta ¹⁾	Bez 3 atribūtiem ²⁾	Izmaksu- jutīguma novērtējums
Minimālā apjoma elipsoīds	76 %	77 %	80 %	75 %	78 %	82 %
<i>K</i> -kārtu šķērsvalidācija	77 %	75 %	79 %	77 %	74 %	80 %

1) klasificējot ierakstus, atribūts “Datums” netiek ņemts vērā.

2) klasificējot ierakstus, atribūti “Nedēļas diena”, “Apbūves objekta funkcionalitāte” un “Respondenta kustības virziens” netiek ņemti vērā.

Satiksmes veida izvēle

Promocijas darbā, lai pārbaudītu izvirzīto hipotēzi, ka datizraces metožu lietošana satiksmes veida izvēlē uzlabo satiksmes veida izvēles klasifikācijas rezultātus, salīdzinot ar tradicionālajām satiksmes veida izvēles metodēm un ietver ceļotāja transporta veida vēlmē brauciena laikā, tika veikta satiksmes veida izvēle ar lēmumu koku algoritmiem atbilstoši 2. nodaļā norādītajam.

Lēmumu koku algoritmi

Satiksmes veida izvēlē transporta pieprasījuma imitācijas modeļa uzbūves procesā ir izmantoti *C4.5* un *CART* lēmumu koku algoritmi. Klasificējot ierakstus, tika izmantotas datu kopas *N1–N3* ar un bez šādiem satiksmes veida atribūta kategorijām kā “*taksis*” un “*velosipēds*”. Papildus datu kopām tika lietots trokšņu samazināšanas pieeju komplekss (datu kopa *N3+*), kombinējot minimālā apjoma elipsoīdu un vienlīdz varbūtīga gadījumrakstura paraugu ņemšanu, lai izvēlētajā paraugkopā samazinātu trokšņaino datu skaitu un pēc iespējas nodrošinātu vienmērīgāku satiksmes veidu kategoriju datu kopā. Klasifikācijas rezultāti sniegti 4. tabulā.

4. tabula

Klasifikācijas rezultātā pareizi klasificēto ierakstu procents paraugkopai *N3+*

Satiksmes veida izvēles metode	Sākotnējā datu kopa <i>N3+</i> un kombinētās datizraces metodes		
	Bez 1 atribūta*	Bez 2 atribūtiem**	Bez 3 atribūtiem***
<i>C4.5</i>	77 %	80 %	79 %
<i>CART</i>	77 %	91,8 %	89 %

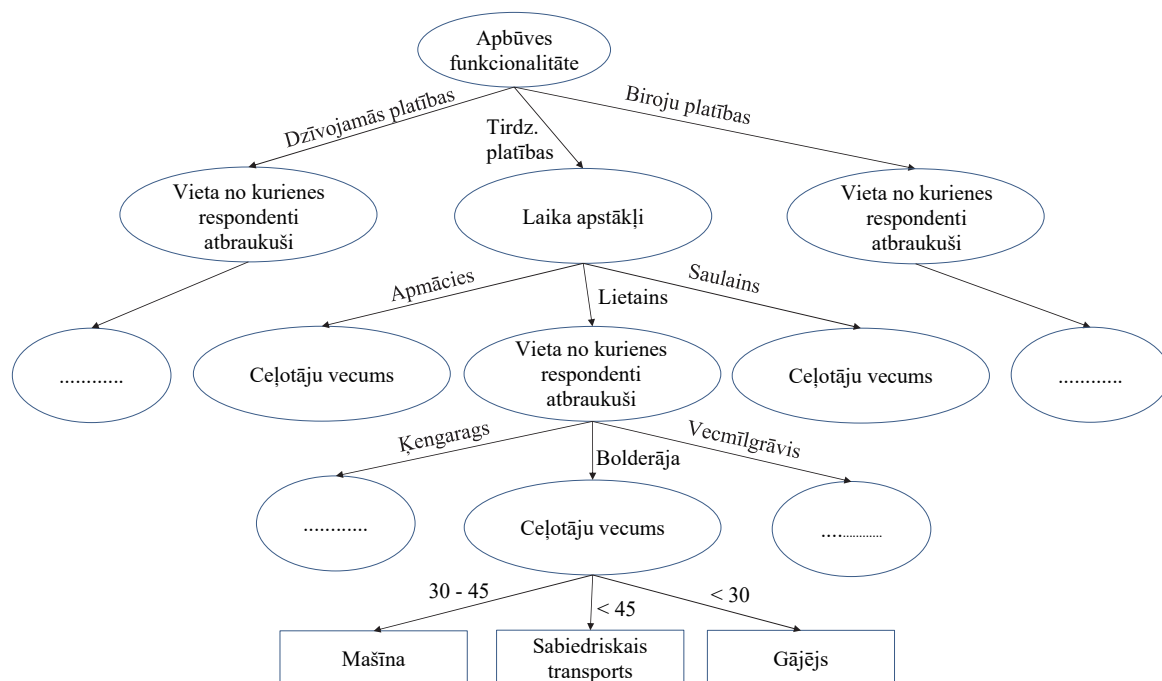
* klasificējot ierakstus, atribūts “Apbūves objekta funkcionalitāte” netiek ņemts vērā.

** klasificējot ierakstus, atribūti “Laika apstākļi”, “Apbūves objekta funkcionalitāte” netiek ņemti vērā.

*** klasificējot ierakstus, atribūti “Nedēļas diena”, “Apbūves objekta funkcionalitāte” un “Laika apstākļi” netiek ņemti vērā.

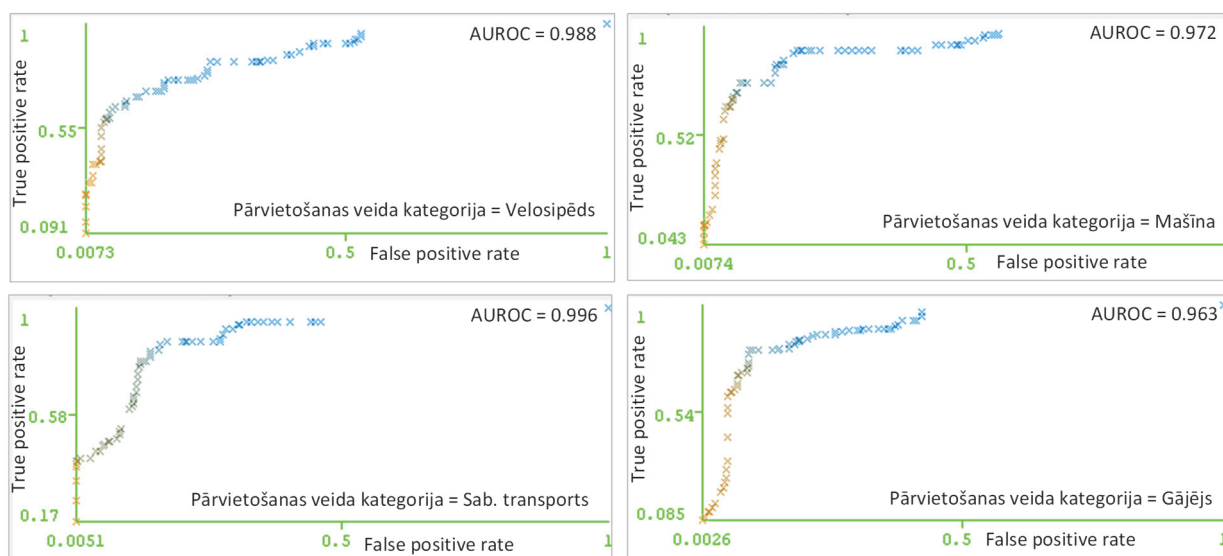
Iegūtie rezultāti parāda, ka pareizi klasificēto ierakstu skaits ir virs 77 % abiem lēmuma koka algoritmiem. Izslēdzot no analīzes atribūtus “Apbūves objekta funkcionalitāte” un “Laika apstākļi”, satiksmes veida klasifikācijas precizitāte uzlabojas par 3 % procentiem *C4.5* lēmumu koku algoritmam un par apmēram 5 % procentiem *CART* lēmumu koku algoritmam. Izslēdzot no datu kopas trešo atribūtu “Nedēļas diena”, satiksmes veida izvēles klasifikācijas rezultāti *C4.5* un *CART* lēmumu koku algoritmiem mazliet pasliktinājās, kas var būt saistīts ar to, ka tomēr nedēļas diena, kad tika iegūti aptaujas dati, ir svarīga (satiksmes veida izvēle ir atkarīga no respondenta ceļojuma dienas), neskatoties uz entropijas rezultātiem, un tai jāpiedalās klasifikācijā (skat. 9. attēlu). Kopējā satiksmes veida izvēles klasifikācijas precizitāte bija 91,8 % paraugkopai *N3+*.

Lai novērtētu *CART* un *C4.5* lēmumu koku algoritmu satiksmes veida izvēles klasifikācijas rezultātu ticamību, tas ir, kā modelis ir spējīgs pareizi klasificēt satiksmes veidus un vizualizēt rezultātus, tika lietota **ROC** (pētāmā atribūta darbības raksturlīknes) **līkne** [46].



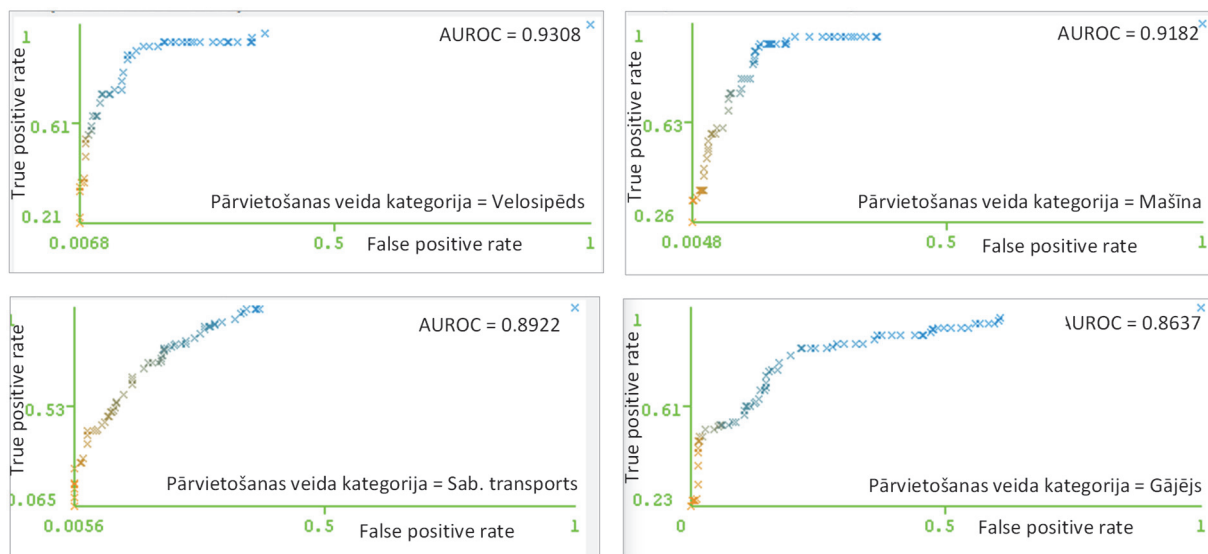
9. attēls. *C4.5* lēmuma koka algoritma rezultāta piemērs datu kopai *N2*.

Lietojot *ROC* analīzi *CART* lēmumu koku algoritma klasifikācijas rezultātiem (datu kopa *N3+*), ir redzams (10. attēls), ka līknes izliekums ir diezgan straujš un tuvojas kreisajam, augšējam stūrim. *AUROC* (laukums zem *ROC* līknes) vērtība ir tuva vieniniekam, kas norāda uz modeļa abām klasifikācijas īpašībām.



10. attēls. *ROC* līknes satiksmes veida kategorijām (datu kopa *N3+*).
Klasifikācija veikta ar *CART* lēmumu koku algoritmu.

Lietojot *ROC* analīzi *C4.5* lēmumu koku algoritma satiksmes veida klasifikācijas rezultātiem, ir redzams, ka arī šeit līknes izliekums ir diezgan straujš un tuvojas kreisajam, augšējam stūrim. *AUROC* (laukums zem *ROC* līknes) vērtība ir tuva vieniniekam satiksmes veida atribūta kategorijām “velosipēds” un “mašīna”, kas norāda uz teicamām modeļa klasifikācijas īpašībām (11. attēls). Savukārt satiksmes veida kategorijām “sabiedriskais transports” un “gājējs” līknes izliekums nav tik straujš un tuvs augšējam kreisajam stūrim, kā citās satiksmes veida kategorijās, un arī laukuma zem *ROC* līknes vērtība ir nedaudz zem 0,90, kas liecina par labām klasifikācijas īpašībām.



11. attēls. *ROC* līknes transporta satiksmes veida kategorijām (datu kopa *N3+*).
Klasifikācija veikta ar *C4.5* lēmumu koku algoritmu.

Lai pārbaudītu lēmumu koku lietojuma efektivitāti, papildus tika klasificēts satiksmes veids ar tradicionālām satiksmes veida izvēles metodēm (skat. 5. tabulu), tādām kā **multinomiālais loģistiskais modelis** un **diskriminantu analīze**. Klasifikācija veikta tirdzniecības mērķa objektam transporta pieprasījumam imitācijas modelī paraugkopai *N3+*.

5. tabula

Satiksmes veida izvēles noteikšanas rezultāti ar dažādām metodēm

Satiksmes veida izvēles metode	Pareizi klasificēti ieraksti
Lēmumu koku <i>CART</i> algoritms	91,8 %
Diskriminantu analīze – pakāpeniskā metode	79,6 %
Diskriminantu analīze – tiešā metode	79,6 %
Multinomiālais loģistiskais regresijas modelis	88,6 %

Satiksmes veida kategorijas klasifikācijas rezultātā *CART* lēmumu koku algoritms nodrošina precīzākus satiksmes veida izvēles klasifikācijas rezultātus, salīdzinot ar multinomiālo loģistisko regresijas modeli un diskriminantu analīzi.

Transporta braucienu norīkošana

Dinamiskā norīkošana [131], kas realizēta integrētajā transporta modelēšanas līdzeklī, ir izmantota, lai pielāgotu transporta maršrutus brauciena laikā un analizētu vairākus transporta eksperimentus transporta sistēmas pārslogotības situācijās.

Promocijas darba trešās daļas secinājumi

- 1) Kombinējot vairākas datizraces metodes satiksmes veida paraugkopas noteikšanai, var mazināt gadījumus, kad būvētais modelis pārāk labi adaptējas datiem un trokšņainie dati tiek interpretēti kā normālie dati.
- 2) Informācijas sistēma *ITE Trip Generation* kopā ar *Urbemis* viedās izaugsmes metodi var izmantot ģenerēto transporta braucienu noteikšanai apbūves objektam satiksmes plūsmu ietekmes analīzē, ja apkārt apbūves objekta teritorijai pastāv attīstīta autotransporta, sabiedriskā transporta, gājēju vai riteņbraucēju infrastruktūra.
- 3) Gradianta un šķērsošanas izcelsmes-galamērķa matricas var izmantot kā sākotnējās, lai iedalītu transporta plūsmu intensitāti pa autoceļu tīklu. Pēc eksperimentu rezultātiem sākotnējās matricas veids neietekmēja braucienu maršrutu noteikšanas rezultātus.

Promocijas darba ceturtnā nodaļa “**Transporta pieprasījuma imitācijas modeļa kalibrēšanas procedūras izstrāde satiksmes plūsmu ietekmes analīzei**” ir veltīta transporta pieprasījuma imitācijas modeļa kalibrēšanas procedūras izstrādāšanai, kuras mērķis ir pielāgot TPIM kalibrēšanas parametrus tādā veidā, lai tie atbilstu novērotajai transporta sistēmai. Kalibrēšanas parametru vērtības tiek noteiktas ar divsoļu grupēšanas algoritmu, ņemot vērā, ka divsoļu grupēšana var apstrādāt lielu datu apjomu, ir ātra un prot strādāt ar nepārtrauktiem un kategoriskiem mainīgajiem [8] gadījumos, kad nepieciešamais klasteru skaits nav zināms.

Transporta pieprasījuma imitācijas modeļa kalibrēšanas procedūra

Promocijas darbā autores **piedāvātā** transporta pieprasījuma imitācijas modeļa **kalibrēšanas procedūra** iekļauj septiņus posmus.

- 1) Datu vākšana. Tiek savākti dati par transporta plūsmām, krustojumu un ielu tīkla ģeometriju un citiem transporta sistēmas raksturlielumiem un elementiem. Tiek definēts laika periods.
- 2) Sākotnējā TPIM izveidošana. Imitācijas modeļa uzbūve balstās uz savāktajiem transporta sistēmas elementiem un raksturlielumiem, piemēram, joslu platums un garums modelī, luksoforu darbības režīmi, atļautais transportlīdzekļu

ātrums. Modelim tiek definētas izcelsmes-galamērķa matricas dažādiem satiksmes veidiem, atsevišķi vieglajam un kravas transportlīdzeklim.

- 3) Sākotnējā TPIM palaišana ar noklusētiem kalibrēšanas parametriem un to vērtībām. Imitācijas modelis tiek palaists tik reizes, lai apmierinātu 95 % ticamības intervālu. Modelēšanas rezultātu novērtēšanai tiek analizēti modelētās un novērotās transporta plūsmu intensitātes un tiek noteikta vidējā kvadrātiskā kļūda.
- 4) Gadījumā, ja vidējā kvadrātiskā kļūda pārsniedz noteikto robežu (promocijas darbā tika izvēlēti 15 %, balstoties uz eksperta novērtējumu), veic TPIM parametru vērtību ietekmes novērtēšanu uz modelēšanas rezultātiem. Tiek veidoti vairāki eksperimenti ar dažādām kalibrēšanas parametru vērtībām un novērotie dati salīdzināti ar modelēšanas rezultātiem. Promocijas darbā šajā posmā autore piedāvā izmantot divsoļu grupēšanu transporta pieprasījuma imitācijas modeļa globālo parametru vērtību izvēlei.
- 5) TPIM palaišana ar izvēlētām globālo parametru vērtībām. Modelēšanas rezultāti tiek uzskatīti par pieņemamiem, ja vidējā kvadrātiskā kļūda modelētajām un novērotajām transporta plūsmu intensitātēm nepārsniedz 15 %.
- 6) TPIM eksperimentu plānošana. Definētas nepieciešamās izmaiņas transporta plūsmu intensitātēs, ielu tīkla ģeometrijā un transporta infrastruktūrā ar mērķi noteikt, kā plānotās satiksmes izmaiņas ietekmēs transporta sistēmas uzvedību, identificēt potenciālās transporta problēmas un nodrošināt drošus un saprātīgus transporta risinājumus.
- 7) TPIM eksperimentu modelēšanas rezultātu novērtēšana ar statistiskām metodēm – vidējo kvadrātisko kļūdu, *GEH* un Teila nevienādības koeficientu un ar transporta sistēmas efektivitātes rādītāju – servisa līmenim analizētai vienībai jābūt D vai E (tuvošanās nestabilai jeb pieņemamai aizkavēšanai vai nestabils process jeb nozīmīga aizkavēšanās).

Promocijas darbā **TPIM piedāvātā kalibrēšanas procedūra** apskatīta **satiksmes plūsmu ietekmes analīzes uzdevumam**, kura mērķis ir vietējiem transporta līdzekļu autovadītājiem uzlabot galamērķa – Ādažu pilsētas centrālās daļas – pieejamību un nodrošināt piemērotus apstākļus iebraukšanai un izbraukšanai no Ādažu pilsētas centrālās daļas uz maģistrāli, izmantojot viedās transporta sistēmas līdzekļus [151, 152].

Apskatītā satiksmes plūsmu ietekmes analīzes uzdevuma rezultāti tika izmantoti Latvijas valsts pētījumu programmas "Nākamās paaudzes informācijas un komunikāciju tehnoloģiju (IKT) pētniecības valsts programma (*NexIT*)" projekta "Sensoru tīklu un signālu apstrādes pielietojumi tautsaimniecībā" (2014. g. – 2017. g.).

Transporta pieprasījuma imitācijas modeļa kalibrēšanas parametri

Globālie parametri “Transporta ierašanās intervāls” un “Imitācijas modelēšanas solis” [2, 76, 96, 107, 134], kas nosaka kopējo transporta sistēmas uzvedību, tika izmantoti, lai pārbaudītu izvirzīto hipotēzi, ka transporta pieprasījuma imitācijas modeļa kalibrēšanas procedūras izstrādāšana nodrošina kalibrēšanas parametru vērtību noteikšanas uzdevuma atrisināšanu ar grupēšanas metodēm.

Datu vākšana imitācijas modeļa uzbūvei

Ieejas datu sagatavošanas posmā tiek savākti dati par katru satiksmes dalībnieka tipu (transportlīdzekļiem, sabiedrisko transportu, gājējiem, riteņbraucējiem) plūsmas intensitāti, ielu tīkla ģeometriju, sabiedriskā transporta joslām, pieturvietām un kustības intervāliem, kā arī luksoforu signālu plāniem regulējamiem krustojumiem novērotajai transporta situācijai. Sākotnēji novērotie transporta dati Ādažu piemēram tika apkopoti, balstoties uz video datiem, kas tika iegūti vakara maksimumstundā (viena maksimālā satiksmes slodzes stunda ar augstāko transporta plūsmu intensitāti 24 stundu periodā) darbadienā un brīvdienās.

Sākotnējā TPIM modeļa uzbūve un novērtēšana

Sākotnējā TPIM modeļa uzbūves rezultātā tika iegūts, ka vienam eksperimentam ir nepieciešami septiņi mēģinājumi, lai iegūto rezultātu izkliede starp modelētām un novērotām transporta plūsmu intensitātēm nepārsniedz piecus procentus (95 % ticamības intervāla apmierināšanai). Sākotnējā TPIM modelēto un novēroto datu starpības vidējā kvadrātiskā kļūda ir 12 % – 28 % robežās atkarībā no modelētā laika intervāla. Lielā starpība starp modelētajām un novērotajām transporta plūsmu intensitātēm Ādažu piemēram varētu būt saistīta arī ar to, ka novērotajā situācijā transporta līdzekļi imitācijas modeli nevarēja sasniegt galamērķi, ņemot vērā bloķēšanas situācijas, kad viens transportlīdzeklis vēlas pārkārtoties no vienas joslas uz citu un meklē vai gaida pieņemamu intervālu, lai veiktu manevru, un šajā gadījumā bloķē braukšanas joslu.

Divsoļu grupēšana TPIM globālo parametru vērtību izvēlei

Divsoļu grupēšana balstās uz maksimālās ticamības novērtēšanu ar Akaike (1) vai Baijesa (2) informācijas kritērijiem [8, 58, 77, 109]. Informācijas kritēriji ir spēcīgi līdzekļi modeļu salīdzināšanai, identifikācijai laikā rindās un lineārā regresijā un tiek plaši izmantoti bioloģijā, tirgzinībās, kā arī vides un jūras zinātnēs [3, 113].

$$AIC = -2 \sum_{j=1}^J \xi_j + 2m_j. \quad (1.)$$

$$BIC = -2 \sum_{j=1}^J \xi_j + m_j \log(N). \quad (2.)$$

$$m_J = J \left\{ 2K^A + \sum_{k=1}^{K^B} L_k - 1 \right\}, \quad (4.6.)$$

- kur AIC – Akaike informācijas kritērija vērtība;
 m_j – novērtēto parametru skaits, brīvības pakāpju skaits;
 ξ_j – ticamības funkciju vērtību datu kopa;
 BIC – Bajesa informācijas kritērija vērtība;
 N – apmācības datu kopas apjoms;
 L_k – kategoriju skaits k -tajam kategorijas mainīgajam;
 K^A – kopējais nepārtraukto mainīgo skaits;
 K^B – kategorijas mainīgo kopējais skaits.

Divsoļu grupēšanas rezultāti Ādažu piemēram parādīja, ka optimālais klasteru skaits ir trīs. Divsoļu grupēšanas procedūras sadalīšanas un biežumu rezultāti apskatītajiem mainīgajiem Ādažu piemēram sniegti 6. tabulā.

6. tabula

Divsoļu grupēšanas analīzes procedūras sadalījums

Klasteru skaits	Centroīdi				
	Ceļojuma laiks, sek.	Novērotie transportlīdzekļi, vienības minūtē	Modelētie transportlīdzekļi, vienības minūtē	Imitācijas modelēšanas solis, sek.	% transportlīdzekļu O-D pa maršrutiem
1	82,64	11,90	12,41	0,75	100,00
2	100,21	3,68	3,50	0,74	90,66
3	20,53	19,80	37,16	0,73	12,87

Divsoļu grupēšanas analīzes procedūras rezultātā ir redzams, ka klasteru grupā imitācijas modelēšanas soļa vērtība ir 0,73–0,75 sek. robežās. Klasteru grupa ar vienu klasteri atbilst transporta plūsmas vidējai intensitātei, t. i., 11–12 transportlīdzekļi minūtē, kur visi transportlīdzekļi izmantoja tikai vienu maršrutu no sākuma līdz beigu punktam (% transportlīdzekļu O-D pa maršrutiem), un 82,6 % transportlīdzekļiem transporta ierašanās intervāla sadalījums atbilst vienmērīgajam sadalījumam. Klasteru grupa ar diviem klasteriem atbilst transporta plūsmas zema intensitātei, vidēji četri transportlīdzekļi minūtē. Pārsvarā 90 % transportlīdzekļiem ir viens brauciena maršruts no sākuma līdz beigu punktam, un 67,03 % transportlīdzekļiem transporta ierašanās intervāla sadalījums atbilst normālajam sadalījumam. Klasteru grupa ar trim klasteriem atbilst transporta plūsmas augstai intensitātei 37–39 transportlīdzekļi minūtē, tikai 12,8 % transportlīdzekļu brauc pa vienu maršrutu no sākuma līdz galapunktam, un 91,4 % transportlīdzekļiem transporta ierašanās intervāla sadalījums atbilst eksponenciālajam sadalījumam. Klasteru grupa ar trim klasteriem un ar augstām transporta plūsmas intensitātēm, salīdzinot ar novērotām transporta plūsmu intensitātēm, reprezentē bloķēšanas situāciju, kad ir izvēlēts pārāk liels imitācijas modelēšanas solis.

Hierarhiska grupēšana TPIM kopējās modelētās transporta sistēmas uzvedības kalibrēšanai

Promocijas darbā apvienojošais klasterizācijas algoritms izmantots, balstoties uz [9, 51, 87] pētījumiem, lai kalibrētu kopējās modelētās transporta sistēmas uzvedību. Tika izvēlēti **divi attāluma līdzības mēri** – Manhetenas [10] un Mahalanobisa attālumi. Lai mazinātu mainīgo ietekmi uz klastera risinājumu, normēto noviržu vērtības (angļu val. *z-score*) tika izmantotas **datu normalizācijai**, kur katra mainīgā vērtība tika transformēta jaunos iegriezumos ar vidējo 0 un standarta novirzi 1. Hierarhiskas klasterizācijas algoritma rezultātā tiek saņemta dendrogramma, kas attēlo katru apvienojumu starp divām apvienojamām grupām.

Klastera risinājumu stabilitātes pārbaude

Lai pārbaudītu klastera risinājumu stabilitāti, datu kopā tika mainīta gadījumu secība. Gadījuma lielumi tika nejaušā kārtā sakārtoti, un katrai kārtošanas secībai tika saņemti dažādi klasteru risinājumi. Pastāv dažādas metodes, lai noteiktu un novērtētu klasteru skaitu [107]. Saskaņā ar pētījuma [84, 85] rezultātiem *Calinski-Harabasz* indekss un *J*-indekss ir visefektīvākās metodes, lai novērtētu klastera risinājuma stabilitāti. Promocijas darbā piemērotais klasteru skaits (skat. 7. tabulu) tika noteikts ar lūzuma punkta atrašanu uz kļūdas līknes [87], *Calinski-Harabasz* indeksu un *J*-indeksu. Indeksi tika aprēķināti ar *SPSS 16.0* un *SAS* statistikas līdzekļiem. **Dispersijas attiecības kritērijs** [28] ir plaši izmantots kritērijs, kas aprēķina starpklasteru un iekšklasteru summas kvadrātu attiecību k klasteriem. ***J*-indekss** salīdzina iekšklasteru attālumu kvadrāta summas un nosaka, vai sadalīt klasteri divos klastos [84, 85].

7. tabula

Klasteru noteikšanas rezultāti Mahalanobisa un Manhetenas attālumiem

Klasteru noteikšanas metode		Klasteru skaits				
		2	10	11	12	13
Lūzuma punkta atrašana uz kļūdas līknes	Mahalanobisa attālums	0,059	0,24	0,23	0,20	0,18
	Manhetenas attālums	0,083	0,081	0,080	0,61	0,59
Dispersijas attiecības kritērijs	Mahalanobisa attālums	126,87	272,86	-538,3	452,09	-554,82
	Manhetenas attālums	68,3	-7,68	757,2	-806,22	-1,03
J-indekss	Mahalanobisa attālums	0,99/ 20,99	0,53/ 78,88	0,99/ 1,82	0,97/ 1,59	0,99/ 0,41

Klasteru skaita noteikšana hierarhiskajam algoritmam parādīja, ka klasteru skaits svārstās atkarībā no izvēlētās metodes klasteru skaita noteikšanai un viennozīmīgi nevar spriest par klastera risinājuma stabilitāti. Apvienojošās

grupēšanas algoritms var būt izmantots kopējās modelētās transporta sistēmas uzvedības kalibrēšanai, bet prasa padziļinātu analīzi par klastera risinājumu stabilitāti, kas satiksmes plūsmu ietekmes analīzes kontekstā nebūtu lietderīgi.

Eksperimentu plānošana

Ādažu piemēram tika saplānoti seši transporta attīstības eksperimenti, lai uzlabotu vietējiem transporta līdzekļu autovadītājiem galamērķa – Ādažu pilsētas centrālās daļas – pieejamību.

- 1) Eksperiments “Bāzes” bez izmaiņām ielu tīklā. “Vietējā” ielā ir izvietoti divi aplūveida krustojumi.
- 2) Eksperiments “Sc_1” bez izmaiņām ielu tīklā. “Vietējā” ielā ir izvietotas dinamiski mainīgas zīmes (angļu val. *Variable message sign*), kas uzrāda ceļojuma laiku, lai šķērsotu “Galveno” ielu kravas transportam.
- 3) Eksperiments “Sc_2”. “Vietējā” ielā viens aplūveida krustojums ir reorganizēts par regulējamo krustojumu.
- 4) Eksperiments “Sc_3”. “Vietējā” ielā viens aplūveida krustojums ir reorganizēts par regulējamo krustojumu ar aizsargājamiem kreisajiem pagriezieniem.
- 5) Eksperiments “Sc_4”. “Vietējā” ielā abi aplūveida krustojumi ir reorganizēti par regulējamiem krustojumiem ar aizsargājamiem kreisajiem pagriezieniem.
- 6) Eksperiments “Sc_5”. Dinamiski mainīgas zīmes izvietotas “Vietējā” ielā. “Vietējā” ielā abi aplūveida krustojumi ir reorganizēti par regulējamiem krustojumiem ar aizsargājamiem kreisajiem pagriezieniem.

TPIM eksperimentu modelēšanas rezultātu novērtēšana

Modelētās un novērotās transporta plūsmu intensitātes tika novērtētas eksponenciālajam, normālajam un vienmērīgajam sadalījumam. Transporta pieprasījuma imitācijas modeļa **eksperimentu modelēšanas rezultātu novērtējums** veikts ar statistiskām metodēm – Teila nevienādības koeficients, *GEH* statistika (skat. 8. tabulu), vidējā kvadrātiskā kļūda un modeļa efektivitātes rādītājiem.

8. tabula

GEH statistikas rezultāti Ādažu piemēram

Eksperimenti	<i>GEH</i> < 5	5 < <i>GEH</i> < 10	<i>GEH</i> > 10
Bāzes	81 %	16 %	3 %
Sc_1	77 %	17 %	6 %
Sc_2	79 %	15 %	6 %
Sc_3	80 %	17 %	3 %
Sc_4	86 %	13 %	<1 %
Sc_5	84 %	14 %	2 %

Kvadrātiskā vidējā kļūda bija 5 % – 15 % robežās atkarībā no transporta attīstības eksperimenta. Lai uzskatītu *GEH* testu par veiksmīgu, pēc avota [132] tiek rekomendēts: 1) vismaz 85 % ielu posmiem jābūt nodrošinātiem $GEH < 5$; 2) 90 % transporta ielu posmu vērtībām jābūt robežās 5–10. Apskatītajā piemērā *GEH* vērtību zem 5 nodrošina tikai viens – ceturtais – transporta attīstības eksperiments. **Ādažu piemēram šādi efektivitātes rādītāji** [39, 132] kā ceļojuma laiks vietējiem autovadītājiem (lai tiktu pilsētas centrā), krustojuma servisa līmenis un aizkavēšanās laiks tika **izvēlēti**, lai novērtētu modelēšanas rezultātus (skat. 9. tabulu).

9. tabula

Vidējā kontroles vadāmā aizkavēšanās un servisa līmenis

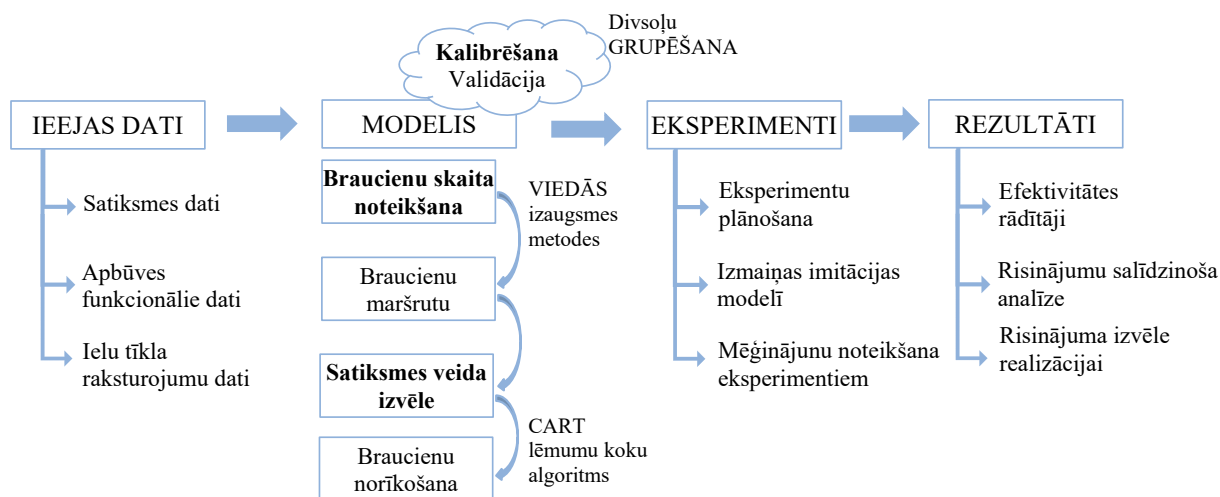
Efektivitātes rādītāji	Eksperimenti					
	Bāzes	Sc_1	Sc_2	Sc_3	Sc_4	Sc_5
Ceļojuma laiks vietējiem autovadītājiem braukšanai uz pilsētas centru, sek.	214,6	208,1	205	208,3	206	207,4
Servisa līmenis	–	–	C	B/C	B/C	B

Transporta pieprasījuma imitācijas modeļa novērtēšanas rezultāti ar efektivitātes rādītājiem parādīja, ka ceļojuma laiks vietējiem autovadītājiem braukšanai uz pilsētas centru variē no 205 līdz 214 sekundēm atkarībā no izvēlēta transporta attīstības eksperimenta. Transporta pieprasījuma imitācijas modeļa validācijas rezultāti Ādažu piemēram ļauj secināt, ka izstrādātais TPIM modelis ir piemērots nākotnes attīstības eksperimentu analīzei un novērtēšanai.

Promocijas darba ceturtais daļas secinājumi

- 1) Transporta pieprasījuma imitācijas modeļa kalibrēšanas procedūra ļauj risināt imitācijas modeļa kalibrēšanas parametru pielāgošanas uzdevumu pētāmajai transporta sistēmai satiksmes plūsmu ietekmes analīzei.
- 2) Divsoļu grupēšana dod iespēju risināt transporta pieprasījuma imitācijas modeļa globālo parametru vērtības izvēles uzdevumu.
- 3) Globālo kalibrēšanas parametru –transporta ierašanās intervāla un transporta imitācijas modelēšanas soļa izmantošana transporta pieprasījuma imitācijas modeļa kalibrēšanā ļauj novērtēt transporta pieprasījuma imitācijas modeļa atbilstību novērotajai transporta sistēmai.
- 4) Statistisko metožu un divsoļu grupēšanas algoritma izmantošana transporta pieprasījuma imitācijas modeļa kalibrēšanā deva iespēju apstrādāt lielus transporta datu apjomus (imitācijas modeļa rezultāti), strādāt ar nepārtrauktiem un kategoriskiem mainīgajiem, un nodrošināt sagaidāmos modelēšanas rezultātus ar pieņemamu detalizāciju un precizitāti.
- 5) Efektivitātes rādītāji – vadāmā aizkavēšanās un ceļojuma laiks – ļauj pārliecināties par transporta pieprasījuma imitācijas modeļa adekvātumu.

Promocijas darba piektajā daļā “Transporta pieprasījuma imitācijas modeļa uzbūve jauktai apbūvei” ir veikta transporta pieprasījuma imitācijas modeļa uzbūve satiksmes plūsmu ietekmes analīzei jauktajai apbūvei Hanzas ielas apkārtnē. TPIM modeļa uzbūve balstās uz promocijas darbā izstrādāto transporta pieprasījuma imitācijas modeļa uzbūves pieeju un ir sniegta 12. attēlā.



12. attēls. Transporta pieprasījuma imitācijas modeļa uzbūves pieeja satiksmes plūsmu ietekmes analīzei.

Transporta pieprasījuma imitācijas modeļa uzbūves pirmajā posmā veikta ģenerēto transporta braucienu skaita noteikšana, izmantojot informācijas sistēmu *Trip Generation* kopā ar viedās izaugsmes metodi *Urbemis* [146, 147]. Ģenerēto transporta braucienu skaits (kopā iebraucošie un izbraucošie braucieni) jauktajai apbūvei būs 2258 braucieni vakara maksimālās satiksmes slodzes stundā (skat. 10. tabulu), gala rezultātā noteiktais ģenerēto transporta braucienu skaits ir samazināts par 40 %, salīdzinot ar sākotnēji noteikto pēc informācijas sistēmas *Trip Generation* lineārās regresijas vienādojumiem.

10. tabula

Ģenerēto transporta braucienu skaita noteikšanas rezultāti vakara maksimālās satiksmes slodzes stundai satiksmes plūsmu ietekmes analīzei

Funkcionalitāte	<i>Trip Generation</i> ¹⁾	<i>Trip Generation</i> – Automobilizācijas līmenis ²⁾	<i>Trip Generation</i> – Automobilizācijas līmenis – <i>Urbemis</i> ³⁾
	braucieni/st.	braucieni/st.	braucieni/st.
Tirdzniecības platības	3 005	2 224	1 890
Biroji	682	395	312
Kopā:	3 687	2 619	2 202

¹⁾ Braucienu skaits maksimālās vakara slodzes stundā, kas noteikts ar informācijas sistēmas *ITE Trip Generation* lineāro novērtēto regresijas vienādojumu.

²⁾ Braucienu skaits maksimālās vakara slodzes stundā ar papildus korekcijām uz automobilizācijas līmeni.

³⁾ Braucienu skaits maksimālās vakara slodzes stundā, balstoties uz *Urbemis* viedās izaugsmes metodi.

TPIM **uzbūves otrajā posmā** sākotnējā gradienta izcelsmes-galamērķa matrica tiek lietota satiksmes plūsmu intensitāšu konvertēšanai izcelsmes-galamērķa matricā [143].

TPIM **uzbūves trešajā posmā** tiek izmantota promocijas darba autores izstrādātā satiksmes veida izvēles metodika, kur paraugkopa noteikta ar minimālo apjoma elipsoīdu, un satiksmes veida izvēle veikta ar lēmumu koka *CART* algoritmu. Paraugkopas noteikšanai ir definēts mērķa objekts – apbūves objekta tirdzniecības un biroju platības [115]. Kopējais datu kopas izmērs sniegts 11. tabulā tirdzniecības un biroju platībām.

11. tabula

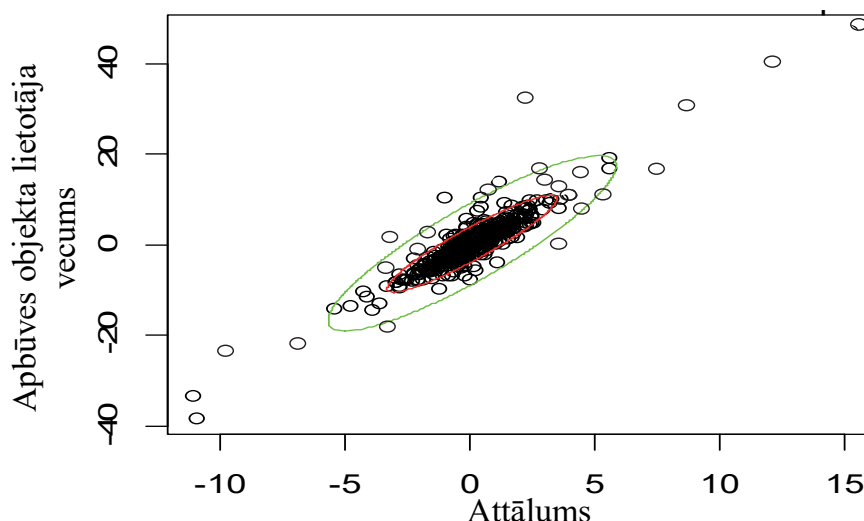
Kopējais datu kopas izmērs pēc jauktās apbūves funkcionalitātes

Funkcionalitāte	Ierakstu skaits
Tirdzniecības platības	2 500
Biroju platības	765

Paraugkopas noteikšanai, satiksmes veida izvēlei un satiksmes plūsmu ietekmes analīzei veiktās darbības ar datu kopu:

- 1) no datu kopas tika izņemti ieraksti ar trūkstošiem datiem, līdz ar to datu kopa samazinājās par 10 %;
- 2) datu kopas satiksmes veida atribūta sadalīšana pa vērtībām ir šāda: mašīnas (33 %), sabiedriskais transports (33 %) un gājēji (34 %). Ieraksti ar satiksmes veidu – riteņbraucēji un takši izņemti no datu kopas, balstoties uz klasifikācijas analīzi par pareizi klasificēto ierakstu skaitu satiksmes veida izvēlē, kombinējot vairākas metodes paraugkopas noteikšanai;
- 3) minimālā apjoma elipsoīds ar izmaksu-jūtīguma novērtējumu izmantots, lai noteiktu trokšņainus ierakstus datu kopā un attiecīgi izņemtu šos ierakstus no tās [4, 151, 152]. Pāriska izkliedes diagramma starp satiksmes veidu un ceļojuma laiku mērķa objektam “Biroju platības” sniegta 13. attēlā;
- 4) izvēlēs sakņota paraugkopu un gadījumrakstura paraugu ņemšana veikta paraugu atlasei izvēlētajam mērķa objektam, lai būtu nodrošināta vienmērīgāka satiksmes veida atribūta kategoriju sadalīšana datu kopā.

Pēc paraugkopas noteikšanas veikta satiksmes veida izvēle ar *CART* lēmumu koku algoritmu. Klasifikācijas precizitāte satiksmes veida izvēlei mērķa objektam “Biroju platības” bija 90,9 %, mērķa objektam “Tirdzniecības platības” – 92,3 %. Satiksmes veida sadalīšanas rezultāti pa mērķa objektiem sniegti 12. tabulā vakara maksimālās satiksmes slodzes stundai.



13. attēls. Minimālā apjoma elipsoīda izkliedes diagramma mērķa objektam “Biroju platības”.

Braucienu sadalīšanas rezultāti jauktai apbūvei vakara maksimālās satiksmes slodzes stundai ļauj secināt, ka lēmuma koku *CART* algoritma lietojums satiksmes veida izvēlē ir pamatots un nodrošina praktiski lietojamus satiksmes veida izvēles rezultātus satiksmes plūsmu ietekmes analīzei.

12. tabula

Satiksmes veida klasifikācijas rezultāti vakara maksimālās satiksmes slodzes stundai

Satiksmes veids	Tirdzniecības platības		Biroji	
	Aprēķināti ar <i>CART</i> ¹⁾	Savākti projektā ²⁾	Aprēķināti ar <i>CART</i>	Savākti projektā
Mašīnas	56 %	57 %	45 %	42 %
Gājējs	27 %	24 %	9 %	7 %
Sabiedriskais transports	17 %	19 %	46 %	51 %

¹⁾ Transporta braucienu procents katram satiksmes veidam noteikts ar lēmumu koku *CART* algoritmu.

²⁾ Transporta braucienu procents noteikts, veicot respondentu aptauju mērķa objektiem [115].

Starpība starp novērotajiem un ar lēmumu koku *CART* algoritmu noteiktajiem transporta braucieniem pa satiksmes veidiem ir 1 % – 3 % tirdzniecības platībām un 2 % – 5 % biroju platībām.

TPIM **uzbūves ceturtajā posmā** ir veikta braucienu dinamiskā norīkošana.

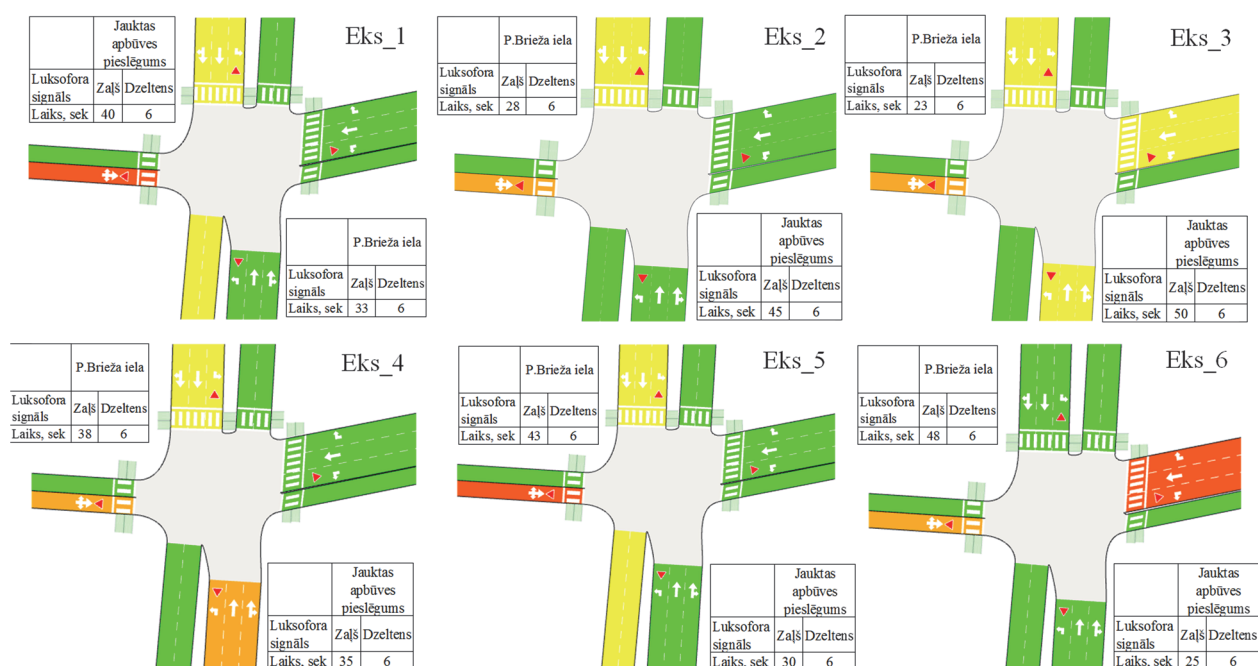
TPIM **uzbūves piektajā posmā** izmantota promocijas darba autores izstrādātā procedūra kalibrēšanas parametru vērtību noteikšanai un modeļa validācijai. Vidējā kvadrātiskā kļūda starp modelēto un novēroto fona transporta plūsmas intensitāti maksimālās satiksmes slodzes stundai bija 7,9 %, Teila nevienādības koeficienta vērtība ir 0,031 (modelim piemīt labas prognozēšanas spējas, modelētās transporta plūsmu intensitātes ir nozīmīgi tuvas novērotajām), *GEH* vērtība zem 5 ir noteikta 89 % transporta ielu posmiem. Transporta

pieprasījuma imitācijas modelim ir aprēķināts ceļojuma laiks vakara maksimālās satiksmes slodzes stundai izpētes teritorijai, kas ļauj secināt, ka uzbūvētais transporta pieprasījuma imitācijas modelis ir veiksmīgi validēts un var būt turpmāk izmantots nepieciešamo satiksmes organizāciju izmaiņu noteikšanā pieguļošajās ielās pēc apbūves objekta celtniecības.

Eksperimentu plānošana un efektivitātes rādītāju novērtēšana

Pēc transporta pieprasījuma imitācijas modeļa uzbūves un validācijas tika veikti eksperimenti jauktas apbūves pieslēgumam ārējam ielu tīklam ar mērķi atrast tādu risinājumu, kas mazinātu satiksmes negatīvo ietekmi uz transporta ielu tīklu, kas saistīts ar jauno apbūvi izpētes teritorijā. Risinājums paredz, ka jauktās apbūves savienojums P. Brieža ielai būs ar trim joslām un krustojums būs regulējams (regulējama krustojuma nepieciešamība noteikta atbilstoši standartam LVS 370:2010 “Ceļu satiksmes regulēšanas luksofori”).

Eksperimentiem izvēlētie luksoforu zaļā signāla laiki ielu krustojuma savienojumiem P. Brieža ielai un jauktās apbūves pieslēgumam sniegti 14. attēlā.



14. attēls. Eksperimentu rezultāti, vidējā transportlīdzekļu rinda (mašīnas/st.).

Krāsa 14. attēlā attēlo kopējo (vieglajam, kravas un sabiedriskajam transportam) vidējo gaidīšanas rindu, zaļā krāsa atspoguļo mazu gaidīšanas rindu vienā joslā (līdz piecām mašīnām), jo tumšāka krāsa, jo lielāka ir gaidīšanas rinda. Risinājumam tika izstrādāti vairāki eksperimenti, un katrā analizēti dažādi luksoforu darbības režīmi ielu krustojuma savienojumam. Tika aprēķināti eksperimentu efektivitātes rādītāji sešiem eksperimentiem.

- 1) Vidējā vadāmā aizkavēšanās vieglajam, kravas un sabiedriskajam transportam.
- 2) Vidējā gaidīšanas rinda vieglajam, kravas un sabiedriskajam transportam.

- 3) Vidējais braukšanas ātrums vieglajam, kravas un sabiedriskajam transportam.
- 4) Vidējais ceļojuma laiks vieglajam, kravas un sabiedriskajam transportam.

Balstoties uz efektivitātes rādītāju analīzes rezultātiem, var secināt, ka otrais eksperiments (*Eks_2*) nodrošina mazāko jauktās apbūves saistītās satiksmes ietekmi uz transporta sistēmu izpētes teritorijā un ir rekomendējams realizācijai.

Promocijas darba piektās daļas secinājumi

- 1) Uzbūvētais transporta pieprasījuma imitācijas modelis jauktajai apbūvei Hanzas ielas apkārtnē vakara maksimālās slodzes stundai ļauj novērtēt jauktās apbūves saistīto transporta plūsmu intensitāti un apbūves objekta satiksmes ietekmi uz transporta sistēmu izpētes teritorijā.
- 2) Eksperimentu rezultāti uzbūvētajam transporta pieprasījuma imitācijas modelim ļauj secināt, ka no sešiem izstrādātajiem eksperimentiem otrais eksperiments nodrošinās mazāko vidējo vadāmo aizkavēšanos un mazāko vidējo mašīnu rindas garumu jauktās apbūves ielu posmu savienojumā vieglajam, kravas un sabiedriskajam transportam izpētes teritorijā.

PROMOCIJAS DARBA REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

Promocijas darbā ir izstrādāta transporta pieprasījuma imitācijas modeļa uzbūves pieeja, kas paredz izmantot mašīnmācīšanās un imitācijas modelēšanas metodes transporta pieprasījuma imitācijas modeļa uzbūvē satiksmes veida izvēlei un imitācijas modeļa kalibrēšanas parametru pielāgošanai. Izstrādātā pieeja ir aprobēta satiksmes plūsmu ietekmes analīzē daudzfunkcionālam apbūves objektam.

Promocijas darba rezultāti

1. Veikta transporta pieprasījuma modeļu veidu izpēte un modeļu izmantošanas salīdzinoša analīze.
2. Izanalizētas transporta pieprasījuma imitācijas modeļa validācijas procedūras.
3. Veikta mašīnmācīšanās un imitācijas modelēšanas metožu izmantojamības analīze transporta pieprasījuma modeļos.
4. Noteiktas mašīnmācīšanās un imitācijas modelēšanas metodes TPIM uzbūvei.
5. Izstrādāta satiksmes veida izvēles metodika, kurā satiksmes veida izvēle ietver ceļotāja transporta veida vēlmes brauciena laikā.
6. Izstrādāta TPIM kalibrēšanas procedūra modeļa kalibrēšanas parametru vērtību izvēlei ar grupēšanas algoritmiem.
7. Uzbūvēts TPIM jauktās apbūves objektam satiksmes plūsmu ietekmes analīzē.

Balstoties uz iegūtajiem rezultātiem, ir izdarīti šādi secinājumi

1. transporta pieprasījuma modeļu veidu salīdzinoša analīze ļāva noteikt, ka paplašinātais, braucienos bāzētais transporta pieprasījuma modelis satiksmes plūsmu ietekmes analīzei prasa jaunās metodikas un procedūru lietošanu, kas

- ļauj satiksmes veida izvēlē ietvert ceļotāja transporta veida vēlmes un nodrošina praktiski lietojamu modelēšanas rezultātu precizitāti atbilstoši satiksmes plūsmu ietekmes analīzes definētajām prasībām;
2. viedās izaugsmes metodes *Urbemis* lietošana ļauj pielāgot ģenerētos transporta braucienus, ņemot vērā sabiedriskā transporta, gājēju un riteņbraucēju infrastruktūras esamību izpētes teritorijā;
 3. sākotnējās izcelsmes-galamērķa matricas veids (transporta plūsmas intensitātes iedalīšanai pa autoceļu tīklu) neietekmē braucienu maršrutu noteikšanas rezultātus;
 4. izstrādātā satiksmes veida izvēles metodika satiksmes plūsmu ietekmes analīzei nodrošina precīzākus satiksmes veida izvēles klasifikācijas rezultātus, salīdzinot ar tradicionālajām metodēm;
 5. izstrādātā transporta pieprasījuma imitācijas modeļa kalibrēšanas procedūra ļauj noteikt globālo kalibrēšanas parametru vērtības satiksmes plūsmu ietekmes analīzei;
 6. divsoļu grupēšanas algoritma lietošana kalibrēšanā ļauj apstrādāt lielus TPIM transporta datu apjomus un nodrošināt sagaidāmos modelēšanas rezultātus ar pieņemamu precizitāti;
 7. apvienojošais klasterizācijas algoritms var būt izmantots kopējās modelētās transporta sistēmas uzvedības kalibrēšanai, bet prasa padziļinātu analīzi par klastera risinājumu stabilitāti, kas SPI analīzes kontekstā nebūtu lietderīgi;
 8. efektivitātes rādītāji (vadāmā aizkavēšanās un ceļojuma laiks) ļauj pārlicināties par transporta pieprasījuma imitācijas modeļa adekvātumu;
 9. iegūtie modelēšanas eksperimentālie rezultāti teritorijai starp Eksporta, Skanstes un Hanzas ielām Rīgā apliecina izstrādātās pieejas izmantošanas efektivitāti. Eksperimenti tika veikti ar uzbūvēto TPIM.

Pēc darba rezultātu apkopošanas var iezīmēt izstrādātās pieejas perspektīvas

1. Datizraces metožu lietošanas iespēju padziļināta analīze transporta braucienu norīkošanā.
2. Transporta pieprasījuma imitācijas modeļa uzbūves pieejas elementu lietošana ceļojumā un aktivitātēs bāzēta transporta pieprasījuma modeļiem.

LITERATŪRA

- [1] Abrahamsson T. Estimation of OriginDestination Matrices Using Traffic Counts – A Literature Survey. International Institute for Applied Systems Analysis. – 1998.
- [2] Abtahi S. M., Tamannaei M., Haghshenash H. Analysis and modeling time headway distributions under heavy traffic flow conditions in the urban highways: case of Isfahan// *Transport.* – 2011. – Vol. 26 (4). – pp. 375–382.
- [3] Acquah H. G. Comparison of Akaike information criterion (AIC) and Bayesian information criterion (BIC) in selection of an asymmetric price relationship// *Development and Agricultural Economics.* – 2010. – Vol. 2 (1). – pp. 001–006.
- [4] Aelst S. V., Rousseeuw P. Minimum volume ellipsoid // *WIREs Comp Stat.* – 2009. – Vol. 1 (1). – pp. 71.–82.
- [5] Ahipasaoglu S. J. Fast algorithms for the minimum volume estimator// *Journal of Global Optimization.* – 2015. – Vol. 62 (2). – pp. 351–370.
- [6] Al-Deek H. M. Which Method is Better for Developing Freight Planning Models at Seaports – Neural Networks or Multiple Regression// *Transportation Research Board.* – 2001. – Vol. 1763. – pp. 90–97.
- [7] Algers S., Daly A., Widlert S. Modelling travel behaviour to support policy making in Stockholm. P. Stopher and M. Lee-Gosselin. – 1997.
- [8] Altas D., Kubas A., Sezen J. Analysis of environmental sensitivity in Thrace region through two step-cluster// *Trakia Journal of Science.* – 2013. – Vol. 11. – pp. 318–329.
- [9] Anable J. ‘Complacent Car Addicts’ or ‘Aspiring Environmentalists’? Identifying travel behavior segments using attitude theory// *Transport Policy.* – 2005. – Vol. 12. – pp. 65–78.
- [10] ArcGIS: Modeling spatial relationships (2013). ArcGIS / Internets. – <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/005p00000005000000> – Resurss apskatīts 2013. gada 29. maijā.
- [11] Arentze T., Timmermans H. ALBATROSS: A Learning Based Transportation Oriented Simulation System. Den Haag: European Institute of Retailing and Services. – 2000.
- [12] Ashok K., Ben-Akiva M. Estimation and Prediction of Time-Dependent Origin-Destination Flows with a Stochastic Mapping to Path Flows and Link Flows// *Transportation Science.* – 2002. – Vol. 36 (2). – pp. 184–198.
- [13] Balakrishna R., Antoniou C., Ben-Akiva M., Koutsopoulos H. N., Wen Y. Calibration of Microscopic Traffic Simulation Models: Method and Application// *Journal of Transportation Research Board.* – 2007. – Vol. 1999. – pp. 198–207.
- [14] Bekhor S., Ben-Akiva M. E., Ramming, S. Evaluation of choice set generation algorithms for route choice models// *Annals of Operations Research.* – 2006. – Vol. 144 (1). – pp. 235–247.
- [15] Bell M. G. H., Iida Y. *Transportation Network Analysis.* – New York: John Wiley & Sons, 1997. – pp. 226.
- [16] Ben-Akiva M. *Travel Demand Modeling, Demand & Economics.* Transportation Systems Analysis. MIT OpenCourseWare / Internets. – <https://ocw.mit.edu/index.htm> – Resurss apskatīts 2016. gada 12. decembrī.
- [17] Ben-Akiva M., Lu L., Xu Y., Constantinou A. An enhanced SPSA algorithm for the calibration of Dynamic Traffic Assignment models// *Transportation Research Part C.* – 2015. – Vol. 51. – pp. 149–166.
- [18] Ben-Akiva M., McFadden D., Abe M., Böckenholt U., Bolduc D., Gopinath D., Morikawa T., Ramaswamy V., Rao V., Revelt D., Steinberg D. Modelling methods for discrete choice analysis// *Marketing Letters.* – 1997. – Vol. 8 (3). – pp. 273–286.
- [19] Bera S., Rao K. V. K. Estimation of origin-destination matrix from traffic counts: the state of the art// *European Transport \ Trasporti Europei.* – 2011. – Vol. 49. – pp. 3–23.

- [20] Bernardin V., Conger M. From Academia to Results from Calibration and Validation of First Hybrid Accessibility-Based Model// Journal of the Transportation Research Board. – 2010. – Vol. 2176. – pp. 50–58.
- [21] Bert E., Chung E., Dumont A. Urban dynamic origin-destination matrices estimation// World Congress on Intelligent Transport Systems. – New York: ITS Congress Association, 2008.
- [22] Bhat C., Guo J., Srinivasan S., Sivakumar A. Comprehensive econometric microsimulator for daily activity-travel patterns// Journal of the Transportation Research Board. – 2004. – pp. 57–66.
- [23] Bierlaire M., Crittin F. An efficient algorithm for real-time estimation and prediction of dynamic OD tables// Operations Research. – 2004. – Vol. 52 (1). – pp. 116–127.
- [24] Bowman J. L., Bradley M., Castiglione J. Making Advanced Travel Forecasting Models Affordable Through Model Transferability// Washington: Transportation Research Board. – 2013.
- [25] Bowman J., Ben-Akiva M. Activity-based Disaggregate Travel Demand Model System with Activity Schedules// Transportation Research A. – 2000. – pp. 1–28.
- [26] Brackstone M., Antoniou C., Barcelo J., Celik H. Traffic Simulation: Case for guidelines. European Commission, Joint Research Centre Institute for Energy and Transport. – 2014.
- [27] Bradley M., Bowman J., Hadi M., Pendyala R., Bhat C., Waller T. Dynamic, Integrated Model System-Jacksonville-Area Application. Transportation Research Board of the National Academies. Washington. – 2014.
- [28] Calinski R. B., Harabasz J. A dendrite method for cluster analysis// Communication in Statistics. – 1974. – Vol. 3 (1). – pp. 1–27.
- [29] Cascetta E. Estimation of trip matrices from traffic counts and survey data: A generalized least squares estimator// Transportation Research Part B: Methodological. – 1984. – Vol. 18 (4–5). – pp. 289–299.
- [30] Casey H. J. Applications to Traffic Engineering of the Law of Retail Gravitation// Traffic Quarterly. – 1955. – Vol. 9 (1). – pp. 23–25.
- [31] Castiglione J., Bradley M., Gliebe J. Activity-based travel demand models: a Primer. Transportation Research Board. Washington. – 2015.
- [32] Chang J. S., Jung D., Kim J., Kang T. Comparative analysis of trip generation models: results using home-based work trips in the Seoul metropolitan area// The International Journal of Transportation Research. – 2014. – pp. 78–88.
- [33] Chatterjee A., Khasnabis L., Slade J. Household stratification models for travel estimation// Journal of Transportation Engineering. – 1977. – Vol. 103 (1). – pp. 199–213.
- [34] Chen A., Chootinan P., Recker W. W. Examining the Quality of Synthetic Origin-Destination Trip Table Estimated by Path Flow Estimator// Journal of transportation engineering. – 2005. – pp. 506–513.
- [35] Ciuffo B., Punzo V., Torrieri V. Comparison of Simulation-Based and Model-Based Calibrations of Traffic-Flow// Journal of the Transportation Research Board. – 2008. – Vol. 2088. – pp. 36–44.
- [36] Community guide to Development Impact Analysis. M. M. Edwards / Internets. – https://gis.lic.wisc.edu/www/licgf/shapingdane/facilitation/all_resources/impacts/CommDev.pdf – Resurss apskatīts 2012. gada 20. septembrī.
- [37] Daehyon K. Neural networks for trip generation model// Journal of the Eastern Asia Society for Transportation studies. – 2001. – Vol. 2 (4). – pp. 201–207.
- [38] Dash R., Dash R. Comparative analysis of k-means and genetic algorithm based data clustering// International Journal of Advanced Computer and Mathematical Sciences. – 2012. – Vol. 3. – pp. 257–265.
- [39] Department of Transportation Federal Highway Administration / Internets. – <https://www.fhwa.dot.gov> – Resurss apskatīts 2015. gada 15. jūlijā.

- [40] Detering S., Schnieder L., Schniede E. Two-Level Validation and Data Acquisition for Microscopic Traffic Simulation Models// International Journal on Advances in Systems and Measurements. – 2010. – Vol. 3. – pp. 48–56.
- [41] Dowling R., Skabardonis A., Al V. Traffic Analysis Toolbox Volume III – Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software. Research, Development, and Technology. Turner-Fairbank Highway Research Center. – 2004.
- [42] Duong D. D., Saccomanno F. F., Hellinga B. R. Effects of microscopic traffic platform calibration on errors in safety and traffic metrics// Washington: Transportation Research Board. – 2011. – pp. 1–21.
- [43] EPA (2013). Mixed-Use Trip Generation Model / Internets. – <https://www.epa.gov/smartgrowth/mixed-use-trip-generation-model> – Resurss apskatīts 2013. gada 30. maijā.
- [44] EPA. COMMUTER Model v2.0. Environmental Protection Agency. – 2005.
- [45] Ezell S. Explaining International IT Application Leadership: Intelligent Transportation Systems. The Information Technology & Innovation Foundation. – 2010.
- [46] Fawcett T. An introduction to ROC analysis// Pattern Recognition Letters. – 2006. – Vol. 27. – pp. 861–874.
- [47] Ferdous N., Bhat C. Comparison of Four-Step Versus Tour-Based Models in Predicting Travel Behavior Before and After Transportation System Changes – Results Interpretation and Recommendations. The University of Texas at Austin Center for Transportation Research. – 2011.
- [48] Fosgerau M. PETRA – An Activity-based Approach to Travel Demand Analysis// National Transport Models: Recent Developments. – 2002. – pp. 134–145.
- [49] Fratar T. J., Voorhees A. M., Raff M. S. Forecasting distribution of interzonal vehicular trips by successive approximations/with discussion// Highway Research Board. – Washington: Transportation Research board. – 2008. – pp. 53–65.
- [50] George Papageorgiou and Athanasios Maimaris (2012). Modelling, Simulation Methods for Intelligent Transportation Systems, Intelligent Transportation Systems / Internets. – <http://www.intechopen.com/books/intelligent-transportation-systems/modelling-simulation-methods-for-intelligent-transportation-systems> – Resurss apskatīts 2016. gada 2. septembrī.
- [51] Hagel P., Shaw R. The Influence of Delivery Mode on Consumer Choice of University// European Advances in Consumer Research. – 2008. – Vol. 8. – pp. 531–536.
- [52] Hague C. G. The Netherlands National Model, 1990: The National Model System for Traffic and Transport. Ministry of Transport and Public Works. The Netherlands – 1992.
- [53] Han J., Kamber M., Pei J. Data Mining: Concepts and Techniques. 3rd edition. – USA: Elsevier Inc., 2012. – pp. 678.
- [54] Hellinga B. R. Requirements for the Calibration of Traffic Simulation Models// Canadian Society for Civil Engineering. – 1998. – Vol. IVB. – pp. 211–222.
- [55] Hensher D. A., Button K. Handbook of Transport Geography and Spatial Systems. – Kidlington: Pergamon/Elsevier Science, 2004. – pp. 127–146.
- [56] Hirsh M., Prashker J., Ben-Akiva M. Dynamic model of weekly activity pattern// Transportation Science. – 1986. – Vol. 20 (1). – pp. 24–36.
- [57] Hourdakakis J., Michalopoulos P. G., Kottommannil J. A Practical procedure for calibrating microscopic traffic simulation models// Journal of the Transportation Research Board. – 2003. – Vol. 1852. – pp. 130–139.
- [58] Hu S. (2015). Akaike Information Criterion / Internets. – <http://www.ncsu.edu>. – Resurss apskatīts 2015. gada 5. augustā.
- [59] Huisken G., Coffa A. Neural Networks and Fuzzy Logic to improve Trip Generation Modelling// Gold Coast, Queensland: Institute of Transport Studies, 2000.

- [60] ITE (2013). Institutes of Transportation Engineers / Internets. – <http://www.ite.org> – Resurss apskatīts 2013. gada 20. maijā.
- [61] ITE. Trip Generation Handbook, 2nd ed. – An ITE Recommended Practice, 2004. – p. 162.
- [62] Yaldi G., Taylor M., Yue W. Examining the possibility of fuzzy set theory application in travel demand modelling// Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. – 2010. – Vol. 8. – pp. 579–592.
- [63] Jovicic G. Activity based travel demand modelling – a literature study. Danmarks TransportForskning. – 2001.
- [64] Jovicic G., Hansen C. O. The Orestad Traffic Passenger Demand Model. Aalborg Universitet. – 2001.
- [65] Jung-Beom L., Kaan O. Calibration of a Macroscopic Traffic Simulation Model Using Enhanced Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation Methodology// Washington: Transportation Research Board, 2008. – pp. 1–19.
- [66] Khalik A., Amal M. A.-T. Prediction Analysis of Trip Production Using Cross-Classification Technique// Al-Rafidain Engineering. – 2006. – Vol. 14 (4). – pp. 51–63.
- [67] Kim K. O., Rilett L. R. Simplex-based Calibration of Traffic Microsimulation Models with Intelligent Transportation Systems Data// Journal of Transportation Research Board. – 2003. – Vol. 1855. – pp. 80.–89.
- [68] Kitamura R. A. Stratification Analysis of Taste Variations in Work Trip Mode Choice// Transportation Research. – 1981. – Vol. 15A (6). – pp. 473–485.
- [69] Koonce P. Benefits of Intelligent Transportation Systems Technologies in Urban Areas: A Literature Review. Portland State University – 2005.
- [70] Koppelman F. S., Bhat C. A Self Instructing Course in Mode Choice Modeling: Multinomial and Nested Logit Models. U. S. Department of Transportation. – 2006.
- [71] Kulkarni A., McNally M. A microsimulation of daily activity patterns// Washington: Transportation Research Board. – 2001.
- [72] Lee D. H., Yang X., Chandrasekar P., Parameter calibration for PARAMICS using Genetic Algorithm// Washington: TRB, 2001.
- [73] Lee G., You S., Ritchie S., Saphores J. D., Sangkapichai J. Environmental Impacts of a Major Freight Corridor: A study of the I-710 in California// Journal of the Transportation Research Board. – 2009. – Vol. 2123. – pp. 119–128.
- [74] List G., Konieczny L., Durnford C. A best practice truck flow estimation model for the New// Transportation Research Record. – Washington: Transportation research board, 2002. – pp. 97–103.
- [75] Liu H., Yu Q., Ding W., Ni D., Wang H., Shannon S. Feasibility Study For Automatic Calibration Of Transportation Simulation Models// Boston: Society for Computer Simulation International, 2011. – pp. 87–94.
- [76] Ma J., Dong H., Zhang H. M. Calibration of Micro Simulation with Heuristic Optimization Methods// Journal of Transportation Research Board. – 2007. – Vol. 1999. – pp. 208.–217.
- [77] Ma J., Kockelman K. M. Crash Modeling Using Clustered Data from Washington State: Prediction of Optimal Speed Limits// IEEE Intelligent Transportation Systems Conference – Toronto: IEEE ITSC, 2006. – pp. 1621–1626.
- [78] Maher M. Inferences on trip matrices from observations on link volumes: A Bayesian statistical approach// Transportation Research Part B: Methodological. – 1983. – Vol. 17 (6). – pp. 435–447.
- [79] Mauro R., Giuffrè O., Granà A., Chiappone S. A Statistical Approach for Calibrating a Microsimulation Model for Freeways// WSEAS Transactions on environment and development. – 2014. – Vol. 10. – pp. 496.–508.
- [80] Meyer M. D., Miller E. J. Urban Transportation Planning 2nd Edition. – Boston: McGraw-Hill, 2001 – p. 656.

- [81] Merkuryev J., Zenina N. Romanovs A. Intelligent Transport Measures as a Component of Cyber-Physical Systems: Case Study for Adazi City// Genova: DIME Università di Genova, 2015. – pp. 57–65.
- [82] Metropolitan Travel Forecasting, Current Practice and Future Direction. Transportation Research Board. – 2007.
- [83] Miller E. J., Roorda M. J., Carrasco J. A. A Tour-Based Model of Travel Mode Choice// Lucerne: 10th International Conference on Travel Behaviour Research. – 2003.
- [84] Milligan G. W., Cooper M. C. A study of variable standardization// Journal of Classification. – 1988. – pp. 181–204.
- [85] Milligan G. W., Cooper M. C. An examination of procedures for determining the number of clusters in a data set// Psychometrika. – 1985. – Vol. 50. – pp. 159–179.
- [86] Milne A., Abley S., Douglass M. Comparisons of NZ and UK Trips and Parking Rates. NZ Transport Agency. – 2009.
- [87] Mooi E., Sarstedt A. M. A Concise Guide to Market Research. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2011. – p. 344.
- [88] Morrow-Jones H. A., Kim M. J. Determinants of Residential Location Decisions among the Pre-Elderly in Central Ohio// Journal of Transport and Land Use. – 2009. – Vol. 2 (1). – pp. 47–64.
- [89] NCTRP. Worksite trip reduction model and manual, Tampa: Florida Department of Transportation. – 2004.
- [90] Nelson \Nygaard. Adjusting Site-Level Vehicle Trip Generation Using URBEMIS, San Francisco: Nelson\Nygaard Consulting Associates. – 2005.
- [91] Ni D., Leonard II J. D., Guin A., Williams B. M. Systematic Approach for Validating Traffic Simulation Models// Journal of the Transportation Research Board. – 2004. – Vol. 1876. – pp. 20–32.
- [92] Olstam J., Tapani A. A Review of Guidelines for Applying Traffic Simulation to Level-of-service Analysis// Procedia Social and Behavioral Sciences. – 2011. – Vol. 16. – pp. 771–780.
- [93] Ortuzar J. D., Willumsen L. G. Modelling transport, 4th Edition. – John Wiley & Sons Ltd., 2011. – p. 586.
- [94] Otkovič I. I., Tollazzi T., Šraml M. Calibration of microsimulation traffic model using neural network// Expert Systems with Applications. – 2013. – Vol. 40. – pp. 5965–5974.
- [95] Ozbay L., Jung-Beom, Kaan. A New Calibration Methodology for Microscopic Traffic Simulation Using Enhanced Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation (E-SPSA) Approach// Journal of the Transportation Research Board. – 2009. – Vol. 2124. – pp. 233–240.
- [96] Park B., Qi H. Development and Evaluation of Simulation Model Calibration Procedure// Journal of Transportation Research Board. – 2005. – Vol. 1934. – pp. 208–217.
- [97] Pavlyuk D., Gromule V. Discrete choice model for a preferred transportation mode// Proceedings of the 10th International Conference “Reliability and Statistics in Transportation and Communication”. – Riga: Transport and Telecommunication Institute. – 2010. – pp. 143–152.
- [98] Paz A., Molano V., Martinez E., Gaviria C., Arteaga C. Calibration of traffic flow models using a memetic algorithm// Transportation Research Part C. – 2015. – Vol. 55. – pp. 432–443.
- [99] Picado R. A Test of Transferability: The SE Florida Activity-Based Travel Demand Model// Columbus: Transportation Research Board. – 2013.
- [100] Punzo V., Ciuffo B. How Parameters of Microscopic Traffic Flow Models Relate to Traffic Dynamics in Simulation// Journal of the Transportation Research Board. – 2009. – Vol. 2124. – pp. 249–256.
- [101] Quinlan J. R. C4.5: Programs for Machine Learning. – Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993. – p. 299.
- [102] Ramos A. L., Ferreira J. V., Barceló J. Modeling & Simulation for Intelligent Transportation Systems// International Journal of Modeling and Optimization. – 2012. – Vol. 2. – pp. 274–279.

- [103] Rindt M., McNally G., Craig R. The Activity-Based Approach. Department of Civil and Environmental Engineering and Institute of Transportation Studies. Irvine. – 2008.
- [104] Ruiter E., Ben-Akiva M. Disaggregate Travel Demand Models for the San Francisco Bay Area// Transportation Research Record. – 1978. – pp. 121–128.
- [105] Rzeszotko J., Nguyen S. H. Machine Learning for Traffic Prediction// Pułtusk: International Workshop on Concurrency, Specification and Programming, 2011. – pp. 442–453.
- [106] Sabel C. E., Kingham S., Nicholson A., Bartie P. Road Traffic Accident Simulation Modelling – A Kernel Estimation Approach// Dunedin: Spatial Information Research Centre University of Otago, 2005. – pp. 442–453.
- [107] Salvador S., Chan P. Determining the Number of Clusters/Segments in Hierarchical Clustering/Segmentation Algorithms// 16th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence – Florida: IEEE Computer Society, 2004 – pp. 576–584.
- [108] Samimi A., Razi-Ardakani H., Mohammadian A. A Decision Tree Approach to Analyze Freight Mode Choice Decisions// Proceedings of the 1st European Symposium on Quantitative Methods in Transportation Systems. – Lausanne, Switzerland, 2012.
- [109] Şchiopu D. Applying TwoStep Cluster Analysis for Identifying Bank Customers' Profile// Buletinul Universităţii Petrol – Gaze din Ploieşti. – 2010. – Vol. LXII. – pp. 66–75.
- [110] Schultz G. G., Rilett L. R. Analysis of Distribution and Calibration of Car-Following Sensitivity Parameters in Microscopic Traffic Simulation Models// Journal of Transportation Research Board. – 2004. – Vol. 1876. – pp. 41–51.
- [111] Shteinman D. Two Methods to Improve the Quality and Reliability of Calibrating & Validating Simulation Models// Adelaide: Australian Institute of Traffic Planning and Management, 2014. – pp. 1–19.
- [112] Shukla N., Ma J., Denagamage W., Huynh R., Perez P. Tour-based travel mode choice estimation based on data mining and fuzzy techniques// International Symposium for Next Generation Infrastructure – United Kingdom: University College London, 2015. – pp. 215–220.
- [113] Snipes M., Taylor D. C. Model selection and Akaike Information Criteria: An example from wine ratings and prices// Wine Economics and Policy. – 2014. – Vol. 3 (1). – pp. 3–9.
- [114] Solvers SIA. ITE rekomendāciju pielāgošana Latvijas (Rīgas) apstākļiem: korekcijas koeficientu aprēķins vairākām funkcionalitātēm, Rīga: SIA Solvers. – 2006.
- [115] Solvers SIA. Transporta satiksmes un gājēju plūsmu izpēte Daugavas kreisā krastā. Rīgas domes pilsētas Attīstības departaments. Rīga. – 2014.
- [116] Spiess H. A maximum likelihood model for estimating origin-destination matrices// Transportation Research Part B Methodological. – 1987. – Vol. 21 (5). – pp. 395–412.
- [117] Spiess H. Conical Volume-Delay Functions// Transportation Science. – 1990. – Vol. 24 (2). – pp. 153–158.
- [118] Stopher P. R., McDonald K. G. Trip Generation by Cross-Classification: An Alternative Methodology// Transportation Research Record. – 1983. – Vol. 944. – pp. 84–91.
- [119] Tamin O. Z., Willumsen L. Transport demand model estimation from traffic counts// Transportation. – 1989. – Vol. 16. – pp. 3–26.
- [120] Tangphaisankun A., Nakamura F., Okamura T. Influences of PARatransit as A Feeder of Mass Transit System in Developing Countries Based on Commuter Satisfaction// Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. – 2009. – Vol. 8. – pp. 1341–1356.
- [121] Tatineni V. C., Demetsky M. J. Supply Chain Models for Freight Transportation Planning. University of Virginia. – 2005.
- [122] Tesema T., Abraham A., Grosan C. Rule mining and classification of road traffic accidents using adaptive regression trees// International Journal of Simulation Systems, Science & Technology. – 2005. – Vol. 6. – pp. 80–94.
- [123] Tillema F., Zuilekom K., Maarseveen M., Huiskens G. Trip generation and trip distribution: Comparison of neural networks and traditional methods. WCTR Society. – 2004.

- [124] Traffic Simulation and Data: Validation methods and Applications/ T. Toledo, T. Kolečkina, P. Wagner u. c. – New York: CRC Press, 2014. – pp. 141–162.
- [125] Train K. Discrete Choice Methods with Simulation. 2nd add. – Cambridge: Cambridge University Press, 2003. – 388. pp.
- [126] Transportation Impact Analyses for Site Development: An ITE Proposed Recommended Practice, Tulkojums: SIA Solvers un Open World tulkojumu birojs. – 2007.
- [127] Treiber M., Kestingb A. Microscopic Calibration and Validation of Car-Following Models – A Systematic Approach/// ISTTT Procedia. – 2014. – Nr. 00. – pp. 1–18.
- [128] TRICS (2013). Trips Rate Information Computer System / Internets. – <http://www.trics.org/> – Resurss apskatīts 2013. gada 30. maijā.
- [129] Trips Database TDB Bureau (2013). TDB / Internets. – <http://www.tdbonline.org> – Resurss apskatīts 2013. gada 30. maijā.
- [130] TRMS (2013). Transport Roads and Maritime Services. Road Projects / Internets. – <http://www.rta.nsw.gov.au/roadprojects> – Resurss apskatīts 2013. gada 30. maijā.
- [131] TSS. Microsimulator and Mesosimulator in Aimsun 6. Transport Simulation Systems. – 2009.
- [132] UK Highways. Design Manual for Roads and Bridges. UK Highways Agency. – 1992.
- [133] Vasconcelos L., Seco Á., Silva A. B. Hybrid calibration of microscopic simulation models// Procedia – Social and Behavioral Sciences. – 2013. – Vol. 00. – pp. 1–11.
- [134] Vasconcelos L., Seco Á., Silva A. B. Hybrid calibration of microscopic simulation models// 16th Meeting of the EURO Working Group on Transportation, Social and Behavioral Sciences Procedia – Switzerland: Springer International Publishing, 2014.
- [135] Vuk G. An innovative approach to activity based travel demand modelling// Aalborg: Trafikdage på Aalborg Universitet, 2011. – pp. 1–9.
- [136] Wang S., Wang F., Qiu R. Traffic Impact Analysis using Microscopic Traffic Simulation Model// Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology. – 2009. – Vol. 9. – pp. 81–96.
- [137] Wardrop J. G. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research// Institute of Civil Engineers. – 1952. – Vol. 1 (3). – pp. 352–362.
- [138] Wiering M., Veenen J. V., Vreeken J., Koopman A. Intelligent Traffic Light Control. Institute of Information and Computing Sciences, Utrecht University. Utrecht. – 2004.
- [139] Wills M. A flexible gravity-opportunity model for trip distribution// Transportation Research board. – 1986. – Vol. 20B (2). – pp. 89–111.
- [140] Willumsen L. Estimation of an O-D Matrix from Traffic Counts – A Review, Leed: Institute of Transport Studies, University of Leeds. – 1978.
- [141] Wilson A. The use of the concept of entropy in system modelling// Operational Research Quarterly. – 1970. – Vol. 21 (2). – pp. 247–265.
- [142] Xie C., Lu J., Parkany E. Work Travel Mode Choice Modeling Using Data Mining: Decision Trees And Neural Networks// Journal of the Transportation Research Board. – 2003. – Vol. 1854. – pp. 50–61.
- [143] Zenina N. Origin destination matrix estimation from traffic counts based on Bi level approach// Kaunas: Kaunas University of Technology, 2013. – pp. 42–45.
- [144] Zenina N., Borisovs A. An Overview of Artificial Neural Networks Application in Transportation// Proceedings of 14th International Conference on Soft Computing. – Brno: Brno University of Technology, 2008. – pp. 12–16.
- [145] Zenina N., Borisovs A. Artificial neural network for analysis of the traffic flow// Proceedings of 16th International Conference on Soft Computing. – Brno: Brno University of Technology, 2010. – pp. 25–32.
- [146] Zenina N., Borisovs A. Clustering algorithm for travel distance analysis// Information Technology and Management Science. – 2013. Vol. 16. – pp. 85–88.

- [147] Zenina N., Borisovs A. Regression Analysis for Transport Trip Generation Evaluation// Information Technology and Management Science. – 2013. – Vol. 16 (1). – pp. 89–94.
- [148] Zenina N., Borisovs A. Transportation Mode Choice Analysis Based on Classification Methods// Information Technology and Management Science. – 2011. – Vol. 16. – pp. 49–53.
- [149] Zenina N., Merkurjevs J. Analysis of Simulation input and output to compare simulation tools// Mechanics Transport Communication. – Sofia: BTY "Todor Kableshkov", 2009. – pp. V–4. – V–10.
- [150] Zenina N., Merkurjevs J. The Impact of Accessibility on Transport Infrastructure within Commercial Site// Proceedings of the 14th International Conference “Reliability and Statistics in Transportation and Communication”. – Riga: Transport and Telecommunication Institute, 2014. – pp. 76–83.
- [151] Zenina N., Romanovs A., Merkurjevs J. Incoming Generated Traffic Flow Estimation based on Transport Access Design and Level of Service// Proceedings of the WSEAS 8th International Conference on Urban Planning and Transportation. – Tenerife: WSEAS Press, 2015. – pp. 195–201.
- [152] Zenina N., Romanovs A., Merkurjevs J. Modelling Based Approach for Attracted Transport Readiness Trips Estimation to the Site// Mathematical Models and Methods in Applied Sciences. – 2015. – Vol. 9 (1). – pp. 410–417.
- [153] Zenina N., Romanovs A., Merkurjevs J. Transport Simulation Model Calibration with Two-step Cluster Analysis Procedure// Information Technology and Management Science. – 2015. – Vol. 19. – pp. 49–56.
- [154] Zhang G., Wang Y., Wei H., Chen Y. Examining Headway Distribution Models with Urban Freeway Loop Event Data// Journal of the Transportation Research Board. – 2007. – Vol. 1999. – pp. 141–149.
- [155] Zhang L., Cirillo C., Xiong C., Hettraku P. Feasibility and Benefit of Advanced Four-Step and Activity-Based Travel. University of Maryland. – 2011.
- [156] Zuylen H. V., Willumsen L. G. The most likely trip matrix estimated from traffic counts// Transportation research Part B: Methodological. – 1980. – Vol. 14 (3). – pp. 281–293.
- [157] Иванов Е. Е., Шустров Д., Перешивкин С. Многомерные статистические методы. Кафедра экономической кибернетики и экономико-математических методов. – 2010.
- [158] Орлова И. В., Половников В. А., Габескирия В. Я., Гармаш А. Н., Гусарова, Михайлов О. М., Пилипенко А. И. Эконометрика. – Москва, 2005.