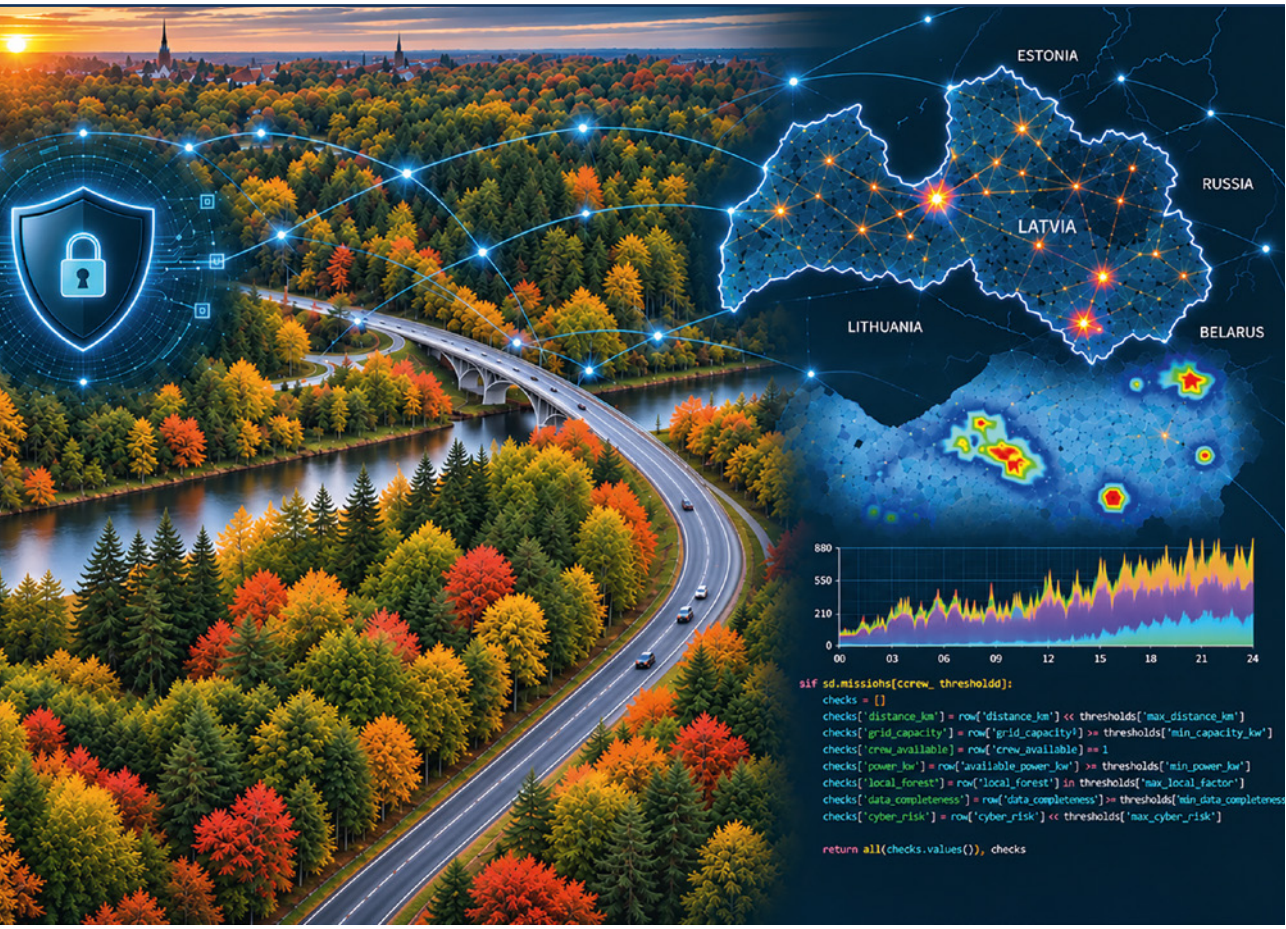
RĪGAS
TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Roberts Grants

DINAMISKU ELEKTRISKO TRANSPORTLĪDZEKĻU UZLĀDES PUNKTU IZMANTOŠANAS LĒMUMU ATBALSTA SISTĒMAS IZSTRĀDE

Promocijas darbs



RTU Izdevniecība
Rīga 2026

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultāte
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

Roberts Grants
Doktora studiju programmas "Elektrotehnoloģiju datorvadība" doktorants

DINAMISKU ELEKTRISKO TRANSPORTLĪDZEKĻU UZLĀDES PUNKTU IZMANTOŠANAS LĒMUMU ATBALSTA SISTĒMAS IZSTRĀDE

Promocijas darbs

Zinātniskā vadītāja
profesore *Dr. sc. ing.*
NADEŽDA KUŅICINA

RTU Izdevniecība
Rīga 2026

Grants, R. Dinamisku elektrisko transportlīdzekļu uzlādes punktu izmantošanas lēmumu atbalsta sistēmas izstrāde. Promocijas darbs. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2026. – 198 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-14" 2026. gada 22. septembra lēmumu, protokols Nr. 04030-9.12.2/3.







Promocijas darbs izstrādāts ar:

– Rīgas Tehniskās universitātes 2022. gada doktorantūras grantu programmas atbalstu;

– Eiropas Sociālā fonda finansētā projekta Nr. 8.2.2.0/20/I/008 "Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās" (2022–2023) atbalstu.

– Eiropas Savienības Atveseļošanas un noturības mehānisma finansētā projekta Nr. 5.2.1.1.i.0/2/24/I/CFLA/003 "Konsolidācijas un pārvaldības izmaiņu ieviešana Rīgas Tehniskajā universitātē, Liepājas Universitātē, Rēzeknes Tehnoloģiju akadēmijā un Latvijas Jūras akadēmijā un Liepājas Jūrniecības koledžā virzībai uz izcilību augstākajā izglītībā, zinātnē un inovācijās" (2025–2026) atbalstu.

Vāka attēls: autora veidota vizuālā kompozīcija, izmantojot Siguldas ainavas fotogrāfiju (*https://elements.envato.com/aerial-view-of-the-sigulda-bridge-and-cable-car-ov-23HXR48*), elektroenerģijas infrastruktūras karti (*https://openinframap.org/#6.52/57/24.928*), autora promocijas darba grafiks, blīvuma karte un *Python* kods. Attēla vizuālajai apstrādei izmantots *OpenAI* (2026).

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (Ph. D.) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2026. gada 21. decembrī plkst. 13.00 Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultātes Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūtā, Āzenes ielā 12/1, Rīgā, 525. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Antans Sauļus Sauhats,
Rīgas Tehniskā universitāte

Ph. D. Irina Ciornei,
Kipras Universitāte, Kipra

Profesors *Domenico Capriglione*,
Kasīno un Dienvidlacio universitāte, Itālija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Roberts Grants ……. (paraksts)
Datums: ……

Promocijas darbs ir sagatavots kā monogrāfisks promocijas darbs, kurā izstrādāts oriģināls zinātnisks pētījums par uz uzticamību orientētu dinamisku elektrisko transportlīdzekļu uzlādes punkta piešķiršanu. Darbā secīgi izklāstīts pētījuma teorētiskais pamatojums, izstrādātais daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas modelis, tā algoritmiskā realizācija, validācijas datu un scenāriju vide, rezultātu analīze un praktiskās ieviešanas iespējas.

Promocijas darba rezultāti aprobēti 18 autora un līdzautoru publikācijās.

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, sešas nodaļas, secinājumi, priekšlikumi un izmantotās literatūras saraksts. Darbā ir 26 attēli, 74 tabulas un 115 vienādojumi. Promocijas darba kopējais apjoms ir 198 lappuses, neieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 62 nosaukumi.

ANOTĀCIJA

Promocijas darbā izstrādāta un validēta daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metodoloģija uz uzticamību orientētai dinamiskai elektrotransportlīdzekļu uzlādes punkta piešķiršanai. Darba aktualitāti nosaka straujais elektrotransportlīdzekļu skaita pieaugums, publiskās uzlādes infrastruktūras attīstība un nepieciešamība efektīvi pārvaldīt uzlādes pieprasījumu sadales tīklu un kiberfizisko sistēmu kontekstā. Darbā pamatots, ka uzlādes punkta izvēle nav reducējama tikai uz attālumu, gaidīšanas laiku, cenu vai uzlādes jaudu, jo piemērotāko alternatīvu ietekmē arī sadales tīkla noslodze, jaudas rezerve, datu kvalitāte, uzticamība un kiberdrošības risks.

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt un validēt daudzkritēriju lēmumu pieņemšanā balstītu modeli uz uzticamību orientētai dinamiskai elektrotransportlīdzekļu uzlādes punkta piešķiršanai. Darbā uzlādes punkta piešķiršana formalizēta kā dinamiska daudzkritēriju lēmumu problēma, kurā katra alternatīva tiek vērtēta pēc lietotāja, uzlādes punkta, sadales tīkla, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības kritērijiem. Analītiskās hierarhijas metode izmantota kritēriju relatīvās nozīmības noteikšanai, bet *PROMETHEE* metode, pieļaujamo alternatīvu prioritizācijai un pilna ranga iegūšanai. Izstrādāta arī dinamiskās filtrēšanas un pārrēķina loģika, kas ļauj pirms alternatīvu rangēšanas izslēgt tehniski, tīkla vai drošības ziņā nepieļaujamas alternatīvas.

Modeļa validācijai izmantota anonimizēta elektrotransportlīdzekļu uzlādes infrastruktūras datu vide ar pilsētas un piepilsētas objektiem, uzlādes punktu tehniskajiem datiem, transformatoru un barošanas avotu parametriem, slodžu profiliem, datu kvalitātes indikatoriem un kiberdrošības scenārijiem. Validācijas rezultāti parāda, ka izstrādātais *AHP–PROMETHEE* modelis nodrošina interpretējamu uzlādes punktu rangu, rezerves alternatīvu secību un pamatotāku lēmumu nekā viena kritērija pieejas. Sadales tīkla kritēriju iekļaušana nodrošina, ka lēmuma pieņemšanas procesā tiek ņemts vērā tīkla darbības režīms, savukārt kiberdrošības un datu kvalitātes integrācija ļauj samazināt riskantāku vai mazāk uzticamu alternatīvu prioritāti.

Promocijas darba hipotēze tiek atbalstīta metodoloģiskās un scenāriju validācijas robežās. Darba rezultāti veido metodoloģiski validētu lēmuma atbalsta sistēmas prototipa aprēķinu kodolu, ko iespējams tālāk attīstīt uzlādes infrastruktūras operatoru, sadales sistēmas operatoru, pašvaldību, kiberdrošības pārvaldības un elektrotransportlīdzekļu uzlādes infrastruktūras digitālā dvīņa vajadzībām.

ANNOTATION

This doctoral thesis develops and validates a multi-criteria decision-making methodology for reliability-oriented dynamic electric vehicle charging point assignment. The relevance of the research is determined by the rapid increase in the number of electric vehicles, the development of public charging infrastructure, and the need to manage charging demand effectively in the context of distribution networks and cyber-physical systems. The thesis demonstrates that charging point selection cannot be reduced only to distance, waiting time, price, or charging power, since the most suitable alternative is also influenced by distribution network loading, available power reserve, data quality, reliability, and cybersecurity risk.

The aim of the doctoral thesis is to develop and validate a multi-criteria decision-making-based model for reliability-oriented dynamic electric vehicle charging point assignment. In the thesis, charging point assignment is formalized as a dynamic multi-criteria decision-making problem in which each alternative is evaluated according to user, charging point, distribution network, data quality, reliability, and cybersecurity criteria. The Analytic Hierarchy Process is used to determine the relative importance of criteria, while the PROMETHEE method is used to prioritize admissible alternatives and obtain a complete ranking. A dynamic filtering and recalculation logic is also developed, enabling technically, network-related, or security-wise inadmissible alternatives to be excluded before ranking.

The model is validated using an anonymized electric vehicle charging infrastructure data environment that includes urban and suburban sites, technical data of charging points, transformer and power supply parameters, load profiles, data quality indicators, and cybersecurity scenarios. The validation results show that the developed AHP–PROMETHEE model provides an interpretable ranking of charging points, a sequence of reserve alternatives, and a more substantiated decision than single-criterion approaches. The inclusion of distribution network criteria ensures that the network operating mode is considered in the decision-making process, while the integration of cybersecurity and data quality makes it possible to reduce the priority of riskier or less reliable alternatives.

The hypothesis of the doctoral thesis is supported within the limits of methodological and scenario-based validation. The results of the thesis form a methodologically validated computational core of a decision support system prototype, which can be further developed for the needs of charging infrastructure operators, distribution system operators, municipalities, cybersecurity management, and digital twins of electric vehicle charging infrastructure.

PATEICĪBA

Vēlos izteikt patiesu pateicību visiem, kuri sniedza atbalstu šī promocijas darba tapšanas laikā.

Īpašu pateicību izsaku savai zinātniskajai vadītājai profesorei *Dr.sc.ing*. Nadeždai Kuņicinai par profesionālo vadību, uzticēšanos, iedrošinājumu, kritiskām diskusijām un ieguldījumu promocijas darba zinātniskās ievirzes veidošanā. Viņas pieredze, padomi un prasīgums būtiski palīdzēja strukturēt pētījuma ideju, nostiprināt metodoloģisko pamatu un virzīt darbu līdz noslēguma rezultātam.

Pateicos Rīgas Tehniskās universitātes kolēģiem un līdzautoriem par sadarbību zinātnisko publikāciju izstrādē, kopīgām diskusijām, ideju apmaiņu un atbalstu pētniecības procesā. Šī sadarbība ļāva paplašināt promocijas darba skatījumu, sasaistot elektromobilitātes, sadales tīklu, lēmumu atbalsta sistēmu, datu analīzes, digitalizācijas un kiberdrošības jautājumus vienotā pētnieciskā virzienā.

Izsaku pateicību AS "Sadales tīkls" par iespēju izmantot promocijas darba izstrādē nepieciešamos anonimizētos tehniskos un slodžu datus, kā arī par profesionālo vidi un praktisko pieredzi, kas palīdzēja labāk izprast elektroapgādes infrastruktūras, elektrotransportlīdzekļu uzlādes objektu un sadales tīklu ekspluatācijas reālos izaicinājumus. Šie dati un praktiskais konteksts bija būtiski, lai izstrādāto metodoloģiju varētu sasaistīt ar reāliem sadales tīkla un uzlādes infrastruktūras pārvaldības apstākļiem.

Pateicos arī nozares kolēģiem par profesionālajām diskusijām, kritiskiem jautājumiem un praktisku skatījumu uz elektroapgādes drošuma, tīkla attīstības, datu kvalitātes, infrastruktūras pārvaldības un enerģētikas transformācijas jautājumiem.

Īpašu pateicību izsaku *WEC Latvia* par iespēju publicēt rakstu "Enerģētikas nākotne 2025: globālās tendences un Latvijas pielāgošanās" žurnālā "Enerģija"! Šī publikācija kā komunikācijas tipa raksts ar pētniecisku daļu par *World Energy Issues Monitor* ļāva plašāk analizēt enerģētikas nozares attīstības tendences, globālos izaicinājumus un Latvijas pielāgošanās iespējas. Publikācijas sagatavošana veicināja promocijas darba konteksta paplašināšanu, īpaši attiecībā uz enerģētikas sistēmu pārmaiņām, noturību, infrastruktūras attīstību un lēmumu pieņemšanu nenoteiktības apstākļos.

Pateicos Latvenergo, AS "Augstsprieguma tīkls", Rīgas Tehniskajai universitātei, Nākotnes enerģētikas līderiem un *WEC Latvia* par sadarbību raksta "*Forecasting Accuracy and Portfolio Effect Impact on Renewable Power Plant Imbalance Costs*" tapšanā. Šī starpinstitucionālā sadarbība sniedza būtisku pienesumu pētnieciskās pieredzes paplašināšanā, īpaši atjaunīgo energoresursu integrācijas, prognozēšanas precizitātes, elektroenerģijas tirgus līdzsvarošanas un portfeļa efekta ietekmes izpētē.

Īpašu pateicību izsaku savai ģimenei un tuvajiem cilvēkiem par pacietību, sapratni un atbalstu visā promocijas darba izstrādes laikā. Viņu atbalsts bija būtisks brīžos, kad darbs prasīja daudz laika, enerģijas un neatlaidības.

Paldies visiem, kuri ar padomu, kritiku, sadarbību vai vienkārši klātbūtni palīdzēja šim darbam kļūt par pabeigtu pētījumu.

SATURA RĀDĪTĀJS

LIETOTIE SAĪSINĀJUMI 14
DATU UN KODA PIEEJAMĪBA 16
IEVADS 17
Pētījuma aktualitāte 17
Pētījuma problēma un pētnieciskā plaisa 17
Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas pieejas nepieciešamība 18
Pētījuma objekts un priekšmets 19
Promocijas darba mērķis un uzdevumi 19
Pētījuma hipotēze 20
Pētījuma metodes 20
Zinātniskā novitāte 20
Praktiskā nozīme 21
Pētījuma rezultātu aprobācija 21
Autora zinātniskās publikācijas un ar promocijas darbu saistītie iepriekšējie darbi 22
Promocijas darba struktūra 23
Mākslīgā intelekta rīku izmantošana promocijas darba sagatavošanā 24
1. ELEKTRISKO TRANSPORTLĪDZEKĻU UZLĀDES INFRASTRUKTŪRAS ATTĪSTĪBA UN PĒTNIECĪBAS KONTEKSTS 25
1.1. Elektrisko transportlīdzekļu attīstība un to ietekme uz elektroapgādes sistēmām 25
1.1.1. Globālās un Eiropas elektromobilitātes attīstības tendences 25
1.1.2. Elektromobilitātes un uzlādes infrastruktūras attīstības tendences Latvijā 26
1.1.3. EV uzlādes ietekme uz sadales tīklu 29
1.1.4. *EV* uzlādes infrastruktūra kā kiberfiziska sistēma 30
1.2. *EV* uzlādes infrastruktūras veidi un darbības principi 31
1.2.1. *AC/DC*, lēnā, ātrā un *ultra*-ātrā uzlāde 31
1.2.2. Publiskā, daļēji publiskā un privātā uzlādes infrastruktūra 32
1.2.3. Uzlādes punkts kā tehnisks un digitāls mezgls 33
1.3. Uzlādes punkta izvēle kā daudzkritēriju lēmumu problēma 34
1.3.1. Telpiskā un faktiskā pieejamība 34
1.3.2. Gaidīšanas laiks, noslodze un lietotāja uzvedība 35
1.3.3. Sadales tīkla ierobežojumi 35
1.3.4. Uzticamības un kiberdrošības dimensija 36
1.3.5. Kritēriju konflikts un *MCDM* nepieciešamība 37
1.4. *MCDM* pieejas *EV* uzlādes infrastruktūras literatūrā 38
1.4.1. *MCDM* izmantošana staciju plānošanā un lokācijas izvēlē 38

1.4.2. *AHP* un *PROMETHEE* pielietojums *EV* infrastruktūras pētījumos 39
1.4.3. Atšķirība starp infrastruktūras plānošanu un dinamisku piešķiršanu 40
1.4.4. Uzticamības un kiberdrošības integrācijas trūkums esošajās pieejās 40
1.5. Lēmumu atbalsta sistēmas nepieciešamība dinamiskai *EV* uzlādes punkta piešķiršanai 41
1.5.1. Lēmuma atbalsta sistēma kā *MCDM* metodoloģijas realizācijas vide 42
1.5.2. Reāllaika, operatīvo datu nozīme 43
1.5.3. Pāreja uz teorētisko modeli 44
1.6. Pirmās nodaļas secinājumi 44
2. UZTICAMĪBAS ORIENTĒTAS DINAMISKAS UZLĀDES PUNKTU PIEŠĶIRŠANAS TEORĒTISKAIS MODELIS 46
2.1. Dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas problēmas formulējums 46
2.1.1. Dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas jēdziens 46
2.1.2. Atšķirība starp infrastruktūras plānošanu un dinamisku piešķiršanu 47
2.1.3. Uzlādes punkta piešķiršana kā *MCDM* problēma 48
2.1.4. Uzticamības orientētas pieejas vieta lēmumu modelī 49
2.1.5. Problēmas robežas un pieņēmumi 50
2.2. Lēmumu vides elementi un alternatīvu kopa 51
2.2.1. Elektriskais transportlīdzeklis kā lēmuma iniciators 51
2.2.2. Uzlādes punkts kā alternatīva *MCDM* modelī 52
2.2.3. Sadales tīkls kā ierobežojošais un novērtējamais slānis 53
2.2.4. Datu un operatora vide kā lēmuma konteksts 53
2.2.5. Lēmumu vides kopējais stāvoklis un alternatīvu kopa 54
2.3. Kritēriju sistēma uz uzticamību orientētai uzlādes punkta piešķiršanai 56
2.3.1. Kritēriju sistēmas veidošanas principi 56
2.3.2. Transportlīdzekļa kritēriji 57
2.3.3. Uzlādes punkta kritēriji 57
2.3.4. Sadales tīkla kritēriji 58
2.3.5. Lietotāja un ekspluatācijas kritēriji 58
2.3.6. Ekonomiskie, vides un *RES/BESS* kritēriji 59
2.3.7. Drošības/kiberdrošības kritēriji 59
2.3.8. Uzticamības kritēriji 59
2.4. Uzticamības un kiberdrošības indikatoru integrācija *MCDM* modelī 61
2.4.1. Uzticamība kā šķērsgriezuma dimensija 61
2.4.2. Kiberdrošības indikatoru izvēle 62
2.4.3. Uzticamības un kiberriska rādītāju formulējums 62
2.4.4. Indikatoru normalizācija un virziens 63

2.4.5. Integrācijas veidi *MCDM* modelī ... 63
2.5. *AHP* balstīta kritēriju hierarhija un svaru noteikšanas princips ... 64
2.5.1. *AHP* vieta uzlādes punkta piešķiršanas *MCDM* modelī ... 64
2.5.2. Kritēriju hierarhijas definēšana ... 64
2.5.3. Pāru salīdzinājumu matrica ... 65
2.5.4. Svaru aprēķina princips ... 65
2.5.5. Konsistences pārbaude ... 65
2.5.6. Ekspertu vērtējumu apkopošana ... 66
2.5.7. Statisko, scenāriju un dinamisko svaru izmantošana ... 66
2.5.8. *AHP* svaru izmantošana *PROMETHEE* prioritizācijā ... 66
2.6. *PROMETHEE* balstīta alternatīvu prioritizācijas loģika ... 67
2.6.1. *PROMETHEE* loma dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas modelī ... 67
2.6.2. Kritēriju starpības un preferenču funkcijas ... 67
2.6.3. Indifferences un preferences sliekšņi ... 67
2.6.4. Kopējais preferences indekss ... 68
2.6.5. Pozitīvā, negatīvā un *neto* plūsma ... 68
2.6.6. Alternatīvu rangs un gala izvēle ... 68
2.6.7. *PROMETHEE I* un *PROMETHEE II* interpretācija ... 69
2.6.8. Riskam pielāgota *PROMETHEE* prioritizācija ... 69
2.7. Dinamiskās atjaunināšanas un filtrēšanas princips ... 69
2.7.1. Dinamiskā atjaunināšana kā teorētiska nepieciešamība ... 69
2.7.2. Kandidātu kopas un pieļaujamo alternatīvu kopas nošķīrums ... 70
2.7.3. Filtrēšanas loģika ... 70
2.7.4. Dinamiskā pārrēķina princips ... 70
2.7.5. Lēmuma stabilitātes princips ... 71
2.8. Otrās nodaļas secinājumi ... 71
3. *MCDM* METODOLOĢIJAS OPERACIONALIZĀCIJA UN ALGORITMISKĀ REALIZĀCIJA ... 73
3.1. Pētījuma metodoloģiskā loģika ... 73
3.1.1. Pāreja no teorētiskā modeļa uz aprēķinu metodoloģiju ... 73
3.1.2. Metodoloģijas saistība ar promocijas darba mērķi un hipotēzi ... 74
3.1.3. Pētījuma pieņēmumi un ierobežojumi ... 75
3.2. Kritēriju operacionalizācija un *AHP* svaru izmantošana ... 76
3.2.1. Kritēriju pārnese no teorētiskā modeļa uz aprēķinu modeli ... 76
3.2.2. Kritēriju indikatoru, datu avotu un *MCDM* virzienu definēšana ... 77
3.2.3. *AHP* svaru pārnese uz aprēķinu modeli ... 78
3.2.4. Svaru interpretācija un jutīguma analīzes priekšnosacījumi ... 79

3.3. *PROMETHEE* prioritizācijas aprēķinu procedūra ... 80
3.3.1. *PROMETHEE* loma aprēķinu modelī ... 80
3.3.2. Kritēriju virzieni un preferenču funkcijas ... 81
3.3.3. Kopējais preferences indekss ... 82
3.3.4. Pozitīvās, negatīvās un neto plūsmas aprēķins ... 82
3.3.5. Gala izvēle un rezerves alternatīvu secība ... 83
3.3.6. Kandidātu un pieļaujamo alternatīvu kopas ... 84
3.3.7. Filtrēšanas nosacījumi ... 85
3.3.8. Dinamiskās atjaunināšanas mehānisms ... 86
3.3.9. Pseidoalgoritms ... 87
3.4. Prototipa aprēķinu realizācijas un rezultātu interpretācijas loģika ... 89
3.4.1. Prototipa mērķis un loma metodoloģijas pārbaudē ... 89
3.4.2. Prototipa funkcionālie slāņi ... 89
3.4.3. Aprēķinu moduļu struktūra ... 90
3.4.4. *MCDM* lēmums jeb momentuzņēmums ... 91
3.4.5. Kiberdrošības un uzticamības slāņa vieta prototipā ... 92
3.4.6. Rezultātu vizualizācijas un interpretācijas vide ... 93
3.4.7. Saistība ar lēmuma atbalsta sistēmas arhitektūru ... 94
3.5. Trešās nodaļas secinājumi ... 95
4. DATU, SCENĀRIJU UN EKSPERIMENTĀLĀS VIDES IZVEIDE ... 97
4.1. Datu struktūra *MCDM* modeļa validācijai ... 97
4.1.1. Validācijas objektu kopējā struktūra ... 97
4.1.2. *EV* un uzlādes pieprasījuma dati ... 100
4.1.3. Uzlādes punktu un operatora dati ... 101
4.1.4. Sadales tīkla dati ... 104
4.1.5. Uzticamības un kiberdrošības dati ... 107
4.2. Datu priekšapstrāde ... 109
4.2.1. Datu tīrīšana un sinhronizācija ... 109
4.2.2. Kritēriju normalizācija ... 110
4.2.3. Sliekšņu un robežvērtību noteikšana ... 112
4.3. Eksperimentālās vides arhitektūra ... 114
4.3.1. Aprēķinu vides apraksts ... 114
4.3.2. Modeļa izpildes secība ... 115
4.3.3. Rezultātu saglabāšana un vizualizācija ... 117
4.4. Scenāriju sistēma ... 118
4.4.1. Scenāriju validācijas datu tvērums ... 118
4.4.2. Bāzes scenārijs ... 119

4.4.3. Sezonālie scenāriji ... 120
4.4.4. Pilsētas un piepilsētas scenāriji ... 120
4.4.5. Slodzes un pīķa scenāriji ... 121
4.4.6. Datu kvalitātes un kiberdrošības scenāriji ... 122
4.4.7. Uz uzticamības kritērijiem orientēts svaru jutīguma scenārijs ... 123
4.4.8. Scenāriju salīdzināšanas princips ... 123
4.5. Novērtēšanas rādītāji ... 124
4.5.1. Lietotāja līmeņa *KPI* ... 125
4.5.2. Infrastruktūras līmeņa *KPI* ... 125
4.5.3. Sadales tīkla līmeņa *KPI* ... 126
4.5.4. Uzticamības un kiberdrošības *KPI* ... 127
4.5.5. *KPI* izmantošana modeļa validācijā ... 130
4.6. Datu un scenāriju ierobežojumi ... 130
4.6.1. Datu pieejamības un detalizācijas ierobežojumi ... 130
4.6.2. Laika izšķirtspējas un agregācijas ierobežojumi ... 130
4.6.3. Kiberdrošības un uzticamības datu ierobežojumi ... 131
4.6.4. Telpiskā mēroga un anonimizācijas ierobežojumi ... 131
4.6.5. Scenāriju validācijas ierobežojumi ... 131
4.6.6. Modeļa robežas ... 131
4.7. Ceturtās nodaļas secinājumi ... 132
5. MODEĻA VALIDĀCIJA UN REZULTĀTU ANALĪZE ... 134
5.1. Validācijas pieeja un salīdzināmās piešķiršanas stratēģijas ... 134
5.2. *AHP* svaru un *PROMETHEE* ranga aprēķina rezultāti ... 137
5.2.1. Bāzes *AHP* kritēriju svari ... 137
5.2.2. Uz uzticamību orientētie koriģētie svari ... 139
5.2.3. Sezonālo validācijas periodu un lēmuma momentu pamatojums ... 140
5.2.4. *PROMETHEE* ranga aprēķina rezultāti sezonālajos lēmuma scenārijos ... 145
5.2.5. Detalizēti *PROMETHEE* plūsmas rezultāti ... 146
5.2.6. Svaru ietekme uz *PROMETHEE* rezultātu ... 147
5.2.7. *PROMETHEE* ranga interpretācija ... 149
5.2.8. Sadaļas kopsavilkums ... 149
5.3. Bāzes scenārija validācijas rezultāti ... 150
5.3.1. Bāzes scenārija validācijas periodi ... 150
5.3.2. Bāzes scenārija *KPI* salīdzinājums pa sezonām ... 151
5.3.3. Ranga stabilitāte un atkārtotas piešķiršanas biežums ... 152
5.3.4. Pieļaujamo alternatīvu un rezerves secības nozīme ... 153
5.3.5. Bāzes scenārija rezultātu interpretācija ... 153

5.4. Salīdzinošā analīze ar vienkāršotām piešķiršanas pieejām 154
5.4.1. Piešķiršanas metožu izvēlēto alternatīvu salīdzinājums 154
5.4.2. Izvēlēto alternatīvu pilnā pieļaujamība 155
5.4.3. Izvēlēto alternatīvu riska profila salīdzinājums 156
5.4.4. Salīdzinošās analīzes interpretācija 157
5.4.5. Sadaļas kopsavilkums 157
5.5. Scenāriju un stresa apstākļu analīze 158
5.5.1. Stresa scenāriju definīcija 158
5.5.2. Stresa scenāriju *KPI* salīdzinājums 158
5.5.3. Pīķa slodzes scenārija interpretācija 160
5.5.4. Datu kvalitātes degradācijas scenārija interpretācija 160
5.5.5. Kiberdrošības scenārija interpretācija 161
5.5.6. Kombinētā stresa scenārija interpretācija 161
5.5.7. Sadaļas kopsavilkums 161
5.6. Jutīguma analīze 162
5.6.1. Bāzes un uz uzticamību orientētās konfigurācijas salīdzinājums 162
5.6.2. Kiberriska kritērija svara jutīguma analīze 163
5.6.3. Kiberriska penalizācijas ietekme 164
5.6.4. Tīkla kritēriju svara jutīguma analīze 164
5.6.5. Dominējošo alternatīvu kopsavilkums jutīguma analīzē 165
5.6.6. Sadaļas kopsavilkums 166
5.7. Uzticamības un kiberdrošības slāņa pienesuma novērtējums 166
5.7.1. Uzticamības un drošības *KPI* novērtēšanas loģika 166
5.7.2. Uzticamības *KPI* rezultāti bāzes un stresa scenārijos 167
5.7.3. Datu kvalitātes ietekme uz lēmuma uzticamību 168
5.7.4. Kiberdrošības riska ietekme uz alternatīvu prioritāti 169
5.7.5. *OCPP/WUSTL* kiberdrošības validācijas slāņa kopsavilkums 169
5.7.6. Uzticamības un kiberdrošības slāņa praktiskais pienesums 171
5.7.7. Sadaļas kopsavilkums 171
5.8. Piektās nodaļas secinājumi 172
6. REZULTĀTU DISKUSIJA, IEVIEŠANAS IESPĒJAS UN PĒTĪJUMA IEROBEŽOJUMI 174
6.1. Rezultātu interpretācija un hipotēzes izvērtējums 174
6.2. Salīdzinājums ar literatūru un zinātniskais pienesums 177
6.3. Zinātniskais pienesums 179
6.4. Praktiskās ieviešanas iespējas 180
6.5. Pētījuma ierobežojumi 181

6.6. Turpmākās attīstības virzieni 184
6.7. Sestās nodaļas secinājumi 186
SECINĀJUMI 188
PRIEKŠLIKUMI 191
ATSAUCES 194

LIETOTIE SAĪSINĀJUMI

Saīsinājums	Atšifrējums / skaidrojums
AAL	Pieļaujamo alternatīvu zuduma rādītājs, angļu val. *Admissible Alternatives Loss*
AC	Maiņstrāva, angļu val. *Alternating Current*
AHP	Analītiskās hierarhijas process, angļu val. *Analytic Hierarchy Process*
ANP	Analītiskā tīkla process, angļu val. *Analytic Network Process*
API	Lietojumprogrammu saskarne, angļu val. *Application Programming Interface*
APP	Lietojumslānis, angļu val. *Application Layer*
ASR	Piešķiršanas sekmīguma rādītājs, angļu val. *Assignment Success Rate*
AUC	Laukums zem ROC līknes, angļu val. *Area Under the Curve*
BESS	Akumulatoru enerģijas uzkrāšanas sistēma, angļu val. *Battery Energy Storage System*
BMS	Akumulatoru vadības sistēma, angļu val. *Battery Management System*
CPO	Uzlādes punktu operators, angļu val. *Charge Point Operator*
CPS	Kiberfiziska sistēma, angļu val. *Cyber-Physical System*
CSDD	Ceļu satiksmes drošības direkcija
CSO	Uzlādes staciju operators/pakalpojuma operators, angļu val. *Charging Station Operator*
DC	Līdzstrāva, angļu val. *Direct Current*
DQI	Datu kvalitātes ietekmes rādītājs, angļu val. *Data Quality Impact*
DSO	Sadales sistēmas operators, angļu val. *Distribution System Operator*
DSS	Lēmumu atbalsta sistēma, angļu val. *Decision Support System*
EEA	Eiropas Vides aģentūra, angļu val. *European Environment Agency*
ELECTRE	Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metožu grupa, franču val. *Elimination Et Choix Traduisant la REalité*; angļu val. *Elimination and Choice Translating Reality*
EMS	Enerģijas pārvaldības sistēma, angļu val. *Energy Management System*
ENISA	Eiropas Savienības Kiberdrošības aģentūra, angļu val. *European Union Agency for Cybersecurity*
ES	Eiropas Savienība
EUS	Elektrisko transportlīdzekļu uzlādes stacija / uzlādes sistēma
EV	Elektriskais transportlīdzeklis, angļu val. *Electric Vehicle*
EVSE	Elektrisko transportlīdzekļu uzlādes iekārta/infrastruktūras elements, angļu val. *Electric Vehicle Supply Equipment*
F/UTP	Ekranēts vītā pāra kabelis ar folijas ekrānu, angļu val. *Foiled Unshielded Twisted Pair*
F1	Klasifikācijas kvalitātes rādītājs, kas apvieno precizitāti un atgūšanas spēju, angļu val. *F1-score*
GIS	Ģeogrāfiskās informācijas sistēma, angļu val. *Geographic Information System*
GVR	Tīkla pārkāpumu īpatsvars, angļu val. *Grid Violation Ratio*
IDS	Ielaušanās atklāšanas sistēma, angļu val. *Intrusion Detection System*
IEA	Starptautiskā Enerģētikas aģentūra, angļu val. *International Energy Agency*
IEC	Starptautiskā elektrotehniskā komisija, angļu val. *International Electrotechnical Commission*
IIoT	Industriālais lietu internets, angļu val. *Industrial Internet of Things*
IoT	Lietu internets, angļu val. *Internet of Things*
IPS	Ielaušanās novēršanas sistēma, angļu val. *Intrusion Prevention System*

ISO	Starptautiskā standartizācijas organizācija, angļu val. *International Organization for Standardization*
ISO/IEC	ISO un IEC kopstandartu ietvars, angļu val. *International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission*
ISO/SAE	ISO un Automobiļu inženieru biedrības kopstandartu ietvars, angļu val. *International Organization for Standardization / Society of Automotive Engineers*

DATU UN KODA PIEEJAMĪBA

Promocijas darba aprēķinu reproducējamības nodrošināšanai izstrādātais *Python* aprēķinu kods, anonimizētie validācijas dati, scenāriju konfigurācijas un rezultātu ģenerēšanas skripti sagatavoti kā atsevišķs pētniecības datu un koda pielikums.

Pielikumā netiek iekļauti neanonimizēti infrastruktūras dati, precīzi objektus identificējoši dati vai sensitīva kiberdrošības informācija. Publiskojamā datu kopa satur tikai anonimizētus un metodoloģiskai pārbaudei nepieciešamus ievaddatus, aprēķinu rezultātus un scenāriju parametrus.

Dati un kods ir pieejams: *https://doi.org/10.5281/zenodo.20383316*

IEVADS

Pētījuma aktualitāte

Elektrisko transportlīdzekļu skaita pieaugums pasaulē un Eiropā būtiski maina transporta un enerģētikas sektoru savstarpējo mijiedarbību. Starptautiskās Enerģētikas aģentūras dati rāda, ka 2024. gadā pasaulē tika pārdoti vairāk nekā 17 miljoni elektroautomobiļu, un to īpatsvars jauno automobiļu tirgū pārsniedza 20 %, savukārt publiski pieejamā uzlādes infrastruktūra turpināja strauji attīstīties [1], [2]. Eiropas Savienībā transporta sektors joprojām ir viens no nozīmīgākajiem siltumnīcefekta gāzu emisiju avotiem, bet elektriskie transportlīdzekļi dzīves cikla griezumā rada mazākas emisijas nekā transportlīdzekļi ar iekšdedzes dzinējiem [3], [4]. Tādēļ elektromobilitāte vairs nav tikai tehnoloģiska inovācija, bet gan būtisks instruments dekarbonizācijas, energoefektivitātes un ilgtspējīgas mobilitātes politikā [1]–[5].

Vienlaikus *EV* izplatība rada jaunas prasības elektroapgādes sistēmām, īpaši sadales tīklu līmenī. Uzlādes pieprasījums ir telpiski un laikā nevienmērīgs, un to ietekmē lietotāju uzvedība, maršruti, akumulatora uzlādes stāvoklis, uzlādes staciju tehniskās iespējas, vietējā tīkla noslodze, tarifu vide, atjaunojamo energoresursu pieejamība un digitālās pārvaldības sistēmu darbība [6]–[10]. Liela skaita *EV* vienlaicīga vai nekoordinēta uzlāde var izraisīt lokālas pārslodzes, sprieguma novirzes, zudumu pieaugumu, slodzes maksimumu palielināšanos un paātrinātu atsevišķu tīkla aktīvu nolietojumu [6], [9], [10]. Tādēļ *EV* integrācija sadales tīklā nav skatāma tikai kā pieslēguma vai infrastruktūras izbūves jautājums, bet gan kā komplekss energosistēmas, digitālās pārvaldības un lietotāja uzvedības mijiedarbības uzdevums [6], [7], [11].

Praktiskajā līmenī viena no būtiskākajām problēmām ir ne tikai uzlādes infrastruktūras izbūve, bet arī tās efektīva izmantošana konkrētā ekspluatācijas situācijā. Uzlādes staciju blīvums, tehniskais nodrošinājums un faktiskā pieejamība atšķiras starp pilsētu, darba vietu, piepilsētas, lauku un tranzīta teritorijām. Nepietiekama infrastruktūras pieejamība palielina lietotāju gaidīšanas laiku un var mazināt uzticēšanos elektromobilitātei, savukārt neoptimāla staciju izmantošana samazina ieguldījumu efektivitāti un palielina slodzi sadales tīklā [2], [6], [7], [9]. Tādēļ arvien nozīmīgāks kļūst jautājums ne tikai par to, kur uzlādes stacijas jāizvieto, bet arī par to, kā konkrētam transportlīdzeklim konkrētā laikā izvēlēties piemērotāko uzlādes punktu.

Šāda izvēle nav reducējama uz viena parametra optimizāciju, piemēram, attālumu līdz tuvākajai stacijai, īsāko gaidīšanas laiku, zemāko cenu vai lielāko nominālo uzlādes jaudu. *EV* uzlādes punkta piešķiršana ir daudzfaktoru lēmumu problēma, kurā vienlaikus jāņem vērā transportlīdzekļa tehniskais stāvoklis, nepieciešamais enerģijas apjoms, uzlādes punkta faktiskā pieejamība, paredzamais gaidīšanas laiks, uzlādes jauda, sadales tīkla parametri, vietējie ekspluatācijas apstākļi, atjaunojamo energoresursu pieejamība, lietotāja preferences, datu kvalitāte, uzticamība un kiberdrošības risks [6]–[9], [11]–[13]. Līdz ar to uzlādes punkta izvēle jāskata kā operatīva, laikā mainīga un daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas problēma.

Eiropas Savienības regulatīvais ietvars uzlādes infrastruktūras attīstību vairs neuztver tikai kā tirgus iniciatīvu, bet arī kā koordinētu publiskās infrastruktūras izvēršanas uzdevumu. Regula (*ES*) 2023/1804 par alternatīvo degvielu infrastruktūras ieviešanu nosaka obligātus nacionālos mērķus publiski pieejamas alternatīvo degvielu infrastruktūras izvēršanai, īpaši elektroenerģijas un ūdeņraža infrastruktūrai, tādējādi pastiprinot nepieciešamību pēc tehniski pamatotas, koordinētas un lietotājiem pieejamas *EV* uzlādes infrastruktūras attīstības [14].

Pētījuma problēma un pētnieciskā plaisa

Līdzšinējie pētījumi *EV* uzlādes jomā aptver staciju izvietojuma plānošanu, kapacitātes izvēli, darba vietu uzlādes konfigurāciju, viedās uzlādes stratēģijas, lietotāju uzvedības analīzi,

agregatoru vadību un uzlādes infrastruktūras integrāciju energosistēmā [6], [7], [9], [10], [15]–[23]. Šie pētījumi ir būtiski ilgtermiņa infrastruktūras attīstībai, tomēr liela daļa no tiem fokusējas uz staciju līmeņa plānošanu, lokācijas izvēli, konfigurācijas optimizāciju vai uzlādes procesa vadību, nevis uz konkrēta *EV* uzlādes punkta dinamisku piešķiršanu reāllaika vai operatīvo datu situācijā.

Tādējādi promocijas darba pētnieciskā plaisa ir saistīta ar to, ka literatūrā salīdzinoši mazāk attīstīta ir operatīva uzlādes punkta piešķiršanas pieeja, kur konkrētam *EV* konkrētā laikā tiek izvēlēta piemērotākā uzlādes alternatīva, vienlaikus integrējot lietotāja, uzlādes infrastruktūras, sadales tīkla, atjaunojamo energoresursu, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības kritērijus. Praktiskos risinājumos bieži dominē tuvākās stacijas, brīvā uzlādes punkta vai lielākās pieejamās jaudas loģika, kas nav pietiekama situācijās, kur uzlādes punkta piemērotību nosaka vairāku savstarpēji konfliktējošu kritēriju kopums.

Šī problēma kļūst vēl būtiskāka, ja *EV* uzlādes infrastruktūra tiek interpretēta kā kiberfiziska sistēma. Mūsdienu uzlādes ekosistēmā mijiedarbojas transportlīdzekļi, uzlādes iekārtas, operatoru platformas, sakaru protokoli, mobilās lietotnes, mākoņservisi, maksājumu sistēmas, lokālā ģenerācija, akumulācijas sistēmas un elektroapgādes infrastruktūra [8], [12], [13], [22]. Šāda arhitektūra paplašina sistēmas funkcionalitāti, bet vienlaikus palielina ievainojamību pret komunikāciju traucējumiem, datu integritātes problēmām, autentifikācijas kļūdām, piekļuves kontroles nepilnībām un piegādes ķēdes riskiem [8], [12], [13], [24], [25]. Tādēļ uzlādes punkta izvēlei jābūt ne tikai lietotājam ērtai un tehniski iespējamai, bet arī uzticamai no datu, komunikācijas, sadales tīkla un kiberdrošības skatpunkta.

Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas pieejas nepieciešamība

Dinamiska *EV* uzlādes punkta piešķiršana pēc būtības ir daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas jeb *MCDM* problēma, jo tajā vienlaikus jānovērtē vairākas savstarpēji konfliktējošas alternatīvu īpašības. *MCDM* literatūrā uzsvērts, ka šādas metodes ir piemērotas situācijām, kur nepieciešams strukturēt sarežģītu lēmumu telpu, apvienot kvantitatīvus un kvalitatīvus kritērijus, strādāt ar nenoteiktību un nodrošināt caurspīdīgu alternatīvu salīdzināšanu [26]–[28]. Ilgtspējas, enerģētikas un infrastruktūras izvērtēšanā *MCDM* ir kļuvusi par nozīmīgu metodoloģisku instrumentu, jo tā ļauj vienotā sistēmā apvienot tehniskos, ekonomiskos, vides un sociālos kritērijus [26], [28].

Šajā promocijas darbā dinamiska *EV* uzlādes punkta piešķiršana tiek formalizēta kā *MCDM* problēma, kur alternatīvas ir konkrētajā laikā sasniedzamie un pieļaujamie uzlādes punkti, bet kritēriji raksturo to piemērotību no *EV*, lietotāja, uzlādes infrastruktūras, sadales tīkla, ekonomikas, atjaunojamo energoresursu, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības skatpunkta. Šāda pieeja ļauj izvairīties no vienkāršotas viena kritērija izvēles un nodrošina strukturētu pamatu kompromisa lēmumam starp lietotāja ērtību, infrastruktūras efektivitāti, tīkla pieļaujamību un drošuma prasībām.

No daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metodēm šajā darbā īpaša nozīme ir analītiskās hierarhijas metodei (*AHP*) un *PROMETHEE* pārākuma attiecību pieejai. *AHP* tiek izmantota kritēriju hierarhijas un relatīvo svaru noteikšanai, jo tā ļauj strukturēt lēmuma problēmu mērķī, kritēriju grupās, apakškritērijos un alternatīvās, kā arī noteikt kritēriju nozīmīgumu ar pāru salīdzinājumiem [29], [30]. Savukārt *PROMETHEE* tiek izmantota pieļaujamo uzlādes alternatīvu prioritizācijai, jo tā ļauj veikt alternatīvu pāru salīdzināšanu pēc vairākiem kritērijiem, izmantot preferenču funkcijas un iegūt interpretējamu pozitīvo, negatīvo un neto plūsmu [27]. Šāds metožu sadalījums ļauj nodalīt ekspertu prioritāšu strukturēšanu no konkrētā laika momentā pieejamo alternatīvu operatīvas rangēšanas.

Būtisks aspekts ir tas, ka *EV* uzlādes punkta piemērotība nav statiska. Tā mainās laikā atkarībā no uzlādes pieprasījuma, staciju pieejamības, tīkla noslodzes, satiksmes, meteoroloģiskajiem apstākļiem, lietotāja prioritātēm, lokāli pieejamajiem energoresursiem,

datu kvalitātes un drošības stāvokļa. *Saaty* dinamisko prioritāšu pieeja parāda, ka lēmumu pieņemšanā iespējams pāriet no statiskām prioritātēm uz laikatkarīgām prioritātēm un prioritāšu funkcijām [31]. Tas ir būtiski arī šī promocijas darba kontekstā, jo uzlādes punkta izvēlei jāatspoguļo nevis abstrakti vidējie apstākļi, bet konkrētā ekspluatācijas brīža situācija.

Pētījuma objekts un priekšmets

Promocijas darba pētījuma objekts ir elektrisko transportlīdzekļu uzlādes infrastruktūra sadales tīklu un kiberfiziskās pārvaldības kontekstā.

Pētījuma priekšmets ir daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metodoloģija uz uzticamību orientētai dinamiskai *EV* uzlādes punkta piešķiršanai.

Šāds objekta un priekšmeta nošķīrums ļauj promocijas darbā koncentrēties nevis uz visu *EV* infrastruktūras plānošanas problemātiku, bet uz konkrētu operatīvu lēmumu: kuru uzlādes punktu konkrētam *EV* konkrētā laikā piešķirt, ja alternatīvu piemērotību nosaka vairāku tehnisku, lietotāja, tīkla, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības kritēriju kopums.

Promocijas darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt un validēt *MCDM* balstītu modeli uz uzticamību orientētai dinamiskai elektrisko transportlīdzekļu uzlādes punkta piešķiršanai, izmantojot reāllaika vai operatīvo tīkla datus par *EV* stāvokli, uzlādes infrastruktūras pieejamību, sadales tīkla parametriem, atjaunojamo energoresursu pieejamību, datu kvalitāti un kiberdrošības risku.

Mērķa sasniegšanai izvirzīti šādi uzdevumi:

1. analizēt elektrisko transportlīdzekļu uzlādes infrastruktūras attīstības tendences, tās ietekmi uz sadales tīkliem un uzlādes pārvaldības pētniecisko kontekstu;
2. izvērtēt daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metožu, īpaši *AHP* un *PROMETHEE*, piemērotību dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas uzdevumam;
3. identificēt un strukturēt kritērijus, kas ietekmē uzlādes punkta piemērotību, ietverot *EV*, uzlādes punkta, lietotāja, sadales tīkla, ekonomiskos, atjaunojamo energoresursu, uzticamības, datu kvalitātes un kiberdrošības kritērijus;
4. izstrādāt uz uzticamību orientētu kritēriju hierarhiju un noteikt kritēriju svaru izmantošanas loģiku, balstoties uz *AHP* pieeju;
5. izstrādāt *PROMETHEE* balstītu alternatīvu prioritizācijas modeli pieļaujamo uzlādes punktu rangēšanai;
6. izstrādāt dinamiskas filtrēšanas un pārrēķina algoritmu, kas ļauj izslēgt tehniski, ekspluatācijas, tīkla, datu kvalitātes vai kiberdrošības ziņā nepieļaujamas alternatīvas;
7. izveidot datu, scenāriju un eksperimentālās validācijas vidi, izmantojot anonimizētus *EV* uzlādes infrastruktūras objektus, slodžu profilus, tīkla parametrus, datu kvalitātes indikatorus un kiberdrošības scenārijus;
8. validēt izstrādāto modeli, salīdzinot to ar vienkāršotām piešķiršanas stratēģijām, piemēram, tuvākās stacijas, īsākā gaidīšanas laika, lielākās pieejamās jaudas izvēles pieeju, pieeju bez sadales tīkla stāvokļa ievērošanas un pieeju bez kiberdrošības risku integrācijas;
9. novērtēt uzticamības, sadales tīkla, datu kvalitātes un kiberdrošības kritēriju pienesumu dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas rezultātā.

Pētījuma hipotēze

Promocijas darba hipotēze: uz uzticamību orientēta dinamiska daudzkritēriju piešķiršanas pieeja, kas vienotā modelī integrē *EV* stāvokli, uzlādes infrastruktūras pieejamību, sadales tīkla parametrus, lietotāja prasības, datu kvalitāti un kiberdrošības risku, nodrošina pamatotāku un interpretējamāku uzlādes punkta izvēli nekā statiskas vai ierobežota kritēriju skaita pieejas.

Šajā darbā hipotēze tiek pārbaudīta metodoloģiskās un scenāriju validācijas robežās. Tas nozīmē, ka darbs nepretendē uz pilna mēroga komerciālas *EV* uzlādes pārvaldības sistēmas ieviešanu reālā *CPO–DSO–EV* vidē, bet pārbauda, vai izstrādātais *AHP–PROMETHEE* modelis spēj strukturēti un reproducējami integrēt lietotāja, infrastruktūras, tīkla, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības kritērijus uzlādes punkta izvēlē.

Pētījuma metodes

Promocijas darbā izmantotas šādas pētījuma metodes:

- zinātniskās literatūras, normatīvā un nozares avotu analīze par *EV* uzlādes infrastruktūru, sadales tīklu integrāciju, gudrās uzlādes, *MCDM*, lēmuma atbalsta sistēmas un kiberdrošību;
- daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metodes, īpaši *AHP* kritēriju svaru noteikšanai un *PROMETHEE* alternatīvu prioritizācijai;
- kritēriju operacionalizācija, nosakot to aprēķināmos indikatorus, datu avotus, *MCDM* virzienu un lomu filtrēšanas vai rangēšanas procesā;
- datu priekšapstrāde un normalizācija, izmantojot slodžu profilus, uzlādes punktu tehniskos datus, transformatoru parametrus, pieejamās jaudas un datu kvalitātes indikatorus;
- scenāriju modelēšana, ietverot normālu režīmu, sezonālas slodzes izmaiņas, tīkla noslodzes scenārijus, lietotāja steidzamības scenārijus un kiberdrošības/datu kvalitātes traucējumu scenārijus;
- algoritmiskā prototipēšana *Python* vidē, realizējot filtrēšanu, *AHP* svaru izmantošanu, *PROMETHEE* plūsmu aprēķinu, dinamisku pārrēķinu, *KPI* aprēķinu un vizualizāciju;
- salīdzinošā analīze ar vienkāršotām piešķiršanas pieejām un jutīguma analīze attiecībā pret kritēriju svaru, tīkla un kiberdrošības kritēriju izmaiņām.

Zinātniskā novitāte

Promocijas darba zinātniskā novitāte izpaužas šādos aspektos:

1. Dinamiska *EV* uzlādes punkta piešķiršana formalizēta kā operatīva daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas problēma, atšķirot to no klasiskās uzlādes staciju izvietojuma un kapacitātes plānošanas problemātikas.
2. Izstrādāta uz uzticamību orientēta kritēriju sistēma, kas vienotā modelī apvieno *EV*, uzlādes punkta, lietotāja, sadales tīkla, ekonomiskos, atjaunojamo energoresursu, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības kritērijus.
3. Izstrādāta *AHP–PROMETHEE* balstīta metodoloģija, kur *AHP* tiek izmantota kritēriju hierarhijas un svaru noteikšanai, bet *PROMETHEE*, pieļaujamo alternatīvu prioritizācijai un pilna ranga iegūšanai.
4. Uzticamība un kiberdrošība integrētas uzlādes punkta piešķiršanas modelī nevis kā ārēji komentāri pēc lēmuma pieņemšanas, bet kā pilnvērtīgi lēmuma kritēriji, filtri vai gala prioritātes korekcijas faktori.

5. Izstrādāta dinamiskas filtrēšanas un pārrēķina loģika, kas ļauj aktualizēt alternatīvu kopu, kritēriju vērtības un rangu atbilstoši mainīgiem *EV*, uzlādes infrastruktūras, sadales tīkla, datu kvalitātes un kiberdrošības apstākļiem.
6. Izveidota metodoloģiska validācijas vide ar anonimizētiem *EV* uzlādes infrastruktūras objektiem, slodžu profiliem, tehniskajiem parametriem, datu kvalitātes indikatoriem un kiberdrošības scenārijiem, kas ļauj reproducējami pārbaudīt izstrādātā modeļa darbību.

Praktiskā nozīme

Promocijas darba praktiskā nozīme ir saistīta ar iespēju izmantot izstrādāto metodoloģiju kā lēmumu atbalsta sistēmas aprēķinu kodolu *EV* uzlādes infrastruktūras pārvaldībā. Uzlādes infrastruktūras operatoriem šāda pieeja var palīdzēt piešķirt lietotājiem piemērotākus uzlādes punktus, ņemot vērā ne tikai attālumu vai pieejamību, bet arī tīkla, datu kvalitātes un drošības kritērijus. Sadales sistēmas operatoriem modelis piedāvā lēmumu pieņemšanas slāni, kurā tiek ņemts vērā sadales tīkla darbības režīms, lokālā slodze, pieejamā jaudas rezerve un potenciālais pārslodzes risks. Pašvaldībām un reģionālās mobilitātes plānotājiem modelis var kalpot kā papildu informācijas avots uzlādes infrastruktūras attīstības prioritizācijai pilsētu un piepilsētu teritorijās.

Kiberdrošības pārvaldības kontekstā izstrādātā pieeja ļauj uzlādes alternatīvu izvēlē iekļaut datu kvalitātes, komunikācijas uzticamības, autentifikācijas, datu integritātes un kiberriska indikatorus. Tas ir būtiski, jo *EV* uzlādes infrastruktūra arvien vairāk darbojas kā kiberfiziska sistēma, kur lēmuma ticamība ir atkarīga ne tikai no fiziskās infrastruktūras stāvokļa, bet arī no digitālo datu un sakaru slāņa uzticamības [8], [12], [13], [24], [25].

Izstrādātais modelis nav komerciāls programmatūras produkts, bet metodoloģiski validēts lēmuma atbalsta sistēmas prototipa aprēķinu kodols. To iespējams tālāk attīstīt *CPO/CSO, DSO*, pašvaldību, kiberdrošības pārvaldības, viedās uzlādes un *EV* uzlādes infrastruktūras digitālā dvīņa vajadzībām.

Pētījuma rezultātu aprobācija

Promocijas darba rezultāti un ar tiem saistītie teorētiskie, metodoloģiskie un praktiskie risinājumi ir aprobēti autora un līdzautoru zinātniskajās publikācijās, starptautisku konferenču rakstu krājumos un recenzētos zinātniskajos žurnālos. Publikācijas aptver vairākus savstarpēji saistītus virzienus: elektromobiļu uzlādes infrastruktūras integrāciju elektroapgādes tīklos, atjaunojamo energoresursu izmantošanu uzlādes infrastruktūrā, *EV* pārvaldības lēmumu atbalsta sistēmas, sadales tīklu digitalizāciju, kiberfizisko sistēmu uzticamību, kiberdrošības riska novērtēšanu, kā arī datu analīzes un viedo tehnoloģiju pielietojumu enerģētikā.

Tieši ar promocijas darba tematiku saistītie rezultāti aprobēti publikācijās par elektromobiļu uzlādes staciju integrāciju zemsprieguma elektroapgādes tīklos, ātrās uzlādes staciju integrāciju ar atjaunojamās enerģijas avotiem, *EV* pārvaldības lēmumu pieņemšanas sistēmu ar viedo tehnoloģiju un lokālo īpatnību integrāciju, kā arī *EV* uzlādes infrastruktūras kiberdrošības riska novērtēšanas lēmumu atbalsta ietvaru. Šie pētījumi veido tiešu pamatu promocijas darbā izstrādātajai uz uzticamību orientētai dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas metodoloģijai.

Promocijas darba metodoloģiskais pamats papildus nostiprināts autora līdzdalībā publikācijās par sadales tīklu digitālā dvīņa izmantošanu infrastruktūras inspekcijā, tīkla pieslēgumu operatīvo pārvaldību, atjaunojamo energoresursu prognozēšanu, automatizētām vadības sistēmām, viedo infrastruktūru, kiberfizisko sistēmu uzticamību un zinātniskās mašīnmācīšanās metodēm. Šīs publikācijas paplašina promocijas darba kontekstu, sasaistot EV uzlādes infrastruktūras pārvaldību ar digitalizāciju, datu kvalitāti, uzticamību, automatizāciju un kiberfizisko sistēmu drošumu.

Autora zinātniskās publikācijas un ar promocijas darbu saistītie iepriekšējie darbi

Publikācijas, kas tieši saistītas ar promocijas darba tematiku

1. **Grants, R**. Elektromobiļu uzlādes staciju integrācijas iespējas zemsprieguma elektroapgādes tīklu izbūves projektos. Inženierprojekts. Rīga: Rīgas Tehniskā universitāte, 2020.
2. Bisenieks, M.; **Grants, R**.; Krumins, O.; Zabasta, A. Fast Charging for Electric Vehicles Station Integration with Renewable Energy Sources. In: 2022 IEEE 7th International Energy Conference (ENERGYCON), 2022. DOI: 10.1109/ENERGYCON53164.2022.9830155.
3. Kunicina, N.; Beliaev, V.; **Grants, R.**; Caiko, J.; Amanova, R.; Brūzgienė, R.; Mansurova, M. Decision-Making System for Electric Vehicle Management by Integrating Smart Technologies and Local Characteristics. Applied Sciences, 2024, 14, 11150. DOI: 10.3390/app142311150.
4. **Grants, R.**; Kunicina, N.; Brūzgienė, R.; Grigaliūnas, Š.; Romanovs, A. Decision-Support Framework for Cybersecurity Risk Assessment in EV Charging Infrastructure. Energies, 2026, 19, 1814. DOI: 10.3390/en19081814.

Publikācijas par elektroenerģijas sistēmām, sadales tīklu digitalizāciju, atjaunojamiem energoresursiem un datu analīzi

5. **Grants, R.** Elektrisko transportlīdzekļu ātrās uzlādes stacijas integrācija ar atjaunojamās enerģijas avotiem. Maģistra darbs. Rīga: Rīgas Tehniskā universitāte, 2020.
6. Bisenieks, M.; **Grants, R.**; Krumins, O.; Caiko, J.; Shuvarina, A.; Ziravecka, A. Operational Management for Grid Connections. In: 2023 IEEE 10th Jubilee Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), 2023. DOI: 10.1109/AIEEE58915.2023.10134826.
7. Gauce, D.; Lektauers, A.; Solovjova, I.; **Grants, R.**; Kolosovs, D.; Litvinenko, A. Application of Digital Twin in Medium-Voltage Overhead Distribution Network Inspection. Remote Sensing, 2023, 15, 489. DOI: 10.3390/rs15020489.
8. **Grants, R.**; Baltputnis, K.; Junghāns, G.; Zāģere-Tihova, S.; Bruksle, B.; Groza, E. Forecasting Accuracy and Portfolio Effect Impact on Renewable Power Plant Imbalance Costs. In: 2025 IEEE 66th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2025. DOI: 10.1109/RTUCON67996.2025.11415022.
9. **Grants, R.** Enerģētikas nākotne 2025: globālās tendences un Latvijas pielāgošanās. Enerģija, 2025, Nr. 4, ISSN: #2592-9844

Publikācijas par vadības sistēmām, automatizāciju, uzticamību un kiberfiziskām sistēmām

10. Beliaev, V.; Kunicina, N.; Ziravecka, A.; Bisenieks, M.; **Grants, R.**; Patlins, A. Development of Adaptive Control System for Aerial Vehicles. Applied Sciences, 2023, 13, 12940. DOI: 10.3390/app132312940.
11. Alizada, R.; Beliaev, V.; **Grants, R.**; Utesevs, I.; Ziravecka, A.; Romanovs, A. Conceptual Model of Control Reliability and Safety for Integrated Maritime Navigation through Cognitive Route Simulation. In: 2024 IEEE 11th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), 2024. DOI: 10.1109/AIEEE62837.2024.10586716.

12. Beliaev, V.; Utesevs, I.; **Grants, R.**; Bisenieks, M.; Ziravecka, A.; Caiko, J. Extremum-Seeking Adaptive Controllers for Energy Efficient Unmanned Aerial Vehicles. In: 2024 IEEE 11th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), 2024. DOI: 10.1109/AIEEE62837.2024.10586635.
13. Kunicina, N.; Bisenieks, M.; **Grants, R.**; Balodis, V. Automated Level Control System Development for Harbor Tank Storage for Smart Cities. In: 2025 IEEE 66th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2025. DOI: 10.1109/RTUCON67996.2025.11415052.
14. Zhao, B.; Zheng, D.; Yang, C.; Wang, S.; Mansurova, M.; Jomartova, S.; Kunicina, N.; Zabasta, A.; Beliaev, V.; Caiko, J.; **Grants, R.** Design and Optimization of an Internet of Things-Based Cloud Platform for Autonomous Agricultural Machinery Using Narrowband Internet of Things and 5G Dual-Channel Communication. Electronics, 2025, 14, 1672. DOI: 10.3390/electronics14081672.

Publikācijas par MCDM, ilgtspēju, izglītību un viedām metodēm

15. Hnatov, A.; Bisenieks, M.; Arhun, S.; **Grants, R.**; Mygal, V.; Ulianets, O. Prospects for the Use of Electric Drives in Urban Passenger Vehicle Transport in Ukraine. In: 2023 IEEE 64th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2023. DOI: 10.1109/RTUCON60080.2023.10413061.
16. Kunicina, N.; Caiko, J.; **Grants, R.** Cultivating Future-Ready Education: Striking a Balance with Personalized Empowerment in Electrical Engineering. In: 2023 IEEE 64th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2023. DOI: 10.1109/RTUCON60080.2023.10412931.
17. Kunicina, N.; Caiko, J.; **Grants, R.** Enhancing Student Motivation and Academic Success. Effective Strategies for Promoting Study Programs in Education. In: 2023 IEEE 64th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2023. DOI: 10.1109/RTUCON60080.2023.10413029.
18. Zhiyenbayev, M.; Kunicina, N.; Mansurova, M.; Patlins, A.; Caiko, J.; Beliaev, V.; **Grants, R.**; Bisenieks, M.; Shyntore, G. Development of Aggregated Sustainability Indicators for Quality of Life Evaluations in Urban Areas of the Republic of Kazakhstan. Sustainability, 2024, 16, 9483. DOI: 10.3390/su16219483.
19. Lei, S.; Balakayeva, G.; Yang, C.; Kunicina, N.; **Grants, R.**; Grunde, U. DDR-PINN: A Dynamic Domain–Gradient Reweighting Physics-Informed Neural Network. Applied Sciences, 2026, 16, 2366. DOI: 10.3390/app16052366.
20. Lei, S.; Yang, C.; **Grants, R.**; Grunde, U.; Kunicina, N. PDGM-PINN: Partial Derivative Guided Multi-Branch Physics-Informed Neural Network. Mathematics, 2026, 14, 1349. DOI: 10.3390/math14081349.

Promocijas darba struktūra

Promocijas darbs sastāv no ievada, sešām nodaļām, secinājumiem, priekšlikumiem, izmantotās literatūras saraksta un pielikumiem.

Pirmajā nodaļā analizēta elektrisko transportlīdzekļu uzlādes infrastruktūras attīstība un pētnieciskais konteksts. Nodaļā aplūkotas elektromobilitātes attīstības tendences, *EV* ietekme uz sadales tīkliem, uzlādes infrastruktūras veidi un darbības principi, uzlādes punkta izvēles

daudzkritēriju raksturs, *MCDM* metožu izmantošana *EV* infrastruktūras pētījumos un lēmuma atbalsta sistēmas loma *EV* uzlādes pārvaldībā.

Otrajā nodaļā izstrādāts teorētiskais modelis uz uzticamību orientētai dinamiskai *EV* uzlādes punkta piešķiršanai. Nodaļā definēta lēmumu vide, alternatīvu kopa, kritēriju sistēma, uzticamības un kiberdrošības integrācijas principi, *AHP* balstīta kritēriju svaru noteikšana, *PROMETHEE* prioritizācijas loģika un dinamiskās filtrēšanas princips.

Trešajā nodaļā veikta *MCDM* metodoloģijas operacionalizācija un algoritmiskā realizācija. Tajā teorētiskais modelis pārnests aprēķinu metodoloģijā, definējot kritēriju indikatorus, datu avotus, normalizāciju, filtrēšanas nosacījumus, *AHP* svaru izmantošanu, *PROMETHEE* plūsmu aprēķinu un prototipa aprēķinu moduļu struktūru.

Ceturtajā nodaļā izveidota datu, scenāriju un eksperimentālās validācijas vide. Nodaļā aprakstīti anonimizētie *EV* uzlādes infrastruktūras objekti, uzlādes punktu tehniskie dati, transformatoru un barošanas avotu dati, slodžu profili, datu kvalitātes un kiberdrošības indikatori, scenāriju sistēma un *KPI* rādītāji.

Piektajā nodaļā veikta modeļa validācija un rezultātu analīze. Tajā analizēti *AHP* svaru un *PROMETHEE* ranga rezultāti, sezonālie un dinamiskie scenāriji, salīdzinājums ar vienkāršotām piešķiršanas stratēģijām, jutīguma analīze, kā arī uzticamības, tīkla un kiberdrošības slāņa pienesums.

Sestajā nodaļā sniegta rezultātu diskusija, salīdzinājums ar literatūru, zinātniskā un praktiskā pienesuma izvērtējums, ieviešanas iespējas, pētījuma ierobežojumi un turpmākās attīstības virzieni.

Promocijas darba noslēgumā formulēti galvenie secinājumi un priekšlikumi, kā arī aizstāvēšanai izvirzāmās tēzes.

Mākslīgā intelekta rīku izmantošana promocijas darba sagatavošanā

Promocijas darba sagatavošanas procesā mākslīgā intelekta rīki tika izmantoti tikai kā palīgrīki autora sagatavotā teksta redakcionālai un tehniskai pilnveidei. To izmantošana bija saistīta ar valodas lietojuma, gramatikas un stilistikas pārbaudi, teikumu skaidrības uzlabošanu, terminoloģijas vienādošanu, atkārtojumu mazināšanu, kā arī atsevišķu teksta fragmentu strukturēšanas un noformējuma pārskatīšanu.

Mākslīgā intelekta rīki netika izmantoti promocijas darba zinātniskā satura ģenerēšanai, pētnieciskās metodoloģijas izstrādei, aprēķinu veikšanai, datu apstrādei, rezultātu interpretācijai, secinājumu vai priekšlikumu formulēšanai. Promocijas darba pētījuma ideja, mērķis, uzdevumi, metodoloģiskā pieeja, datu atlase, modeļa izstrāde, aprēķini, rezultātu analīze, zinātniskā novitāte, secinājumi un priekšlikumi ir autora patstāvīga darba rezultāts.

Visi mākslīgā intelekta rīku sniegtie redakcionālie ieteikumi tika kritiski izvērtēti, pārbaudīti un nepieciešamības gadījumā koriģēti. Autors uzņemas pilnu atbildību par promocijas darba saturu, zinātnisko precizitāti, izmantotajām metodēm, iegūtajiem rezultātiem, to interpretāciju un darba gala redakciju.

Mākslīgā intelekta rīki netika izmantoti kā zinātniskās literatūras avots, un to sniegtā informācija nav izmantota kā patstāvīgs pierādījums vai atsauce promocijas darba teorētiskajā vai empīriskajā daļā.

1. ELEKTRISKO TRANSPORTLĪDZEKĻU UZLĀDES INFRASTRUKTŪRAS ATTĪSTĪBA UN PĒTNIECĪBAS KONTEKTS

1.1. Elektrisko transportlīdzekļu attīstība un to ietekme uz elektroapgādes sistēmām

Elektrisko transportlīdzekļu attīstība pēdējo gadu laikā ir kļuvusi par vienu no nozīmīgākajiem transporta un enerģētikas sektoru pārmaiņu virzieniem. Elektromobilitātes izaugsmi nosaka vairāki savstarpēji saistīti faktori: transporta sektora dekarbonizācijas mērķi, fosilā kurināmā patēriņa samazināšana, energoefektivitātes paaugstināšana, vides kvalitātes uzlabošana pilsētās, tehnoloģiju attīstība akumulatoru, jaudas elektronikas un uzlādes infrastruktūras jomā, kā arī politikas instrumenti, kas veicina bezemisiju transportlīdzekļu izmantošanu [1]–[5].

Elektromobilitātes attīstība vienlaikus ir arī infrastruktūras pārvaldības problēma, jo publiski pieejamu uzlādes punktu skaits, to telpiskais izvietojums, jaudas līmenis un datu pieejamība tieši ietekmē *EV* lietotāju mobilitātes iespējas. Tādēļ *EV* infrastruktūras attīstība jāvērtē ne tikai pēc kopējā uzlādes punktu skaita, bet arī pēc to spējas nodrošināt pieejamu, drošu, tīkla darbībai pieļaujamu un lietotāja vajadzībām atbilstošu uzlādes pakalpojumu [14], [32].

Elektromobilitāte vienlaikus maina arī elektroapgādes sistēmu darbības raksturu. Elektriskais transportlīdzeklis nav tikai jauns transporta līdzekļa tips, bet arī mobilais elektroenerģijas patērētājs, kura uzlādes vajadzība ir atkarīga no lietotāja pārvietošanās paradumiem, akumulatora uzlādes līmeņa, izvēlētās uzlādes jaudas, pieejamās infrastruktūras un konkrētā elektroapgādes tīkla stāvokļa. Līdz ar to *EV* uzlāde palielina transporta un elektroenerģijas sistēmu savstarpējo atkarību, īpaši sadales tīklu līmenī [6], [9], [10]

Šajā promocijas darbā elektromobilitātes attīstība tiek skatīta ne tikai kā transporta tehnoloģiju maiņa, bet kā jauna kiberfiziska lēmumu vide, kurā uzlādes punkta izvēli ietekmē transportlīdzekļa, lietotāja, uzlādes infrastruktūras, sadales tīkla, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības faktori. Tādēļ šajā sadaļā vispirms aplūkotas globālās un Eiropas attīstības tendences, pēc tam raksturots Latvijas elektromobilitātes konteksts, *EV* uzlādes ietekme uz sadales tīklu un uzlādes infrastruktūras kā kiberfiziskas sistēmas nozīme.

1.1.1. Globālās un Eiropas elektromobilitātes attīstības tendences

Globālā elektromobilitātes attīstība pēdējā desmitgadē ir ievērojami paātrinājusies. Elektrisko transportlīdzekļu tirgus sākotnēji attīstījās kā tehnoloģiski un politiski atbalstīts segments, bet pašlaik daudzās valstīs tas kļūst par strukturālu transporta nozares transformācijas elementu. Starptautiskās Enerģētikas aģentūras dati rāda, ka 2024. gadā pasaulē tika pārdoti vairāk nekā 17 miljoni elektroautomobiļu, savukārt elektrisko automobiļu īpatsvars jauno automobiļu tirgū pārsniedza 20 % [1]. Šī tendence apliecina, ka elektromobilitāte ir pārgājusi no nišas tehnoloģijas uz plašākas izmantošanas stadiju.

Elektrisko transportlīdzekļu izplatību veicina vairāki tehnoloģiski un ekonomiski priekšnosacījumi. Pirmkārt, akumulatoru tehnoloģiju attīstība ir palielinājusi transportlīdzekļu nobraukumu ar vienu uzlādi un pakāpeniski samazinājusi akumulatoru izmaksas. Otrkārt, jaudas elektronikas, uzlādes iekārtu un enerģijas pārvaldības sistēmu attīstība ir ļāvusi palielināt uzlādes ātrumu un efektīvāk integrēt uzlādes infrastruktūru elektroapgādes tīklos. Treškārt, digitālās platformas, lietotnes un viedās uzlādes risinājumi ir uzlabojuši lietotāja iespējas plānot uzlādi, pārvaldīt maksājumus un saņemt informāciju par uzlādes punktu pieejamību [2], [10], [22], [33].

Eiropas Savienībā elektromobilitātes attīstība ir cieši saistīta ar klimata politiku, transporta emisiju samazināšanu un alternatīvo degvielu infrastruktūras attīstību. Eiropas Vides aģentūra norāda, ka transporta sektors joprojām ir būtisks siltumnīcefekta gāzu emisiju avots, savukārt elektriskie transportlīdzekļi, īpaši gadījumos, kad elektroenerģijas ražošanā pieaug atjaunojamo energoresursu īpatsvars, var būtiski samazināt transporta radīto emisiju apjomu [3], [4]. Eiropas Komisijas alternatīvo degvielu infrastruktūras regulējums papildus nosaka prasības publiskās uzlādes infrastruktūras attīstībai, lai nodrošinātu elektromobilitātes praktisku izmantošanu visā Eiropas transporta tīklā [5], [14].

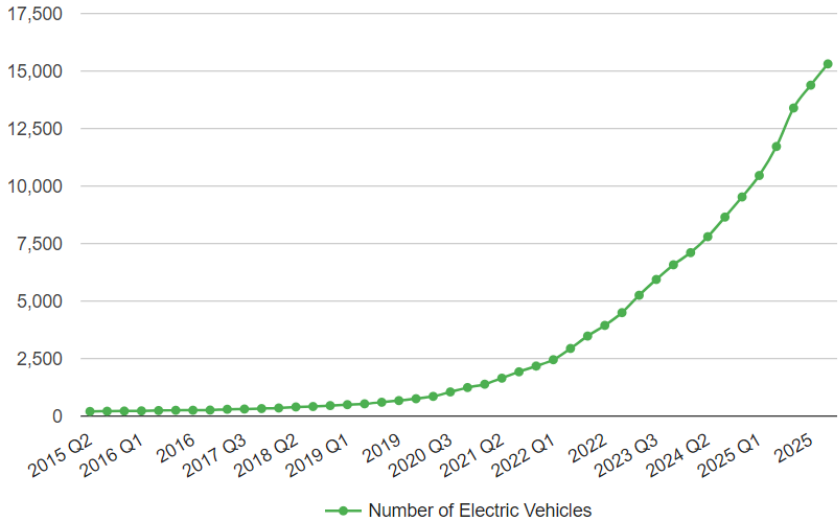
Tomēr elektromobilitātes attīstība rada arī jaunus izaicinājumus elektroapgādes sistēmām. Atšķirībā no tradicionāliem sadzīves vai rūpniecības patērētājiem *EV* uzlādes slodze ir cieši saistīta ar lietotāja mobilitāti un var būt telpiski un laikā nevienmērīga. Uzlādes pieprasījums koncentrējas noteiktās vietās un laika intervālos, piemēram, dzīvojamos rajonos vakarā, darba vietās dienas laikā, pilsētas publiskajos uzlādes punktos vai transporta koridoros intensīvas satiksmes periodos [6], [9]. Šāda slodzes koncentrācija var radīt papildu noslodzi sadales tīklu elementiem, īpaši transformatoriem, kabeļlīnijām un zemsprieguma tīkla posmiem.

Gudrās uzlādes un agregatoru vadības pētījumi parāda, ka *EV* lietotāju uzvedība, uzlādes sākuma laiks, nepieciešamais enerģijas daudzums un lietotāja elastība būtiski ietekmē gan tehniskos, gan ekonomiskos rezultātus [6]. Ja uzlāde tiek veikta nekoordinēti, tā var palielināt slodzes maksimumus un tīkla noslodzes riskus. Savukārt koordinēta uzlāde, dinamiska cenu signālu izmantošana, lokālo energoresursu integrācija un datu balstīta vadība var palīdzēt samazināt slodzes maksimumus, uzlabot infrastruktūras izmantošanu un atlikt vai samazināt nepieciešamību pēc tīkla pastiprināšanas [10], [19]–[22].

No pētījuma skatpunkta tas nozīmē, ka *EV* uzlādes infrastruktūra jāvērtē ne tikai pēc tās izvietojuma un tehniskās jaudas, bet arī pēc spējas darboties dinamiskā lēmumu vidē. Lietotājam svarīgs ir attālums, pieejamība, gaidīšanas laiks, cena un uzlādes ātrums, savukārt sadales sistēmas operatoram būtiska ir tīkla noslodze, jaudas rezerve, sprieguma kvalitāte un lokālo aktīvu ekspluatācijas robežas. Šo interešu savienošana veido pamatu dinamiskai un daudzkritēriju uzlādes punkta izvēles pieejai.

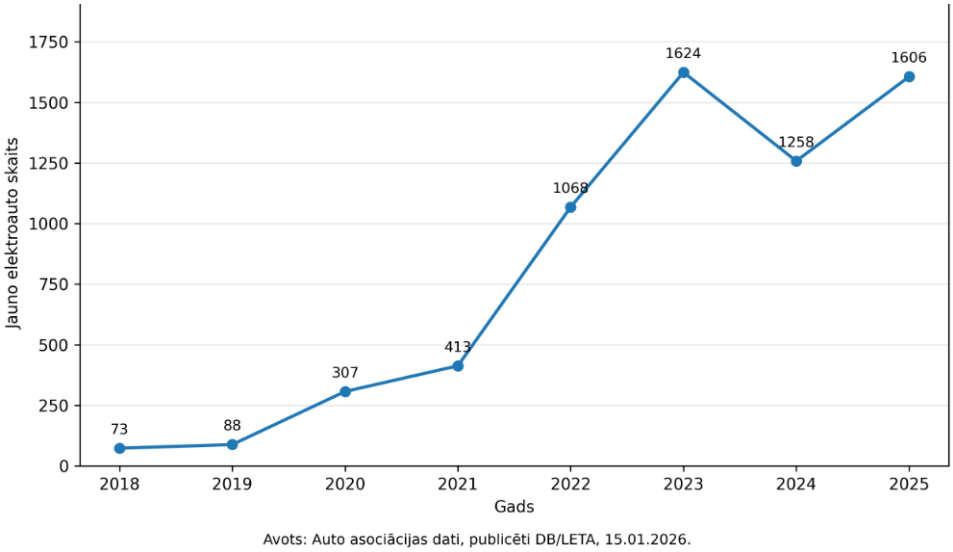
1.1.2. Elektromobilitātes un uzlādes infrastruktūras attīstības tendences Latvijā

Latvijas elektromobilitātes attīstība pēdējos gados pāriet no sākotnējas ieviešanas posma uz straujākas izaugsmes un infrastruktūras paplašināšanās posmu. Saskaņā ar e-transports/CSDD publicētajiem datiem 2026. gada 1. janvārī Latvijā uzskaitē bija 14 385 elektromobiļi, no kuriem 13 916 bija vieglie transportlīdzekļi un 469 — kravas transportlīdzekļi. Elektromobiļu skaita pieaugums 2025. gadā sasniedza 51 %. Savukārt 2026. gada 1. aprīlī Latvijā uzskaitē bija jau 15 309 elektromobiļi, tostarp 14 813 vieglie un 496 kravas transportlīdzekļi, kas nozīmē aptuveni 6 % pieaugumu 2026. gada pirmajā ceturksnī [34].



1.1.att. Elektromobiļu pieaugums Latvijā [34]

Šie dati raksturo kopējo elektromobiļu autoparku Latvijā. Savukārt jauno elektroauto tirgus dinamika ir jāvērtē atsevišķi. 2025. gadā Latvijā tika reģistrēti 1606 jauni elektroauto, kas ir par 27,7 % vairāk nekā 2024. gadā. Vienlaikus jauno elektroauto īpatsvars kopējā jauno vieglo pasažieru automobiļu reģistrācijā bija 7,1 %, salīdzinot ar 7,3 % 2024. gadā. Tas nozīmē, ka jauno elektroauto tirgus absolūtā izteiksmē pieaug, tomēr tā relatīvais īpatsvars jauno vieglo automobiļu tirgū vēl nav būtiski palielinājies [35].



1.2.att. Jauno elektroauto reģistrācija Latvijā 2018-2025 [35]

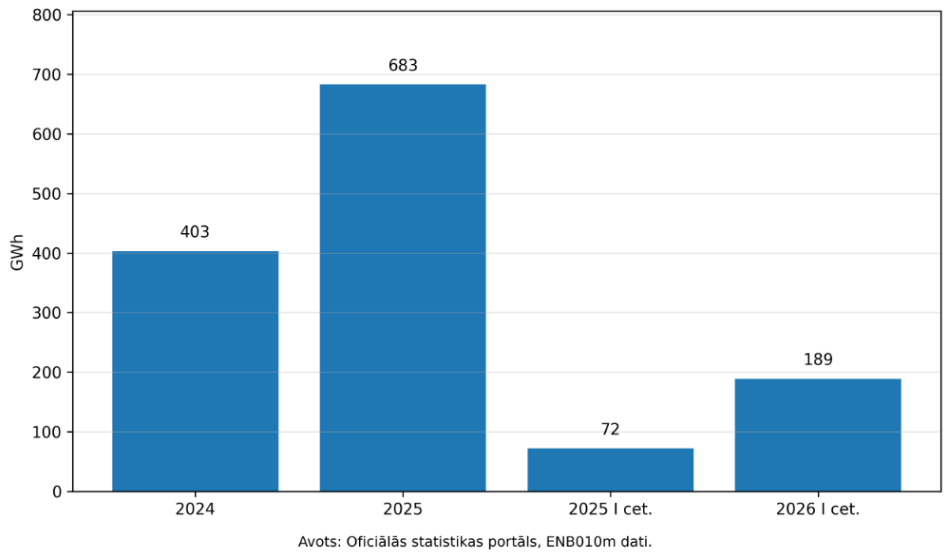
Latvijas elektromobilitātes attīstību raksturo arī lietoto elektroauto īpatsvara palielināšanās. 2025. gadā tika reģistrēti 3332 lietoti vieglie elektroauto, kas ir par 93,6 % vairāk nekā gadu iepriekš. Tas norāda, ka elektromobilitātes izplatību Latvijā arvien vairāk ietekmē

ne tikai jaunu transportlīdzekļu iegāde, bet arī lietoto elektroauto imports un otrreizējais tirgus. Šāda struktūra ir nozīmīga uzlādes infrastruktūras plānošanai, jo lietotāju uzlādes paradumi un tehniskās prasības var būt atšķirīgas atkarībā no transportlīdzekļa vecuma, akumulatora kapacitātes un uzlādes jaudas iespējām [35].

Latvijas publiskās uzlādes infrastruktūras attīstībā sākotnēji būtisku lomu pildīja nacionālais e-mobi ātrās uzlādes tīkls, kas tika izveidots, lai nodrošinātu elektromobiļu pārvietošanos visā Latvijas teritorijā. Pašlaik e-mobi tīklā darbojas 141 ātrās uzlādes stacija, un informācija par staciju statusu ir pieejama e-mobi platformā un lietotnē. Šis tīkls ir nozīmīgs elektromobilitātes sākotnējās pieejamības nodrošināšanai ārpus lielākajām pilsētām un gar galvenajiem transporta koridoriem [34].

Vienlaikus Latvijas uzlādes infrastruktūra kļūst daudzveidīgāka. Tirgū arvien aktīvāk darbojas privātie operatori, kuri attīsta publiskus un daļēji publiskus uzlādes punktus ar dažādiem jaudas līmeņiem, īpaši Rīgā, Pierīgā un gar nozīmīgākajiem autoceļiem. Tas nozīmē, ka Latvijas uzlādes infrastruktūra pakāpeniski pāriet no vienota sākotnējā valsts tīkla uz daudzoperatoru vidi, kur lietotājam vienā teritorijā var būt pieejamas vairākas alternatīvas ar atšķirīgu jaudu, cenu, pieejamību, norēķinu modeli un datu kvalitāti.

Elektromobilitātes attīstība Latvijā jāskata arī elektroenerģijas sistēmas pārmaiņu kontekstā. Saskaņā ar Oficiālās statistikas portāla ENB010m datiem 2025. gadā Latvijā bruto elektroenerģijas ražošana bija 5959 GWh, bet piegādes iekšējam tirgum sasniedza 7200 GWh. Saules elektrostaciju izstrāde pieauga no 403 GWh 2024. gadā līdz 683 GWh 2025. gadā, proti, par aptuveni 69,5 %. 2026. gada pirmajā ceturksnī saules elektrostaciju izstrāde bija 189 GWh, kas ir vairāk nekā divarpus reizes vairāk nekā 2025. gada pirmajā ceturksnī. Šī tendence rāda, ka *EV* uzlādes attīstība notiek paralēli atjaunojamās elektroenerģijas, īpaši saules ģenerācijas, pieaugumam [36].



1.3.att. Saules elektrostaciju elektroenerģijas izstrāde Latvijā [36]

Šādos apstākļos EV uzlādes infrastruktūra Latvijā kļūst par nozīmīgu elektroapgādes sistēmas elastības un slodzes pārvaldības jautājumu. No vienas puses, pieaugošais elektromobiļu skaits palielina elektroenerģijas pieprasījumu transporta sektorā. No otras puses, straujš saules ģenerācijas pieaugums rada nepieciešamību efektīvāk saskaņot elektroenerģijas ražošanu, patēriņu, uzlādes pieprasījumu un lokālo tīkla jaudas rezervi. Tādēļ *EV* uzlādes

punkta izvēle Latvijā nevar balstīties tikai uz tuvākās stacijas principu. Konkrētā brīdī lietotājam tuvākā stacija var būt aizņemta, tai var būt zemāka faktiskā pieejamā jauda, lielāks gaidīšanas laiks, mazāka datu ticamība vai nelabvēlīgāks sadales tīkla noslodzes profils.

Latvijas elektromobilitātes attīstības konteksts tādējādi pastiprina šī promocijas darba aktualitāti. Pieaugot elektromobiļu skaitam, paplašinoties daudzoperatoru uzlādes videi un vienlaikus mainoties elektroenerģijas ražošanas struktūrai, nepieciešama metodoloģija, kas konkrētam EV konkrētā laikā spēj izvērtēt vairākas uzlādes alternatīvas. Šāda izvēle jābalsta ne tikai uz attālumu un brīvo uzlādes punktu skaitu, bet arī uz pieejamo jaudu, gaidīšanas laiku, sadales tīkla noslodzi, datu kvalitāti, uzticamību un kiberdrošības risku.

1.1.3. EV uzlādes ietekme uz sadales tīklu

Elektrisko transportlīdzekļu uzlāde būtiski ietekmē sadales tīklu darbības režīmus, jo uzlādes slodze ir telpiski koncentrēta, laikā mainīga un atkarīga no lietotāju uzvedības. Tradicionālā sadales tīkla plānošanā slodzes attīstība bieži tika vērtēta, balstoties uz salīdzinoši prognozējamu sadzīves, komerciālo vai rūpniecisko patēriņu. *EV* uzlāde šajā sistēmā ievieš jaunu dinamisku slodzes komponenti, kuras apjoms un laiks ir atkarīgs no transportlīdzekļu pārvietošanās, akumulatoru uzlādes līmeņa, uzlādes jaudas un pieejamās infrastruktūras [6], [9], [10].

Sadales tīkla skatījumā būtiskākie *EV* uzlādes ietekmes aspekti ir transformatoru un līniju noslodzes pieaugums, slodzes maksimumu palielināšanās, sprieguma novirzes, fāžu nesimetrija, elektroenerģijas zudumu pieaugums un nepieciešamība pēc pieslēgumu vai tīkla pastiprināšanas [9], [10], [37]. Īpaši nozīmīga šī ietekme ir zemsprieguma un vidējā sprieguma tīkla posmos, kur vairāku lieljaudas uzlādes punktu vienlaicīga darbība var būtiski mainīt lokālo slodzes profilu. Ja uzlādes infrastruktūra tiek izvietota bez pietiekamas tīkla analīzes vai ja uzlādes pieprasījums netiek koordinēts, lokālie tīkla elementi var tikt noslogoti tuvu pieļaujamajām robežām.

EV uzlādes ietekme nav vienāda visos tīkla punktos. Pilsētas teritorijās uzlādes pieprasījums var koncentrēties pie tirdzniecības centriem, biroju ēkām, daudzstāvu dzīvojamiem rajoniem un publiskām autostāvvietām. Piepilsētās un reģionos nozīmīgāki var būt tranzīta punkti, degvielas uzpildes staciju teritorijas, pašvaldību infrastruktūra un darba vietu uzlāde. Šādas atšķirības nozīmē, ka uzlādes punkta piemērotība ir jāvērtē lokālā tīkla kontekstā, nevis tikai pēc stacijas tehniskajiem parametriem vai ģeogrāfiskās atrašanās vietas.

Autora iepriekšējais inženierprojekts par elektromobiļu uzlādes staciju integrācijas iespējām zemsprieguma elektroapgādes tīklu izbūves projektos parādīja, ka uzlādes stacijas pieslēguma izvēlē būtiska nozīme ir esošā tīkla elektriskajiem parametriem, pieslēgtajām slodzēm, sprieguma kritumam, kabeļu noslodzei un aizsardzības aparātu izvēlei [37]. Savukārt autora līdzautoru publikācija par ātrās uzlādes staciju integrāciju ar atjaunojamās enerģijas avotiem apliecina, ka lieljaudas uzlādes infrastruktūras attīstība jāskata kopā ar lokālo elektroenerģijas ražošanu, akumulācijas risinājumiem un enerģijas pārvaldību [38].

Sadales tīkla ietekmes mazināšanai literatūrā tiek piedāvātas vairākas pieejas: viedā uzlāde, pieprasījuma reakcija, agregatoru vadība, decentralizēta uzlādes kontrole, dinamiska cenu signālu izmantošana, lokālu atjaunojamo energoresursu un *BESS* integrācija, kā arī uzlādes sesiju koordinācija laikā [6], [19]–[22], [39], [40]. Tomēr daļa šo risinājumu fokusējas uz uzlādes procesa vadību pēc tam, kad uzlādes punkts jau izvēlēts. Šajā promocijas darbā uzmanība tiek pievērsta citam lēmuma slānim, kurš uzlādes punkts konkrētam *EV* konkrētā laikā būtu piemērotākais, ņemot vērā arī sadales tīkla noslodzi un jaudas rezervi.

Tādējādi sadales tīkls šajā pētījumā netiek uzskatīts par ārēju fonu, bet gan par vienu no lēmumu pieņemšanas kritēriju avotiem. Uzlādes punkts var būt lietotājam ērts un tehniski jaudīgs, bet vienlaikus mazāk piemērots, ja attiecīgajā tīkla mezglā ir augsta noslodze, maza jaudas rezerve vai paaugstināts pārslodzes risks. Tāpēc dinamiskas *EV* uzlādes punkta

piešķiršanas modelī jāiekļauj sadales tīkla darbības režīmu raksturojoši kritēriji, kas ļauj uzlādes punkta izvēli sasaistīt ar lokālā sadales tīkla tehnisko stāvokli.

1.1.4. *EV* uzlādes infrastruktūra kā kiberfiziska sistēma

Mūsdienu *EV* uzlādes infrastruktūra vairs nav tikai elektroenerģijas nodošanas iekārtu kopums. Tā ir kiberfiziska sistēma, kurā fiziskā elektroenerģijas padeve ir cieši saistīta ar digitālu datu apmaiņu, lietotāju autentifikāciju, maksājumu sistēmām, operatoru platformām, sakaru protokoliem, attālinātu uzraudzību, uzlādes sesiju vadību un enerģijas pārvaldības algoritmiem [8], [12], [13], [22], [41]. Šāda sistēma ļauj efektīvāk izmantot infrastruktūru, nodrošināt lietotājam aktuālu informāciju, īstenot viedo uzlādi un integrēt uzlādi ar elektroapgādes tīkla vai lokālo energoresursu vadību.

Šajā darbā *EV* uzlādes infrastruktūra tiek interpretēta kā transporta un elektroenerģijas sistēmu kiberfizisks mezgls. Šāds skatījums atbilst *clean transportation CP*S pieejai, kur elektriskais transports, enerģijas pārveidošana, uzlādes process, komunikācijas tīkli, lietotāja saskarnes un infrastruktūras vadība tiek analizēti kā savstarpēji saistīta sistēma [32]. Līdz ar to uzlādes punkta izvēles problēma nav tikai ģeogrāfisks vai ekonomisks jautājums, bet arī kiberfiziskas sistēmas lēmums, kur jāņem vērā fiziskā pieejamība, elektriskā jauda, datu aktualitāte, komunikācijas uzticamība un drošības stāvoklis.

Uzlādes infrastruktūras kiberfiziskais raksturs nozīmē, ka katra uzlādes alternatīva ir vērtējama ne tikai pēc fiziskajiem parametriem, piemēram, jaudas, savienotāja tipa vai atrašanās vietas, bet arī pēc digitālās uzticamības. Uzlādes punkta statuss, pieejamība, cena, rezervācijas iespēja, gaidīšanas laiks un sesijas stabilitāte bieži ir atkarīga no operatora datu kvalitātes, sakaru stabilitātes un informācijas aktualitātes. Ja dati ir novecojuši, nepilnīgi vai neprecīzi, lietotājam var tikt ieteikta alternatīva, kas faktiski nav pieejama vai nav piemērota konkrētajai uzlādes vajadzībai.

Kiberdrošības aspekts kļūst īpaši nozīmīgs, jo *EV* uzlādes infrastruktūra savieno vairākus domēnus: transportlīdzekli, uzlādes iekārtu, lietotāja lietotni, operatora platformu, maksājumu vidi, mākoņpakalpojumus un elektroapgādes sistēmu [12], [13]. *NIST EV* superātro uzlādes kiberdrošības profils uzsver, ka *EV* uzlādes infrastruktūrā savstarpēji mijiedarbojas *EV, EVSE*, komunālo pakalpojumu sistēmas, ēku energosistēmas, trešās puses un mākoņpakalpojumi [12]. Šāda savienotība paplašina sistēmas funkcionalitāti, bet vienlaikus palielina uzbrukuma virsmu.

Autora un līdzautoru 2026. gada publikācijā par *EV* uzlādes infrastruktūras kiberdrošības riska novērtēšanu uzsvērts, ka uzlādes infrastruktūra jāvērtē kā vairāku slāņu kiberfiziska sistēma, kurā būtiski ir tādi drošības atribūti kā sistēmas pieejamība, datu integritāte, autentifikācijas drošība, droša komunikācija, pakalpojuma nepārtrauktība un incidentu atklāšanas spēja [13]. Šajā publikācijā *AHP* un *PROMETHEE* metožu kombinācija izmantota kiberdrošības risku prioritizācijai, kas tieši sasaucas ar šī promocijas darba metodoloģisko pieeju, izmantot daudzkritēriju lēmumu pieņemšanu arī *EV* uzlādes punkta izvēlē.

Kiberfiziskais skatījums ir būtisks arī tādēļ, ka digitāla kļūda vai kiberincidents var radīt fiziskas sekas. Piemēram, kļūdaini dati par uzlādes punkta pieejamību var novirzīt lietotāju uz neizmantojamu staciju; komunikācijas traucējumi var pārtraukt uzlādes sesiju; autentifikācijas vai maksājumu sistēmas kļūme var padarīt staciju nepieejamu; savukārt ļaunprātīga uzlādes sesiju vadība var radīt nevēlamu slodzes koncentrāciju konkrētā tīkla posmā [8], [12], [13]. Tādēļ uzticamības un kiberdrošības kritēriji nav uzskatāmi par ārējiem papildinājumiem, bet par būtisku uzlādes punkta piemērotības daļu.

Šajā promocijas darbā *EV* uzlādes punkts tiek interpretēts kā kiberfiziska alternatīva. Tas nozīmē, ka tā piemērotību nosaka ne tikai atrašanās vieta, jauda un cena, bet arī darbspēja, datu aktualitāte, komunikācijas uzticamība, kiberdrošības riska līmenis un lokālā sadales tīkla

stāvoklis. Šāds skatījums veido pamatu uz uzticamību orientētai dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas metodoloģijai, kur alternatīvas tiek vērtētas daudzdimensionāli un tiek ņemta vērā gan fiziskā, gan digitālā infrastruktūras puse.

1.2. *EV* uzlādes infrastruktūras veidi un darbības principi

Elektrisko transportlīdzekļu uzlādes infrastruktūra ir heterogēna tehniska un digitāla sistēma, kuru iespējams klasificēt pēc vairākiem savstarpēji saistītiem kritērijiem: enerģijas padeves veida, uzlādes jaudas, pieejamības režīma, ekspluatācijas vides un komunikācijas risinājumiem. Šāda klasifikācija ir būtiska, jo tā nosaka ne tikai uzlādes procesa tehniskos parametrus, bet arī lietotāja pieredzi, uzlādes ilgumu, infrastruktūras noslodzi un mijiedarbību ar sadales tīklu [2], [9], [10], [33].

Promocijas darba kontekstā uzlādes infrastruktūras klasifikācija nav pašmērķis. Tā ir nepieciešama, lai vēlāk uzlādes punktus varētu interpretēt kā *MCDM* alternatīvas ar atšķirīgiem tehniskajiem, ekspluatācijas, tīkla, datu kvalitātes un uzticamības raksturlielumiem. Tādēļ šajā sadaļā uzlādes infrastruktūra aplūkota trīs līmeņos: pēc *AC/DC* un uzlādes ātruma dalījuma, pēc pieejamības režīma un pēc uzlādes punkta kā tehniska un digitāla mezgla funkcijām.

1.2.1. *AC/DC*, lēnā, ātrā un *ultra*-ātrā uzlāde

Pēc enerģijas padeves veida elektrisko transportlīdzekļu uzlādes infrastruktūru visbiežāk iedala maiņstrāvas jeb *AC* un līdzstrāvas jeb *DC* uzlādes risinājumos. *AC* uzlādes gadījumā elektroenerģijas pārveidošana līdz akumulatora uzlādei nepieciešamajai līdzstrāvai parasti notiek transportlīdzekļa iebūvētajā lādētājā. Tādēļ *AC* risinājumi parasti ir saistīti ar zemākām vai vidējām uzlādes jaudām un ir piemēroti situācijām, kur transportlīdzeklis vienā vietā atrodas ilgāku laiku, piemēram, mājās, darba vietā, stāvvietā vai pie publiskiem pilsētvides objektiem [33].

DC uzlādes gadījumā jaudas pārveide notiek pašā uzlādes stacijā. Tas ļauj nodrošināt ievērojami augstāku uzlādes jaudu un īsāku uzlādes laiku, jo transportlīdzekļa akumulatoram tiek padota līdzstrāva, apejot transportlīdzekļa iebūvētā *AC/DC* lādētāja jaudas ierobežojumus. Šī iemesla dēļ *DC* uzlāde ir īpaši nozīmīga publiskās ātrās uzlādes infrastruktūrā, transporta koridoros, tranzīta mezglos un vietās, kur lietotājam nepieciešama ātra enerģijas papildināšana [2], [33].

Uzlādes iekārtu tehniskā darbība balstās uz energoelektronikas pārveidotājiem, tostarp taisngriežiem, *DC/DC* pārveidotājiem un invertoru topoloģijām, kas nodrošina elektroenerģijas pārveidošanu un vadību atbilstoši transportlīdzekļa akumulatora un uzlādes procesa prasībām [42]. Savukārt EV tehniskā puse ir cieši saistīta ar elektropiedziņas un elektrisko mašīnu darbības principiem, kas nosaka transportlīdzekļa enerģijas patēriņu, uzlādes vajadzību un ekspluatācijas režīmu [43].

Pēc jaudas un uzlādes procesa ilguma uzlādes infrastruktūru var iedalīt lēnajā, ātrajā un *ultra*-ātrajā uzlādē. *IEA* analīzēs publiskie lēnie lādētāji tiek definēti kā iekārtas ar jaudu līdz 22 kW, savukārt ātrie lādētāji pārsniedz 22 kW, bet *ultra*-ātrie lādētāji sasniedz 150 kW un vairāk [2]. Praktiskā ekspluatācijā šīs robežas var atšķirties atkarībā no operatora, valsts regulējuma un konkrētās iekārtas tehnoloģijas, tomēr šāds dalījums ļauj skaidri nošķirt dažādus uzlādes infrastruktūras lietošanas scenārijus.

Lēnā un vidējas jaudas AC uzlāde ir piemērota situācijām, kur transportlīdzeklis ilgstoši stāv vienā vietā un uzlādes ilgums nav kritisks. Šajā kategorijā ietilpst mājas uzlāde, darba vietu uzlāde, daļa pilsētvides publisko stāvvietu un daļēji publiski uzlādes punkti. Šādos gadījumos zemāka uzlādes jauda parasti ir pieņemama, jo lietotājam nav nepieciešama tūlītēja enerģijas papildināšana. Sadales tīkla skatījumā šāda uzlāde var būt elastīgāka, jo uzlādes procesu iespējams pārcelt laikā vai vadīt atbilstoši tīkla noslodzei.

Ātrā un *ultra*-ātrā *DC* uzlāde ir piemērota situācijām, kur galvenā lietotāja prasība ir īss uzlādes laiks. Šādi risinājumi ir būtiski lielas intensitātes publiskajā uzlādē, automaģistrāļu un reģionālo koridoru infrastruktūrā, komerciālajos uzlādes mezglos un scenārijos, kur lietotājs nevar ilgstoši gaidīt. Tomēr lielāka uzlādes jauda nozīmē arī lielāku momentāno slodzi tīklam, tādēļ šādu punktu piemērotība ir jāvērtē ne tikai pēc to nominālās jaudas, bet arī pēc pieslēguma jaudas, vietējā tīkla noslodzes, jaudas rezerves un uzlādes sesiju intensitātes [9], [10].

Līdz ar to *AC/DC* un jaudas klasifikācija promocijas darba kontekstā ir būtiska, jo tā nosaka uzlādes punkta tehnisko profilu. *MCDM* modelī šie parametri vēlāk var tikt izmantoti kā kritēriji vai filtrēšanas nosacījumi: piemēram, vai transportlīdzeklis ir savietojams ar konkrēto uzlādes tipu, kāda ir pieejamā uzlādes jauda, vai šī jauda atbilst lietotāja vajadzībām un vai konkrētais tīkla mezgls spēj šo slodzi pieļaut.

1.2.2. Publiskā, daļēji publiskā un privātā uzlādes infrastruktūra

Pēc pieejamības režīma uzlādes infrastruktūru var iedalīt privātajā, daļēji publiskajā un publiskajā infrastruktūrā. Šis dalījums ir būtisks, jo uzlādes punkta pieejamība, lietošanas intensitāte, datu pieejamība, norēķinu modelis un lietotāja elastība būtiski atšķiras atkarībā no tā, vai uzlāde notiek mājsaimniecībā, darba vietā, komerciālā objektā vai publiskā transporta koridorā [9], [33].

Privātā uzlāde parasti ir saistīta ar mājsaimniecībām, individuālām autostāvvietām vai uzņēmuma iekšējām vajadzībām paredzētu infrastruktūru. Šāda uzlāde bieži notiek naktī vai ilgstošas stāvēšanas laikā, un lietotājam parasti ir lielāka elastība attiecībā uz uzlādes sākuma laiku un ilgumu. No sadales tīkla skatupunkta privātā uzlāde var radīt slodzes pieaugumu dzīvojamos rajonos, īpaši vakara stundās, kad jau tradicionāli veidojas sadzīves patēriņa maksimumi. Tajā pašā laikā privātā uzlāde ir piemērota viedās uzlādes risinājumiem, jo uzlādes sesiju iespējams optimizēt laika intervālā, kurā transportlīdzeklis nav nepieciešams lietošanai [6], [19].

Daļēji publiskā uzlādes infrastruktūra ietver darba vietu uzlādi, tirdzniecības centru, viesnīcu, daudzdzīvokļu ēku, pašvaldību objektu un citu ierobežoti pieejamu teritoriju uzlādes punktus. Šajos gadījumos uzlādes punkts var būt pieejams noteiktai lietotāju grupai vai noteiktos laika periodos. Daļēji publiskās infrastruktūras nozīme pieaug, jo tā ļauj nodrošināt uzlādi vietās, kur transportlīdzeklis dabiski atrodas vairākas stundas. Šādi punkti var samazināt spiedienu uz ātrās publiskās uzlādes infrastruktūru, tomēr to pieejamība un izmantošanas nosacījumi ne vienmēr ir vienādi visiem lietotājiem.

Publiskā uzlādes infrastruktūra ir pieejama plašam lietotāju lokam un parasti darbojas ar operatora pārvaldības platformu, autentifikācijas mehānismiem, norēķinu sistēmu un attālinātu statusa uzraudzību. Tā ietver pilsētvides uzlādes punktus, uzlādi publiskās stāvvietās, koridoru uzlādi, ātrās uzlādes mezglus un komerciālus uzlādes parkus. Publiskās infrastruktūras gadījumā lietotājam īpaši svarīga ir faktiskā pieejamība, brīvo punktu skaits, gaidīšanas laiks, cena, savienotāja tips un informācijas aktualitāte. Vienlaikus operatoram un sadales sistēmas pārvaldītājam būtiska ir staciju noslodze, pieslēguma jauda, slodzes profili un iespējamā ietekme uz vietējo tīklu [2], [9], [10].

Ekspluatācijas vides ziņā var izšķirt vairākus tipiskus uzlādes scenārijus: mājas uzlādi, darba vietas uzlādi, galamērķa uzlādi pilsētvidē, ātro uzlādi transporta koridoros un lokālus uzlādes mezglus pie komerciāliem vai sabiedriskiem objektiem. Katram no šiem scenārijiem ir atšķirīgs tipiskais stāvēšanas laiks, nepieciešamā jauda un lietotāja elastība. Piemēram, mājas un darba vietu uzlāde var būt lēnāka, bet elastīgāka; pilsētvides uzlāde bieži ir saistīta ar vidēju stāvēšanas ilgumu; savukārt koridoru ātrā uzlāde prasa lielāku jaudu un īsāku pakalpojuma laiku.

Šis dalījums ir nozīmīgs dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas kontekstā. Ja lietotājam konkrētajā laikā ir pieejamas vairākas alternatīvas, tad katras alternatīvas

piemērotība ir atkarīga ne tikai no attāluma vai jaudas, bet arī no pieejamības režīma, faktiskās noslodzes, lietotāja laika elastības, uzlādes mērķa un vietējā tīkla stāvokļa. Tādēļ *MCDM* modelim jāspēj salīdzināt neviendabīgas alternatīvas, kuras atšķiras gan pēc tehniskajiem, gan ekspluatācijas parametriem.

1.2.3. Uzlādes punkts kā tehnisks un digitāls mezgls

Mūsdienu uzlādes punkts nav tikai fiziska elektroenerģijas nodošanas vieta. Tas ir tehnisks un digitāls mezgls, kurā vienlaikus notiek elektroenerģijas padeve, datu apmaiņa, lietotāja identifikācija, maksājumu apstrāde, statusa monitorings, sesijas vadība un saziņa ar operatora pārvaldības sistēmu. Šī iemesla dēļ *EVSE* jāvērtē kā kiberfiziska infrastruktūras vienība, kuras piemērotību nosaka ne tikai uzlādes jauda vai savienotāja tips, bet arī digitālā savienojamība, datu aktualitāte, komunikācijas drošība un operatora sistēmu darbspēja [11]–[13], [22].

Tehniskā līmenī uzlādes punkta piemērotību nosaka tādi parametri kā uzstādītā jauda, faktiskā pieejamā jauda, pieslēguma ierobežojumi, *AC/DC* tips, savienotāja veids, uzlādes punktu skaits, slodzes vadības iespējas, aizsardzības aparāti un pieslēgums konkrētam sadales tīkla mezglam. Šie parametri nosaka, vai konkrētais EV var izmantot attiecīgo uzlādes punktu un cik efektīvi tas var saņemt nepieciešamo enerģijas daudzumu. Tomēr vienlaikus šie paši parametri ietekmē arī tīkla slodzi un operatora spēju pārvaldīt infrastruktūru.

Uzlādes punkta digitalizētais raksturs nozīmē, ka tā darbība ir atkarīga no komunikācijas tīkla, datu pārraides, vadības loģikas un savietojamības ar citām informācijas sistēmām. Šādu tehnisko vidi var skaidrot ar industriālo *IoT* un infrastruktūras kontroles sistēmu principiem, kur būtiska loma ir sakaru arhitektūrai, datu plūsmām, sensoru tīkliem, viedajai elektroenerģijas uzskaitei un sakaru kanālu uzticamībai [44]. Tādēļ uzlādes punkta izmantošana lēmuma atbalsta sistēmas modelī jābalsta ne tikai uz elektroenerģijas parametriem, bet arī uz datu kvalitātes un komunikācijas pieejamības indikatoriem.

Autora līdzautoru 2024. gada publikācijā par *EV* pārvaldības lēmumu pieņemšanas sistēmu uzsvērts, ka efektīvai *EV* pārvaldībai nepieciešama viedo tehnoloģiju, *IoT*, datu apmaiņas un lokālo īpatnību integrācija [11]. Šāda pieeja tieši sasaucas ar šī promocijas darba uzdevumu, jo dinamiska uzlādes punkta piešķiršana prasa ne tikai tehnisko alternatīvu salīdzināšanu, bet arī aktuālu datu izmantošanu par transportlīdzekli, uzlādes punktu, vidi, lietotāju un infrastruktūru.

Kiberdrošības kontekstā uzlādes punkts ir arī potenciāls piekļuves mezgls plašākai *EV* uzlādes ekosistēmai. *NIST EV* super-ātro uzlādes infrastruktūras profils norāda, ka EV uzlādes infrastruktūrā mijiedarbojas *EV*, *EVSE*, komunālo pakalpojumu sistēmas, ēku energosistēmas, operatoru platformas, trešās puses un mākoņpakalpojumi [12]. Šāda savienotība rada nepieciešamību vērtēt autentifikācijas, autorizācijas, datu integritātes, komunikācijas drošības un pakalpojuma pieejamības aspektus.

Autora un līdzautoru 2026. gada publikācijā par *EV* uzlādes infrastruktūras kiberdrošības riska novērtēšanu uzsvērts, ka *EVSE* ir daļa no kiberfiziskas infrastruktūras, kur kiberrisks var ietekmēt ne tikai informācijas drošību, bet arī pakalpojuma pieejamību, lietotāju uzticēšanos un potenciāli arī elektroapgādes sistēmas darbību [13]. Tādēļ kiberdrošība šajā promocijas darbā netiek interpretēta tikai kā ārējs drošības audits, bet kā viena no dimensijām, kas var ietekmēt konkrēta uzlādes punkta piemērotību.

Šāds skatījums nozīmē, ka dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas modelī uzlādes punkts jāapraksta ar plašāku raksturlielumu kopu. Papildus attālumam, jaudai, cenai un gaidīšanas laikam jāvērtē arī pieejamība, datu aktualitāte, komunikācijas uzticamība, savietojamība, tīkla noslodzes profils un kiberdrošības riska līmenis. Tādējādi uzlādes punkts kļūst par daudzdimensionālu *MCDM* alternatīvu, kuras izvēlei nepieciešama strukturēta, dinamiska un uz uzticamību orientēta lēmumu pieņemšanas pieeja

1.3. Uzlādes punkta izvēle kā daudzkritēriju lēmumu problēma

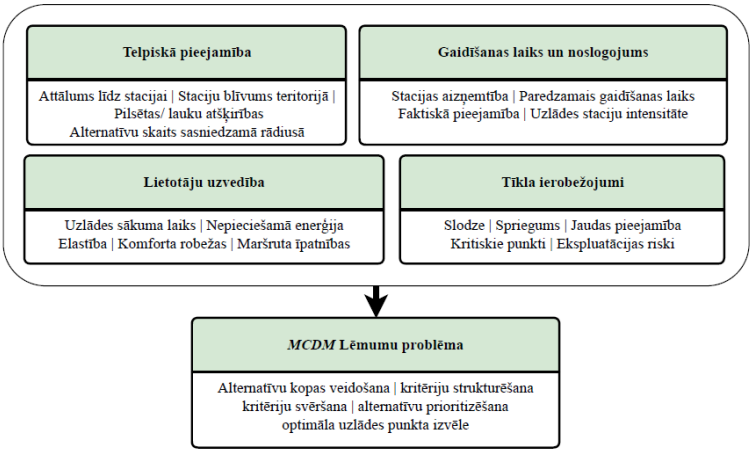
Elektrisko transportlīdzekļu uzlādes punkta izvēle praksē nav reducējama uz vienu kritēriju, piemēram, ģeogrāfiski tuvākās, lētākās vai nomināli jaudīgākās stacijas izvēli. Reālā ekspluatācijas situācijā piemērotāko uzlādes alternatīvu vienlaikus ietekmē telpiskā sasniedzamība, faktiskā stacijas pieejamība, gaidīšanas laiks, stacijas noslogojums, transportlīdzekļa uzlādes vajadzība, lietotāja elastība, sadales tīkla tehniskais stāvoklis, datu kvalitāte, pakalpojuma uzticamība un kiberdrošības risks [6], [9], [11]–[13].

Atšķirībā no uzlādes infrastruktūras plānošanas uzdevumiem, kuros galvenais jautājums ir staciju izvietošana, kapacitātes izvēle vai tīkla pārklājuma nodrošināšana, šajā promocijas darbā uzmanības centrā ir operatīvs lēmums: kuru uzlādes punktu konkrētam EV konkrētā laikā piešķirt. Tas nozīmē, ka lēmuma problēma nav tikai telpiska, bet arī dinamiska. Pieejamo alternatīvu kopa mainās laikā, kritēriju vērtības mainās laikā, un labākā alternatīva ir atkarīga no konkrētā ekspluatācijas brīža.

Uzlādes punkta izvēles problēmu papildus sarežģī tas, ka transporta sistēmu ilgtspēja nav raksturojama ar vienu rādītāju. Ilgtspējīga transporta novērtēšanā tiek izmantotas indikatoru sistēmas, kurās vienlaikus tiek analizētas vides, sociālās, ekonomiskās un infrastruktūras dimensijas [45]. Līdzīgi arī *EV* uzlādes punkta piešķiršanas uzdevumā alternatīvas jāvērtē nevis pēc viena dominējoša kritērija, bet pēc savstarpēji konfliktējošu kritēriju kopas.

Šādā situācijā vienkāršota *distance-based, price-based* vai *power-based* izvēles loģika nav pietiekama. Tuvākā stacija var būt aizņemta vai tehniski nevēlama no tīkla skatpunkta; jaudīgākā stacija var radīt lielāku lokālu noslodzi; lētākā alternatīva var būt saistīta ar ilgāku gaidīšanas laiku vai zemāku uzticamību. Tādēļ uzlādes punkta izvēle šajā darbā tiek interpretēta kā daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas problēma, kurā vairākas alternatīvas jānovērtē pēc savstarpēji konfliktējošiem kritērijiem [27], [29].

EV uzlādes punkta izvēli ietekmējošo faktoru struktūra un to sasaiste ar daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas problēmu ir parādīta 1.4. attēlā.



1.4.att. EV uzlādes punkta izvēli ietekmējošo faktoru karte.
Avots: autora veidots, balstoties uz literatūras analīzi [6], [9], [11]–[13], [27], [29].

1.3.1. Telpiskā un faktiskā pieejamība

Viens no pirmajiem faktoriem *EV* uzlādes punkta izvēlē ir telpiskā pieejamība. No lietotāja skatpunkta tā ietver attālumu līdz uzlādes punktam, brauciena laiku, novirzi no plānotā

maršruta un alternatīvu skaitu sasniedzamā rādiusā. Pilsētās uzlādes punktu skaits parasti ir lielāks, bet vienlaikus augstāka var būt arī staciju noslodze. Savukārt piepilsētu un reģionālās teritorijās attālumi starp uzlādes punktiem var būt lielāki, un rezerves alternatīvu skaits var būt ierobežots [9].

Tomēr telpiskā pieejamība pati par sevi vēl nenozīmē faktisko pieejamību. Uzlādes punkts var atrasties lietotājam izdevīgā vietā, bet konkrētajā brīdī būt aizņemts, nedarbspējīgs, rezervēts vai neatbilstošs konkrētā *EV* tehniskajām prasībām. Tādēļ uzlādes punkta izvēlē jānošķir kartē redzamā infrastruktūras pieejamība no reālās pakalpojuma pieejamības konkrētajā laikā.

Faktisko pieejamību ietekmē uzlādes punkta darbspējas statuss, brīvo pieslēgvietu skaits, savienotāja tips, pieejamā jauda, operatora datu aktualitāte un lietotāja iespēja šo punktu izmantot bez būtiska kavējuma. Līdz ar to dinamiskā piešķiršanas modelī telpiskā pieejamība ir jāpapildina ar aktuāliem ekspluatācijas datiem. Tas ir būtiski, jo lietotājam tuvākā alternatīva ne vienmēr ir labākā, ja tās faktiskā pieejamība ir zema vai datu ticamība nav pietiekama.

Šī promocijas darba kontekstā telpiskā un faktiskā pieejamība veido sākotnējo alternatīvu kopas noteikšanas pamatu. Tikai tās uzlādes alternatīvas, kas ir sasniedzamas, tehniski savietojamas un faktiski izmantojamas, var tikt tālāk vērtētas daudzkritēriju prioritizācijas modelī.

1.3.2. Gaidīšanas laiks, noslodze un lietotāja uzvedība

Otrs būtisks faktoru bloks ir gaidīšanas laiks, uzlādes punkta noslogojums un lietotāja uzvedība. Pat ja stacija ir telpiski sasniedzama un tehniski piemērota, tās izvēle var nebūt racionāla, ja paredzamais gaidīšanas laiks ir liels vai ja konkrētajā vietā ir augsta sesiju intensitāte. Ātrās uzlādes infrastruktūrā lietotāja uztvertā pakalpojuma kvalitāte ir cieši saistīta ar to, cik ātri lietotājs var sākt uzlādi un cik ilgi jāgaida līdz pakalpojuma saņemšanai [16].

Uzlādes punkta noslodzi raksturo stacijas aizņemtība, brīvo pieslēgvietu skaits, rindas garums, paredzamais gaidīšanas laiks un uzlādes sesiju intensitāte. Šie rādītāji ir laikā mainīgi un var būtiski atšķirties starp diennakts stundām, darba dienām, brīvdienām un sezonāliem periodiem. Tādēļ statiska informācija par stacijas atrašanās vietu un nominālo jaudu nav pietiekama, lai korekti noteiktu tās piemērotību.

Lietotāja uzvedība vēl vairāk sarežģī šo lēmumu. *EV* lietotāju uzlādes paradumi atšķiras atkarībā no brauciena mērķa, akumulatora uzlādes stāvokļa, nepieciešamā enerģijas daudzuma, laika ierobežojumiem un gatavības mainīt maršrutu. Pētījumi par *EV* lietotāju uzvedību un agregatoru viedo uzlādi parāda, ka uzlādes sākuma laiks, nepieciešamā enerģija un lietotāja elastība būtiski ietekmē gan tehniskos, gan ekonomiskos rezultātus [6].

No uzlādes punkta izvēles skatpunkta īpaši nozīmīgi ir vairāki lietotāja parametri: sākotnējais *SOC*, nepieciešamais enerģijas daudzums, pieļaujamais gaidīšanas laiks, pieļaujamā maršruta novirze, vēlamais uzlādes ātrums un izmaksu jutīgums. Autora līdzautoru 2024. gada publikācijā par *EV* pārvaldības lēmumu pieņemšanas sistēmu uzsvērts, ka *EV* vadība jāpielāgo lokālajiem apstākļiem, lietotāja vajadzībām un datu pieejamībai [11]. Tas nozīmē, ka lietotāja uzvedība nav ārējs fons, bet viens no būtiskiem *MCDM* modeļa kritēriju avotiem.

Tādējādi gaidīšanas laiks, noslodze un lietotāja uzvedība veido savstarpēji saistītu izvēles dimensiju. Īss attālums līdz stacijai var zaudēt nozīmi, ja gaidīšana ir ilga, savukārt tālāka stacija var būt piemērotāka, ja tā ir brīva, ātrāka, uzticamāka vai labāk atbilst lietotāja maršrutam.

1.3.3. Sadales tīkla ierobežojumi

Papildus lietotāja un uzlādes infrastruktūras kritērijiem uzlādes punkta izvēli būtiski ietekmē sadales tīkla tehniskais stāvoklis. *EV* uzlādes infrastruktūra ir pieslēgta konkrētiem tīkla mezgliem, transformatoriem, kabeļlīnijām un zemsprieguma vai vidējā sprieguma tīkla

posmiem. Tādēļ uzlādes punkta piemērotība nav nosakāma tikai pēc tā nominālās jaudas vai lietotāja ērtības, bet arī pēc tā, vai attiecīgajā brīdī vietējais tīkls spēj pieļaut papildu slodzi.

Literatūrā norādīts, ka *EV* uzlāde var palielināt transformatoru un līniju noslodzi, veicināt sprieguma novirzes, palielināt zudumus un radīt lokālus pīķa slodzes riskus [9], [10]. Gudrās uzlādes pētījumi papildus parāda, ka nekoordinēta vienlaicīga uzlāde var radīt nevēlamu slodzes koncentrāciju un pasliktināt sadales tīkla ekspluatācijas režīmu [6], [19], [20].

Šī iemesla dēļ kandidātu alternatīvas nav vienlīdzīgas no tīkla skatpunkta. Stacija, kas lietotājam šķiet piemērota pēc attāluma, cenas vai jaudas, var būt mazāk vēlama, ja tā piesaistīta jau noslogotam mezglam vai ja tās izmantošana palielina sprieguma noviržu un pārslodzes risku. Praktiski tas nozīmē, ka uzlādes punkta piešķiršanas modelī jāiekļauj lokālā slodze, pieejamā jaudas rezerve, sprieguma režīms, kritisko mezglu ietekme un tīkla ekspluatācijas riska rādītāji.

No uzticamības orientētas pieejas skatpunkta sadales tīkla ierobežojumi ir jāinterpretē kā pilnvērtīga kritēriju grupa. Izvēlētais uzlādes punkts nedrīkst būt tikai lietotājam ērts; tam jābūt arī tehniski pieņemamam no elektroapgādes sistēmas skatpunkta. Tādēļ šajā promocijas darbā dinamiska uzlādes punkta piešķiršana tiek skatīta kā lēmumu pieņemšanas uzdevums, kurā uzlādes alternatīvu novērtēšanā tiek integrēts sadales tīkla darbības režīms.

Šāda pieeja nenozīmē, ka lietotājam vienmēr jāizvēlas sadales tīklam tehniski visizdevīgākais uzlādes punkts, bet gan to, ka tīkla noslodze, pieejamā jaudas rezerve un potenciālie tehniskie ierobežojumi tiek ņemti vērā kopā ar lietotāja, uzlādes punkta, uzticamības un drošības kritērijiem. Tā nozīmē, ka tīkla stāvoklis tiek iekļauts kopējā lēmumā kopā ar citiem kritērijiem. Ja tīkla noslodze ir zema un jaudas rezerve pietiekama, lietotāja ērtības kritēriji var dominēt. Savukārt augstas noslodzes vai ierobežotas jaudas rezerves apstākļos tīkla kritērijiem jābūt lielākai ietekmei uz gala rangu.

1.3.4. Uzticamības un kiberdrošības dimensija

Līdz ar uzlādes infrastruktūras digitalizāciju uzlādes punkta izvēli ietekmē ne tikai fiziski un ekspluatācijas parametri, bet arī uzticamības, datu kvalitātes un kiberdrošības faktori. Mūsdienu uzlādes ekosistēmā mijiedarbojas transportlīdzeklis, uzlādes stacija, operatora platforma, lietotāja lietotne, komunikāciju protokoli, maksājumu vide, mākoņpakalpojumi un vietējās enerģijas pārvaldības sistēmas [12], [13], [22]. Šāda savienotība palielina pakalpojuma funkcionalitāti, bet vienlaikus rada jaunas ievainojamības.

Uzticamības dimensija ietver uzlādes punkta darbspēju, pakalpojuma nepārtrauktību, datu aktualitāti, komunikācijas stabilitāti un lēmuma izpildāmību. Ja dati par uzlādes punkta statusu ir novecojuši vai nepilnīgi, lietotājam var tikt rekomendēta alternatīva, kas faktiski nav pieejama. Ja komunikācijas kanāls ir nestabils, uzlādes sesija var tikt pārtraukta vai lietotājs nevarēs autentificēties. Tādēļ datu kvalitāte un pakalpojuma uzticamība ir tieši saistīta ar gala lēmuma kvalitāti.

Kiberdrošības dimensija ietver autentifikācijas drošību, piekļuves kontroli, datu integritāti, komunikācijas drošību, incidentu atklāšanas spēju un pakalpojuma pieejamības risku. *NIST EV/XFC* profils uzsver, ka *EV* uzlādes infrastruktūrā savstarpēji mijiedarbojas elektrotransportlīdzekļi, uzlādes iekārtas un īpaši ātrās uzlādes infrastruktūra, mākoņpakalpojumu un trešo pušu sistēmas, kā arī energosistēmas un ēku elektroapgādes sistēmas, veidojot savstarpēji saistītu kritiskās infrastruktūras vidi [12]. Autora un līdzautoru 2026. gada publikācijā par *EV* uzlādes infrastruktūras kiberdrošības riska novērtēšanu parādīts, ka šādu risku prioritizācijai ir izmantojama *AHP* un *PROMETHEE* metožu kombinācija [13].

No uzlādes punkta piešķiršanas skatpunkta tas nozīmē, ka alternatīva var būt tehniski derīga un telpiski pievilcīga, bet mazāk vēlama, ja tai ir augstāks komunikācijas, datu integritātes vai piekļuves kontroles risks. Uzticamības orientētā modelī kiberdrošība netiek

interpretēta kā ārējs audits pēc lēmuma pieņemšanas. Tā kļūst par vienu no novērtēšanas dimensijām pašā uzlādes punkta izvēles procesā.

Tādējādi uzlādes punkta piemērotība jāvērtē kā fizisko, ekspluatācijas un digitālo īpašību kopums. Šī pieeja ir īpaši nozīmīga dinamiskā vidē, kur lēmums tiek pieņemts, balstoties uz aktuāliem datiem. Ja datu vai komunikācijas slānis nav uzticams, arī matemātiski korekts *MCDM* aprēķins var novest pie praktiski nepareizas rekomendācijas.

1.3.5. Kritēriju konflikts un *MCDM* nepieciešamība

Iepriekš aplūkotie faktori parāda, ka *EV* uzlādes punkta izvēle ir konfliktējošu kritēriju uzdevums. Lietotājs parasti vēlas minimālu attālumu, īsu gaidīšanas laiku, pietiekamu uzlādes jaudu un pieņemamu cenu. Uzlādes infrastruktūras operators ir ieinteresēts efektīvā staciju izmantošanā un stabilā pakalpojuma nodrošināšanā. Sadales sistēmas skatījumā nozīmīga ir slodzes sabalansētība, jaudas rezerves saglabāšana un tehnisko ierobežojumu ievērošana. Savukārt uzticamības un kiberdrošības dimensija prasa, lai izvēlētais punkts būtu ne tikai ērts, bet arī darbspējīgs, datu ziņā uzticams un digitāli drošs.

Šie mērķi ne vienmēr sakrīt. Tuvākā uzlādes stacija var būt pārslogota; stacija ar īsāko gaidīšanas laiku var atrasties tālāk no maršruta; lielākās jaudas uzlādes punkts var radīt lielāku lokālu tīkla noslodzi; zemākā cena var būt saistīta ar zemāku pieejamību vai ilgāku gaidīšanu; savukārt drošākā un uzticamākā alternatīva ne vienmēr būs lietotājam ērtākā. Tas nozīmē, ka uzlādes punkta izvēlē nepieciešams nevis viena kritērija maksimums vai minimums, bet līdzsvarots kompromiss.

1.1.tabula

Konfliktējošo kritēriju piemēri EV uzlādes punkta izvēlē

Kritēriju grupa	Tipiski rādītāji	Ieguvums lietotājam/sistēmai	Iespējamais konflikts
Telpiskā un faktiskā pieejamība	attālums, brauciena laiks, faktiskā pieejamība, alternatīvu skaits	mazāks novirzes ceļš, labāka sasniedzamība	tuvākā stacija var būt aizņemta vai tīkla ziņā nevēlama
Gaidīšanas laiks un noslodze	aizņemtība, paredzamais gaidīšanas laiks, sesiju intensitāte	īsāks pakalpojuma saņemšanas laiks	mazāka gaidīšana var prasīt lielāku maršruta novirzi
Uzlādes tehniskie parametri	jauda, savietojamība, pieslēgvietu skaits, darbspēja	ātrāka uzlāde un tehniskā atbilstība *EV*	augsta jauda var radīt lielāku tīkla slodzi
Lietotāja vajadzības	*SOC*, nepieciešamā enerģija, elastība, komforta robežas	individuāli piemērotāka izvēle	lietotāja ērtākā izvēle var nebūt optimāla tīklam
Sadales tīkla ierobežojumi	lokālā slodze, jaudas rezerve, sprieguma režīms	mazāka ietekme uz tīklu	tīklam vēlamāks punkts var būt tālāks vai lēnāks
Ekonomiskie kritēriji	cena, tarifi, ekspluatācijas izmaksas	zemākas izmaksas	zemākā cena ne vienmēr nozīmē mazāko gaidīšanu
Uzticamība un datu kvalitāte	darbspēja, datu aktualitāte, sesijas stabilitāte	mazāks neveiksmīgas izvēles risks	uzticamākais punkts var nebūt tuvākais
Kiberdrošība	autentifikācija, datu integritāte, komunikācijas drošība	mazāks kļūdaina vai kompromitēta lēmuma risks	drošāks punkts var būt mazāk izdevīgs pēc cenas vai attāluma

Piezīme: tabula ilustrē, ka EV uzlādes punkta izvēle nav viena kritērija optimizācijas uzdevums; dažādu kritēriju grupu mērķi bieži ir savstarpēji konfliktējoši, tādēļ nepieciešama daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas pieeja [6], [9], [11]–[13], [27], [29].

Šādu lēmumu vidi var konceptuāli aprakstīt ar alternatīvu kopu, kurā katra alternatīva ir konkrēts uzlādes punkts noteiktā laikā. Katru alternatīvu raksturo kritēriju vērtību kopums, bet gala prioritāte ir atkarīga no šo kritēriju vērtībām un to relatīvās nozīmības. Tādēļ šajā promocijas darbā uzlādes punkta izvēle tiek formalizēta kā *MCDM* problēma, kur *AHP* vēlāk

tiek izmantota kritēriju strukturēšanai un svēršanai, bet *PROMETHEE*, pieļaujamo alternatīvu prioritizācijai.

Šāda pieeja ļauj vienotā lēmumu telpā apvienot lietotāja, uzlādes infrastruktūras, sadales tīkla, ekonomiskos, uzticamības, datu kvalitātes un kiberdrošības kritērijus. Tā nodrošina nevis vienkāršu tuvākās vai jaudīgākās stacijas izvēli, bet interpretējamu rangu, kurā redzams, kura alternatīva konkrētajā situācijā veido labāko kompromisu starp savstarpēji konfliktējošiem faktoriem. Tādējādi 1.3. sadaļa veido tiešu pāreju uz nākamo nodaļas daļu, kur tiek analizētas *MCDM* pieejas *EV* uzlādes infrastruktūras literatūrā.

1.4. *MCDM* pieejas *EV* uzlādes infrastruktūras literatūrā

Iepriekšējās sadaļās tika pamatots, ka *EV* uzlādes punkta izvēle nav reducējama uz viena kritērija optimizāciju. To vienlaikus ietekmē telpiskā un faktiskā pieejamība, gaidīšanas laiks, stacijas noslodze, uzlādes jauda, lietotāja vajadzības, sadales tīkla ierobežojumi, datu kvalitāte, pakalpojuma uzticamība un kiberdrošības apsvērumi [6], [9], [11]–[13]. Šāda problēmas struktūra dabiski ved uz daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas pieejām, jo praktiski piemērotākā alternatīva ir kompromiss starp vairākiem savstarpēji konfliktējošiem kritērijiem.

EV uzlādes infrastruktūras literatūrā lēmumu pieņemšanas modeļi ir attīstījušies no lokācijas un kapacitātes izvēles modeļiem uz integrētākām daudzkritēriju, daudzmērķu un hibrīdām pieejām. Pētījumos tiek analizēta staciju izvietošana, uzlādes jaudas izvēle, transporta pieprasījums, lietotāju uzvedība, sadales tīkla ierobežojumi, investīciju izmaksas, vides ietekme, gudrās uzlādes stratēģijas un uzlādes infrastruktūras pārvaldība [7], [9], [15]–[22]. Tomēr šie virzieni ne vienmēr tieši risina operatīvu uzdevumu, konkrēta *EV* uzlādes punkta dinamisku piešķiršanu noteiktā laikā.

EV uzlādes infrastruktūras literatūrā izmantoto pieeju klasifikācija ir parādīta 1.5. attēlā.

EV UZLĀDES INFRASTRUKTŪRAS LĒMUMU PIEEJAS		
Izvietojuma izvēle un jaudas noteikšana	**MCDM pieejas**	**Daudzmērķu optimizācija**
Staciju atrašanās vietas izvēle Kapacitātes noteikšana GIS un telpiskā analīze Transporta un sadales tīkla plānošana.	AHP, ANP; PROMETHEE; TOPSIS/ ELECTRE; MCDM	Izmaksu, slodzes un gaidīšanas kompromisi; Pareto risinājumi; Ģenētiskie algoritmi / simulācijas optimizācija; MOO + MCDM hibrīdmodeļi
Viedā uzlāde un agregatoru pieejas		
Slodzes modulācija | Pieprasījuma reakcija | Lietotāja elastība | Transportlīdzekļa un tīkla mijiedarbība | Agregatoru modeļi | Decentralizēta vadība		
Dinamiska uzlādes punkta piešķiršana		
Konkrēta elektrotransportlīdzekļa uzlādes punkta izvēle; Alternatīvu prioritizācija reāllaikā vai izmantojot periodiski atjauninātus operatīvos datus; Lietotāja, uzlādes stacijas, sadales tīkla un atjaunīgo energoresursu datu integrācija; Uzticamības un kiberdrošības kritēriju iekļaušana; Pieļaujamo uzlādes alternatīvu rangēšana konkrētā lēmuma brīdī.		

1.5.att. Literatūrā izmantoto *EV* uzlādes infrastruktūras pieeju klasifikācija

Avots: autora veidots, balstoties uz EV uzlādes infrastruktūras plānošanas, fast-charging, GIS-MCDM, gudrās uzlādes, decentralizētas uzlādes vadības un EV kiberdrošības literatūras analīzi [6], [7], [9], [11]–[13], [15]–[22], [27], [29].

1.4.1. *MCDM* izmantošana staciju plānošanā un lokācijas izvēlē

Viena no plašāk attīstītajām pētniecības līnijām *EV* uzlādes infrastruktūras literatūrā ir uzlādes staciju izvietošanas, vietas izvēles un kapacitātes noteikšanas uzdevumi. Šajos pētījumos galvenais jautājums ir, kur izvietot uzlādes stacijas, kāds pieslēgumu skaits un jauda

nepieciešama, kādu lietotāju plūsmu stacija spēj apkalpot un kā šāds risinājums ietekmē transporta un elektroapgādes sistēmu [9], [15], [16].

Uzlādes stacijas izvietojums nav tikai ģeogrāfisks pārklājuma jautājums. Stacija vienlaikus ir transporta infrastruktūras elements, elektroenerģijas patēriņa mezgls un potenciāls lokālas enerģijas pārvaldības punkts. Tādēļ tās izvietojums ietekmē lietotāja ērtību, brauciena maršrutu, pakalpojuma pieejamību, sadales tīkla slodzi, sprieguma režīmu, zudumus un nepieciešamību pēc tīkla pastiprināšanas [9], [10].

Šo problēmu risināšanā plaši izmantotas *GIS-MCDM* pieejas. Tās ļauj telpisko analīzi apvienot ar daudzkritēriju novērtēšanu, vērtējot kandidātlokācijas pēc transporta, enerģētikas, ekonomiskajiem, sociālajiem un vides kritērijiem. Piemēram, elektrisko *car-sharing* staciju vietas izvēles pētījumos izmantoti *GIS* un *MCDM* risinājumi, lai salīdzinātu alternatīvas ar atšķirīgiem telpiskajiem un ilgtspējas rādītājiem [17]. Līdzīgu virzienu pārstāv pētījumi, kuros *EV* uzlādes staciju vietas izvēlē izmantota *PROMETHEE* kopā ar nenoteiktības modelēšanas pieejām [18].

Šie pētījumi ir būtiski, jo tie parāda, ka *EV* uzlādes infrastruktūras plānošana pati par sevi ir daudzkritēriju uzdevums. Tomēr to galvenais fokuss ir infrastruktūras attīstības stratēģija, nevis konkrēta transportlīdzekļa operatīva novirzīšana uz piemērotāko uzlādes punktu konkrētā ekspluatācijas situācijā. Līdz ar to *site selection* un *placement* literatūra veido nozīmīgu teorētisko pamatu, bet nenosedz visu šī promocijas darba pētījuma problēmu.

1.4.2. *AHP* un *PROMETHEE* pielietojums *EV* infrastruktūras pētījumos

MCDM metodes *EV* uzlādes infrastruktūras pētījumos tiek izmantotas situācijās, kur alternatīvas nav iespējams korekti salīdzināt pēc viena rādītāja. Tipiski kritēriji ietver attālumu, brauciena laiku, investīciju izmaksas, uzlādes jaudu, tīkla kapacitāti, gaidīšanas laiku, lietotāju pieprasījumu, vides ietekmi un pakalpojuma kvalitāti [7], [9], [15], [17], [18]. Šādos gadījumos *MCDM* ļauj veidot strukturētu lēmumu telpu, kur katra alternatīva tiek vērtēta pēc vienota kritēriju kopuma.

AHP ir viena no biežāk lietotajām metodēm, jo tā ļauj sarežģītu lēmuma problēmu sadalīt hierarhijā: mērķis, kritēriji, apakškritēriji un alternatīvas [29]. *EV* uzlādes kontekstā šī īpašība ir nozīmīga, jo lēmumu ietekmē vairākas atšķirīgas dimensijas: transportlīdzekļa tehniskais stāvoklis, stacijas parametri, sadales tīkla ierobežojumi, lietotāja vajadzības, izmaksas, uzticamība un drošība. *AHP* sniedz iespēju šos kritērijus strukturēt un noteikt to relatīvo nozīmīgumu ar ekspertu pāru salīdzinājumiem [29], [30].

PROMETHEE savukārt ir piemērota alternatīvu prioritizācijai, jo tā balstās uz pārākuma attiecību loģiku un ļauj novērtēt, kādā mērā viena alternatīva ir dodama priekšroka salīdzinājumā ar citu [27]. *EV* uzlādes infrastruktūras kontekstā *PROMETHEE* ir vērtīga ar to, ka tā ļauj vienā prioritizācijas procesā apvienot gan kvantitatīvus kritērijus, piemēram, attālumu, jaudu, cenu un gaidīšanas laiku, gan daļēji kvalitatīvus kritērijus, piemēram, pakalpojuma uzticamību, lietotāja komfortu vai kiberdrošības riska līmeni [11], [13], [27].

Autora līdzautoru 2024. gada publikācijā par *EV* pārvaldības lēmumu pieņemšanas sistēmu *PROMETHEE* izmantota kā viens no lēmumu algoritmiem, integrējot viedās tehnoloģijas, *IoT* un lokālās īpatnības *EV* uzlādes infrastruktūras pārvaldībā [11]. Savukārt autora un līdzautoru 2026. gada publikācijā par *EV* uzlādes infrastruktūras kiberdrošības riska novērtēšanu *AHP* un *PROMETHEE* kombinācija izmantota kiberdrošības atribūtu svēršanai un draudu prioritizācijai [13]. Šīs publikācijas veido tiešu metodoloģisku sasaisti ar promocijas darba pieeju.

Citas *MCDM* metodes, piemēram, *TOPSIS, fuzzy TOPSIS, ELECTRE* un *ANP*, literatūrā biežāk izmantotas lokācijas, ilgtspējas un infrastruktūras prioritizācijas uzdevumos [15], [17], [18], [26]. *TOPSIS* priekšrocība ir skaidra interpretācija caur tuvumu ideālajam un anti-ideālajam risinājumam, savukārt *fuzzy* pieejas ir piemērotas situācijās, kur ekspertu vērtējumi

ir nenoteikti vai lingvistiski [17], [46], [47]. Tomēr šī promocijas darba kontekstā īpaši nozīmīga ir *AHP–PROMETHEE* kombinācija, jo *AHP* nodrošina kritēriju strukturēšanu un svēršanu, bet *PROMETHEE*, interpretējamu uzlādes alternatīvu prioritizāciju.

1.4.3. Atšķirība starp infrastruktūras plānošanu un dinamisku piešķiršanu

Svarīgs metodoloģisks nošķīrums šajā promocijas darbā ir atšķirība starp uzlādes infrastruktūras plānošanu un dinamisku uzlādes punkta piešķiršanu. Infrastruktūras plānošanas uzdevumos galvenais jautājums ir par to, kur stacijas jāizvieto, kāda kapacitāte nepieciešama, kādi ieguldījumi jāveic un kā nodrošināt noteiktu teritorijas pārklājumu [9], [15], [16]. Šādi modeļi parasti darbojas ilgtermiņa vai vidēja termiņa plānošanas horizontā.

Savukārt dinamiska uzlādes punkta piešķiršana ir operatīvs lēmums. Tā atbild uz jautājumu, kuru konkrētu uzlādes punktu konkrētam *EV* konkrētajā laikā izvēlēties. Šajā gadījumā alternatīvu kopa mainās laikā, jo stacijas var kļūt aizņemtas, atbrīvoties, mainīt pieejamo jaudu, nonākt kļūmes režīmā vai kļūt mazāk piemērotas tīkla noslodzes dēļ. Arī lietotāja situācija mainās: samazinās *SOC*, mainās maršruts, laika ierobežojumi un pieļaujamā elastība.

Gudrās uzlādes literatūra daļēji risina dinamisko pārvaldību, bet tās galvenais jautājums parasti ir cits: kad un ar kādu jaudu transportlīdzekli uzlādēt, lai samazinātu tīkla noslodzi, izmantotu cenu signālus vai palielinātu elastību [6], [19], [20]. *Dynamic charging point assignment* savukārt koncentrējas uz alternatīvas izvēli, kur uzlādēt. Šie uzdevumi ir savstarpēji saistīti, bet metodoloģiski atšķirīgi. Gudrās uzlādes pieejas var optimizēt uzlādes procesu pēc tam, kad uzlādes punkts jau izvēlēts, bet dinamiska piešķiršana nosaka pašu uzlādes alternatīvu.

Daudzmērķu optimizācijas modeļi spēj ģenerēt kompromisa risinājumus starp izmaksām, slodzi, gaidīšanas laiku un infrastruktūras izmantošanu [7], [9], [16]. Tomēr gala izvēle no Pareto vai citu kompromisu kopas bieži prasa papildus lēmumu pieņemšanas instrumentu. Šeit *MCDM* metodes kļūst īpaši noderīgas, jo tās nodrošina interpretējamu alternatīvu prioritizāciju atbilstoši kritēriju svarīgumiem un konkrētā brīža datiem.

Tādēļ šī promocijas darba pētnieciskā niša nav klasiskā staciju izvietojuma plānošana un nav arī tikai gudrās uzlādes vadība. Darba fokuss ir dinamiska uzlādes punkta piešķiršana, kur konkrētam EV konkrētā brīdī jāizvēlas piemērotākā alternatīva no mainīgas kandidātu kopas, vienlaikus ņemot vērā lietotāja, stacijas, sadales tīkla, uzticamības un kiberdrošības kritērijus.

1.4.4. Uzticamības un kiberdrošības integrācijas trūkums esošajās pieejās

Lielākā daļa *EV* uzlādes infrastruktūras *MCDM* pētījumu koncentrējas uz lokāciju, izmaksām, pieprasījumu, pieejamību, uzlādes jaudu, vides aspektiem un dažkārt arī sadales tīkla ierobežojumiem [7], [9], [15]–[18]. Tomēr mūsdienu EV uzlādes infrastruktūra arvien vairāk darbojas kā kiberfiziska sistēma, kur uzlādes stacijas, transportlīdzekļi, operatoru platformas, mobilās lietotnes, mākoņpakalpojumi, maksājumu sistēmas un sadales tīkls ir savienoti vienotā digitālā ekosistēmā [12], [13].

Šāda savienotība nozīmē, ka uzticamība un kiberdrošība vairs nav tikai atsevišķs tehniskās kontroles jautājums. Tās tieši ietekmē uzlādes punkta faktisko pieejamību, datu korektumu, lietotāja autentifikāciju, uzlādes sesijas stabilitāti, norēķinu izpildi un operatora spēju nodrošināt pakalpojumu. Ja stacijas dati ir novecojuši, komunikācija nestabila vai pastāv paaugstināts kiberrisks, tad arī ģeogrāfiski tuva un tehniski jaudīga stacija var nebūt piemērota alternatīva konkrētajā lēmuma brīdī.

NIST EV/XFC profils uzsver, ka īpaši ātrās uzlādes infrastruktūra ietver vairākas savstarpēji saistītas sistēmu grupas, elektrotransportlīdzekļus, uzlādes iekārtas un īpaši ātrās uzlādes sistēmas, mākoņpakalpojumus, trešo pušu platformas, kā arī energosistēmas un ēku elektroapgādes sistēmas, un tādēļ jāvērtē kā riskos balstīta kiberfiziska infrastruktūra [12].

Autora un līdzautoru 2026. gada publikācijā šī problēma attīstīta tālāk, piedāvājot hibrīdu *AHP–PROMETHEE* ietvaru kiberdrošības risku novērtēšanai *EV* uzlādes infrastruktūrā [13].

Tomēr esošajā literatūrā kiberdrošības un uzticamības novērtējums bieži ir atdalīts no uzlādes punkta izvēles modeļiem. Viena pētniecības līnija analizē *EV* infrastruktūras plānošanu un uzlādes vadību, bet cita iberdrošības risku novērtēšanu. Dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas kontekstā šāds nošķīrums ir nepietiekams, jo gala izvēlei jāņem vērā gan fiziskā infrastruktūras piemērotība, gan digitālās vides uzticamība.

Promocijas darba pieeja šo plaisu risina, integrējot uzticamības un kiberdrošības kritērijus pašā *MCDM* modelī. Tas nozīmē, ka uzlādes punkts tiek vērtēts ne tikai pēc attāluma, cenas, jaudas un gaidīšanas laika, bet arī pēc datu kvalitātes, komunikācijas uzticamības, pakalpojuma pieejamības, autentifikācijas drošības un kiberriska līmeņa. Šāda pieeja ļauj veidot uz uzticamību orientētu dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas modeli, kurā alternatīvu izvēle tiek pamatota, vienlaikus ņemot vērā lietotāja vajadzības, sadales tīkla darbības režīmu un digitālās drošības riskus.

1.2.tabula

EV uzlādes infrastruktūras literatūrā izmantoto pieeju salīdzinošais raksturojums

Pieeja	Galvenais fokuss	Stiprās puses	Ierobežojumi promocijas darba kontekstā
Uzlādes staciju izvietojuma izvēle	Staciju izvietošana, kapacitāte, teritorijas pārklājums	Labi piemērota infrastruktūras attīstības stratēģijai	Bieži statiska; nerisina konkrēta *EV* operatīvu izvēli
MCDM	Alternatīvu vērtēšana pēc vairākiem kritērijiem	Interpretējama, piemērota heterogēniem kritērijiem	*EV* literatūrā bieži lietota lokācijai, nevis dinamiskai piešķiršanai
Daudzmērķu optimizācija	Kompromisu meklēšana starp izmaksām, slodzi, gaidīšanu un pārklājumu	Labi modelē konfliktējošus mērķus	Gala izvēlei bieži vajadzīgs papildus *MCDM* instruments
Gudrās uzlādes / aggregators	Uzlādes procesa vadība laikā un jaudas modulācija	Labi atspoguļo dinamiku un lietotāja elastību	Galvenokārt atbild uz jautājumu "kad/kā uzlādēt", nevis "kur uzlādēt"
Uzticamības un kiberdrošības novērtēšana	Drošības, komunikācijas un datu riska vērtēšana	Ļauj *EVSE* skatīt kā kiberfizisku infrastruktūru	Bieži atdalīta no uzlādes punkta izvēles modeļiem
Dinamiska uzlādes punkta piešķiršana	Konkrēta punkta izvēle noteiktā laikā	Visciešāk atbilst promocijas darba problēmai	Literatūrā mazāk attīstīta un fragmentēta

Piezīme: tabula parāda, ka literatūrā dominē staciju plānošanas, lokācijas izvēles un uzlādes procesa vadības pieejas, savukārt dinamiska uzlādes punkta piešķiršana ar integrētu MCDM, sadales tīkla, lietotāja, uzticamības un kiberdrošības loģiku joprojām ir nepietiekami attīstīts pētniecības virziens [6], [9], [11]–[13], [16]–[22].

Promocijas darba pētnieciskā niša ir šo pieeju integrācijā. Darbā *EV* uzlādes punkta izvēle tiek formulēta kā dinamiska, uz uzticamību orientēta *MCDM* problēma, kur *AHP* nodrošina kritēriju strukturēšanu un svēršanu, *PROMETHEE*, alternatīvu prioritizāciju, bet lēmuma atbalsta sistēmas kalpo kā praktiskās realizācijas slānis. Šāda pieeja ļauj pāriet no statiskas infrastruktūras plānošanas uz operatīvu lēmumu pieņemšanu reāllaika vai operatīvo datu apstākļos.

1.5. Lēmumu atbalsta sistēmas nepieciešamība dinamiskai *EV* uzlādes punkta piešķiršanai

Iepriekšējās sadaļās tika pamatots, ka elektrisko transportlīdzekļu uzlādes punkta izvēle ir daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas problēma. To vienlaikus ietekmē lietotāja vajadzības, transportlīdzekļa stāvoklis, uzlādes stacijas tehniskie parametri, faktiskā pieejamība, gaidīšanas

laiks, sadales tīkla ierobežojumi, datu kvalitāte, uzticamība un kiberdrošības riski [6], [9], [11]–[13]. Šāda lēmumu vide nav pilnvērtīgi risināma ar vienkāršu tuvākās, lētākās vai jaudīgākās stacijas izvēli, jo dažādu kritēriju mērķi bieži ir savstarpēji konfliktējoši.

Līdzšinējā *EV* uzlādes infrastruktūras literatūra sniedz nozīmīgu pamatu šādas problēmas risināšanai, tomēr dominējošie pētniecības virzieni pārsvarā ir saistīti ar staciju izvietojuma plānošanu, kapacitātes noteikšanu, gudrās uzlādes vadību, agregatoru modeļiem un daudzmērķu optimizāciju [7], [9], [15]–[22]. Šie virzieni ir būtiski infrastruktūras attīstībai un uzlādes procesa pārvaldībai, taču tie tikai daļēji risina operatīvu uzdevumu, konkrētam *EV* konkrētā laikā izvēlēties piemērotāko uzlādes punktu no mainīgas alternatīvu kopas.

Šajā promocijas darbā šādas izvēles pamatā ir daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metodoloģija. Lēmumu atbalsta sistēma netiek traktēta kā pašmērķis vai galvenais zinātniskais rezultāts. Tā tiek interpretēta kā praktiskās realizācijas vide, kurā tiek īstenota izstrādātā *MCDM* pieeja: kritēriju strukturēšana, *AHP* balstīta kritēriju svaru noteikšana, *PROMETHEE* balstīta alternatīvu prioritizācija, dinamiska datu aktualizācija un lēmuma rezultātu interpretācija. Tādējādi darba zinātniskais kodols ir *MCDM* modelis, bet lēmuma atbalsta sistēma ir šī modeļa ieviešanas un izmantošanas slānis.

1.5.1. Lēmuma atbalsta sistēma kā *MCDM* metodoloģijas realizācijas vide

Lēmumu atbalsta sistēmas tradicionāli tiek izmantotas sarežģītās un daļēji strukturētās lēmumu situācijās, kur nepieciešams apvienot datus, modeļus, ekspertu vērtējumus un alternatīvu salīdzināšanu [48], [49]. *EV* uzlādes punkta piešķiršana atbilst šādai problēmu klasei, jo lēmums jāpieņem apstākļos, kuros alternatīvas un kritēriju vērtības var mainīties laikā, bet gala izvēli ietekmē vairākas savstarpēji konfliktējošas prasības.

Šajā darbā lēmuma atbalsta sistēmas funkcija ir nodrošināt *MCDM* metodoloģijas praktisku izpildi. Tā apkopo ievaddatus, aktualizē kritēriju vērtības, piemēro kritēriju svarus, veic alternatīvu prioritizāciju un sagatavo lēmuma rezultātu lietotājam, operatoram vai citam lēmuma pieņēmējam saprotamā formā. Šāda sistēma ļauj pāriet no vienkāršotas stacijas izvēles pēc viena kritērija uz strukturētu lēmumu, kurā vienlaikus tiek ņemti vērā lietotāja, uzlādes infrastruktūras, sadales tīkla, ekonomiskie, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības kritēriji.

Lēmuma atbalsta sistēma šajā darbā tiek skatīta kā analītiska un arhitektūras vide, kurā tiek savienoti dati, kritēriju aprēķins, svaru piemērošana, alternatīvu rangēšana un rezultātu interpretācija. Šāds skatījums atbilst industriālo *IoT* un *service-oriented automation* sistēmu attīstības virzienam, kur datu ieguve, servisu reģistrācija, autorizācija, automatizēta servisu darbības koordinēšana un vēsturisko datu uzkrāšana veido pamatu automatizētai lēmumu pieņemšanai [44]. Tādēļ promocijas darbā lēmuma atbalsta sistēma nav uztverama kā atsevišķa lietotne, bet kā *MCDM* modeļa ieviešanas un validācijas vide.

Lēmuma atbalsta sistēma šajā darbā palīdz lēmuma pieņēmējam izvērtēt alternatīvas, nodrošinot pārskatāmu un izskaidrojamu izvēles pamatojumu. Tā ļauj izsekot, kā izmantotie dati, kritēriju vērtības un svari ietekmē alternatīvu prioritāti. *AHP* ļauj pamatot, kāpēc konkrētām kritēriju grupām tiek piešķirta noteikta nozīme, savukārt *PROMETHEE* ļauj interpretēt, kā veidojas alternatīvu rangs un kāpēc viens uzlādes punkts konkrētajā situācijā ir piemērotāks par citu [27], [29].

Konceptuāli lēmuma atbalsta sistēmas darbību šajā darbā var raksturot kā lēmumu funkciju, kas noteiktā laikā izmanto aktuālos datus, alternatīvas, kritēriju vērtības un svarus, lai iegūtu uzlādes punktu prioritāšu secību:

$$R_t = DSS(D_t, A_t, C_t, w), \tag{1.1}$$

kur D_t- ir laikā t pieejamā datu kopa, A_t - pieejamo uzlādes alternatīvu kopa, C_t - kritēriju vērtību kopa, w - kritēriju svaru vektors, R_t - uzlādes punktu prioritāšu rangs.

Šajā formulējumā lēmuma atbalsta sistēma nav atsevišķa optimizācijas metode. Tā ir vide, kurā tiek realizēta *MCDM* loģika: datu aktualizācija, kritēriju novērtēšana, svaru piemērošana un alternatīvu prioritizācija. Detalizēti alternatīvu kopas, kritēriju vektoru, *AHP* svaru un *PROMETHEE* prioritizācijas matemātiskie formulējumi tiek izstrādāti 2. nodaļā, savukārt to algoritmiskā operacionalizācija — 3. nodaļā.

Autora līdzautoru 2024. gada publikācijā par *EV* pārvaldības lēmumu pieņemšanas sistēmu uzsvērta viedo tehnoloģiju, *IoT*, lokālo īpatnību un lēmumu algoritmu integrācija *EV* pārvaldībā [11]. Šī pieeja sasaucas ar promocijas darba virzienu, jo dinamiska uzlādes punkta piešķiršana prasa ne tikai datu uzkrāšanu, bet arī to pārveidošanu strukturētā lēmumā. Savukārt autora un līdzautoru 2026. gada pētījumā par *EV* uzlādes infrastruktūras kiberdrošības riska novērtēšanu *AHP–PROMETHEE* kombinācija izmantota kiberdrošības atribūtu svēršanai un risku prioritizācijai [13]. Šī metodoloģiskā pieredze šajā promocijas darbā tiek paplašināta uz uzlādes punkta dinamiskas izvēles uzdevumu.

Tādējādi lēmuma atbalsta sistēma šajā promocijas darbā kalpo kā realizācijas slānis, kurā tiek savienoti dati, kritēriji, svari, alternatīvu rangs un lēmuma skaidrojums. Galvenais pētījuma priekšmets tomēr paliek *MCDM* metodoloģija: kā strukturēt uzlādes punkta izvēles kritērijus, kā noteikt to nozīmīgumu, kā prioritizēt alternatīvas un kā uzticamības un kiberdrošības aspektus iekļaut pašā lēmuma modelī.

1.5.2. Reāllaika, operatīvo datu nozīme

Dinamiska *EV* uzlādes punkta piešķiršana būtiski atšķiras no statiskas uzlādes infrastruktūras plānošanas. Plānošanas uzdevumos parasti tiek izmantoti ilgtermiņa vai vidēja termiņa dati: satiksmes plūsmas, teritorijas attīstības prognozes, paredzamais *EV* skaits, investīciju izmaksas un tīkla kapacitāte. Savukārt dinamiskā piešķiršanā lēmums tiek pieņemts konkrētā laikā, kad būtiska ir aktuālā informācija par transportlīdzekli, uzlādes punktiem, lietotāja situāciju, sadales tīkla režīmu un digitālās vides uzticamību.

Reāllaika vai operatīvie dati ir nepieciešami tādēļ, ka uzlādes punkta piemērotība var mainīties īsā laika intervālā. Uzlādes punkts, kas pirms dažām minūtēm bija piemērotākā alternatīva, var kļūt aizņemts, var mainīties paredzamais gaidīšanas laiks, var samazināties pieejamā jauda vai pasliktināties lokālā tīkla noslodzes stāvoklis. Tāpat var mainīties lietotāja situācija: samazinās akumulatora uzlādes līmenis, mainās maršruts, pieļaujamais gaidīšanas laiks vai nepieciešamais enerģijas daudzums.

Dinamiskai *MCDM* pieejai nepieciešami vairāki datu slāņi. *EV* dati raksturo *SOC*, nepieciešamo enerģiju, uzlādes jaudas pieņemšanas spēju un savietojamību ar uzlādes punktu. Uzlādes stacijas dati raksturo pieejamību, aizņemtību, jaudu, darbspēju, gaidīšanas laiku un savienotāju tipus. Sadales tīkla dati raksturo lokālo slodzi, pieejamo jaudas rezervi, sprieguma režīmu un potenciālos ekspluatācijas riskus. Lietotāja dati raksturo maršrutu, laika ierobežojumus, elastību un komforta robežas. Drošības un uzticamības dati raksturo komunikācijas stabilitāti, datu aktualitāti, autentifikācijas drošību un kiberriska līmeni [6], [9], [11]–[13], [22].

Šādu datu izmantošana ļauj *MCDM* modelim darboties nevis kā vienreizējam statiskam aprēķinam, bet kā atkārtojami izpildāmam lēmumu procesam. Ja mainās kritēriju vērtības, lēmuma atbalsta sistēma pārrēķina alternatīvu prioritātes un var piedāvāt jaunu rangu. Tas ir īpaši būtiski situācijās, kur sākotnēji rekomendētais uzlādes punkts kļūst nepieejams, mainās tīkla noslodze vai parādās paaugstināts uzticamības vai kiberdrošības risks.

Saaty dinamisko prioritāšu pieeja rāda, ka lēmumu pieņemšanā prioritātes var tikt skatītas arī kā laikā mainīgas vērtības, nevis tikai kā statiski svari [31]. Šī ideja ir būtiska *EV* uzlādes punkta piešķiršanā, jo dažādos ekspluatācijas scenārijos var mainīties gan kritēriju vērtības, gan atsevišķos gadījumos arī to relatīvā nozīme. Piemēram, normālā situācijā lietotāja

ērtības kritēriji var dominēt, bet augstas tīkla noslodzes vai kiberdrošības riska apstākļos lielāku nozīmi var iegūt tīkla un uzticamības kritēriji.

Tādējādi reāllaika un operatīvie dati ir priekšnosacījums tam, lai *MCDM* metodoloģija būtu izmantojama operatīvā *EV* uzlādes punkta piešķiršanā. Bez aktuāliem datiem *AHP–PROMETHEE* modelis var nodrošināt teorētiski strukturētu, bet praktiski novecojušu lēmumu. Savukārt ar aktuāliem datiem tas kļūst par dinamisku prioritizācijas mehānismu, kas spēj pielāgoties mainīgai kiberfiziskai uzlādes videi.

Reāllaika vai operatīvo datu izmantošana nozīmē, ka lēmumu modelim jāspēj darboties ar heterogēniem un atšķirīgas kvalitātes datu avotiem. Šajā kontekstā būtiska ir ne tikai datu pieejamība, bet arī to aktualitāte, pārraides uzticamība, komunikācijas kanālu noturība un iespēja sasaistīt datu plūsmas ar konkrētiem infrastruktūras objektiem [44]. Tādēļ datu kvalitāte šajā promocijas darbā tiek iekļauta nevis kā ārējs tehnisks pieņēmums, bet kā viens no lēmuma uzticamību ietekmējošiem faktoriem.

1.5.3. Pāreja uz teorētisko modeli

Pirmās nodaļas analīze parāda, ka *EV* uzlādes punkta dinamiska piešķiršana jāskata kā daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas problēma kiberfiziskā vidē. Elektromobilitātes attīstība palielina uzlādes infrastruktūras nozīmi, savukārt uzlādes punkta izvēli ietekmē ne tikai attālums vai jauda, bet arī faktiskā pieejamība, gaidīšanas laiks, lietotāja vajadzības, sadales tīkla ierobežojumi, datu kvalitāte, uzticamība un kiberdrošība.

Līdzšinējā literatūra sniedz būtisku pamatu šīs problēmas risināšanai. Uzlādes staciju izvietojuma izvēles un novietojuma plānošanas pētījumi palīdz izprast infrastruktūras attīstības loģiku. Gudrās uzlādes un agregatoru pētījumi parāda uzlādes procesa dinamiku un lietotāju elastības nozīmi. *MCDM* metodes nodrošina instrumentus heterogēnu kritēriju strukturēšanai un alternatīvu salīdzināšanai. Kiberdrošības un uzticamības pētījumi parāda, ka uzlādes infrastruktūra jāvērtē kā digitāli savienota un riskos balstīta kiberfiziska sistēma [6], [9], [11]–[13], [16]–[22], [27], [29], [48], [49].

Tomēr promocijas darba pētījuma niša ir šo virzienu integrācija vienā operatīvā lēmumu modelī. Nepieciešams formāli definēt, kas ir uzlādes alternatīva, kādi kritēriji raksturo tās piemērotību, kā tiek veidota pieļaujamo alternatīvu kopa, kā tiek noteikti kritēriju svari un kā alternatīvas tiek prioritizētas dinamiskā laikā. Šie jautājumi tiek risināti otrajā nodaļā.

Otrajā nodaļā *EV* uzlādes punkta piešķiršanas problēma tiek formalizēta kā uz uzticamību orientēts *MCDM* modelis. Tajā tiek definēta lēmumu vide, alternatīvu kopa, kritēriju sistēma, *AHP* balstīta kritēriju svaru noteikšanas loģika, *PROMETHEE* balstīta alternatīvu prioritizācija, uzticamības un kiberdrošības integrācijas principi, kā arī dinamiskas filtrēšanas un pārrēķina nepieciešamība. Tādējādi 1. nodaļas teorētiskais un literatūras pamatojums tiek pārnests uz formālu metodoloģisko modeli, kas vēlāk tiek operacionalizēts 3. nodaļā un validēts 4.–5. nodaļā.

1.6. Pirmās nodaļas secinājumi

Elektrisko transportlīdzekļu skaita pieaugums pasaulē, Eiropā un Latvijā būtiski palielina nepieciešamību pēc efektīvas, uzticamas un lietotājam pieejamas uzlādes infrastruktūras. Elektromobilitāte vairs nav tikai transporta sektora tehnoloģiska pārmaiņa, bet kļūst par būtisku elektroapgādes sistēmas, mobilitātes un digitālās infrastruktūras mijiedarbības elementu [1]–[5].

EV uzlādes infrastruktūras attīstība Latvijā notiek nevienmērīgi. Pieaug gan kopējais elektromobiļu skaits, gan jauno un lietoto elektroauto reģistrācija, vienlaikus publiskā uzlādes infrastruktūra pāriet no sākotnējā nacionālā e-mobi tīkla uz daudzoperatoru vidi. Tas palielina

nepieciešamību pēc tādas uzlādes punkta izvēles pieejas, kas spēj salīdzināt dažādas alternatīvas pēc vairākiem tehniskiem, ekspluatācijas un uzticamības kritērijiem.

EV uzlādes infrastruktūra nav tikai fiziska elektroenerģijas nodošanas sistēma. Mūsdienu uzlādes punkts ir tehnisks un digitāls mezgls, kurā mijiedarbojas elektroenerģijas padeve, lietotāja autentifikācija, maksājumu vide, operatora platforma, komunikācijas protokoli, datu apmaiņa un attālināta uzraudzība [12], [13], [22]. Tādēļ uzlādes punkta piemērotība jāvērtē ne tikai pēc jaudas un atrašanās vietas, bet arī pēc datu kvalitātes, komunikācijas uzticamības un pakalpojuma pieejamības.

EV uzlāde būtiski ietekmē sadales tīkla darbības režīmus. Nekoordinēta vai lokāli koncentrēta uzlāde var palielināt transformatoru un līniju noslodzi, radīt sprieguma novirzes, paaugstināt zudumus un palielināt slodzes maksimumus [6], [9], [10]. Tādēļ uzlādes punkta izvēlē sadales tīkls jāuzskata nevis par ārēju fonu, bet par vienu no lēmuma kritēriju avotiem.

Uzlādes punkta izvēle nav reducējama uz tuvākās, lētākās vai jaudīgākās stacijas izvēli. Tuvākā stacija var būt aizņemta, jaudīgākā alternatīva var radīt lielāku tīkla slodzi, lētākā izvēle var nozīmēt ilgāku gaidīšanu, savukārt tehniski piemērota stacija var būt mazāk uzticama datu vai kiberdrošības aspektu dēļ. Tas apliecina, ka *EV* uzlādes punkta izvēle pēc būtības ir daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas problēma.

Literatūrā dominē vairāki *EV* uzlādes infrastruktūras izpētes virzieni: staciju izvietojuma un kapacitātes plānošana, *GIS-MCDM* pieejas, daudzmērķu optimizācija, gudrās uzlādes, agregatoru vadība un kiberdrošības risku novērtēšana [6], [7], [9], [15]–[22]. Šie virzieni risina būtiskas infrastruktūras attīstības un uzlādes vadības problēmas, tomēr tie pilnībā nenosedz konkrēta *EV* uzlādes punkta dinamiskas piešķiršanas uzdevumu reāllaika vai operatīvo datu situācijā.

AHP un *PROMETHEE* kombinācija ir metodoloģiski pamatota šī promocijas darba kontekstā. *AHP* ļauj strukturēt kritēriju hierarhiju un noteikt kritēriju relatīvo nozīmīgumu, savukārt *PROMETHEE* nodrošina interpretējamu alternatīvu prioritizāciju, pilna ranga iegūšanu un rezerves alternatīvu secības noteikšanu [27], [29], [30]. Tas ir būtiski dinamiskā vidē, kur uzlādes punktu pieejamība un piemērotība var mainīties īsā laikā.

Uzticamība un kiberdrošība *EV* uzlādes punkta izvēlē nav jāuzskata par ārējiem papildinājumiem pēc lēmuma pieņemšanas. Tās jāintegrē pašā *MCDM* modelī kā kritēriji, filtrēšanas nosacījumi vai prioritātes korekcijas faktori. Datu integritāte, komunikācijas stabilitāte, autentifikācija, pakalpojuma pieejamība un kiberriska līmenis tieši ietekmē to, vai konkrētais uzlādes punkts ir praktiski piemērota alternatīva [12], [13].

Lēmuma atbalsta sistēma šajā promocijas darbā nav galvenais zinātniskais kodols, bet gan *MCDM* metodoloģijas praktiskās realizācijas vide. Lēmuma atbalsta sistēma nodrošina datu apkopošanu, kritēriju vērtību aktualizāciju, *AHP* svaru izmantošanu, *PROMETHEE* alternatīvu prioritizāciju un lēmuma rezultāta interpretāciju. Galvenais pētījuma priekšmets ir *MCDM* modelis uz uzticamību orientētai dinamiskai *EV* uzlādes punkta piešķiršanai.

Pirmās nodaļas analīze pamato nepieciešamību izstrādāt teorētisku *MCDM* modeli, kurā *EV* uzlādes punkta izvēle tiek formalizēta kā dinamiska, uz uzticamību orientēta alternatīvu prioritizācijas problēma. Šis modelis tiek izstrādāts 2. nodaļā, kur tiek definēta lēmumu vide, alternatīvu kopa, kritēriju sistēma, *AHP* svaru noteikšanas loģika, *PROMETHEE* prioritizācija un uzticamības/kiberdrošības integrācija.

2. UZTICAMĪBAS ORIENTĒTAS DINAMISKAS UZLĀDES PUNKTU PIEŠĶIRŠANAS TEORĒTISKAIS MODELIS

2.1. Dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas problēmas formulējums

Šī promocijas darba centrālais pētnieciskais uzdevums ir uz uzticamību orientēta dinamiska elektriskā transportlīdzekļa uzlādes punkta piešķiršana. Ar dinamisku uzlādes punkta piešķiršanu šajā darbā tiek saprasts daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas process, kurā konkrētam elektriskajam transportlīdzeklim noteiktā laika momentā no pieejamo vai sasniedzamo uzlādes punktu kopas tiek izvēlēta piemērotākā alternatīva. Šajā izvēlē tiek ņemts vērā transportlīdzekļa stāvoklis, nepieciešamais enerģijas daudzums, uzlādes infrastruktūras pieejamība, gaidīšanas laiks, sadales tīkla režīms, lietotāja ierobežojumi, datu kvalitāte, pakalpojuma uzticamība un kiberdrošības aspekti [6], [9], [11]–[13].

Dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas problēma rodas tāpēc, ka uzlādes punkta piemērotība nav statiska īpašība. Viena un tā pati stacija dažādos laika momentos var būt ļoti atšķirīgi vērtējama: tā var būt brīva vai aizņemta, ar pietiekamu vai ierobežotu pieejamo jaudu, ar labu vai pasliktinātu komunikācijas kvalitāti, ar pieņemamu vai paaugstinātu tīkla noslodzes risku. Līdz ar to uzlādes punkta izvēle nav tikai navigācijas vai ģeogrāfiskā attāluma uzdevums, bet laikā mainīga alternatīvu prioritizācijas problēma.

Šajā nodaļā dinamiska uzlādes punkta piešķiršana tiek formalizēta kā *MCDM* problēma. Vispirms tiek definēts dinamiskas piešķiršanas jēdziens un tās atšķirība no klasiskās uzlādes infrastruktūras plānošanas. Tālāk tiek formulēta alternatīvu un kritēriju telpa, kā arī uz uzticamību orientētas pieejas vieta lēmumu modelī. Noslēgumā tiek noteiktas problēmas robežas un galvenie pieņēmumi, lai turpmākajās sadaļās varētu precīzi definēt lēmumu vidi, kritēriju sistēmu, *AHP* svaru noteikšanas loģiku un *PROMETHEE* prioritizācijas mehānismu.

2.1.1. Dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas jēdziens

Dinamiska *EV* uzlādes punkta piešķiršana šajā darbā tiek interpretēta kā operatīvs lēmumu pieņemšanas process, kurā konkrētam transportlīdzeklim konkrētā laikā tiek noteikts piemērotākais uzlādes punkts no ierobežotas alternatīvu kopas. Šī alternatīvu kopa nav pastāvīga, jo tā mainās atkarībā no transportlīdzekļa atrašanās vietas, atlikušā nobraukuma, uzlādes punktu statusa, staciju noslodzes, lietotāja laika ierobežojumiem, sadales tīkla režīma un datu pieejamības.

Atšķirībā no statiskas izvēles, kur lēmums var balstīties uz reti aktualizētu informāciju, piemēram, stacijas atrašanās vietu, nominālo jaudu vai savienotāja tipu, dinamiskā pieejā tiek pieņemts, ka būtiskākie lēmuma parametri mainās laikā. Uzlādes punkts, kas vienā brīdī ir piemērotākais, pēc īsa laika var kļūt mazāk piemērots, ja tas tiek aizņemts, samazinās pieejamā jauda, palielinās gaidīšanas laiks, mainās lietotāja maršruts vai rodas lokāls tīkla ierobežojums. Šāda mainība ir īpaši nozīmīga publiskās un daļēji publiskās uzlādes infrastruktūrā, kur pieprasījums un staciju noslodze var būt nevienmērīga.

Dinamiskas piešķiršanas uzdevumā lēmums tiek pieņemts nevis abstraktam vidējam lietotājam, bet konkrētai situācijai. Šajā situācijā nozīme ir *EV* akumulatora uzlādes līmenim, nepieciešamajam enerģijas daudzumam, transportlīdzekļa tehniskajai savietojamībai ar uzlādes punktu, lietotāja pieļaujamajam gaidīšanas laikam un maršruta novirzei, kā arī uzlādes punkta faktiskajai pieejamībai. Vienlaikus jāņem vērā, ka uzlādes punkts ir pieslēgts konkrētam sadales tīkla mezglam, kura noslodze un jaudas rezerve var ierobežot papildu uzlādes slodzes pieļaujamību [6], [9], [10].

Tādēļ dinamiska uzlādes punkta piešķiršana šajā promocijas darbā netiek skatīta kā vienreizējs izvēles akts. Tā tiek interpretēta kā atkārtoti izpildāms alternatīvu novērtēšanas un prioritizācijas process. Tā rezultāts var būt gan viena rekomendētā alternatīva, gan pilns

alternatīvu rangs, kur pirmais uzlādes punkts tiek piedāvāts kā primārā izvēle, bet nākamie punkti veido rezerves secību gadījumam, ja sākotnēji izvēlētā alternatīva kļūst nepieejama vai vairs neatbilst minimālajām prasībām.

Dinamiskās piešķiršanas loģika ir cieši saistīta ar reāllaika vai operatīvo datu izmantošanu. Lai lēmums būtu praktiski derīgs, modelim jāspēj izmantot aktuālus datus par *EV, EVSE*, uzlādes punktu statusu, gaidīšanas laiku, tīkla noslodzi, datu aktualitāti un drošības indikatoriem. Autora līdzautoru 2024. gada publikācijā par *EV* pārvaldības lēmumu pieņemšanas sistēmu uzsvērta viedo tehnoloģiju, *IoT*, lokālo raksturlielumu un lēmumu algoritmu nozīme *EV* uzlādes infrastruktūras pārvaldībā [11]. Šī pieeja ir būtiska arī šajā promocijas darbā, jo dinamiska uzlādes punkta piešķiršana nav iespējama bez aktuālas un uzticamas informācijas par lēmumu vidi.

No sistēmas arhitektūras viedokļa dinamiska uzlādes punkta piešķiršana ir tuva kiberfiziskas vadības ciklam, kurā dati par objektu stāvokli tiek iegūti no fiziskās infrastruktūras, pārveidoti kritērijos un izmantoti lēmuma pārrēķinam. Šāds cikls atbilst industriālā *IoT* un kritiskās infrastruktūras vadības pieejām, kur lēmumu kvalitāti nosaka ne tikai algoritms, bet arī datu avotu pieejamība, komunikācijas slāņa uzticamība un iespēja sasaistīt mērījumus ar konkrētiem infrastruktūras objektiem [44], [50], [51].

2.1.2. Atšķirība starp infrastruktūras plānošanu un dinamisku piešķiršanu

Dinamiska uzlādes punkta piešķiršana ir jānošķir no klasiskās uzlādes infrastruktūras plānošanas. Uzlādes infrastruktūras plānošanas pētījumos galvenokārt tiek analizēta staciju izvietošana, kapacitātes izvēle, pieslēguma jaudas noteikšana, teritorijas pārklājums, investīciju efektivitāte, pieprasījuma prognozēšana un ietekme uz sadales tīkla attīstību [9], [15]–[18]. Šādi uzdevumi parasti tiek risināti vidēja vai ilgtermiņa laika horizontā, un to rezultāts ir infrastruktūras attīstības vai izvietojuma plāns.

Savukārt šajā promocijas darbā uzmanības centrā nav jautājums par to, kur ilgtermiņā jāizvieto jaunas uzlādes stacijas. Darba fokuss ir operatīvs lēmums: kuru no jau pieejamajiem vai konkrētajā brīdī sasniedzamajiem uzlādes punktiem izvēlēties konkrētam *EV* noteiktā ekspluatācijas situācijā. Šajā gadījumā alternatīvas nav potenciālas nākotnes lokācijas, bet reāli uzlādes punkti, kas konkrētajā laika momentā var būt izmantojami vai neizmantojami.

Infrastruktūras plānošanā lietotājs bieži tiek modelēts agregētā līmenī, piemēram, kā pieprasījuma plūsma, transporta koridors vai teritorijas mobilitātes profils. Dinamiskā piešķiršanā lietotājs un transportlīdzeklis tiek aplūkots konkrētāk: nozīme ir konkrētajam *SOC*, nepieciešamajam enerģijas daudzumam, brauciena mērķim, laika ierobežojumam un pieļaujamajai maršruta novirzei. Tādējādi lēmuma mērogs pāriet no infrastruktūras attīstības līmeņa uz individuālu vai sesijas līmeņa izvēli.

Arī sadales tīkla loma abos uzdevumos ir atšķirīga. Plānošanas uzdevumā sadales tīkls tiek vērtēts, lai noteiktu pieslēguma iespējas, tīkla pastiprināšanas vajadzību un ilgtermiņa kapacitāti. Dinamiskā piešķiršanā sadales tīkls ir aktuālā lēmuma kritēriju avots: jāvērtē lokālā slodze, jaudas rezerve, sprieguma režīms, fāžu slodzes un potenciālais pārslodzes risks konkrētajā laika momentā [9], [10], [37]. Tas nozīmē, ka tīkla dati nav tikai plānošanas ievade, bet arī operatīvas alternatīvu prioritizācijas elements.

Šo divu uzdevumu atšķirība apkopota 2.1. tabulā.

2.1. tabula

Staciju plānošanas un dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas salīdzinājums

Aspekts	Uzlādes infrastruktūras plānošana	Dinamiska uzlādes punkta piešķiršana
Lēmuma objekts	Uzlādes staciju izvietojums, kapacitāte un pārklājums	Konkrēta uzlādes punkta izvēle konkrētam *EV*
Lēmuma mērogs	Teritorijas, pilsētas, reģiona vai sistēmas līmenis	Operatīvais vai uzlādes sesijas līmenis

Laika horizonts	Mēneši, gadi, infrastruktūras attīstības periods	Reāllaiks vai operatīvās situācijas
Alternatīvu kopa	Potenciālās lokācijas vai staciju konfigurācijas	Sasniedzamie un pieejamie uzlādes punkti laikā (t)
Galvenie kritēriji	Pārklājums, investīcijas, pieprasījuma prognoze, pieslēguma jauda, tīkla attīstība	Pieejamība, gaidīšanas laiks, *SOC*, nepieciešamā enerģija, tīkla režīms, uzticamība, kiberdrošības risks
Lietotāja loma	Agregēts pieprasījums vai mobilitātes plūsma	Individuāla vai daļēji individualizēta izvēles situācija
Tīkla loma	Pieslēgumu un pastiprināšanas vajadzību plānošana	Lokālā režīma un pieļaujamības novērtēšana konkrētajā brīdī
Lēmuma rezultāts	Infrastruktūras attīstības vai izvietojuma plāns	Prioritizēts uzlādes punktu rangs vai izvēlētais uzlādes punkts

Piezīme: tabula parāda, ka dinamiska uzlādes punkta piešķiršana nav reducējama uz klasisko staciju plānošanu, jo tā ir operatīva daudzkritēriju izvēles problēma ar īsu laika horizontu un mainīgiem ievades datiem [9], [11], [15]–[18].

Šis nošķīrums ir būtisks visai promocijas darba metodoloģijai. Infrastruktūras plānošanas literatūra sniedz pamatu izpratnei par staciju izvietojumu, kapacitāti un tīkla integrāciju, tomēr tā pilnībā neatrisina dinamiska assignment problēmu. Šajā darbā tiek piedāvāta pieeja, kas izmanto *MCDM* metodoloģiju, lai konkrētā ekspluatācijas situācijā noteiktu piemērotāko uzlādes punktu no jau eksistējošas vai konkrētajā brīdī sasniedzamas alternatīvu kopas.

2.1.3. Uzlādes punkta piešķiršana kā *MCDM* problēma

Dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas problēmu teorētiski korekti var formulēt kā daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas uzdevumu. Šādu pieeju nosaka pati uzlādes punkta izvēles būtība: alternatīvas nav iespējams pilnvērtīgi salīdzināt tikai pēc viena rādītāja. Lietotājam var būt svarīgs attālums, gaidīšanas laiks, uzlādes ātrums un cena, bet sadales tīkla skatījumā būtiski ir slodzes ierobežojumi, sprieguma režīms, pieejamā jaudas rezerve un lokālo aktīvu noslodze [6], [9]. Vienlaikus operatora un sistēmas skatījumā jāņem vērā uzlādes punkta darbspēja, datu kvalitāte, pakalpojuma nepārtrauktība un kiberdrošības riski [8], [12], [13], [22].

Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas teorijā šāda tipa uzdevumiem raksturīga alternatīvu kopa, kritēriju kopa un preferenču informācija, kas ļauj salīdzināt alternatīvas pēc vairākiem savstarpēji konfliktējošiem kritērijiem [26], [27], [29]. *EV* uzlādes punkta piešķiršanā alternatīvas ir uzlādes punkti, bet kritēriji raksturo to tehnisko, telpisko, ekspluatācijas, lietotāja, tīkla, ekonomisko, uzticamības un drošības piemērotību [6], [9], [11], [13].

Šajā darbā pieejamo alternatīvu kopa laika momentā t tiek apzīmēta ar:

$$A_t = \{a_1, a_2, \dots, a_m\} \tag{2.1}$$

kur A_t ir konkrētajā laikā sasniedzamo vai sākotnēji apsveramo uzlādes punktu kopa, bet m ir alternatīvu skaits. Katra alternatīva $a \in A_t$ tiek raksturota ar kritēriju vērtību vektoru:

$$c(a,t) = [c_1(a,t), c_2(a,t), \dots, c_n(a,t)], \tag{2.2}$$

kur $c_j(a,t)$ ir alternatīvas a vērtējums pēc j-tā kritērija laikā t, bet n ir kritēriju skaits. Šis pieraksts atbilsts *MCDM* alternatīvu, kritēriju reprezentācijas loģikai [12], [13].

Kritēriju relatīvo nozīmīgumu raksturo svaru vektors:

$$w = [w_1, w_2, \dots, w_n], \sum_{j=1}^{n} w_j = 1\,, w_j \geq 0 \tag{2.3}$$

Šajā promocijas darbā kritēriju svaru iegūšanai tiek izmantota *AHP* loģika, jo tā ļauj lēmuma problēmu strukturēt hierarhiski un noteikt kritēriju relatīvo nozīmīgumu, izmantojot ekspertu pāru salīdzinājumus [29]–[31]. Savukārt alternatīvu gala prioritizācijai tiek izmantota *PROMETHEE* pieeja, jo tā ļauj veikt alternatīvu pāru salīdzināšanu pēc vairākiem kritērijiem un iegūt interpretējamu alternatīvu rangu [27].

Vispārīgi alternatīvas kopējo daudzkritēriju novērtējumu var rakstīt kā:

$$\Phi(a,t) = F(c(a,t), w), \tag{2.4}$$

kur $\Phi(a,t)$ ir alternatīvas a prioritātes vai piemērotības novērtējums laikā t, bet $F(\cdot)$ ir izvēlētā daudzkritēriju prioritizācijas funkcija. Ja tiek izmantota *PROMETHEE* pieeja, tad $F(\cdot)$ nav vienkāršas svērtās summas modelis, bet gan pāru salīdzinājumu un pārākuma attiecību plūsmu aprēķina mehānisms [27].

Pirms alternatīvu prioritizācijas ir jāizslēdz tās alternatīvas, kuras konkrētajā laikā nav pieļaujamas tehnisku, ekspluatācijas, lietotāja, tīkla, uzticamības vai drošības nosacījumu dēļ. Tāpēc tiek nošķirta sākotnējā alternatīvu kopa A_t un pieļaujamo alternatīvu kopa A_t^{adm}, kur:

$$A_t^{adm} \subseteq A_t \tag{2.5}$$

Gala izvēli var definēt kā alternatīvu ar lielāko daudzkritēriju prioritātes vērtību pieļaujamo alternatīvu kopā:

$$a_t^* = arg \max_{a \in A_t^{adm}} \phi(a,t), \tag{2.6}$$

kur a_t^* ir izvēlētais uzlādes punkts laikā t. Šis pieraksts parāda, ka dinamiska uzlādes punkta piešķiršana nav viena kritērija optimizācijas uzdevums. Tā ir daudzkritēriju izvēles problēma, kur alternatīvas piemērotība ir atkarīga no vairāku kritēriju vērtībām, to relatīvā svarīguma un konkrētā laika momenta situācijas [6], [9], [11], [13], [27], [29], [31].

Šāda formalizācija nodrošina pamatu turpmākajām nodaļas sadaļām. 2.2. sadaļā tiek definēti lēmumu vides elementi, kas rada kritēriju vērtības. 2.3. sadaļā tiek izveidota kritēriju sistēma. 2.5. sadaļā tiek pamatota *AHP* izmantošana kritēriju svaru noteikšanai, bet 2.6. sadaļā tiek detalizēti formulēta *PROMETHEE* balstīta alternatīvu prioritizācijas loģika.

2.1.4. Uzticamības orientētas pieejas vieta lēmumu modelī

Šī promocijas darba specifiku nosaka ne tikai dinamiska piešķiršana un daudzkritēriju lēmumu pieņemšana, bet arī uz uzticamību orientēta pieeja. Uzticamība šajā darbā netiek saprasta tikai šaurā tehniskā nozīmē kā iekārtas darbspēja. Tā tiek interpretēta kā plašāka lēmuma kvalitātes dimensija, kas ietver uzlādes punkta faktisko pieejamību, pakalpojuma nepārtrauktību, datu korektumu, komunikācijas stabilitāti, drošības kontroles pietiekamību un izvēles ietekmi uz sadales tīkla darbības režīmu [8], [12], [13].

Šāda uzticamības interpretācija ir īpaši būtiska kritiskās infrastruktūras kontekstā, jo *EV* uzlādes infrastruktūra ir atkarīga no elektroapgādes, sakaru, datu apmaiņas un operatora platformu vienlaicīgas darbspējas. Kritiskās infrastruktūras un noturīgu sakaru tīklu literatūrā pakalpojuma nepārtrauktība, komunikācijas pieejamība un spēja uzturēt pieņemamu darbības līmeni traucējumu apstākļos tiek uzskatīta par būtisku sistēmas drošuma elementu [51], [52]. Tāpēc šajā darbā uzticamība tiek iekļauta ne tikai kā tehnisks *EVSE* statuss, bet arī kā lēmuma izpildāmības un informācijas ticamības dimensija.

Uz uzticamību orientēta piešķiršana nozīmē, ka uzlādes punkta izvēlei jābūt pieņemamai vienlaikus vairākās dimensijās. Izvēlētais uzlādes punkts nedrīkst būt tikai tuvākais, lētākais vai nomināli jaudīgākais. Tam jābūt tehniski piemērotam konkrētajam *EV*, faktiskajā brīdī pieejamam, lietotājam pieņemamam, drošam no datu un komunikācijas skatupunkta un neradošam pārmērīgu risku lokālajam sadales tīkla režīmam [6], [9], [11]–[13].

Autora līdzautoru 2026. gada pētījumā par kiberdrošības risku novērtēšanu *EV* uzlādes infrastruktūrā uzsvērts, ka tādi atribūti kā sistēmas pieejamība, pakalpojuma nepārtrauktība, datu integritāte, autentifikācijas drošība, droša komunikācija un draudu atklāšanas efektivitāte ir tieši saistīti ar uzlādes infrastruktūras ekspluatācijas uzticamību un lēmumu kvalitāti [13]. Līdzīgi *EV* ātro uzlādes kiberdrošības literatūrā norādīts, ka uzlādes infrastruktūras digitālie traucējumi var ietekmēt ne tikai informācijas drošību, bet arī fizisku pakalpojuma pieejamību un potenciāli arī tīkla stabilitāti [8].

NIST EV/XFC kiberdrošības profils papildus pamato, ka *EV* uzlādes infrastruktūra jāvērtē kā vairāku savstarpēji saistītu domēnu kiberfiziska sistēma, kurā mijiedarbojas *EV*, *EVSE/XFC*, mākoņpakalpojumi, trešās puses, ēku energosistēmas un komunālo pakalpojumu infrastruktūra [12]. Šāda sistēma nav droši novērtējama tikai pēc uzlādes punkta fiziskajiem parametriem. Jāņem vērā arī digitālā slāņa uzticamība, datu integritāte, komunikācijas pieejamība un incidentu ietekme uz pakalpojuma sniegšanu.

Tādējādi uzticamība šajā darbā darbojas divos līmeņos. Pirmkārt, tā ir atsevišķa kritēriju grupa, kurā ietilpst pieejamība, darbspēja, datu integritāte, komunikācijas uzticamība un drošības stāvoklis. Otrkārt, tā ir integrējošs modelēšanas princips, kas ietekmē gala alternatīvu ranga interpretāciju. Alternatīva ar labiem attāluma, cenas vai uzlādes jaudas rādītājiem nevar tikt uzskatīta par prioritāru, ja tai ir paaugstināts darbspējas, datu korektuma vai kiberdrošības risks [8], [12], [13], [22].

No lietotāja skatpunkta uzticams uzlādes punkts ir tāds, kas nodrošina prognozējamu un izpildāmu pakalpojumu. No sadales tīkla skatpunkta uzticams lēmums ir tāds, kas nepasliktina lokālo režīmu, neveicina pārslodzi un nepalielina sprieguma kvalitātes riskus [6], [9]. No operatora skatpunkta uzticamība saistīta ar datu pieejamību, stacijas statusa korektumu, kiberdrošības risku pārvaldību un spēju reaģēt uz izmaiņām uzlādes infrastruktūras ekspluatācijas laikā [8], [12], [13]. Šo skatījumu apvienošana veido promocijas darba uz uzticamību orientētā *MCDM* modeļa pamatu.

2.1.5. Problēmas robežas un pieņēmumi

Lai izstrādājamais *MCDM* modelis būtu skaidri formalizējams, nepieciešams definēt pētījuma problēmas robežas un galvenos pieņēmumus. Šajā darbā aplūkotā sistēma ietver piecus galvenos elementus: elektrisko transportlīdzekli kā lēmuma iniciatoru, uzlādes punktu kā izvēles alternatīvu, sadales tīklu kā ierobežojošo un novērtējamo slāni, lietotāju kā prasību un preferenču avotu, kā arī datu un operatora vidi kā kritēriju vērtību nodrošināšanas mehānismu [6], [9], [11], [48], [49].

Ārpus šī modeļa robežām tiek atstāta pilna mēroga ilgtermiņa uzlādes infrastruktūras investīciju optimizācija, elektroenerģijas tirgus cenu modelēšana, pilnīga reģionālās mobilitātes simulācija un visas valsts uzlādes infrastruktūras izvietojuma plānošana. Šie jautājumi ir būtiski elektromobilitātes attīstībai, taču tie nav šī promocijas darba centrālais uzdevums. Darbs fokusējas uz operatīvu vai reāllaika izvēles problēmu: kuru no pieejamajiem uzlādes punktiem konkrētā situācijā piešķirt konkrētam *EV* [9], [11], [13].

No telpiskā skatpunkta modelis ir piemērojams lokālai vai reģionālai alternatīvu telpai, kur lietotājam eksistē reāla izvēle starp vairākiem sasniedzamiem uzlādes punktiem. Ja lietotājam pieejama tikai viena alternatīva, *MCDM* prioritizācijas problēma pēc būtības nepastāv, bet paliek aktuāls jautājums par šīs alternatīvas pieļaujamību. Ja alternatīvu ir vairākas, modelis ļauj tās salīdzināt pēc vienotas kritēriju sistēmas un iegūt prioritāšu rangu.

No laika skatpunkta modelis balstās uz dinamisku datu aktualizāciju. Tas nozīmē, ka kritēriju vērtības var mainīties laikā, bet izvēles rezultāts ir derīgs konkrētajam lēmuma momentam. Šāda loģika saskan ar laikatkarīgu prioritāšu pieeju *AHP/ANP* teorijā, kur lēmuma prioritātes var tikt vispārinātas no statiskām vērtībām uz funkcijām laikā [31]. Šajā darbā pamatmodelī tiek saglabāta interpretējama struktūra: *AHP* nodrošina kritēriju svarus,

PROMETHEE veido alternatīvu rangu, bet dinamiskums tiek panākts, aktualizējot alternatīvu kopu un kritēriju vērtības.

Šajā darbā tiek pieņemts, ka lēmuma pieņemšanai nepieciešamie dati ir pieejami reāllaika vai operatīvajā režīmā pietiekamā detalizācijas pakāpē, lai aprēķinātu būtiskākās kritēriju vērtības. Tie var ietvert transportlīdzekļa stāvokli, uzlādes punkta statusu, gaidīšanas laiku, lokālo slodzes līmeni, sprieguma režīmu, pieejamo jaudas rezervi un drošības indikatorus [9], [11]–[13], [22]. Ja kāds datu slānis nav pieejams pilnā apjomā, to iespējams aizstāt ar scenāriju pieņēmumiem, ekspertu vērtējumu vai jutīguma analīzi, skaidri norādot šāda pieņēmuma ietekmi uz validācijas rezultātiem.

Lēmuma atbalsta sistēma šajā promocijas darbā tiek uztverta kā *MCDM* modeļa praktiskās realizācijas vide, nevis kā pētījuma vienīgais zinātniskais rezultāts. Tas nozīmē, ka promocijas darba zinātniskais kodols ir kritēriju sistēma, *AHP* balstīta svaru noteikšanas loģika, *PROMETHEE* prioritizācijas mehānisms, uzticamības un kiberdrošības integrācija, kā arī dinamiskās filtrēšanas un atjaunināšanas princips. Lēmuma atbalsta sistēmas funkcija ir nodrošināt šo elementu praktisku izpildi un rezultātu interpretāciju.

Apkopojot, 2.1. sadaļā dinamiska *EV* uzlādes punkta piešķiršana ir definēta kā uz uzticamību orientēta daudzkritēriju izvēles problēma, kurā lēmums tiek pieņemts starp laikā mainīgām alternatīvām, balstoties uz transportlīdzekļa, uzlādes punkta, sadales tīkla, lietotāja, datu kvalitātes un drošības kritērijiem. Šis formulējums veido pamatu nākamajām nodaļas sadaļām, kur tiek definēta lēmumu vide, kritēriju sistēma, *AHP* balstīta svaru noteikšana, *PROMETHEE* prioritizācija un dinamiskās atjaunināšanas princips [13], [27], [29], [31].

2.2. Lēmumu vides elementi un alternatīvu kopa

Dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas *MCDM* modelī lēmums netiek pieņemts izolēti tikai pēc uzlādes punkta atrašanās vietas vai tehniskās jaudas. Lēmumu vide ietver vairākus savstarpēji saistītus elementus: elektrisko transportlīdzekli, uzlādes punktu, sadales tīkla lokālo režīmu, lietotāja prasības, operatora datu vidi, kā arī uzticamības un kiberdrošības indikatorus. Šie elementi kopā veido alternatīvu novērtēšanas telpu, kur katra uzlādes punkta piemērotība ir atkarīga gan no fiziskās infrastruktūras, gan no dinamiskās ekspluatācijas situācijas [6], [9], [11]–[13], [22].

Šajā sadaļā lēmumu vide tiek aprakstīta no *MCDM* skatpunkta, nevis kā pilna lēmuma atbalsta sistēmas programmatūras arhitektūra. Tas nozīmē, ka galvenā uzmanība tiek pievērsta tam, kādi sistēmas elementi rada kritēriju vērtības, kā tie ietekmē alternatīvu kopu un kā vēlāk izmantojami *AHP–PROMETHEE* balstītā prioritizācijā [27], [29], [31]. Elektriskais transportlīdzeklis šajā modelī darbojas kā lēmuma iniciators, uzlādes punkts kā izvēles alternatīva, sadales tīkls kā ierobežojošais un novērtējamais slānis, bet datu un operatora vide kā kritēriju aktualizācijas un uzticamības avots.

2.2.1. Elektriskais transportlīdzeklis kā lēmuma iniciators

Dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas process sākas ar elektrisko transportlīdzekli un tā uzlādes nepieciešamību. *EV* šajā modelī tiek traktēts kā lēmuma iniciators, jo tieši transportlīdzekļa stāvoklis, akumulatora uzlādes līmenis, nepieciešamais enerģijas apjoms un lietotāja mobilitātes uzdevums nosaka, kad un kāpēc jāizvēlas uzlādes punkts [6], [11].

No tehniskā skatpunkta būtiskākie *EV* parametri ir akumulatora uzlādes līmenis, nepieciešamais enerģijas daudzums, atlikušais nobraukums, maksimāli pieņemamā uzlādes jauda, uzlādes savienotāja tips un transportlīdzekļa saderība ar konkrētu *AC* vai *DC* uzlādes risinājumu [10], [33]. Gudrās uzlādes literatūrā parādīts, ka uzlādes sākuma laiks, nepieciešamais enerģijas apjoms un lietotāja elastība būtiski ietekmē gan tehniskos, gan ekonomiskos uzlādes rezultātus [6]. Savukārt *EV* monitoringa un *IoT* literatūrā uzsvērts, ka

BMS dati, tostarp *SOC, SOH*, strāva, spriegums un temperatūra, var tikt izmantoti reāllaika uzraudzībai un uzlādes lēmumu atbalstam [41].

Šajā darbā *EV* stāvokli laikā t var konceptuāli aprakstīt ar vektoru:

$$x_{EV}(t) = \left[SOC(t), E_{req}(t), R_{rem}(t), P_{acc}(t), u_{pref}(t)\right], \quad (2.7)$$

kur $SOC(t)$ ir akumulatora uzlādes līmenis, $E_{req}(t)$ - nepieciešamais enerģijas daudzums līdz vēlamajam uzlādes līmenim, $R_{rem}(t)$ - atlikušā nobraukuma vai sasniedzamības raksturojums, $P_{acc}(t)$ - transportlīdzekļa pieņemamā uzlādes jauda, $u_{pref}(t)$ lietotāja preferenču un ierobežojumu kopums.

EV parametri *MCDM* modelī pilda divas funkcijas. Pirmkārt, tie nosaka alternatīvu pieļaujamību, piemēram, izslēdzot uzlādes punktus, kurus transportlīdzeklis nevar sasniegt vai ar kuriem tas nav tehniski savietojams. Otrkārt, tie ietekmē alternatīvu prioritāti, jo zemāks *SOC*, lielāks nepieciešamais enerģijas apjoms vai mazāka lietotāja laika elastība var paaugstināt tādu kritēriju nozīmi kā uzlādes jauda, gaidīšanas laiks un attālums [6], [11], [31].

Šajā kontekstā *EV* nav pasīvs slodzes objekts, bet dinamiskas lēmumu situācijas sākumpunkts. Tas nosaka gan lēmuma aktivizāciju, gan sākotnējo kandidātu kopu, gan kritēriju interpretāciju. Tādēļ *EV* stāvokļa vektors ir viens no būtiskākajiem elementiem, kas sasaista lietotāja mobilitātes vajadzības ar uzlādes infrastruktūras un sadales tīkla tehniskajiem ierobežojumiem.

2.2.2. Uzlādes punkts kā alternatīva *MCDM* modelī

MCDM modelī katrs uzlādes punkts tiek definēts kā alternatīva $a \in A_t$, kuru iespējams novērtēt pēc vienotas kritēriju sistēmas. Atšķirībā no infrastruktūras plānošanas uzdevumiem, kuros alternatīvas bieži ir potenciālās lokācijas vai staciju konfigurācijas, dinamiskas piešķiršanas uzdevumā alternatīvas ir konkrētajā laikā sasniedzami un potenciāli izmantojami uzlādes punkti [9], [15]–[18].

Uzlādes punkta piemērotību nosaka ne tikai tā atrašanās vieta vai nominālā jauda. Jāņem vērā arī faktiski pieejamā jauda, savienotāja tips, *AC/DC* uzlādes veids, stacijas aizņemtība, paredzamais gaidīšanas laiks, rezervācijas iespēja, darbspējas statuss, cena, uzlādes sesiju stabilitāte un digitālās komunikācijas uzticamība [10], [11], [22], [33]. Īpaši *DC* ātrās uzlādes un super-ātrās uzlādes gadījumā būtiska kļūst arī stacijas jaudas elektronikas, aizsardzības, standartizācijas, izolācijas kontroles un tīkla mijiedarbības loma [10].

Uzlādes punkta a stāvokli laikā *t* var aprakstīt ar vektoru:

$$x_{CP}(a,t) = \left[P_{ch}^{avail}(a,t), W(a,t), L(a), C_{conn}(a), S_{op}(a,t), p(a,t)\right], \quad (2.8)$$

kur $P_{ch}^{avail}(a,t)$ ir pieejamā uzlādes jauda, $W(a,t)$ - gaidīšanas laika vai noslodzes indikators, $L(a)$ - atrašanās vietas vai sasniedzamības raksturojums, $C_{conn}(a)$ - savienotāja un uzlādes tipa savietojamība, $S_{op}(a,t)$ - ekspluatācijas statuss, $p(a,t)$ - cena vai tarifēšanas parametrs.

Šie uzlādes punkta raksturlielumi *MCDM* modelī var darboties atšķirīgi. Savietojamība, darbspēja un minimālā pieejamība var tikt izmantota kā filtrēšanas nosacījumi, savukārt gaidīšanas laiks, cena, pieejamā jauda un attālums kā prioritizācijas kritēriji [11], [22], [27]. Tādējādi uzlādes punkts netiek vērtēts kā statiska infrastruktūras vienība, bet kā dinamiska alternatīva, kuras piemērotība mainās laikā.

Šāda interpretācija ir būtiska promocijas darba metodoloģijai. Ja uzlādes punkts tiek vērtēts tikai kā fiziska atrašanās vieta vai nominālā jauda, modelis nespēj atspoguļot ekspluatācijas realitāti. Dinamiskā piešķiršanā būtiski ir ne tikai tas, kur stacija atrodas, bet arī

vai tā konkrētajā brīdī ir pieejama, cik ilgi jāgaida, kāda jauda faktiski pieejama, vai dati ir aktuāli un vai tās izmantošana ir pieļaujama no tīkla un drošības skatupunkta.

2.2.3. Sadales tīkls kā ierobežojošais un novērtējamais slānis

Sadales tīkls dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas modelī nav ārējs fons, bet pilnvērtīgs lēmumu vides elements. Uzlādes punkta izvēle var būt lietotājam ērta, bet tehniski nevēlama, ja konkrētā pieslēguma vieta atrodas pie jau noslogota transformatora punkta, ja lokālajā tīklā pastāv sprieguma novirzes vai ja papildu uzlādes slodze palielina maksimumslodzes risku [6], [9], [37].

EV uzlādes infrastruktūras plānošanas literatūra uzsver, ka uzlādes slodze var ietekmēt transformatoru un līniju noslodzi, zudumus, sprieguma kvalitāti un nepieciešamību pēc tīkla pastiprināšanas [9]. Līdzīgi elektrotransportlīdzekļu uzlādes infrastruktūras un tās integrācijas sadales tīklā literatūrā norādīts, ka plaša mēroga uzlādes infrastruktūras attīstība pastiprina mijiedarbību starp transporta elektrifikāciju, jaudas elektroniku, sadales tīkla stabilitāti, viedo vadību un potenciāli arī tīkla pakalpojumu nodrošināšanu [10]. Tādēļ uzlādes punkta alternatīvas jāvērtē ne tikai pēc lietotāja ērtības, bet arī pēc lokālā tīkla spējas droši apkalpot papildu slodzi.

Sadales tīkla stāvokli, kas saistīts ar alternatīvu a, var aprakstīt šādi:

$$x_G(a,t) = [P_{load}(a,t), Q(a,t), U(a,t), I_{\Phi}(a,t), P_{avail}(a,t), e_G(a,t)], \quad (2.9)$$

kur $P_{load}(a,t)$ - ir lokālā aktīvā slodze, $Q(a,t)$ - reaktīvās jaudas vai jaudas koeficienta raksturojums, $U(a,t)$ - sprieguma režīms, $I_{\Phi}(a,t)$ - fāžu strāvu raksturojums, $P_{avail}(a,t)$ - pieejamā jaudas rezerve, $e_G(a,t)$ - tīkla notikumu, ierobežojumu vai uzticamības indikators.

No šiem parametriem vēlāk iespējams iegūt *MCDM* kritērijus, piemēram, noslodzes koeficientu, brīvās jaudas rezervi, sprieguma novirzes risku, fāžu nesimetriju, maksimumslodzes risku un tīkla piemērotības integrēto rādītāju. Šāda pieeja ir būtiska, lai modelis nebūtu tikai lietotāja ērtības vai uzlādes stacijas parametru salīdzinājums, bet ietvertu arī sadales tīkla ekspluatācijas ierobežojumus [6], [9], [10], [37].

Sadales tīkla iekļaušana *MCDM* modelī nenozīmē, ka vienmēr jāizvēlas tīklam visērtākā alternatīva. Tā nozīmē, ka tīkla stāvoklis kļūst par vienu no kritēriju avotiem līdzās lietotāja, uzlādes punkta un ekonomiskajiem kritērijiem. Normālā režīmā tīkla kritēriju ietekme var būt mērena, bet paaugstinātas slodzes, ierobežotas jaudas rezerves vai sprieguma riska apstākļos tie var būtiski mainīt alternatīvu rangu.

Sadales tīkla kritēriju nozīmi pastiprina arī elektroenerģijas sistēmu operatīvās vadības un atjaunojamo energoresursu integrācijas pētījumi, kuros uzsvērta jaudas rezervju, balansēšanas, frekvences un sprieguma režīma nozīme sistēmas stabilitātes nodrošināšanā [53]. Lai gan šajā promocijas darbā netiek modelēta pilna elektroenerģijas sistēmas dinamika, šī loģika pamato nepieciešamību iekļaut lokālās slodzes, jaudas rezerves un pārslodzes riska indikatorus uzlādes punkta izvēles modelī.

2.2.4. Datu un operatora vide kā lēmuma konteksts

Dinamiska *MCDM* modeļa darbība ir atkarīga no datu pieejamības, aktualitātes un ticamības. Uzlādes punkta izvēlei nepieciešamie dati var nākt no vairākiem avotiem: *EV* un *BMS*, uzlādes punkta monitoringa, uzlādes operatora platformas, rezervāciju sistēmas, sadales sistēmas operatora mērījumiem, kontrolskaitītājiem, viedajiem skaitītājiem, lokālās enerģijas pārvaldības sistēmām, lietotāja mobilās lietotnes, navigācijas sistēmām un drošības monitoringa [11]–[13], [41], [49].

Šajā kontekstā datu un operatora vide nav tikai tehnisks ievaddatu avots, bet lēmuma atbalsta sistēmas darbības pamats. Industriālās automatizācijas un *IoT* arhitektūrās būtiska nozīme ir servisu reģistrācijai, autorizācijai, datu vēstures uzkrāšanai un informācijas apmaiņai

starp lokāliem un ārējiem sistēmas elementiem [44]. Līdzīga loģika ir izmantojama arī *EV* uzlādes punkta piešķiršanas modelī: katrai alternatīvai jābūt sasaistāmai ar aktuālu statusu, mērījumu vai scenārija indikatoru, nevis tikai ar statisku tehnisko aprakstu.

Autora līdzautoru 2024. gada pētījumā *EV* pārvaldība skatīta kā viedo tehnoloģiju, *IoT*, lokālo raksturlielumu un lēmumu algoritmu integrācija [11]. Šāda pieeja ir būtiska arī šajā darbā, jo *MCDM* kritēriju vērtības nav iespējams aprēķināt tikai no statiskas staciju datubāzes. Nepieciešama datu vide, kas ļauj aktualizēt alternatīvu pieejamību, gaidīšanas laiku, lietotāja situāciju, tīkla noslodzi un drošības indikatorus [11], [13], [49].

Datu vides paplašināšanu nākotnē var sasaistīt arī ar digitālā dvīņa pieeju, kur infrastruktūras objekti, ģeotelpiskie dati, mērījumi un tehniskā stāvokļa informācija tiek apvienoti vienotā analītiskā modelī. Sadales tīkla digitālā dvīņa pētījumi parāda, ka šāda pieeja var palīdzēt infrastruktūras inspekcijā, datu integrācijā, attālinātā analīzē un uzticamākā infrastruktūras pārvaldībā [54]. Promocijas darba pamatmodelī digitālais dvīnis netiek pilnā apjomā realizēts, taču datu struktūra tiek veidota tā, lai šāda paplašināšana būtu iespējama turpmāk.

IoT-enabled EV monitoringa literatūrā uzsvērts, ka *EV* un *BMS* datu vākšana, attālināta uzraudzība, sensoru dati, *SOC/SOH* novērtējumi, bezvadu komunikācija un mākoņplatformas var nodrošināt pamatu reāllaika vai operatīvo datu lēmumu atbalstam [41]. Savukārt *IoT* un *smart industry* lēmuma atbalsta sistēmas literatūra norāda, ka sarežģītās enerģētikas un viedās pilsētvides sistēmās automatizēta lēmumu pieņemšana ir cieši saistīta ar datu ieguvi, apstrādi un interpretēšanu [49].

Datu un operatora vidi šajā modelī var raksturot ar vektoru:

$$x_D(a,t) = \left[D_{qual}(a,t), D_{age}(a,t), Com(a,t), Sec(a,t), O_{stat}(a,t)\right], \qquad (2.10)$$

kur $D_{qual}(a,t)$ ir datu kvalitātes indikators, $D_{age}(a,t)$ - datu aktualitātes vai novecošanas rādītājs, $Com(a,t)$ - komunikācijas uzticamība, $Sec(a,t)$ - drošības stāvokļa indikators, $O_{stat}(a,t)$ - operatora vai stacijas statusa informācijas pieejamība.

Šis slānis ir īpaši nozīmīgs uzticamības orientētā *MCDM* modelī. Ja dati par stacijas pieejamību, slodzi vai tīkla stāvokli ir novecojuši vai nepilnīgi, tad pat matemātiski korekts *MCDM* aprēķins var radīt nepareizu lēmumu. Tāpēc datu kvalitāte, aktualitāte un integritāte šajā darbā nav tikai tehnisks priekšnosacījums, bet daļa no uzticamības kritēriju sistēmas [8], [12], [13], [49].

Operatora vide ietekmē arī praktisko lēmuma izpildāmību. Ja uzlādes punkts ir teorētiski pieejams, bet operatora platforma nenodrošina aktuālu statusu, nav iespējama autentifikācija vai pastāv komunikācijas traucējumi, šī alternatīva var kļūt mazāk piemērota vai pat nepieļaujama. Tādēļ dinamiskā piešķiršanas modelī datu un operatora vide jāvērtē kopā ar fizisko infrastruktūru.

2.2.5. Lēmumu vides kopējais stāvoklis un alternatīvu kopa

Apvienojot iepriekš definētos elementus, katras alternatīvas a piemērotību laikā *t* var interpretēt kā funkciju no četriem galvenajiem stāvokļa blokiem: *EV* stāvokļa, uzlādes punkta stāvokļa, sadales tīkla stāvokļa un datu/operatora vides. Šo kopējo lēmumu vides stāvokli var pierakstīt šādi:

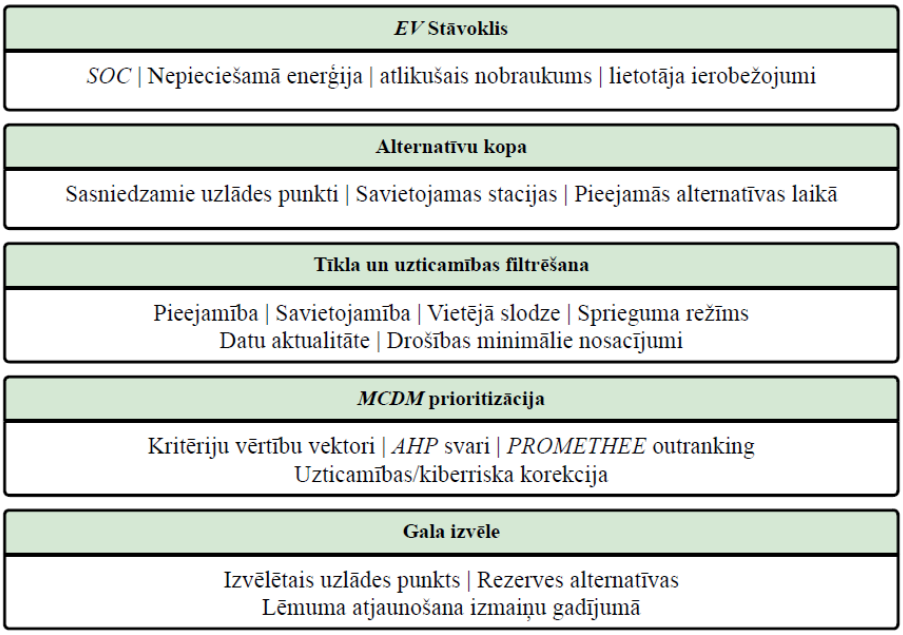
$$s(a,t) = [x_{EV}(t), x_{CP}(a,t), x_G(a,t), x_D(a,t)\,], \qquad (2.11)$$

No šī stāvokļa vektora tiek iegūtas kritēriju vērtības:

$$c(a,t) = g(s(a,t)), \qquad (2.12)$$

kur $g(\cdot)$ ir kritēriju iegūšanas vai aprēķina funkcija, kas pārveido sākotnējos tehniskos, ekspluatācijas, lietotāja, tīkla un datu parametrus *MCDM* modelī izmantojamās kritēriju vērtībās.

Lēmumu vides elementu pāreja no *EV* stāvokļa un alternatīvu kopas uz filtrēšanu, *MCDM* prioritizāciju un gala izvēli ir konceptuāli parādīta 2.1. attēlā.



2.1.att. Lēmumu vides elementi un to sasaiste ar *MCDM* prioritizāciju
Avots: autora veidots, balstoties uz [9]–[13], [27], [29], [41], [49].

Šāda formalizācija ir būtiska, jo tā nodala trīs līmeņus. Pirmajā līmenī atrodas fiziskie un digitālie dati, piemēram, *SOC*, stacijas jauda, spriegums vai komunikācijas statuss. Otrajā līmenī no šiem datiem tiek aprēķināti kritēriji, piemēram, gaidīšanas laiks, tīkla noslodzes risks vai datu uzticamība. Trešajā līmenī kritēriji tiek izmantoti *MCDM* prioritizācijā, kur *AHP* nosaka kritēriju svarus, bet *PROMETHEE* veido alternatīvu rangu [13], [27], [29], [31].

Dinamiskā modelī alternatīvu kopa A_t nav nemainīga. Tā var mainīties atkarībā no transportlīdzekļa atrašanās vietas, sasniedzamības, staciju statusa, tehniskās savietojamības, tīkla ierobežojumiem un drošības minimālajām prasībām [9], [11], [13], [22]. Tādēļ šajā darbā tiek nošķirta sākotnējā alternatīvu kopa A_t un pieļaujamo alternatīvu kopa A_t^{qdm}, kas tiek iegūta pēc filtrēšanas. Šī pieeja ļauj nodrošināt, ka *MCDM* prioritizācijā tiek salīdzinātas tikai tās alternatīvas, kuras konkrētajā brīdī ir tehniski, ekspluatācijas un drošības ziņā izmantojamas.

2.2. tabula

Lēmumu vides elementu loma dinamiskā *MCDM* modelī

Lēmumu vides elements	**Galvenie parametri**	**Loma alternatīvu kopas veidošanā**	**Loma *MCDM* prioritizācijā**
Elektriskais transportlīdzeklis	*SOC,* nepieciešamā enerģija, atlikušais nobraukums,	Nosaka, vai uzlāde ir nepieciešama un kuras	Ietekmē uzlādes steidzamību, jaudas nozīmi, attāluma

	uzlādes jaudas pieņemšana, lietotāja ierobežojumi	alternatīvas ir sasniedzamas vai savietojamas	nozīmi un gaidīšanas laika pieļaujamību
Uzlādes punkts	Pieejamā jauda, savienotājs, statuss, gaidīšanas laiks, cena, rezervācija	Izslēdz nesavietojamus, aizņemtus vai darbnespējīgus punktus	Nosaka pakalpojuma kvalitāti, ātrumu, izmaksas un lietotājam uztveramo piemērotību
Sadales tīkls	Lokālā slodze, spriegums, fāžu slodze, jaudas rezerve, notikumi	Izslēdz tehniski nepieļaujamas alternatīvas	Diferencē alternatīvas pēc tīkla ietekmes, noslodzes riska un sprieguma režīma
Datu un operatora vide	Datu aktualitāte, datu kvalitāte, komunikācijas statuss, operatora informācija, drošības indikatori	Izslēdz alternatīvas ar nepietiekamu datu vai statusa ticamību	Ietekmē uzticamības, kiberdrošības un lēmuma korektuma vērtējumu
Lietotājs	Laika ierobežojumi, maršruts, komforta robežas, elastība	Sašaurina alternatīvas pēc sasniedzamības un pieļaujamās novirzes	Maina kritēriju relatīvo nozīmi atkarībā no lietotāja situācijas

Piezīme: tabula parāda, ka dinamiskā MCDM modelī alternatīvu piemērotība veidojas no transportlīdzekļa, uzlādes punkta, sadales tīkla, datu/operatora vides un lietotāja prasību savstarpējās mijiedarbības [6], [9]–[13], [22], [27], [41], [49].

Apkopojot, šajā sadaļā definēta lēmumu vide, kurā dinamiska uzlādes punkta piešķiršana tiek formulēta kā *MCDM* problēma. *EV* nosaka lēmuma nepieciešamību, uzlādes punkts veido alternatīvu, sadales tīkls ievieš tehniskos ierobežojumus, bet datu un operatora vide nodrošina kritēriju vērtību aktualizāciju un uzticamību. Šāda struktūra veido pamatu nākamajai sadaļai, kur tiek definēta kritēriju sistēma uz uzticamību orientētai uzlādes punkta piešķiršanai.

2.3. Kritēriju sistēma uz uzticamību orientētai uzlādes punkta piešķiršanai

Dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas modelī kritēriju sistēma ir centrālais elements, kas ļauj pārvērst heterogēnus tehniskos, lietotāja, tīkla, ekonomiskos, vides, uzticamības un kiberdrošības datus salīdzināmā daudzkritēriju novērtēšanas struktūrā. Tā kā uzlādes punkta izvēle nav reducējama uz vienu rādītāju, piemēram, attālumu, cenu vai uzlādes jaudu, kritēriju sistēmai jāaptver vairāki savstarpēji saistīti lēmuma aspekti [6], [9], [11]–[13], [27].

Šajā darbā kritēriju sistēma tiek veidota kā hierarhiski strukturēta daudzkritēriju telpa. Tās augšējais līmenis ir galvenais lēmuma mērķis — izvēlēties konkrētajā laikā piemērotāko un uzticamāko uzlādes punktu. Zem šī mērķa tiek definētas kritēriju grupas un apakškritēriji, kas tālāk izmantojami *AHP* balstītai svaru noteikšanai un *PROMETHEE* balstītai alternatīvu prioritizācijai [27], [29], [31]. Kritēriju sistēmas uzdevums nav tikai aprakstīt uzlādes punktu parametrus, bet arī nodrošināt loģisku pāreju no datiem uz lēmumu.

2.3.1. Kritēriju sistēmas veidošanas principi

Kritēriju sistēmas izveidē tiek ievēroti vairāki principi. Pirmkārt, kritērijiem jāatspoguļo dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas būtība, nevis tikai infrastruktūras plānošanas loģika. Tas nozīmē, ka kritērijiem jābūt piemērotiem operatīvai vai reāllaika izvēlei starp pieejamām alternatīvām [9], [11]. Otrkārt, kritērijiem jāspēj raksturot gan statiskus parametrus, piemēram, savienotāja tipu vai pieslēguma jaudu, gan dinamiskus parametrus, piemēram, gaidīšanas laiku, uzlādes punkta aizņemtību, lokālo tīkla slodzi vai datu aktualitāti [6], [10], [22], [41].

Treškārt, kritēriju sistēmai jābūt piemērotai *AHP* un *PROMETHEE* metodoloģiskajai kombinācijai. *AHP* prasa hierarhiski strukturējamu kritēriju kopu, kurā eksperti var salīdzināt kritēriju grupas un apakškritērijus, savukārt *PROMETHEE* prasa alternatīvu vērtības pēc katra

kritērija, kritērija vēlamo virzienu un preferenču interpretāciju [27], [29]. Tādēļ katram kritērijam jābūt skaidri definētam pēc nozīmes, virziena un lomas *MCDM* modelī.

Šajā darbā kopējā kritēriju kopa tiek definēta kā vairāku kritēriju grupu apvienojums:

$$C = C_{EV} \cup C_{CP} \cup C_G \cup C_U \cup C_E \cup C_{ENV} \cup C_{SEC} \cup C_{REL}, \tag{2.13}$$

kur C_{EV} ir transportlīdzekļa kritēriji, C_{CP} - uzlādes punkta kritēriji, C_G - sadales tīkla kritēriji, C_U - lietotāja un ekspluatācijas kritēriji, C_E - ekonomiskie kritēriji, C_{ENV} - vides, RES un BESS kritēriji, C_{SEC} - kiberdrošības kritēriji, C_{REL} - uzticamības kritēriji.

Katra kritērija vērtība $c_j(a,t)$ tiek interpretēta attiecībā pret alternatīvu a un laiku t. Kritēriji var būt maksimizējami, piemēram, pieejamā jauda, jaudas rezerve, datu uzticamība vai pakalpojuma pieejamība, vai minimizējami, piemēram, attālums, gaidīšanas laiks, sprieguma novirze vai kiberriska līmenis. Tādēļ katram kritērijam tiek noteikts vēlamais virziens:

$$d_j = \begin{cases} +1, & ja\ lielākā\ kritērija\ vērtība\ ir\ vēlamāka, \\ -1, & ja\ mazākā\ kritērija\ vērtība\ ir\ vēlamāka. \end{cases} \tag{2.14}$$

Šis dalījums vēlāk ir būtisks *PROMETHEE* prioritizācijā, jo preference starp divām alternatīvām ir atkarīga ne tikai no kritēriju vērtību starpības, bet arī no tā, vai attiecīgais kritērijs ir maksimizējams vai minimizējams [27].

2.3.2. Transportlīdzekļa kritēriji

Transportlīdzekļa kritēriji raksturo konkrētā *EV* uzlādes nepieciešamību, tehniskās robežas un alternatīvu sasniedzamību. Šajā grupā ietilpst akumulatora uzlādes līmenis $SOC(t)$, nepieciešamais enerģijas daudzums $E_{req}(t)$, atlikušais nobraukums, transportlīdzekļa pieņemamā uzlādes jauda, savienotāja savietojamība un mobilitātes uzdevuma steidzamība [6], [11], [33], [41].

Šie kritēriji ne vienmēr ir alternatīvas īpašības šaurā nozīmē, jo *SOC* vai nepieciešamā enerģija ir transportlīdzekļa, nevis uzlādes punkta parametrs. Tomēr tie būtiski ietekmē alternatīvu vērtēšanu. Piemēram, ja *SOC* ir zems un nepieciešamais enerģijas daudzums ir liels, augstāku prioritāti var iegūt tie uzlādes punkti, kas nodrošina lielāku uzlādes jaudu, mazāku gaidīšanas laiku un mazāku maršruta novirzi. Savukārt, ja lietotājam ir pietiekama laika elastība, zemākas jaudas vai ekonomiski izdevīgāks uzlādes punkts var būt pieņemams [6], [11].

Transportlīdzekļa kritēriji *MCDM* modelī darbojas divos veidos. Tie var būt filtrēšanas nosacījumi, piemēram, izslēdzot uzlādes punktus, kurus *EV* nevar sasniegt vai ar kuriem tas nav tehniski savietojams. Vienlaikus tie var ietekmēt citu kritēriju interpretāciju, piemēram, paaugstinot gaidīšanas laika vai uzlādes jaudas nozīmīgumu situācijās ar zemu *SOC* [6], [31].

2.3.3. Uzlādes punkta kritēriji

Uzlādes punkta kritēriji raksturo alternatīvas spēju nodrošināt konkrētam *EV* nepieciešamo uzlādes pakalpojumu. Šajā grupā ietilpst pieejamā uzlādes jauda, *AC/DC* uzlādes veids, savienotāja tips, stacijas darbspējas statuss, aizņemtība, gaidīšanas laiks, rezervācijas iespēja, sesiju stabilitāte un stacijas tehniskā savietojamība ar transportlīdzekli [10], [11], [22], [33].

Uzlādes jauda ir būtisks kritērijs, jo tā tieši ietekmē uzlādes ilgumu un lietotāja uztverto pakalpojuma kvalitāti. Tomēr augstāka jauda ne vienmēr nozīmē labāku alternatīvu, jo tā var radīt lielāku momentāno slodzi sadales tīklam vai būt saistīta ar augstāku cenu [9], [10], [16]. Tāpēc uzlādes punkta kritēriji jāvērtē kopā ar tīkla, lietotāja un ekonomiskajiem kritērijiem.

Gaidīšanas laiks un aizņemtība ir īpaši nozīmīgi dinamiskā modelī. Uzlādes punkts var būt ģeogrāfiski tuvs un tehniski piemērots, bet konkrētajā brīdī mazāk vēlams, ja tajā ir augsta

noslodze vai paredzams ilgs gaidīšanas laiks [9], [16]. Gudrās uzlādes tehniskās verifikācijas un *M2M* komunikācijas pētījumi papildus parāda, ka uzlādes sesijas kvalitāti ietekmē arī transportlīdzekļa un stacijas komunikācijas savietojamība, profilu izpilde un komunikācijas stabilitāte [22].

Šajā darbā uzlādes punkta kritēriji tiek izmantoti gan kā pieļaujamības nosacījumi, gan kā prioritizācijas kritēriji. Piemēram, darbspējas statuss un savienotāja savietojamība var būt obligāti filtrēšanas nosacījumi, bet pieejamā jauda, gaidīšanas laiks, cena un sesijas stabilitāte, *PROMETHEE* rangēšanā izmantojami kritēriji.

2.3.4. Sadales tīkla kritēriji

Sadales tīkla kritēriji nodrošina, ka uzlādes punkta izvēle tiek vērtēta ne tikai no lietotāja vai uzlādes operatora skatpunkta, bet arī no elektroapgādes sistēmas ekspluatācijas pieļaujamības. Šajā grupā ietilpst lokālā slodze, transformatora vai pieslēguma noslodzes koeficients, brīvā jaudas rezerve, sprieguma režīms, fāžu nesimetrija, maksimumslodzes risks, kritisko mezglu statuss un tīkla notikumu vēsture [6], [9], [10], [37].

Sadales tīkla kritēriji ir īpaši būtiski uz uzticamību orientētai pieejai, jo tie ļauj novērst situāciju, kur lietotājam šķietami optimāla izvēle pasliktina lokālo tīkla režīmu. Piemēram, uzlādes punkts ar īsu gaidīšanas laiku un augstu jaudu var būt mazāk vēlama alternatīva, ja tas pieslēgts jau noslogotam transformatora punktam vai ja konkrētajā mezglā pastāv sprieguma novirzes risks [6], [9].

Tīkla kritēriji dinamiskā uzlādes punkta piešķiršanas modelī var tikt izmantoti vairākos veidos. Ja lokālā slodze vai sprieguma režīms pārsniedz pieļaujamas robežas, alternatīva var tikt izslēgta filtrēšanas posmā. Ja tīkla noslodze ir paaugstināta, bet vēl pieļaujama, tā var samazināt alternatīvas prioritāti *PROMETHEE* aprēķinā. Šāda pieeja ļauj integrēt sadales tīkla režīmu lēmumā, nepārvēršot modeli par tīri tehnisku tīkla optimizācijas uzdevumu.

Sadales tīkla kritēriju iekļaušana ir būtiska arī tādēļ, ka *EV* uzlāde ir laikā un telpiski nevienmērīga slodze. Pilsētu, piepilsētu un reģionālos mezglos tīkla ierobežojumi var būt atšķirīgi, tāpēc viena un tā pati uzlādes jauda dažādos tīkla punktos var radīt atšķirīgu ietekmi. Tādēļ dinamiskā *MCDM* modelī uzlādes punkta izvēle jāsaista ar konkrētā lokālā tīkla stāvokli laikā t.

2.3.5. Lietotāja un ekspluatācijas kritēriji

Lietotāja un ekspluatācijas kritēriji raksturo alternatīvas praktisko pieņemamību konkrētajā mobilitātes situācijā. Šajā grupā ietilpst attālums līdz uzlādes punktam, brauciena laiks, maršruta novirze, pieļaujamais gaidīšanas laiks, laika elastība, komforta robežas un lietotāja individuālās preferences [6], [9], [11].

Šie kritēriji nodrošina, ka modelis nekļūst par tīkla vai operatora optimizācijas instrumentu, kas ignorē lietotāja vajadzības. *EV* uzlādes pārvaldībā lietotājs nav pasīvs elements, jo uzlādes sākuma laiks, nepieciešamais enerģijas apjoms un pieļaujamā elastība būtiski ietekmē uzlādes procesa tehniskos un ekonomiskos rezultātus [6]. Tāpēc dinamiskā uzlādes punkta piešķiršanā lietotāja kritēriji jāiekļauj jau kritēriju sistēmas līmenī, nevis tikai kā ārējs ierobežojums pēc aprēķina.

No *MCDM* skatpunkta lietotāja kritēriji bieži konfliktē ar tīkla un uzticamības kritērijiem. Piemēram, lietotājam ērtākais punkts var būt tuvākais, bet tīkla skatījumā piemērotākais, tālāks punkts ar lielāku jaudas rezervi. Lētākā alternatīva var prasīt ilgāku gaidīšanu, bet ātrākā alternatīva var būt dārgāka vai radīt lielāku tīkla noslodzi. Šāda konfliktējošu kritēriju struktūra ir tipiska *MCDM* problēmām un pamato *PROMETHEE* tipa prioritizācijas metodes izmantošanu [27].

2.3.6. Ekonomiskie, vides un *RES/BESS* kritēriji

Ekonomiskie kritēriji raksturo uzlādes izmaksas un resursu izmantošanas efektivitāti. Šajā grupā ietilpst uzlādes cena, tarifu struktūra, operatora izmaksas, rezervācijas izmaksas, iespējamais cenu signāls un izmaksu prognozējamība [6], [9], [11]. Zemāka cena var paaugstināt alternatīvas pievilcību, tomēr tā ne vienmēr sakrīt ar īsāko gaidīšanas laiku, augstāko uzlādes jaudu vai labāko tīkla režīmu.

Vides un energoresursu kritēriji raksturo iespēju izmantot lokāli pieejamu atjaunojamo enerģiju*, BESS* jaudas rezervi vai citu elastības resursu, kas var mazināt uzlādes slodzes ietekmi uz sadales tīklu [10], [38]–[40]. Autora līdzautoru 2022. gada pētījumā par ātrās uzlādes stacijas integrāciju ar atjaunojamiem energoresursiem parādīta uzlādes infrastruktūras un *RES* integrācijas nozīme uzlādes sistēmas enerģētiskajā attīstībā [38]. *BESS* literatūra papildus norāda, ka akumulācijas sistēmas var izlīdzināt *PV* un vēja ģenerācijas svārstības, palielināt atjaunojamo resursu izmantojamību, nodrošināt aktīvās un reaktīvās jaudas funkcijas un mazināt ietekmi uz tīkla stabilitāti [39], [40].

Dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas modelī *RES/BESS* pieejamība var darboties kā pozitīvs kritērijs, ja konkrētais uzlādes punkts vai lokālais mezgls spēj izmantot vietējo ģenerāciju vai uzkrāto enerģiju. Tomēr šis kritērijs jāvērtē uzmanīgi, jo *BESS* izmantošanu ierobežo akumulatora *SOC* robežas, uzlādes/izlādes jaudas limits, akumulatora nolietojums un vadības stratēģija [39], [40]. Tādēļ *RES/BESS* kritērijs šajā darbā tiek interpretēts nevis kā absolūta priekšrocība, bet kā kontekstuāls enerģētiskās elastības indikators.

2.3.7. Drošības/kiberdrošības kritēriji

Drošības un kiberdrošības kritēriji raksturo alternatīvas piemērotību no digitālās uzticamības, datu aizsardzības un kiberfiziskās noturības skatpunkta. Šajā grupā ietilpst autentifikācijas drošums, piekļuves kontrole, datu integritāte, komunikācijas drošība, operatora platformas pieejamība, maksājumu drošība, incidentu atklāšanas spēja un pakalpojuma pieejamības risks [8], [12], [13].

EV uzlādes infrastruktūra arvien vairāk darbojas kā kiberfiziska sistēma, kur fiziskā elektroenerģijas nodošana ir cieši saistīta ar digitālo komunikāciju, lietotāja identifikāciju, operatora platformām, mākoņpakalpojumiem un maksājumu sistēmām [8], [12], [13]. Tas nozīmē, ka uzlādes punkts var būt tehniski pieejams un lietotājam ērts, bet mazāk vēlams, ja pastāv paaugstināts datu integritātes, autentifikācijas vai komunikācijas risks.

Autora līdzautoru 2026. gada pētījumā kiberdrošības risku novērtēšanai *EV* uzlādes infrastruktūrā izmantota *AHP–PROMETHEE* pieeja, kur drošības atribūti tiek strukturēti un prioritizēti pēc to ietekmes uz infrastruktūras slāņiem [13]. Šī loģika ir tieši pārnesama uz dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas modeli, kur kiberdrošības kritēriji var darboties gan kā filtrēšanas sliekšņi, gan kā prioritizācijas kritēriji.

Šajā darbā kiberdrošības kritēriji nav ārējs audits pēc gala izvēles. Tie tiek integrēti pašā lēmuma modelī, lai alternatīvas ar paaugstinātu digitālo vai komunikācijas risku netiktu automātiski uzskatītas par piemērotām tikai tāpēc, ka tās ir tuvas, lētas vai jaudīgas.

2.3.8. Uzticamības kritēriji

Uzticamības kritēriji šajā promocijas darbā ir cieši saistīti ar visām iepriekšējām kritēriju grupām. Tie ietver stacijas faktisko pieejamību, darbspēju, pakalpojuma nepārtrauktību, datu aktualitāti, komunikācijas stabilitāti, uzlādes sesijas pabeigšanas paredzamību, lēmuma korektumu un tīkla darbības pieļaujamību [8], [12], [13], [22].

Atšķirībā no atsevišķiem tehniskajiem kritērijiem uzticamība nav tikai viens rādītājs. Tā ir integrējoša dimensija, kas raksturo, vai izvēlētais uzlādes punkts spēs nodrošināt paredzamu un drošu rezultātu konkrētajā situācijā. Tādēļ uzticamības kritēriji var būt gan tieši izmērāmi,

piemēram, *service uptime* vai notikumu biežums, gan atvasināti, piemēram, datu ticamība, lēmuma stabilitāte vai kombinēts risku samazināšanas rādītājs [13].

Uzticamības kritēriju iekļaušana ļauj nošķirt šķietami piemērotu alternatīvu no praktiski drošas un izpildāmas alternatīvas. Piemēram, uzlādes punkts var būt ģeogrāfiski tuvs un ar augstu nominālo jaudu, bet tā prioritātei jābūt zemākai, ja operatora dati ir novecojuši, komunikācija nestabila vai stacijai ir paaugstināts nepieejamības risks. Tādēļ uzticamība šajā darbā tiek interpretēta kā lēmuma kvalitātes šķērsgriezuma dimensija.

Šajā sadaļā uzticamības kritēriji tiek definēti kā kritēriju sistēmas daļa, bet to detalizēta integrācija kopā ar kiberdrošības indikatoriem tiek izklāstīta 2.4. sadaļā. Šāda secība ir būtiska, jo vispirms jānosaka, kādas kritēriju grupas veido *MCDM* modeli, un tikai pēc tam jāprecizē, kā uzticamība darbojas kā filtrēšanas, prioritizācijas vai korekcijas slānis.

2.3.tabula

Kritēriju sistēma dinamiskai *EV* uzlādes punkta piešķiršanai

Kritēriju grupa	**Tipiskie apakškritēriji**	**Kritērija virziens**	**Loma *MCDM* modelī**	**Galvenie avoti**
Transportlīdzekļa kritēriji	*SOC*, nepieciešamā enerģija, atlikušais nobraukums, pieņemamā uzlādes jauda, savietojamība	Atkarīgs no kritērija; *SOC* deficīts minimizējams, savietojamība obligāta	Nosaka uzlādes nepieciešamību, pieļaujamās alternatīvas un kritēriju interpretāciju	[6], [11], [33], [41]
Uzlādes punkta kritēriji	Pieejamā jauda, gaidīšanas laiks, aizņemtība, savienotājs, statuss, rezervācija	Jauda un pieejamība maksimizējama; gaidīšanas laiks minimizējams	Raksturo uzlādes pakalpojuma kvalitāti un tehnisko piemērotību	[10], [11], [22], [33]
Sadales tīkla kritēriji	Noslodzes koeficients, jaudas rezerve, sprieguma novirze, fāžu nesimetrija, maksimumslodzes risks	Jaudas rezerve maksimizējama; noslodze un novirzes minimizējamas	Nodrošina tīkla režīma pieļaujamības un ietekmes novērtēšanu	[6], [9], [10], [37]
Lietotāja un ekspluatācijas kritēriji	Attālums, brauciena laiks, maršruta novirze, pieļaujamais gaidīšanas laiks, elastība	Attālums, kavējums un novirze minimizējami; elastība maksimizējama	Nodrošina alternatīvas praktisko pieņemamību lietotājam	[6], [9], [11]
Ekonomiskie kritēriji	Uzlādes cena, tarifu struktūra, rezervācijas izmaksas, izmaksu prognozējamība	Parasti minimizējami	Diferencē alternatīvas pēc izmaksu pieņemamības	[6], [9], [11]
Vides un *RES/BESS* kritēriji	*RES* pieejamība, *BESS SOC*, lokālā enerģijas elastība, neto slodzes samazinājums	*RES/BESS* pieejamība maksimizējama; tīkla ietekme minimizējama	Raksturo alternatīvas enerģētisko elastību un potenciālu mazināt tīkla slodzi	[10], [38]–[40]
Drošības/kiberdrošības kritēriji	Autentifikācija, piekļuves kontrole, datu integritāte, komunikācijas drošība, incidentu risks	Drošības līmenis maksimizējams; risks minimizējams	Nodrošina digitālās uzticamības un kiberfiziskās noturības novērtēšanu	[8], [12], [13]
Uzticamības kritēriji	Pieejamība, darbspēja, service uptime, datu aktualitāte, lēmuma stabilitāte	Uzticamība maksimizējama; atteikumu risks minimizējams	Kalpo kā šķērsgriezuma kvalitātes dimensija un var ietekmēt gala prioritāti	[8], [12], [13], [22]

Piezīme: kritēriju sistēma ir veidota tā, lai vienā MCDM novērtēšanas telpā integrētu transportlīdzekļa, uzlādes punkta, sadales tīkla, lietotāja, ekonomiskos, vides, drošības un uzticamības faktorus. Kritēriju relatīvais nozīmīgums tālāk tiek noteikts ar AHP, bet alternatīvu prioritizācija ar PROMETHEE [27], [29], [31].

Apkopojot, kritēriju sistēma šajā darbā veido pāreju no lēmumu vides apraksta uz formālu *MCDM* modeli. Tā nodrošina, ka uzlādes punkta alternatīvas tiek vērtētas nevis pēc

viena dominējoša parametra, bet pēc savstarpēji saistītu kritēriju kopas. Šāda struktūra ir nepieciešama, lai nākamajā sadaļā varētu precizēt uzticamības un kiberdrošības indikatoru darbību *MCDM* modelī, kā arī vēlāk definēt *AHP* svarošanas un *PROMETHEE* prioritizācijas procedūru.

2.4. Uzticamības un kiberdrošības indikatoru integrācija *MCDM* modelī

Dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas modelī uzticamība un kiberdrošība nav ārēji Dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas modelī uzticamība un kiberdrošība nav ārēji papildinājumi, kurus vērtē tikai pēc gala lēmuma pieņemšanas. Tie ir lēmumu vidi ietekmējoši faktori, kas var noteikt, vai konkrēts uzlādes punkts vispār ir pieļaujams, kā tas tiek salīdzināts ar citām alternatīvām un kā interpretējams tā gala prioritātes vērtējums. Šī iemesla dēļ uzticamības un kiberdrošības indikatori šajā darbā tiek integrēti pašā *MCDM* modelī.

Uzticamības orientēta pieeja nozīmē, ka uzlādes punkta piemērotība tiek vērtēta ne tikai pēc lietotāja ērtības, uzlādes jaudas vai cenas, bet arī pēc tā, vai alternatīva spēj nodrošināt prognozējamu, drošu un izpildāmu pakalpojumu konkrētajā laikā. Savukārt kiberdrošības integrācija nozīmē, ka lēmuma modelī tiek ņemti vērā digitālās infrastruktūras riski: autentifikācijas drošums, datu integritāte, komunikācijas uzticamība, operatora platformas darbspēja un iespējamā kiberincidentu ietekme uz pakalpojuma pieejamību [8], [12], [13], [24], [25].

Uzticamības un kiberdrošības indikatoru integrācija *MCDM* modelī ir pamatota ar to, ka *EV* uzlādes infrastruktūra darbojas kā kritiskās infrastruktūras un digitālas komunikācijas sistēmas saskarne. Sakaru tīklu noturības pētījumos uzsvērts, ka pakalpojuma pieejamība jāvērtē ne tikai normālā režīmā, bet arī traucējumu, degradācijas vai koordinētu atteiču apstākļos [52]. Tāpēc šajā darbā kiberdrošības un datu kvalitātes rādītāji tiek interpretēti nevis kā ārējs kontroles saraksts, bet kā faktori, kas var mainīt alternatīvu pieļaujamību un prioritāti.

2.4.1. Uzticamība kā šķērsgriezuma dimensija

Uzticamība šajā promocijas darbā tiek interpretēta plašāk nekā tikai uzlādes iekārtas tehniskā darbspēja. Tā ietver vairākas savstarpēji saistītas dimensijas: fizisko pieejamību, pakalpojuma nepārtrauktību, datu aktualitāti, komunikācijas stabilitāti, sadales tīkla režīma pieļaujamību un digitālās vides drošumu. Tādēļ uzticamība darbojas kā šķērsgriezuma dimensija, kas savieno uzlādes punkta tehnisko, ekspluatācijas, tīkla un kiberdrošības novērtējumu.

No lietotāja skatpunkta uzticamība nozīmē, ka izvēlētais uzlādes punkts būs faktiski pieejams, darbosies bez būtiskiem traucējumiem un nodrošinās paredzamu uzlādes sesijas izpildi. No operatora skatpunkta uzticamība ir saistīta ar stacijas darbspēju, datu korektumu, rezervācijas un norēķinu sistēmas darbību, kā arī ar spēju uzturēt pakalpojumu mainīgos ekspluatācijas apstākļos. No sadales tīkla skatpunkta uzticams lēmums ir tāds, kas nerada pārmērīgu lokālo slodzi, nepastiprina sprieguma novirzes un nepalielina pārslodzes risku [6], [9], [10].

Tādējādi uzticamība šajā modelī veido sasaisti starp fizisku darbspēju, datu ticamību un sistēmas noturību. Šāda interpretācija ir būtiska, jo dinamiskā piešķiršanā kļūdaini vai novecojuši dati var radīt tikpat nepiemērotu lēmumu kā tehniski nedarbspējīga uzlādes iekārta. Tāpēc datu aktualitāte, komunikācijas stabilitāte un operatora sistēmas darbspēja tiek skatītas kā pilnvērtīgi uzticamības komponenti [51], [52].

Šāda interpretācija ir būtiska, jo dinamiskā uzlādes punkta izvēlē matemātiski augsts alternatīvas vērtējums nav pietiekams, ja pastāv augsts neveiksmīgas izpildes risks. Piemēram, uzlādes punkts var būt tuvs un jaudīgs, bet tam var būt zema datu aktualitāte vai nestabila komunikācija. Šādā gadījumā alternatīva nedrīkst automātiski saņemt augstu prioritāti tikai tehnisko vai ģeogrāfisko priekšrocību dēļ.

2.4.2. Kiberdrošības indikatoru izvēle

Kiberdrošības indikatoru izvēle balstās uz *EV* uzlādes infrastruktūras kiberfizisko raksturu. Mūsdienu uzlādes infrastruktūrā mijiedarbojas *EV, EVSE*, operatora platformas, lietotāja mobilās lietotnes, maksājumu sistēmas, mākoņpakalpojumi, komunikācijas protokoli un elektroapgādes sistēmas. Šāda savienotība palielina sistēmas funkcionalitāti, bet vienlaikus paplašina potenciālo ievainojamības virsmu [8], [12], [13].

NIST EV/XFC kiberdrošības profils uzsver, ka uzlādes infrastruktūra jāvērtē kā savstarpēji saistītu domēnu sistēma, kur būtiska nozīme ir pieejamībai, integritātei, autentifikācijai, komunikācijas drošībai un incidentu pārvaldībai [12]. *ENISA* apdraudējumu ainava papildus norāda uz tādiem digitālās vides riskiem kā ļaunprogrammatūra, izspiedējprogrammatūra, sociālā inženierija, datu apdraudējumi, piegādes ķēdes riski un pakalpojuma pieejamības traucējumi [24]. *ISO/SAE 21434* tipa kiberdrošības un riska pārvaldības pieejas savukārt pamato nepieciešamību identificēt apdraudējumus, novērtēt to ietekmi un sasaistīt drošības prasības ar sistēmas funkcijām [25].

Šajā darbā kiberdrošības kritēriji tiek grupēti vairākās apakšdimensijās: autentifikācija un piekļuves kontrole, datu integritāte, komunikācijas drošība, pakalpojuma pieejamības risks, incidentu atklāšanas un reakcijas spēja, maksājumu un lietotāja datu aizsardzība, kā arī trešo pušu un piegādes ķēdes risks. Autora un līdzautoru 2026. gada publikācijā par *EV* uzlādes infrastruktūras kiberdrošības riska novērtēšanu *AHP* un *PROMETHEE* metodes izmantotas kiberdrošības atribūtu svēršanai un prioritizācijai, kas veido tiešu metodoloģisku sasaisti ar šajā darbā izstrādāto *MCDM* pieeju [13].

2.4.3. Uzticamības un kiberriska rādītāju formulējums

Lai uzticamības un kiberdrošības aspektus varētu integrēt *MCDM* modelī, nepieciešams tos izteikt kā salīdzināmus indikatorus. Šajā darbā uzticamības kopējo rādītāju alternatīvai a laikā t var konceptuāli definēt kā svērtu uzticamības apakšindikatoru summu:

$$R_{rel}(a,t) = \sum_{r=1}^{q} a_r \tilde{r}_r(a,t), \qquad \sum_{r=1}^{q} a_r = 1,\ a_r \geq 0 \tag{2.15}$$

kur $R_{rel}(a,t)$ - alternatīvas uzticamības novērtējums, $\tilde{r}_r(a,t)$ - normalizēta uzticamības apakšindikatora vērtība, a_r - attiecīgā apakšindikatora svars, q - uzticamības apakšindikatoru skaits.

Uzticamības apakšindikatori var ietvert stacijas darbspēju, pakalpojuma pieejamību, datu aktualitāti, komunikācijas stabilitāti, sesijas izpildes paredzamību un lokālā tīkla pieļaujamību. Ja $R_{rel}(a,t)$ ir augstāks, alternatīva tiek uzskatīta par uzticamāku.

Savukārt kiberdrošības risku var formulēt kā svērtu risku apakšindikatoru summu:

$$\rho_{cyb}(a,t) = \sum_{l=1}^{p} \beta_l \tilde{\rho}_l(a,t), \qquad \sum_{l=1}^{p} \beta_l = 1, \beta_l \geq 0 \tag{2.16}$$

kur $\rho_{cyb}(a,t)$ ir alternatīvas kiberriska novērtējums, $\tilde{\rho}_l(a,t)$ - normalizēta l-tā kiberriska indikatora vērtība, β_l ir šī indikatora relatīvais svars, p - kiberdrošības riska apakšindikatoru skaits.

Atšķirībā no uzticamības rādītāja, kiberriska rādītājam zemāka vērtība ir vēlamāka.

Šādi definēti rādītāji ļauj uzticamību un kiberdrošību izmantot gan kā neatkarīgus *MCDM* kritērijus, gan kā filtrēšanas vai gala prioritātes korekcijas elementus. Vienlaikus jāņem vērā, ka šie rādītāji nedrīkst radīt dubultu uzskaiti. Ja uzticamības un kiberdrošības apakškritēriji jau ir iekļauti *PROMETHEE* kritēriju kopā, tad gala korekcijas slānī tos jāizmanto piesardzīgi vai tikai specifiskos scenārijos.

2.4.4. Indikatoru normalizācija un virziens

Tā kā uzticamības un kiberdrošības indikatori var būt izteikti dažādās mērvienībās un skalās, pirms to izmantošanas *MCDM* modelī nepieciešama normalizācija. Normalizācijas mērķis ir pārveidot indikatorus salīdzināmā intervālā, piemēram, $[0; 1]$, kur vērtība tuvāk 1 norāda uz labvēlīgāku stāvokli, bet vērtība tuvāk 0 uz nelabvēlīgāku stāvokli.

Benefit tipa indikatoriem, kuros lielāka vērtība ir vēlamāka, normalizāciju var formulēt šādi:

$$\tilde{x}_j(a,t) = \frac{x_j(a,t) - x_j^{min}}{x_j^{max}(t) - x_j^{min}}, \tag{2.17}$$

savukārt *cost* tipa indikatoriem, kuros mazāka vērtība ir vēlamāka, normalizāciju var formulēt šādi:

$$\tilde{x}_j(a,t) = \frac{x_j^{max}(t) - x_j(a,t)}{x_j^{max} - x_j^{min}}, \tag{2.18}$$

Šie formulējumi ir konceptuāli un vēlāk 3. nodaļā tiek operacionalizēti atbilstoši konkrēto datu īpašībām. Šajā nodaļā būtiski ir parādīt, ka uzticamības un kiberdrošības indikatoriem jābūt savietojamiem ar kopējo *MCDM* kritēriju telpu. Piemēram, datu aktualitāte, komunikācijas uzticamība un pakalpojuma pieejamība ir *benefit* tipa kritēriji, bet kiberriska līmenis, datu novecošanās un incidentu risks *cost* tipa kritēriji.

Normalizācija ir īpaši svarīga *PROMETHEE* pieejā, kur alternatīvas tiek salīdzinātas pēc kritēriju vērtību starpībām. Ja kritēriji nav savietojami mērogā vai virzienā, preferenču funkcijas var radīt neinterpretējamus rezultātus. Tādēļ pirms alternatīvu prioritizācijas jānodrošina, ka visi kritēriji ir skaidri definēti pēc virziena, skalas un praktiskās nozīmes [27].

2.4.5. Integrācijas veidi *MCDM* modelī

Uzticamības un kiberdrošības indikatorus *MCDM* modelī iespējams integrēt trīs līmeņos. Pirmais līmenis ir filtrēšana. Šajā gadījumā alternatīva tiek izslēgta no tālākas vērtēšanas, ja tā neatbilst minimālajiem tehniskajiem, uzticamības vai drošības nosacījumiem. Piemēram, ja uzlādes punkts ir nedarbspējīgs, dati par tā statusu nav pietiekami aktuāli vai kiberriska līmenis pārsniedz pieļaujamu slieksni, šī alternatīva netiek iekļauta pieļaujamo alternatīvu kopā.

Pieļaujamo alternatīvu kopu var konceptuāli definēt šādi:

$$A_t^{adm} = \left\{ a \in A_t \middle| \begin{matrix} h_{tech}(a,t) = 1, h_G(a,t) = 1, \\ h_{rel}(a,t) = 1, h_{sec}(a,t) = 1 \end{matrix} \right\}, \tag{2.19}$$

kur $h_{tech}(a,t)$ raksturo tehnisko pieļaujamību, $h_G(a,t)$ - tīkla pieļaujamību, $h_{rel}(a,t)$ - minimālo uzticamības līmeni, $h_{sec}(a,t)$ - minimālo drošības līmeni.

Otrais integrācijas līmenis ir uzticamības un kiberdrošības indikatoru iekļaušana tieši *MCDM* kritēriju kopā. Šajā gadījumā datu aktualitāte, komunikācijas uzticamība, autentifikācijas drošums vai kiberriska līmenis tiek vērtēti līdzās attālumam, gaidīšanas laikam, uzlādes jaudai, cenai un tīkla noslodzei. Šāda pieeja ir metodoloģiski tīra, jo visas alternatīvas tiek salīdzinātas pēc vienotas kritēriju sistēmas.

Trešais integrācijas līmenis ir gala prioritātes korekcija. Ja sākotnējais PROMETHEE neto plūsmas rezultāts tiek apzīmēts ar $\phi(a,t)$, tad kiberriska korekciju var pierakstīt šādi:

$$\Phi_{adj}(a,t) = \phi(a,t) - \lambda \rho_{cyb}(a,t), \tag{2.20}$$

kur $\Phi_{adj}(a,t)$ ir riskam pielāgotā alternatīvas prioritāte, $\phi(a,t)$ - *PROMETHEE neto* plūsma, $\rho_{cyb}(a,t)$ - kiberriska novērtējums, λ - riska jutīguma koeficients.

Ja uzticamības rādītājs nav tieši iekļauts *PROMETHEE* kritērijos, iespējams izmantot paplašinātu korekcijas formu:

$$\Phi_{adj}(a,t) = \phi(a,t) + \mu R_{rel}(a,t) - \lambda \rho_{cyb}(a,t), \tag{2.21}$$

kur μ ir uzticamības pozitīvās korekcijas koeficients.

Šī formula izmantojama tikai tad, ja uzticamība un kiberrisks nav jau pilnvērtīgi iekļauti pamata kritēriju kopā. Pretējā gadījumā pastāv dubultas ieskaites risks.

2.4.tabula

Uzticamības un kiberdrošības indikatoru integrācija *MCDM* modelī

Integrācijas līmenis	Funkcija modelī	Piemēri	Ietekme uz lēmumu
Filtrēšana	Izslēdz nepieļaujamas alternatīvas	nedarbspējīga stacija, novecojuši dati, nepieļaujams kiberrisks	Alternatīva netiek iekļauta A_t^{adm}
MCDM kritēriji	Salīdzina pieļaujamās alternatīvas pēc uzticamības un drošības	datu aktualitāte, komunikācijas stabilitāte, autentifikācijas drošums	Ietekmē *PROMETHEE* rangu
Gala prioritātes korekcija	Samazina vai palielina gala prioritāti pēc riska/uzticamības rādītājiem	kiberriska penalizācija, uzticamības bonuss	Maina riskam pielāgoto rangu

Apkopojot, uzticamības un kiberdrošības integrācija ļauj paplašināt klasisku *MCDM* modeli tā, lai uzlādes punkta izvēle nebūtu balstīta tikai uz lietotāja ērtību vai tehniskiem parametriem. Tā nodrošina, ka alternatīvas tiek vērtētas arī pēc to spējas nodrošināt uzticamu, datu ziņā korektu, komunikācijas ziņā stabilu un kiberfiziski drošu uzlādes pakalpojumu.

2.5. *AHP* balstīta kritēriju hierarhija un svaru noteikšanas princips

AHP šajā promocijas darbā tiek izmantota kā kritēriju strukturēšanas un svaru noteikšanas metode. Tā nav gala alternatīvu izvēles metode, bet nodrošina svaru vektoru, kas tālāk tiek izmantots *PROMETHEE* alternatīvu prioritizācijā. Šāds metožu sadalījums ir būtisks, jo tas ļauj nodalīt ekspertu preferenču strukturēšanu no konkrētā laika momentā pieejamo alternatīvu operatīvas rangēšanas [27], [29]–[31].

2.5.1. *AHP* vieta uzlādes punkta piešķiršanas *MCDM* modelī

Dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas problēmā kritēriju skaits ir liels, un tie aptver vairākas atšķirīgas dimensijas: transportlīdzekli, uzlādes punktu, lietotāju, sadales tīklu, ekonomiku, *RES/BESS*, uzticamību un kiberdrošību. Šādos apstākļos svaru noteikšana bez strukturētas pieejas var kļūt subjektīva un nepārskatāma. *AHP* ļauj šo problēmu sadalīt hierarhijā un noteikt kritēriju relatīvo nozīmīgumu ar pāru salīdzinājumiem [29].

Šajā darbā *AHP* tiek izmantota, lai noteiktu kritēriju svarus, kuri vēlāk veido svaru vektoru w. *AHP* svaru izmantošana nodrošina, ka *PROMETHEE* prioritizācijā katrs kritērijs netiek uzskatīts par vienādi nozīmīgu, bet tā ietekme atbilst ekspertu noteiktai vai scenārijā definētai prioritāšu struktūrai.

2.5.2. Kritēriju hierarhijas definēšana

AHP hierarhija šajā darbā sastāv no četriem līmeņiem. Pirmajā līmenī atrodas galvenais mērķis uz uzticamību orientēta piemērotākā *EV* uzlādes punkta izvēle laikā t. Otrajā līmenī atrodas kritēriju grupas: transportlīdzekļa, uzlādes punkta, sadales tīkla, lietotāja, ekonomiskie, vides/*RES/BESS*, kiberdrošības un uzticamības kritēriji. Trešajā līmenī atrodas apakškritēriji, piemēram, gaidīšanas laiks, jaudas rezerve, datu aktualitāte vai autentifikācijas drošums. Ceturtajā līmenī atrodas alternatīvas konkrētajā laikā pieļaujamie uzlādes punkti.

Svarīgi uzsvērt, ka šajā darbā *AHP* netiek izmantota, lai tieši izvēlētos alternatīvu. Alternatīvu skaits un vērtības mainās laikā, tāpēc gala rangēšanai piemērotāka ir *PROMETHEE* metode. *AHP* nodrošina stabilu un interpretējamu kritēriju svaru struktūru, bet *PROMETHEE* izmanto šos svarus konkrētā alternatīvu kopā.

2.5.3. Pāru salīdzinājumu matrica

AHP pamatā ir pāru salīdzinājumu matrica, kur eksperti salīdzina kritērijus pa pāriem un nosaka, cik lielā mērā viens kritērijs ir nozīmīgāks par otru. Matricu var pierakstīt šādi:

$$A = a_{ij}, i, j = 1, \dots, K, \tag{2.22}$$

kur K ir salīdzināmo kritēriju vai kritēriju grupu skaits, a_{ij} raksturo i-tā kritērija relatīvo nozīmīgumu attiecībā pret j-to kritēriju.

AHP pāru salīdzinājumu matricā simetriski pret galveno diagonāli novietotie elementi ir savstarpēji apgriezti:

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}, a_{ii} = 1, \tag{2.23}$$

Salīdzinājumos parasti tiek izmantota *Saaty* 1–9 skala, kur 1 nozīmē vienādu nozīmīgumu, bet lielākas vērtības norāda uz pieaugošu viena kritērija priekšrocību pār otru [15]. Šāda pieeja ļauj ekspertu kvalitatīvo spriedumu pārveidot kvantitatīvos svaros.

2.5.4. Svaru aprēķina princips

Kritēriju svarus *AHP* pieejā iespējams aprēķināt ar galvenā īpašvektora metodi:

$$Aw = \lambda_{max} w, \tag{2.24}$$

kur A ir pāru salīdzinājumu matrica, w ir kritēriju svaru vektors, λ_{max} ir matricas lielākā īpašvērtība [15].

Praktiskos aprēķinos var izmantot arī ģeometriskā vidējā pieeju. Katras rindas ģeometriskais vidējais tiek aprēķināts kā:

$$g_i = \left(\prod_{j=1}^{K} a_{ij}\right)^{1/K}, \tag{2.25}$$

bet normalizēto svaru:

$$w_i = \frac{g_i}{\sum_{i=1}^{K} g_i}, \tag{2.26}$$

Šāda pieeja ir ērta skaitliskai realizācijai un ļauj iegūt kritēriju svaru vektoru, kas tālāk izmantojams *PROMETHEE* prioritizācijas formulās.

2.5.5. Konsistences pārbaude

AHP priekšrocība ir iespēja pārbaudīt ekspertu spriedumu konsistenci. Ja pāru salīdzinājumi ir pretrunīgi, iegūtie svari var būt nepamatoti. Konsistences indeksu aprēķina šādi:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - K}{K - 1}, \tag{2.27}$$

kur CI ir konsistences indekss, λ_{max} - lielākā īpašvērtība, K - salīdzināmo elementu skaits.

Konsistences attiecību nosaka kā:

$$CR = \frac{CI}{RI}, \tag{2.28}$$

kur RI ir nejaušās konsistences indekss.

Parasti tiek uzskatīts, ka $CR < 0{,}10$ norāda uz pieņemamu konsistences līmeni [29], [30]. Ja CR pārsniedz pieļaujamo robežu, pāru salīdzinājumi jāpārskata.

2.5.6. Ekspertu vērtējumu apkopošana

Ja kritēriju svaru noteikšanā piedalās vairāki eksperti, individuālie pāru salīdzinājumi jāapkopo vienā grupas salīdzinājumu matricā. *AHP* literatūrā šim nolūkam bieži izmanto ģeometrisko vidējo:

$$\bar{a}_{ij} = \left(\prod_{e=1}^{E} a_{ij}^{(e)}\right)^{1/E}, \tag{2.29}$$

kur $a_{ij}^{(e)}$ ir e-tā eksperta vērtējums, E - ekspertu skaits.

Šāda apkopošana saglabā matricas struktūru un ļauj iegūt grupas spriedumu kopu [29], [30].

Promocijas darba kontekstā ekspertu vērtējumi ir būtiski, jo uzlādes punkta izvēles kritēriji aptver vairākas kompetences jomas: *EV* uzlādes infrastruktūru, sadales tīklus, lietotāju vajadzības, datu pārvaldību, uzticamību un kiberdrošību. Tāpēc *AHP* svaru noteikšanā jāņem vērā starpdisciplinārs skatījums.

2.5.7. Statisko, scenāriju un dinamisko svaru izmantošana

Dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas modelī iespējamas vairākas svaru izmantošanas pieejas. Vienkāršākā ir statisko svaru pieeja, kur *AHP* noteiktie svari tiek izmantoti visos scenārijos nemainīgi. Šī pieeja ir interpretējama un stabila, bet mazāk elastīga.

Otra pieeja ir scenāriju svari. Šajā gadījumā dažādiem ekspluatācijas apstākļiem var definēt atšķirīgas svaru konfigurācijas. Piemēram, normālā režīmā lielāka nozīme var būt lietotāja ērtībai, bet tīkla noslodzes režīmā sadales tīkla kritērijiem. Uzticamības vai kiberdrošības riska režīmā lielāku svaru var iegūt datu kvalitātes un drošības kritēriji.

Trešā pieeja ir pilnībā dinamiska svaru maiņa laikā. Šī pieeja teorētiski atbilst *Saaty* dinamisko prioritāšu idejai [31], tomēr tā var samazināt modeļa interpretējamību un palielināt validācijas sarežģītību. Tāpēc šajā promocijas darbā pamatmodelī lietderīgāk izmantot bāzes *AHP* svarus un scenāriju jutīguma analīzi, nevis nepārtraukti mainīgu svaru sistēmu.

2.5.8. *AHP* svaru izmantošana *PROMETHEE* prioritizācijā

AHP rezultāts šajā darbā ir normalizēts kritēriju svaru vektors tiek reiķināts atbilstoši formulai 2.3., kur katrs w_j raksturo j-tā kritērija relatīvo nozīmīgumu. Šie svari tālāk tiek izmantoti *PROMETHEE* kopējā preferences indeksa aprēķinā. Tādējādi *AHP* un *PROMETHEE* šajā darbā veido vienotu metodoloģisku ķēdi: *AHP* nodrošina svaru pamatojumu, bet *PROMETHEE* alternatīvu rangēšanu.

2.5.tabula

AHP izmantošanas posmi dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas *MCDM* modelī

Posms	Saturs	Rezultāts
Kritēriju hierarhijas izveide	Mērķis, kritēriju grupas un apakškritēriji	Strukturēta kritēriju sistēma
Pāru salīdzinājumi	Ekspertu vērtējumi pēc *Saaty* skalas	Salīdzinājumu matrica
Svaru aprēķins	Īpašvektora vai ģeometriskā vidējā metode	Kritēriju svaru vektors
Konsistences pārbaude	*CI* un *CR* aprēķins	Vērtējumu kvalitātes kontrole
Ekspertu vērtējumu apkopošana	Individuālo matricu ģeometriskais vidējais	Grupas svaru struktūra
PROMETHEE ievade	*AHP* svari tiek izmantoti preferences indeksā	Alternatīvu prioritizācijas pamats

2.6. *PROMETHEE* balstīta alternatīvu prioritizācijas loģika

PROMETHEE metode šajā promocijas darbā tiek izmantota kā galvenais pieļaujamo uzlādes alternatīvu prioritizācijas mehānisms. Ja *AHP* nodrošina kritēriju svarus, tad *PROMETHEE* ļauj šos svarus piemērot konkrētā laikā pieejamām alternatīvām un iegūt interpretējamu rangu [27]. Šī metode ir piemērota dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas uzdevumam, jo tā balstās uz alternatīvu pāru salīdzināšanu un ļauj vienlaikus ņemt vērā vairākus savstarpēji konfliktējošus kritērijus.

2.6.1. *PROMETHEE* loma dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas modelī

Dinamiskā uzlādes punkta piešķiršanā alternatīvas ir konkrētajā laikā pieļaujamie uzlādes punkti A_t^{adm}. Katru alternatīvu raksturo kritēriju vērtību vektors $c(a,t)$, bet kritēriju nozīmīgumu nosaka *AHP* iegūtais svaru vektors w. *PROMETHEE* uzdevums ir salīdzināt šīs alternatīvas pa pāriem un noteikt, kura alternatīva ir priekšrocībā salīdzinājumā ar citām.

PROMETHEE priekšrocība šajā darbā ir interpretējamība. Pozitīvā plūsma parāda, cik lielā mērā alternatīva dominē pār citām, negatīvā plūsma, cik lielā mērā citas alternatīvas dominē pār to, bet neto plūsma apvieno abas dimensijas vienā prioritātes vērtībā [27]. Tas ļauj ne tikai izvēlēties pirmo alternatīvu, bet arī veidot rezerves alternatīvu secību.

2.6.2. Kritēriju starpības un preferenču funkcijas

PROMETHEE aprēķins sākas ar alternatīvu pāru salīdzināšanu pēc katra kritērija. Ja kritērijs ir maksimizējams, kritērija starpību starp alternatīvām a un b var definēt kā:

$$d_j(a,b,t) = c_j(a,t) - c_j(b,t), \tag{2.30}$$

Ja kritērijs ir minimizējams, piemēram, gaidīšanas laiks, attālums vai kiberriska līmenis, starpību var definēt pretējā virzienā:

$$d_j(a,b,t) = c_j(b,t) - c_j(a,t), \tag{2.31}$$

Šāda pieraksta mērķis ir nodrošināt, ka pozitīva starpība vienmēr nozīmē alternatīvas a priekšrocību pār alternatīvu b pēc attiecīgā kritērija.

Kritērija starpība tiek pārveidota preferenču vērtībā:

$$P_j(a,b,t) = P_j(d_j(a,b,t)), \tag{2.32}$$

kur $P_j(a,b,t) \in [0;1]$. Ja $P_j(a,b,t) = 0$, alternatīvai a nav priekšrocības pār b pēc kritērija j. Ja $P_j(a,b,t) = 1$, alternatīvai a ir pilna priekšrocība pār b pēc šī kritērija [27]. Preferenču funkcija ļauj noteikt, cik būtiska ir viena alternatīva priekšrocība pār otru. Neliela atšķirība var tikt uzskatīta par nenozīmīgu, bet lielāka atšķirība, par skaidru priekšrocību.

2.6.3. Indifferences un preferences sliekšņi

PROMETHEE pieejā būtiska nozīme ir indifferences un preferences sliekšņiem. Indifferences slieksnis q_j raksturo tādu kritērija atšķirību, kuru lēmuma pieņēmējs vēl neuzskata par būtisku. Preferences slieksnis p_j raksturo tādu atšķirību, pie kuras viena alternatīva jau tiek skaidri uzskatīta par labāku nekā otra. Šie sliekšņi atbilst nosacījumam:

$$0 \le q_j \le p_j, \tag{2.33}$$

Lineāru preferenču funkciju ar sliekšņiem var formulēt šādi:

$$P_j(d) = \begin{cases} 0, & d \le q_j, \\ \frac{d-q_j}{p_j-q_j}, & q_j < d < p_j, \\ 1, & d \ge p_j \end{cases} \quad (2.34)$$

Šāda funkcija ir piemērota kritērijiem, kuros priekšrocība pieaug pakāpeniski, piemēram, attālumam, gaidīšanas laikam, uzlādes jaudai vai tīkla jaudas rezervei. Citos gadījumos var izmantot arī vienkāršāku vai pakāpienveida preferenču funkciju, ja kritērija interpretācija to prasa [27].

2.6.4. Kopējais preferences indekss

Pēc preferenču vērtību aprēķina katram kritērijam tiek aprēķināts kopējais preferences indekss starp alternatīvām a un b:

$$\pi(a,b,t) = \sum_{j=1}^{n} w_j P_j(a,b,t), \quad (2.35)$$

kur w_j ir *AHP* noteiktais j-tā kritērija svars, bet $P_j(a,b,t)$ ir alternatīvas a preference pār alternatīvu b pēc j-tā kritērija.

Kopējais preferences indekss $\pi(a,b,t)$ raksturo, cik lielā mērā alternatīva a kopumā ir priekšrocībā pār alternatīvu b, ņemot vērā visus kritērijus un to svarus. Indeksa vērtība atrodas intervālā no 0 līdz 1, kur 0 nozīmē, ka alternatīvai a nav priekšrocības pār b, bet 1 nozīmē maksimālu priekšrocību.

2.6.5. Pozitīvā, negatīvā un *neto* plūsma

Ja pieļaujamo alternatīvu kopā A_t^{adm} ir m alternatīvas, tad katrai alternatīvai aprēķina pozitīvo plūsmu:

$$\phi^+(a,t) = \frac{1}{m-1} \sum_{\substack{b \in A^{adm} \\ b \ne a}} \pi(a,b,t), \quad (2.36)$$

Negatīvā plūsma raksturo, cik lielā mērā citas alternatīvas dominē pār alternatīvu a:

$$\phi^-(a,t) = \frac{1}{m-1} \sum_{\substack{b \in A^{adm} \\ b \ne a}} \pi(b,a,t), \quad (2.37)$$

PROMETHEE II pilnīgai alternatīvu rangēšanai tiek izmantota *neto* plūsma:

$$\phi(a,t) = \phi^+(a,t) - \phi^-(a,t), \quad (2.38)$$

Pozitīvā plūsma parāda, cik lielā mērā alternatīva a dominē pār citām alternatīvām. Negatīvā plūsma parāda, cik lielā mērā citas alternatīvas dominē pār a. *Neto* plūsma apvieno abas dimensijas un tiek izmantota *PROMETHEE II* pilnā ranga veidošanai [27].

2.6.6. Alternatīvu rangs un gala izvēle

PROMETHEE II rezultātā alternatīvas tiek sakārtotas pēc *neto* plūsmas vērtības:

$$R_t = \left(a_{(1)}, a_{(2)}, \dots, a_{(m)}\right), \quad \phi\left(a_{(1)},t\right) \ge \phi\left(a_{(2)},t\right) \ge \cdots \ge \phi\left(a_{(m)},t\right), \quad (2.39)$$

Gala izvēle tiek definēta kā alternatīva ar lielāko *neto* plūsmu atbilstoši definētajai formulai 2.6.

Šāda pieeja ir būtiska dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas modelī, jo tā nodrošina ne tikai vienu rekomendēto uzlādes punktu, bet arī pilnu rezerves alternatīvu secību. Ja sākotnēji izvēlētais uzlādes punkts kļūst nepieejams vai vairs neatbilst minimālajiem nosacījumiem, var izmantot nākamo alternatīvu rangā.

2.6.7. *PROMETHEE I* un *PROMETHEE II* interpretācija

PROMETHEE I balstās uz pozitīvās un negatīvās plūsmas atsevišķu interpretāciju un var atklāt situācijas, kur alternatīvas nav pilnībā salīdzināmas. Tas ir noderīgi analītiskai interpretācijai, īpaši gadījumos, kad vienai alternatīvai ir augsta pozitīvā plūsma, bet arī augsta negatīvā plūsma. Šāda alternatīva var būt ļoti laba pēc dažiem kritērijiem, bet būtiski sliktāka pēc citiem.

PROMETHEE II izmanto *neto* plūsmu un nodrošina pilnu alternatīvu rangu. Dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas operatīvajā modelī pilns rangs ir nepieciešams, jo sistēmai jāspēj sniegt skaidru gala rekomendāciju. Tādēļ šajā darbā *PROMETHEE II* tiek izmantota gala izvēlei, savukārt *PROMETHEE I* loģika var tikt izmantota rezultātu interpretācijai un konfliktējošu alternatīvu analīzei.

2.6.8. Riskam pielāgota *PROMETHEE* prioritizācija

Uzticamības un kiberdrošības aspektus iespējams iekļaut *PROMETHEE* prioritizācijā divējādi. Pirmā pieeja ir iekļaut uzticamības un drošības kritērijus pašā kritēriju kopā, ļaujot tiem ietekmēt preferences indeksu kopā ar citiem kritērijiem. Otrā pieeja ir izmantot riskam pielāgotu gala korekciju, kā definēts 2.4. sadaļā.

Ja tiek izmantota korekcijas pieeja, tad gala rangs var tikt veidots pēc $\Phi_{adj}(a,t)$, nevis tikai pēc $\phi(a,t)$. Tomēr šāda korekcija jālieto uzmanīgi. Ja kiberdrošības un uzticamības kritēriji jau ir iekļauti *PROMETHEE* kritēriju kopā, papildu korekcija var radīt dubultu šo faktoru ietekmi. Tādēļ pamatmodelī ieteicams uzticamības un kiberdrošības indikatorus iekļaut kā *MCDM* kritērijus, bet korekcijas funkciju izmantot specifiskos riska scenārijos vai jutīguma analīzē.

2.6.tabula

PROMETHEE prioritizācijas posmi dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas modelī

Posms	Apraksts	Rezultāts
Pieļaujamo alternatīvu kopa	Tiek noteiktas alternatīvas A_t^{adm}	Salīdzināmo uzlādes punktu kopa
Kritēriju vērtības	Katram punktam aprēķina $c_j(a,t)$	Kritēriju matrica
Kritēriju starpības	Aprēķina $d_j(a,b,t)$	Pāru salīdzinājumu starpības
Preferenču funkcijas	Pārvērš starpības preferencēs	$P_j(a,b,t)$
Kopējais preferences indekss	Izmanto *AHP* svarus	$\pi(a,b,t)$
Plūsmu aprēķins	Aprēķina ϕ^+, ϕ^-, ϕ	Alternatīvu prioritātes
Ranga veidošana	Sakārto pēc *neto* plūsmas	Gala rangs un rezerves secība

2.7. Dinamiskās atjaunināšanas un filtrēšanas princips

Dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas modelī alternatīvu kopa un kritēriju vērtības nav nemainīgas. Tās var mainīties, mainoties *EV* atrašanās vietai, *SOC* līmenim, uzlādes staciju noslodzei, gaidīšanas laikam, sadales tīkla režīmam, datu kvalitātei vai kiberdrošības stāvoklim. Tādēļ *MCDM* modelim jāietver dinamiskas atjaunināšanas un filtrēšanas princips.

Šajā sadaļā filtrēšanas un atjaunināšanas loģika tiek izklāstīta teorētiskā līmenī. Pilna algoritmiskā realizācija, datu struktūras un aprēķinu secība tiek detalizēti aprakstīta 3. nodaļā.

2.7.1. Dinamiskā atjaunināšana kā teorētiska nepieciešamība

Dinamiskā atjaunināšana ir nepieciešama tāpēc, ka uzlādes punkta piemērotība ir laikā mainīga. Uzlādes punkts, kas vienā brīdī ir optimāls, vēlāk var kļūt aizņemts, tehniski nepieejams vai mazāk vēlams tīkla noslodzes dēļ. Tāpat var mainīties lietotāja situācija samazināties *SOC*, mainīties maršruts vai pieļaujamais gaidīšanas laiks.

MCDM modelim jāspēj reaģēt uz šādām izmaiņām, aktualizējot alternatīvu kopu un kritēriju vērtības. Šī pieeja atbilst dinamisku prioritāšu idejai, kur lēmuma nosacījumi un kritēriju vērtības nav statiskas, bet var mainīties laikā [31]. Promocijas darba kontekstā dinamiskums galvenokārt tiek panākts ar datu, alternatīvu un kritēriju vērtību atjaunināšanu, nevis ar nepārtrauktu visu *AHP* svaru maiņu.

2.7.2. Kandidātu kopas un pieļaujamo alternatīvu kopas nošķīrums

Dinamiskā piešķiršanas modelī sākotnēji tiek veidota kandidātu alternatīvu kopa:

$$A_t^0 = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}, \tag{2.40}$$

kur A_t^0 ir sasniedzamo vai sākotnēji apsveramo uzlādes punktu kopa laikā t. Šajā kopā var būt alternatīvas, kuras vēlāk izrādās neatbilstošas tehnisku, lietotāja, tīkla, datu kvalitātes vai drošības nosacījumu dēļ.

Pēc filtrēšanas tiek iegūta pieļaujamo alternatīvu kopa:

$$A_t^{adm} \subseteq A_t^0, \tag{2.41}$$

Tieši A_t^{adm} tiek izmantota *PROMETHEE* prioritizācijā. Šis nošķīrums ir būtisks, jo *PROMETHEE* rangēšanai jānotiek tikai starp alternatīvām, kuras ir reāli izmantojamas konkrētajā lēmuma situācijā.

2.7.3. Filtrēšanas loģika

Filtrēšanas process ietver vairākas nosacījumu grupas. Pirmkārt, tiek pārbaudīta sasniedzamība: vai *EV* var nokļūt līdz uzlādes punktam, ņemot vērā *SOC*, atlikušās enerģijas rezervi un maršruta ierobežojumus. Otrkārt, tiek pārbaudīta tehniskā savietojamība: vai uzlādes punkta savienotājs, *AC/DC* tips un jauda ir atbilstoša konkrētajam *EV*.

Treškārt, tiek pārbaudīts uzlādes punkta statuss un faktiskā pieejamība. Nedarbspējīgi, nepieejami vai nepietiekami ticami uzlādes punkti netiek virzīti tālāk uz prioritizāciju. Ceturtkārt, tiek vērtēti sadales tīkla ierobežojumi, piemēram, ja lokālā slodze vai sprieguma režīms pārsniedz pieļaujamos sliekšņus. Piektkārt, tiek pārbaudīti datu kvalitātes un kiberdrošības minimālie nosacījumi [8], [12], [13], [22].

Filtrēšanas nosacījumus var pierakstīt ar indikatorfunkcijām:

$$h_i(a,t) = \begin{cases} 1, ja\ nosacījums\ ir\ izpildīts, \\ 0, ja\ nosacījums\ nav\ izpildīts. \end{cases}, \tag{2.42}$$

Alternatīva tiek iekļauta pieļaujamo alternatīvu kopā tikai tad, ja izpildās būtiskie minimālie nosacījumi.

2.7.4. Dinamiskā pārrēķina princips

Dinamiskais pārrēķins var tikt aktivizēts divos veidos: periodiski vai notikumu balstīti. Periodiska pārrēķina gadījumā *MCDM* modelis tiek izpildīts noteiktos laika intervālos. Notikumu balstīta pārrēķina gadījumā modelis tiek izpildīts, ja notiek būtiska izmaiņa, piemēram, izvēlētais uzlādes punkts kļūst aizņemts, pasliktinās tīkla režīms, mainās lietotāja *SOC* vai tiek konstatēts drošības risks.

Dinamiskais pārrēķins šajā darbā ir interpretējams kā lēmuma cikla atkārtota izpilde, nevis kā jauna modeļa izveide katrā laika momentā. Šāda pieeja ir saderīga ar *IoT* un kritiskās infrastruktūras vadības sistēmām, kur notikumu, sensoru datu vai operatora statusa izmaiņas aktivizē datu atjaunošanu un lēmuma pārskatīšanu [44], [51]. *EV* uzlādes punkta piešķiršanā

šādi notikumi var būt *EVSE* statusa maiņa, gaidīšanas laika pieaugums, tīkla noslodzes robežas pārsniegšana, datu kvalitātes degradācija vai kiberdrošības riska paaugstināšanās.

Notikumu balstīts pārrēķins ir īpaši nozīmīgs dinamiskā uzlādes punkta piešķiršanas kontekstā, jo ne visas būtiskās izmaiņas notiek vienmērīgos intervālos. Uzlādes punkta aizņemtība, komunikācijas traucējums vai tīkla notikums var pēkšņi mainīt alternatīvu piemērotību. Tādēļ lēmuma atbalsta sistēmas realizācijas slānī jāparedz iespēja aktualizēt rangu, ja mainās būtiskie lēmuma nosacījumi.

2.7.5. Lēmuma stabilitātes princips

Dinamiskā modelī jāņem vērā arī lēmuma stabilitāte. Ja rangu pārrēķina pārāk bieži, lietotājam var tikt piedāvātas biežas un pretrunīgas rekomendācijas. Tādēļ nepieciešams lēmuma stabilitātes kritērijs, kas palīdz interpretēt, cik pārliecinoši pirmā alternatīva atšķiras no nākamajām.

Vienkāršu stabilitātes indikatoru var definēt kā starpību starp pirmās un otrās alternatīvas *neto* plūsmām:

$$\Delta\phi_{12}(t) = \phi\left(a_{(1)}, t\right) - \phi\left(a_{(2)}, t\right), \tag{2.43}$$

Ja $\Delta\varphi_{12}(t)$ ir liela, pirmā alternatīva ir skaidri labāka par otro. Ja starpība ir maza, pirmās divas alternatīvas ir tuvas, un lēmums jāinterpretē piesardzīgi. Šādā gadījumā rezerves alternatīvu secībai ir īpaša nozīme.

2.7.tabula

Dinamiskās filtrēšanas un atjaunināšanas teorētiskie posmi

Posms	Saturs	Rezultāts
Kandidātu kopas veidošana	Sasniedzamie un sākotnēji piemērotie uzlādes punkti	A_t^0
Filtrēšana	Tehniskie, lietotāja, tīkla, datu un drošības nosacījumi	A_t^{adm}
Kritēriju aktualizācija	Atjauno kritēriju vērtības laikā (t)	C_t
PROMETHEE pārrēķins	Aprēķina plūsmas un *neto* rangu	R_t
Gala izvēle	Nosaka pirmo un rezerves alternatīvas	a_t^*, rezerves secība
Stabilitātes pārbaude	Vērtē $\Delta\phi_{12}(t)$	Lēmuma pārliecinošuma indikators

Apkopojot, dinamiskās filtrēšanas un atjaunināšanas princips nodrošina, ka *MCDM* modelis strādā nevis ar statisku uzlādes punktu sarakstu, bet ar aktuālu, tehniski un uzticamības ziņā pieļaujamu alternatīvu kopu. Šī pieeja veido pamatu algoritmiskajai operacionalizācijai 3. nodaļā.

2.8. Otrās nodaļas secinājumi

Dinamiska *EV* uzlādes punkta piešķiršana šajā nodaļā formalizēta kā daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas problēma, kur konkrētam *EV* konkrētā laikā jāizvēlas piemērotākais uzlādes punkts no pieļaujamo alternatīvu kopas.

Nodaļā nošķirta uzlādes infrastruktūras plānošana no dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas. Plānošana ir ilgtermiņa infrastruktūras attīstības uzdevums, savukārt dinamiska piešķiršana ir operatīva izvēle starp konkrētajā laikā sasniedzamiem un izmantojamiem uzlādes punktiem.

Definēta lēmumu vide, kurā *EV* darbojas kā lēmuma iniciators, uzlādes punkts kā *MCDM* alternatīva, sadales tīkls kā ierobežojošais un novērtējamais slānis, bet datu un operatora vide kā kritēriju aktualizācijas un uzticamības avots.

Izveidota kritēriju sistēma, kas ietver transportlīdzekļa, uzlādes punkta, sadales tīkla, lietotāja, ekonomiskos, vides/*RES/BESS*, kiberdrošības un uzticamības kritērijus. Šī sistēma nodrošina pamatu *AHP* balstītai svaru noteikšanai un *PROMETHEE* balstītai alternatīvu prioritizācijai.

Uzticamība šajā darbā interpretēta kā šķērsgriezuma dimensija, kas ietver faktisko pieejamību, darbspēju, pakalpojuma nepārtrauktību, datu aktualitāti, komunikācijas stabilitāti, tīkla pieļaujamību un kiberdrošības risku.

Kiberdrošības indikatori integrēti *MCDM* modelī kā būtiska uzlādes punkta piemērotības dimensija. Tie var darboties kā filtrēšanas nosacījumi, kā *MCDM* kritēriji vai kā gala prioritātes korekcijas faktori.

AHP metode šajā nodaļā pozicionēta kā kritēriju hierarhijas un svaru noteikšanas metode, nevis gala alternatīvas izvēles mehānisms. *AHP* rezultāts ir svaru vektors, kas tālāk tiek izmantots *PROMETHEE* prioritizācijā.

PROMETHEE metode definēta kā galvenais pieļaujamo uzlādes alternatīvu rangēšanas mehānisms. Tā ļauj salīdzināt alternatīvas pēc vairākiem kritērijiem, aprēķināt pozitīvo, negatīvo un *neto* plūsmu, kā arī iegūt pilnu alternatīvu rangu un rezerves secību.

Dinamiskās filtrēšanas un atjauninašanas princips nodrošina, ka prioritizācijā tiek izmantotas tikai konkrētajā laikā pieļaujamās alternatīvas un aktuālās kritēriju vērtības. Tas ir būtiski, jo *EV* uzlādes punkta piemērotība mainās laikā.

Otrajā nodaļā izstrādātais teorētiskais *MCDM* modelis veido pamatu 3. nodaļai, kur tas tiek operacionalizēts algoritmiskā aprēķinu procedūrā, definējot datu apstrādi, filtrēšanu, *AHP* svaru izmantošanu, *PROMETHEE* aprēķinu un validācijas *KPI* sagatavošanu.

3. *MCDM* METODOLOĢIJAS OPERACIONALIZĀCIJA UN ALGORITMISKĀ REALIZĀCIJA

Promocijas darba otrajā nodaļā dinamiska elektriskā transportlīdzekļa uzlādes punkta piešķiršana tika formalizēta kā uz uzticamību orientēta daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas problēma. Tika definēta lēmumu vide, alternatīvu kopa, kritēriju sistēma, uzticamības un kiberdrošības integrācijas principi, *AHP* balstīta kritēriju svaru noteikšanas loģika, *PROMETHEE* balstīta alternatīvu prioritizācija un dinamiskās filtrēšanas nepieciešamība. Šie elementi veido teorētisko pamatu, taču promocijas darba validācijai tie jāpārnes praktiski izpildāmā aprēķinu procedūrā.

Trešās nodaļas uzdevums ir operacionalizēt otrajā nodaļā izstrādāto *MCDM* modeli. Ar operacionalizāciju šajā darbā tiek saprasta teorētisko modeļa elementu pārvēršana aprēķināmās darbībās: kritēriji tiek definēti kā mērāmi vai scenārijos nosakāmi indikatori, alternatīvu kopa tiek sašaurināta ar filtrēšanas nosacījumiem, *AHP* svari tiek sagatavoti izmantošanai *PROMETHEE* aprēķinā, bet *PROMETHEE* rezultātā iegūtais rangs tiek izmantots uzlādes punkta izvēlei un rezerves alternatīvu secības noteikšanai.

Nodaļā tiek saglabāts promocijas darba metodoloģiskais fokuss: galvenais zinātniskais kodols ir *MCDM* modelis, nevis programmatūras vai lietotāja saskarnes izstrāde. Aprēķinu prototips un rezultātu vizualizācijas vide tiek izmantota kā metodoloģijas pārbaudes un interpretācijas instruments. Tas nozīmē, ka prototipa uzdevums ir nodrošināt aprēķinu atkārtojamību, scenāriju salīdzināmību un rezultātu skaidrojamību, nevis aizstāt *MCDM* metodoloģiju ar atsevišķu programmatūras produktu.

3.1. Pētījuma metodoloģiskā loģika

3.1.1. Pāreja no teorētiskā modeļa uz aprēķinu metodoloģiju

Promocijas darba pirmajā nodaļā tika pamatots *EV* uzlādes infrastruktūras pētnieciskais konteksts, uzlādes punkta izvēles daudzfaktoru raksturs un nepieciešamība vienotā lēmumu pieņemšanas pieejā integrēt lietotāja, uzlādes infrastruktūras, sadales tīkla, uzticamības, datu kvalitātes un kiberdrošības aspektus. Tika parādīts, ka dinamiska *EV* uzlādes punkta izvēle nav reducējama tikai uz tuvāko staciju, īsāko gaidīšanas laiku, zemāko cenu vai lielāko pieejamo uzlādes jaudu, jo šie kritēriji var savstarpēji konfliktēt.

Promocijas darba otrajā nodaļā šī problēma tika formalizēta kā uz uzticamību orientēts dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas *MCDM* modelis. Tajā tika definēta alternatīvu kopa, lēmumu vides elementi, kritēriju sistēma, uzticamības un kiberdrošības integrācijas veidi, *AHP* svaru noteikšanas princips, *PROMETHEE* prioritizācijas loģika un dinamiskās filtrēšanas nepieciešamība. Tādējādi otrā nodaļa izveidoja teorētisko pamatu, bet trešās nodaļas uzdevums ir šo teorētisko modeli pārnest aprēķinu metodoloģijā.

Šī pāreja pēc būtības nozīmē modeļa operacionalizāciju: teorētiski definētie lēmumu vides elementi tiek pārvērsti datu struktūrās, kritēriju indikatoros, filtrēšanas nosacījumos un aprēķinu secībā. Kiberfizisku sistēmu modelēšanas literatūrā šāda pāreja no konceptuāla modeļa uz izpildāmu vai pārbaudāmu aprēķinu vidi ir būtiska, jo dažādas sistēmas dimensijas fiziskā infrastruktūra, dati, vadība, komunikācija un lēmumu loģika jāapvieno vienotā metodoloģiskā ietvarā [55], [56].

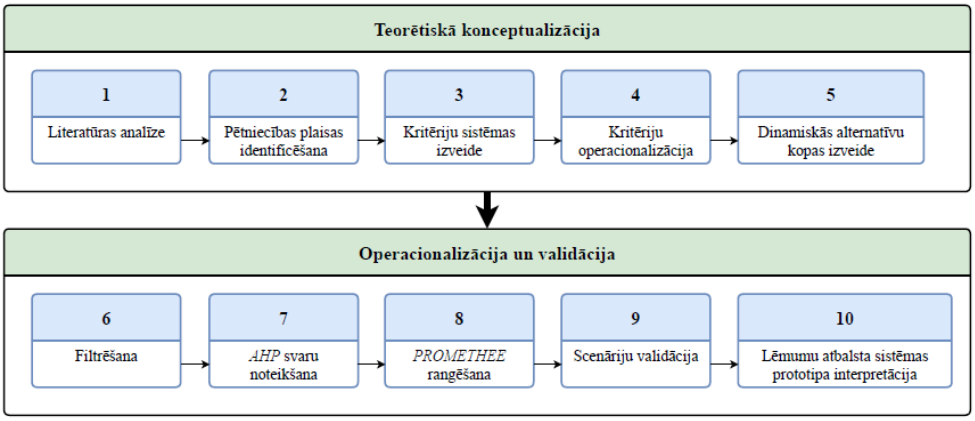
Šajā nodaļā galvenā uzmanība tiek pievērsta tam, kā teorētiskie elementi tiek praktiski īstenoti aprēķinu procesā. Kritēriji tiek pārvērsti aprēķināmos indikatoros, datu avoti tiek sasaistīti ar konkrētām kritēriju vērtībām, alternatīvas tiek filtrētas pēc pieļaujamības nosacījumiem, *AHP* svari tiek sagatavoti izmantošanai *PROMETHEE* aprēķinā, bet iegūtais alternatīvu rangs tiek izmantots dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas un validācijas procedūrā.

Metodoloģiskā secība promocijas darbā ir šāda: vispirms literatūras analīzē identificētā pētnieciskā plaisa tiek pārveidota kritēriju sistēmā; pēc tam kritēriji tiek operacionalizēti kā aprēķināmi vai scenārijos definējami indikatori; no pieejamajiem uzlādes punktiem tiek izveidota kandidātu alternatīvu kopa; nederīgās alternatīvas tiek izslēgtas ar filtrēšanas nosacījumiem; kritēriju relatīvais svarīgums tiek noteikts ar *AHP*; pieļaujamās alternatīvas tiek rangētas ar *PROMETHEE*; rezultāti tiek izmantoti scenāriju validācijā un interpretēti kā lēmumu atbalsta prototipa aprēķinu kodols.

Šāda metodoloģiskā secība balstās uz *AHP* hierarhiskās strukturēšanas un pāru salīdzinājumu principiem [29], *AHP* mērījumu teorijas apsvērumiem [30], dinamisko prioritāšu pieeju [31], *PROMETHEE* pārākuma attiecību metodoloģiju [27], kā arī lēmuma atbalsta sistēmas un enerģijas pārvaldības sistēmu izstrādes pieejām [48], [49].

Metodoloģisko pāreju no teorētiskā modeļa uz aprēķinu procedūru var attēlot kā secīgu plūsmu:

$$Teorētiskais\ MCDM\ modelis \rightarrow kritēriju\ operacionalizācija \rightarrow datu\ sagatavošana \rightarrow filtrēšana \rightarrow AHP\ svaru\ piemērošana \rightarrow PROMETHEE\ prioritizācija \rightarrow gala\ izvēle\ un\ rezerves\ alternatīvas \rightarrow KPI\ un\ rezultātu\ interpretācija.$$



3.1.att. Pētījuma metodoloģiskā plūsma

Avots: autora veidots, balstoties uz AHP, PROMETHEE, dinamisku prioritāšu un lēmuma atbalsta sistēmas metodoloģijas literatūru [27], [29]–[31], [48], [49].

3.1.2. Metodoloģijas saistība ar promocijas darba mērķi un hipotēzi

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt un validēt *MCDM* balstītu modeli uz uzticamību orientētai dinamiskai *EV* uzlādes punkta piešķiršanai. Līdz ar to trešās nodaļas metodoloģija tiek veidota kā aprēķināma procedūra, ar kuru iespējams pārbaudīt, vai otrajā nodaļā izstrādātais modelis spēj nodrošināt pamatotāku, interpretējamāku un tehniski uzticamāku uzlādes punkta izvēli nekā vienkāršotas vai statiskas pieejas.

Promocijas darba hipotēze paredz, ka uz uzticamību orientēta, daudzkritēriju un dinamiska pieeja ļauj vienotā modelī labāk integrēt *EV* stāvokli, uzlādes infrastruktūras pieejamību, sadales tīkla parametrus, lietotāja prasības, datu kvalitāti un kiberdrošības apsvērumus. Tāpēc metodoloģijai jānodrošina ne tikai alternatīvu ranga aprēķins, bet arī iespēja pārbaudīt modeļa darbību dažādos ekspluatācijas apstākļos: normālā režīmā, tīkla noslodzes pieauguma gadījumā, lietotāja steidzamības situācijā, datu kvalitātes pasliktināšanās gadījumā un paaugstināta kiberdrošības riska apstākļos.

Šajā darbā *AHP* tiek izmantota kritēriju relatīvās nozīmības noteikšanai, savukārt *PROMETHEE* tiek izmantota pieļaujamo alternatīvu prioritizācijai. Šāda pieeja ļauj nodalīt divas metodoloģiski atšķirīgas darbības: ekspertu prioritāšu strukturēšanu un konkrētā laika momentā pieejamo uzlādes alternatīvu rangēšanu. Dinamisko prioritāšu teorija papildus pamato nepieciešamību ņemt vērā, ka alternatīvu piemērotība var mainīties laikā, jo mainās *EV* stāvoklis, staciju pieejamība, gaidīšanas laiks, tīkla noslodze, datu kvalitāte un drošības indikatori [31].

Trešās nodaļas metodoloģija sagatavo pamatu piektās nodaļas validācijai, kur izstrādātais modelis tiek salīdzināts ar vienkāršotām piešķiršanas pieejām. Šādas pieejas ietver tuvākās stacijas izvēli, īsākā gaidīšanas laika izvēli, lielākās pieejamās jaudas izvēli, statisku *MCDM* pieeju, pieeju, kurā uzlādes punkta izvēlē netiek integrēts sadales tīkla darbības režīms, un pieeju, kurā netiek integrēti kiberdrošības riski. Šāda salīdzināšana ļauj novērtēt katra promocijas darbā ieviestā slāņa pienesumu: dinamiku, sadales tīkla kritērijus, uzticamību, datu kvalitāti un kiberdrošību.

Metodoloģijas praktiskais rezultāts nav tikai viena uzlādes punkta izvēle. Tā nodrošina arī pilnu alternatīvu rangu, rezerves alternatīvu secību, filtrēšanas pamatojumu un *KPI* aprēķina iespēju. Tas ir būtiski, jo uzticamības orientētā modelī svarīga ir ne tikai pirmā rekomendācija, bet arī lēmuma noturība gadījumā, ja izvēlētais punkts kļūst nepieejams, mainās tīkla režīms vai pasliktinās datu/drošības stāvoklis.

3.1.3. Pētījuma pieņēmumi un ierobežojumi

Izstrādātā metodoloģija balstās uz vairākiem pieņēmumiem, kas nepieciešami, lai teorētisko *MCDM* modeli varētu īstenot aprēķinu un validācijas vidē. Pirmkārt, tiek pieņemts, ka lēmuma pieņemšanai nepieciešamie dati par *EV* stāvokli, uzlādes punkta statusu, sadales tīkla režīmu, lietotāja ierobežojumiem, datu kvalitāti un kiberdrošības indikatoriem ir pieejami reāllaikā, vai arī var tikt definēti scenāriju veidā.

Otrkārt, tiek pieņemts, ka uzlādes punkta piešķiršanas kritērijus iespējams strukturēt hierarhiski, lai tos varētu izmantot *AHP* svēršanas procedūrā. Šis pieņēmums ir pamatots ar *AHP* metodoloģiju, kur sarežģīta lēmumu problēma tiek sadalīta mērķī, kritēriju grupās, apakškritērijos un alternatīvās [29]. Vienlaikus *AHP* svari šajā darbā tiek interpretēti kā ekspertu relatīvo prioritāšu struktūra, nevis kā absolūti un nemainīgi lielumi [30].

Treškārt, tiek pieņemts, ka konkrētā laika momentā iespējams izveidot pieļaujamo alternatīvu kopu, kurā iekļautas tikai tās uzlādes alternatīvas, kas atbilst minimālajiem sasniedzamības, savietojamības, *EVSE* statusa, tīkla, lietotāja, datu kvalitātes un kiberdrošības nosacījumiem. Šāda filtrēšana ir būtiska, jo *PROMETHEE* rangēšana nedrīkst paaugstināt alternatīvu, kas konkrētajā situācijā nav praktiski izmantojama.

Ceturtkārt, tiek pieņemts, ka validācijas vajadzībām daļu kritēriju iespējams modelēt scenāriju līmenī. Tas ir nepieciešams gadījumos, kad nav pieejami pilni reāllaika dati par visiem *EV*, lietotāju paradumiem, sprieguma režīmu, fāžu nesimetriju vai kiberdrošības notikumiem. Šādos gadījumos scenāriju dati netiek interpretēti kā pilns lauka eksperiments, bet kā metodoloģiska validācijas vide, kurā iespējams pārbaudīt izstrādātā *MCDM* modeļa darbības loģiku.

Metodoloģijai ir arī skaidras robežas. Šajā darbā netiek modelēta pilna transporta plūsma pilsētas vai valsts mērogā. Transportlīdzekļa kustība tiek ņemta vērā tikai tādā apjomā, kādā tā ietekmē uzlādes punkta sasniedzamību, attālumu, maršruta novirzi un kandidātu kopas izveidi. Tāpat netiek modelēta pilna elektroenerģijas tirgus dinamika. Cena var tikt iekļauta kā viens no kritērijiem, taču darba fokuss nav elektroenerģijas cenu prognozēšana vai tirgus optimizācija.

Darbs arī nepretendē uz pilnu *EVSE* kiberdrošības incidentu tehnisku modelēšanu. Kiberdrošības komponente tiek iekļauta kā lēmumu ietekmējošs riska un uzticamības slānis,

balstoties uz *EV* uzlādes infrastruktūras kiberdrošības profiliem un *EV* uzlādes infrastruktūras kiberriska novērtēšanas ietvaru [12], [13]. Tādēļ drošības indikatori šajā metodoloģijā kalpo alternatīvu riska novērtēšanai un prioritātes korekcijai, nevis aizstāj pilnu tehnisko drošības auditu.

Aprēķinu prototipa un vizualizācijas vides loma arī ir ierobežota. Tā nav komerciāla *CPO, DSO* vai mobilitātes operatora platforma. Tā ir pētniecības instruments, kas palīdz reproducējami pārbaudīt izstrādāto *AHP–PROMETHEE* metodoloģiju, saglabāt aprēķinu rezultātus, vizualizēt lēmuma plūsmu un interpretēt validācijas *KPI*. Tādēļ turpmāk tekstā šis slānis tiek saukts par aprēķinu rezultātu vizualizācijas un interpretācijas vidi, nevis par patstāvīgu lēmuma atbalsta sistēmas produktu.

Apkopojot, 3.1. sadaļā definētā metodoloģiskā loģika nodrošina pāreju no teorētiskā *MCDM* modeļa uz aprēķinu procedūru. Turpmākajās sadaļās šī loģika tiek detalizēta: 3.2. sadaļā tiek operacionalizēti kritēriji un *AHP* svaru izmantošana, 3.3. sadaļā tiek definēta *PROMETHEE* prioritizācijas aprēķinu procedūra, 3.4. sadaļā tiek aprakstīts dinamiskās filtrēšanas un piešķiršanas algoritms, bet 3.5. sadaļā tiek parādīta prototipa aprēķinu realizācijas un rezultātu interpretācijas vide.

3.2. Kritēriju operacionalizācija un *AHP* svaru izmantošana

Otrajā nodaļā tika definēta kritēriju sistēma uz uzticamību orientētai dinamiskai *EV* uzlādes punkta piešķiršanai. Šajā sadaļā šī kritēriju sistēma tiek pārnesta uz aprēķinu modeli, nosakot katram kritērijam praktisku interpretāciju: aprēķināmo indikatoru, iespējamo datu avotu, vēlamo virzienu *MCDM* modelī un lomu algoritmiskajā procedūrā.

Kritēriju operacionalizācija šajā darbā nozīmē pāreju no teorētiski definēta kritērija uz mērāmu, aprēķināmu vai scenārijā definējamu indikatoru. Tādējādi 2. nodaļā noteiktās kritēriju grupas tiek sasaistītas ar datiem, kas vēlāk tiek izmantoti alternatīvu filtrēšanā, *PROMETHEE* rangēšanā un validācijas *KPI* aprēķinā.

3.2.1. Kritēriju pārnese no teorētiskā modeļa uz aprēķinu modeli

Aprēķinu modelī katrai pieļaujamajai alternatīvai a_i laikā t tiek veidots kritēriju vērtību vektors atbilstoši iepriekš definētajai formulai 2.2.

Ja pieļaujamo alternatīvu kopā laikā t ir m alternatīvas, tad aprēķinu vajadzībām tiek veidota kritēriju matrica:

$$C_t = \begin{bmatrix} c_1(a_1,t) & c_2(a_1,t) & \cdots & c_n(a_1,t) \\ c_1(a_2,t) & c_2(a_2,t) & \cdots & c_n(a_2,t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_1(a_m,t) & c_2(a_m,t) & \cdots & c_n(a_m,t) \end{bmatrix}, \tag{3.1}$$

Šī matrica ir *PROMETHEE* aprēķina pamatstruktūra. Tā apkopo visas pieļaujamās alternatīvas un to vērtības pēc operacionalizētajiem kritērijiem. Atkarībā no kritērija rakstura vērtība $c_j(a_i,t)$ var būt iegūta no *EV* datiem, *EVSE* tehniskajiem parametriem, operatora datiem, sadales tīkla mērījumiem, lietotāja scenārija, datu kvalitātes novērtējuma vai kiberdrošības riska indikatora.

Kritēriji aprēķinu modelī var pildīt trīs funkcijas. Pirmkārt, tie var darboties kā filtrēšanas nosacījumi, piemēram, sasniedzamība, savietojamība, *EVSE* darbspēja, minimālā pieejamā jauda vai kritisks kiberdrošības risks. Otrkārt, tie var tikt izmantoti *PROMETHEE* rangēšanā kā *benefit* vai *cost* tipa kritēriji. Treškārt, atsevišķi uzticamības, datu kvalitātes vai kiberdrošības rādītāji var tikt izmantoti kā prioritātes korekcijas vai penalizācijas faktori specifiskos scenārijos.

Šāda pieeja ļauj izvairīties no abstraktas kritēriju interpretācijas. Katram kritērijam tiek noteikts, no kādiem datiem tas veidojas, vai lielāka vai mazāka vērtība ir vēlama un kā tas

ietekmē gala izvēli. *EV* lietotāju uzvedības literatūra pamato nepieciešamību iekļaut *SOC*, nepieciešamo enerģiju, uzlādes sākuma laiku un lietotāja elastību [6], savukārt *EV* uzlādes infrastruktūras un sadales tīkla integrācijas literatūra pamato tīkla noslodzes, sprieguma režīma un jaudas rezerves iekļaušanu [9], [10]. Uzticamības un kiberdrošības kritēriju iekļaušana balstās uz *EV* uzlādes infrastruktūras kiberdrošības profiliem un autora līdzautoru EV uzlādes infrastruktūras kiberriska novērtēšanas ietvaru [12], [13].

Praktiskā aprēķinu modelī katram indikatoram jābūt sasaistītam ar datu izcelsmi, aprēķina soli un interpretācijas virzienu. Tas ir īpaši svarīgi heterogēnu datu vidē, kur vienā lēmumā tiek izmantoti *EV* parametri, uzlādes punkta statuss, slodžu dati, ģeotelpiskā informācija, lietotāja scenārijs un kiberdrošības indikatori. Šāda datu izsekojamība palielina lēmuma atbalsta sistēmas rezultātu pārbaudāmību un ļauj vēlāk identificēt, vai ranga izmaiņas izraisīja faktiskas infrastruktūras izmaiņas vai datu kvalitātes problēmas [50], [54].

3.2.2. Kritēriju indikatoru, datu avotu un *MCDM* virzienu definēšana

Kritēriju operacionalizācijas praktiskais rezultāts ir tabula, kurā katrai kritēriju grupai tiek norādīts aprēķināmais indikators, galvenais datu avots, vēlamais virziens *MCDM* modelī un loma aprēķinu procedūrā. Šī tabula savieno teorētisko kritēriju sistēmu ar algoritmisko izpildi.

Indikatora definēšana šajā darbā nozīmē ne tikai matemātisku formulu, bet arī datu pieejamības un interpretācijas noteikumu. Ja indikators ir iegūstams tieši no mērījumiem, tas tiek izmantots kā aprēķināma kritērija vērtība. Ja dati konkrētajā validācijas kopā nav pieejami, bet indikators teorētiski ir būtisks, tas tiek saglabāts kā metodoloģiski paredzēts kritērijs vai aizstāts ar scenārijā definētu vērtību. Šāda pieeja ļauj saglabāt modeļa pilno struktūru, vienlaikus skaidri nodalot aprēķināmos un scenāriju veidā modelētos indikatorus.

3.1.tabula

Kritēriju operacionalizācija dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas modelī

Kritēriju grupa	Aprēķināmais indikators	Galvenais datu avots	Virziens MCDM modelī	Loma modelī
Transportlīdzekļa kritēriji	*SOC*, nepieciešamā enerģija, atlikušais nobraukums, *EV* pieņemamā uzlādes jauda	EV/BMS dati, lietotāja lietotne, scenāriju dati	Atkarīgs no indikatora	Filtrs un scenārija interpretācijas faktors
Sasniedzamība un savietojamība	Attālums, brauciena laiks, savienotāja un uzlādes tipa atbilstība	Navigācijas dati, *EVSE* tehniskie dati	Attālums minimizējams; savietojamība obligāta	Filtrs un rangēšanas kritērijs
Uzlādes punkta pieejamība	Pieejamības statuss, aizņemtība, rezervācijas iespēja, darbspēja	*CPO/CSO* dati, *EVSE* monitorings	Pieejamība maksimizējama; aizņemtība minimizējama	Filtrs un rangēšanas kritērijs
Gaidīšanas laiks	Paredzamais gaidīšanas laiks, rindas garums	Operatora dati, sesiju vēsture, scenāriju dati	Minimizējams	Rangēšanas kritērijs
Uzlādes jauda	Pieejamā uzlādes jauda, nominālā jauda, *EV* jaudas ierobežojums	*EVSE* dati, operatora dati, *EV* tehniskie dati	Maksimizējams līdz *EV* un tīkla robežām	Filtrs un rangēšanas kritērijs
Sadales tīkla noslodze	Noslodzes koeficients, pieslēguma vai transformatora noslodze	Kontrolskaitītāji, *DSO* dati, lokālie mērījumi	Minimizējams	Filtrs un rangēšanas kritērijs
Jaudas rezerve	Pieejamā jaudas rezerve	Kontrolskaitītāji, pieslēguma dati	Maksimizējams	Filtrs un rangēšanas kritērijs

Sprieguma režīms	Sprieguma novirze no nominālās vērtības	Sprieguma mērījumi pa fāzēm vai vidējais spriegums	Minimizējams	Filtrs un rangēšanas kritērijs
Fāžu nesimetrija	Fāžu strāvu nesimetrijas indikators	Fāžu strāvas, lokālie mērījumi	Minimizējams	Rangēšanas kritērijs
Ekonomiskie kritēriji	Uzlādes cena, tarifs, rezervācijas izmaksas	*CPO/CSO* cenu dati, scenāriju dati	Parasti minimizējams	Rangēšanas kritērijs
RES/BESS kritēriji	*PV* pieejamība, *BESS SOC*, lokālā elastība	*EMS*, *BESS/BMS* dati, scenāriju dati	Pieejamība un elastība maksimizējama	Rangēšanas kritērijs vai scenārija faktors
Uzticamības kritēriji	Service uptime, darbspēja, datu pilnīgums, notikumu biežums	*EVSE* monitorings, notikumu žurnāli, datu kvalitātes pārbaude	Uzticamība maksimizējama; notikumu biežums minimizējams	Filtrs, rangēšanas kritērijs vai korekcija
Kiberdrošības kritēriji	Autentifikācija, datu integritāte, komunikācijas drošība, incidentu risks	Drošības monitorings, risku modelis, ekspertu vērtējumi	Drošības līmenis maksimizējams; risks minimizējams	Filtrs, rangēšanas kritērijs vai penalizācija
Datu kvalitāte	Datu pilnīgums, datu vecums, statusa ticamība	Datu priekšapstrāde, operatora sistēma, mērījumu arhīvs	Pilnīgums maksimizējams; datu vecums minimizējams	Filtrs, rangēšanas kritērijs vai korekcija

Piezīme: tabula pārnes 2. nodaļā definēto kritēriju sistēmu aprēķinu modelī. Kritēriju loma var mainīties atkarībā no validācijas scenārija. Piemēram, sprieguma novirze normālā režīmā var darboties kā rangēšanas kritērijs, bet kritiskas novirzes gadījumā — kā filtrēšanas nosacījums. Ja konkrētajā validācijas datu kopā sprieguma vai fāžu nesimetrijas dati nav pieejami pilnā apjomā, šie kritēriji tiek saglabāti kā metodoloģiski paredzēti un analizēti scenāriju līmenī.

Kritēriju virziena definēšana ir būtiska, jo *PROMETHEE* aprēķinā alternatīvu priekšrocība tiek noteikta pēc kritēriju vērtību starpībām. Gaidīšanas laiks, attālums, cena, tīkla noslodze un kiberrisks ir cost tipa kritēriji, kur mazāka vērtība ir vēlamāka. Savukārt pieejamā uzlādes jauda, jaudas rezerve, datu pilnīgums, pieejamība un uzticamība ir *benefit* tipa kritēriji, kur lielāka vērtība ir vēlamāka.

Lai aprēķinu modelis būtu konsekvents, kritēriju vērtības pirms *PROMETHEE* aprēķina tiek pārveidotas vienotā interpretācijas loģikā. Tas nozīmē, ka neatkarīgi no kritērija sākotnējā virziena *PROMETHEE* priekšrokas aprēķinā pozitīva starpība vienmēr nozīmē alternatīvas priekšrocību pār salīdzināmo alternatīvu. Šī loģika detalizēti tiek izklāstīta 3.3. sadaļā.

3.2.3. *AHP* svaru pārnese uz aprēķinu modeli

Pēc kritēriju operacionalizācijas nepieciešams noteikt to relatīvo svarīgumu. Šajā darbā šim nolūkam tiek izmantota *AHP* metode. *AHP* ļauj sarežģītu lēmumu problēmu sadalīt hierarhijā un noteikt kritēriju relatīvās prioritātes ar pāru salīdzinājumiem [29]. Šajā promocijas darbā *AHP* netiek izmantota kā gala alternatīvu izvēles metode, bet kā svaru noteikšanas instruments, kura rezultāti tālāk tiek izmantoti *PROMETHEE* prioritizācijā.

AHP izmantošana ir pamatota ar to, ka dinamiska *EV* uzlādes punkta piešķiršana ietver vairākas savstarpēji konfliktējošas dimensijas: lietotāja vajadzības, *EVSE* pieejamību, uzlādes jaudu, sadales tīkla pieļaujamību, ekonomiskos faktorus, datu kvalitāti, uzticamību un kiberdrošību. *AHP* ļauj šīs dimensijas strukturēt un iegūt svaru vektoru, kas atspoguļo ekspertu vērtējumu par kritēriju relatīvo nozīmīgumu [29], [30].

Šajā darbā *AHP* tiek izmantota trīs līmeņos. Pirmajā līmenī tiek noteikti kritēriju grupu svari, piemēram, transportlīdzekļa, uzlādes punkta, sadales tīkla, lietotāja, ekonomisko, *RES/BESS*, uzticamības un kiberdrošības kritēriju relatīvais svarīgums. Otrajā līmenī tiek

noteikti apakškritēriju lokālie svari katras grupas ietvaros. Trešajā līmenī lokālie apakškritēriju svari tiek pārvērsti globālajos svaros, kas tiek izmantoti *PROMETHEE* aprēķinā.

Globālais apakškritērija svars tiek aprēķināts šādi:

$$w_{g,j} = w_G * w_{j|G}, \tag{3.2}$$

kur $w_{g,j}$ ir j-tā apakškritērija globālais svars, w_G - attiecīgās kritēriju grupas svars, $w_{j|G}$ - apakškritērija lokālais svars šīs grupas ietvaros.

Visu *PROMETHEE* aprēķinā izmantoto globālo svaru kopa veido svaru vektoru:

$$w = [w_1, w_2, \dots, w_n], \sum_{j=1}^{n} w_j = 1, w_j \geq 0 \tag{2.3}$$

Praktiski *AHP* svaru noteikšanas procedūra ietver šādus posmus: kritēriju hierarhijas definēšanu, pāru salīdzinājumu matricu izveidi, lokālo svaru aprēķinu, konsistences pārbaudi un globālo svaru iegūšanu. Konsistences pārbaude ir būtiska, jo tā ļauj novērtēt, vai ekspertu salīdzinājumi ir pietiekami loģiski saskaņoti. Ja konsistences attiecība pārsniedz pieļaujamo robežu, pāru salīdzinājumi jāpārskata [29], [30].

Dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas kontekstā *AHP* svarus iespējams izmantot kā bāzes svaru vektoru vai kā scenāriju atkarīgus svarus. Bāzes svaru vektors raksturo normālu ekspluatācijas režīmu. Savukārt scenāriju svaru vektori ļauj analizēt, kā mainās alternatīvu rangs situācijās, kur lielāka nozīme tiek piešķirta, piemēram, lietotāja steidzamībai, tīkla noslodzei, uzticamībai vai kiberdrošības riskam. Šāda pieeja ir saskaņā ar dinamisko prioritāšu ideju, kur kritēriju nozīme var mainīties atkarībā no laika un sistēmas stāvokļa [31].

3.2.4. Svaru interpretācija un jutīguma analīzes priekšnosacījumi

AHP rezultātā iegūtie svari nav tikai aprēķinu koeficienti. Tie atspoguļo lēmuma pieņēmēja vai ekspertu prioritāšu struktūru. Tāpēc svaru interpretācija ir būtiska metodoloģijas daļa. Ja lielāks svars tiek piešķirts lietotāja kritērijiem, modelis vairāk izvēlas īsāku attālumu, mazāku gaidīšanas laiku un lietotājam ērtāku izvēli. Ja lielāks svars tiek piešķirts tīkla kritērijiem, prioritāti iegūst alternatīvas ar zemāku lokālo noslodzi, lielāku jaudas rezervi un mazāku pārslodzes risku. Ja lielāks svars tiek piešķirts uzticamības un kiberdrošības kritērijiem, modelis pazemina alternatīvas ar zemu datu kvalitāti, nestabilu komunikāciju vai paaugstinātu kiberrisku.

Šajā darbā svaru interpretācija tiek veikta divos līmeņos. Kritēriju grupu svari parāda, kura lēmuma dimensija dominē kopējā modelī: lietotāja ērtība, uzlādes punkta pieejamība, tīkla pieļaujamība, ekonomiskā efektivitāte, enerģētiskā elastība vai uzticamība un drošība. Apakškritēriju globālie svari savukārt parāda, kuri konkrētie indikatori visvairāk ietekmē *PROMETHEE* gala rangu.

Lai nodrošinātu scenāriju analīzi, bāzes *AHP* svaru vektoru var koriģēt ar scenārija reizinātājiem. Šāda pieeja ļauj pārbaudīt, kā mainās alternatīvu rangs, ja noteiktā situācijā tiek pastiprināta kāda kritēriju grupa. Piemēram, tīkla pīķa scenārijā lielāku nozīmi var iegūt tīkla noslodze un jaudas rezerve, bet kiberdrošības scenārijā kiberriska, datu integritātes un komunikācijas uzticamības kritēriji.

Scenārijā koriģēto svaru var aprakstīt šādi:

$$w_j^{(s)} = \frac{\gamma_j^{(s)} w_j}{\sum_{k=1}^{n} \gamma_k^{(s)} w_k}, \tag{3.4}$$

kur w_j ir sākotnējais *AHP* svars, $\gamma_j^{(s)}$ - scenārija s reizinātājs j-tajam kritērijam, $w_j^{(s)}$ - koriģētais un normalizētais kritērija svars scenārijā s.

Šī pieeja ļauj prototipā īstenot *preference articulation* loģiku, kur eksperts vai scenārija konfigurācija norāda, kuri kritēriji konkrētajā situācijā jāpastiprina, kuri jāsaglabā nemainīgi un kuri var tikt samazināti. Šajā darbā šāda korekcija netiek interpretēta kā jauna *MCDM* metode, bet kā *AHP* svaru scenāriju jutīguma analīzes mehānisms. Tā izmantojama 5. nodaļā, lai pārbaudītu, vai uzticamības, kiberdrošības, datu kvalitātes un tīkla kritēriju palielināta nozīme maina PROMETHEE rangu.

Svaru jutīguma analīze vēlāk tiek izmantota, lai pārbaudītu trīs jautājumus. Pirmkārt, vai pirmā alternatīva saglabājas nemainīga pie nelielām svaru izmaiņām. Otrkārt, vai uzticamības un kiberdrošības kritēriju pastiprināšana maina uzlādes punktu secību. Treškārt, vai tīkla kritēriju svara palielināšana samazina tehniski riskantu alternatīvu prioritāti.

Apkopojot, 3.2. sadaļā kritēriju sistēma tiek pārnesta no teorētiskā modeļa uz aprēķinu procedūru. Katram kritērijam tiek noteikts indikators, datu avots, *MCDM* virziens un loma modelī, bet *AHP* tiek izmantota kritēriju relatīvās nozīmības noteikšanai. Iegūtie lokālie un globālie svari veido pamatu *PROMETHEE* prioritizācijai, savukārt scenāriju svaru korekcija sagatavo metodoloģisko pamatu 5. nodaļas jutīguma un uzticamības orientācijas analīzei.

3.3. *PROMETHEE* prioritizācijas aprēķinu procedūra

Pēc kritēriju operacionalizācijas un *AHP* svaru sagatavošanas nākamais metodoloģijas posms ir pieļaujamo uzlādes punktu prioritizācija. Šajā promocijas darbā šim nolūkam tiek izmantota *PROMETHEE* metode, jo tā ir piemērota daudzkritēriju situācijām, kur alternatīvas jāvērtē pēc vairākiem savstarpēji konfliktējošiem kritērijiem un nepieciešams iegūt interpretējamu alternatīvu secību [27].

Dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas uzdevumā *PROMETHEE* ir piemērota tādēļ, ka lēmuma rezultāts nav tikai viena izvēlēta stacija, bet arī pilns rezerves alternatīvu rangs. Tas ir būtiski uz uzticamību orientētā modelī, jo sākotnēji izvēlētais uzlādes punkts var kļūt nepieejams, aizņemts, tehniski ierobežots vai drošības ziņā nevēlams.

PROMETHEE šajā darbā tiek izmantota kā aprēķinu mehānisms, kas pārveido *AHP* noteiktos svarus un aktuālās kritēriju vērtības pilnā alternatīvu rangā. Šis rangs tālāk tiek izmantots validācijā, kur tiek analizēta izvēlētās alternatīvas neto plūsma, rezerves alternatīvu secība, ranga stabilitāte un modeļa darbība dažādos ekspluatācijas scenārijos.

3.3.1. *PROMETHEE* loma aprēķinu modelī

Aprēķinu modelī *PROMETHEE* saņem trīs galvenās ievades: pieļaujamo alternatīvu kopu A_t^{adm}, kritēriju matricu C_t un *AHP* noteikto svaru vektoru w. Pieļaujamo alternatīvu kopa tiek iegūta filtrēšanas posmā, kritēriju matrica raksturo katras alternatīvas vērtības pēc operacionalizētajiem kritērijiem, bet svaru vektors nosaka šo kritēriju relatīvo nozīmīgumu.

PROMETHEE priekšrocība šī darba kontekstā ir tās pārākuma attiecību loģika. Alternatīvas netiek vērtētas tikai pēc vienas agregētas svērtās summas, bet tiek savstarpēji salīdzinātas pāros pēc katra kritērija. Tādējādi iespējams noteikt, cik lielā mērā viena alternatīva ir priekšroka salīdzinājumā ar citu, ņemot vērā kritēriju svarus, kritēriju virzienus un preferenču funkcijas [27].

PROMETHEE metode jau izmantota *EV* uzlādes infrastruktūras kontekstā, piemēram, uzlādes staciju optimālas vietas izvēles uzdevumos, kur tā ļauj salīdzināt alternatīvas pēc vairākiem tehniskiem, ekonomiskiem un telpiskiem kritērijiem [30]. Autora līdzautoru 2024. gada publikācijā *PROMETHEE* pieeja izmantota *EV* pārvaldības lēmumu pieņemšanas sistēmā, integrējot viedās tehnoloģijas, lokālos apstākļus un daudzkritēriju novērtēšanas loģiku [10]. Šajā promocijas darbā šī ideja tiek attīstīta tālāk no vispārīgas *EV* pārvaldības un infrastruktūras izvērtēšanas uz dinamisku, sesijas līmeņa uzlādes punkta piešķiršanu.

3.3.2. Kritēriju virzieni un preferenču funkcijas

PROMETHEE aprēķinu kvalitāti būtiski ietekmē kritēriju virzienu un preferenču funkciju izvēle. Katram kritērijam jānosaka, vai tas ir maksimizējams jeb $benefit$ tipa kritērijs, vai minimizējams jeb $cost$ tipa kritērijs. Pēc tam kritērija vērtību starpība tiek pārveidota priekšrokas pakāpē intervālā no 0 līdz 1.

Dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas modelī kritēriju virzieni ir praktiski interpretējami. Gaidīšanas laiks, attālums, tīkla noslodze, sprieguma novirze, fāžu nesimetrija, cena un kiberrisks ir minimizējami kritēriji. Savukārt pieejamā uzlādes jauda, uzlādes punkta pieejamība, jaudas rezerve, datu kvalitāte un uzticamība ir maksimizējami kritēriji.

Lai visiem kritērijiem priekšrokas aprēķins būtu vienādi interpretējams, kritērija starpību starp alternatīvām a un b definē tā, lai pozitīva vērtība vienmēr nozīmētu alternatīvas a priekšrocību pār alternatīvu b:

$$d_j(a,b,t) = \begin{cases} c_j(a,t) - c_j(b,t), & ja\ c_j\ ir\ maksimizējams\ kritērijs, \\ c_j(b,t) - c_j(a,t), & ja\ c_j\ ir\ minimizējams\ kritērijs. \end{cases}, \quad (3.5)$$

kur $d_j(a,b,t)$ ir alternatīvu starpība pēc j-tā kritērija laikā t, $c_j(a,t)$ un $c_j(b,t)$ ir alternatīvu a un b kritērija vērtības.

Pēc starpības aprēķina tiek piemērota preferenču funkcija:

$$Pj(a,b,t) = Pj(dj(a,b,t)), \quad (2.32)$$

kur $Pj(a,b,t)$ raksturo priekšrokas pakāpi pēc j-tā kritērija. Ja $Pj(a,b,t) = 0$, tad alternatīvai a nav izteiktas priekšrokas pār alternatīvu b. Ja $Pj(a,b,t) = 1$, tad alternatīvai a ir pilna priekšroka pār alternatīvu b pēc attiecīgā kritērija.

Vienkāršotā lineārā preferenču funkcija ar indifferences slieksni q_j un preferences slieksni p_j var tikt definēta atbilstoši pēc formulas 2.34.

Ja konkrētā aprēķinā netiek lietoti indifferences un preferences sliekšņi, var izmantot vienkāršotu lineāru vai normalizētu preferenču funkciju, saglabājot to pašu interpretāciju: lielāka P_j vērtība nozīmē lielāku alternatīvas priekšroku.

3.2.tabula

PROMETHEE preferenču funkciju izvēles principi dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanai

Kritērijs / indikators	Kritērija tips	Ieteicamais preferenču funkcijas tips	Interpretācija *MCDM* modelī
Gaidīšanas laiks	$Cost$	V-veida vai lineāra funkcija ar sliekšņiem	Nelielas gaidīšanas laika atšķirības var būt maznozīmīgas, bet lielākas atšķirības būtiski pazemina alternatīvas prioritāti
Attālums / maršruta novirze	$Cost$	U-veida vai lineāra funkcija ar indifferences slieksni	Neliela attāluma starpība var netikt uzskatīta par būtisku, bet lielāka novirze samazina lietotāja pieņemamību
Pieejamā uzlādes jauda	$Benefit$	V-veida vai lineāra funkcija ar preferences slieksni	Lielāka jauda paaugstina prioritāti līdz robežai, ko nosaka EV pieņemamā jauda un tīkla pieļaujamība
Uzlādes punkta pieejamība	$Benefit$	Parastā vai līmeņu funkcija	Pieejama un darbspējīga alternatīva iegūst priekšroku pret aizņemtu vai nedarbspējīgu alternatīvu
Tīkla noslodze	$Cost$	Līmeņu vai lineāra funkcija ar sliekšņiem	Pieaugot noslodzei, alternatīvas prioritāte samazinās; kritiskas noslodzes gadījumā kritērijs var darboties kā filtrs

Jaudas rezerve	$Benefit$	Lineāra funkcija ar sliekšņiem	Lielāka jaudas rezerve paaugstina alternatīvas pieļaujamību un samazina pārslodzes risku
Sprieguma novirze	$Cost$	Līmeņu funkcija	Nelielas novirzes var būt pieļaujamas, bet lielākas novirzes būtiski samazina alternatīvas tehnisko piemērotību
Fāžu nesimetrija	$Cost$	Līmeņu vai V-veida funkcija	Lielāka nesimetrija norāda uz sliktāku lokālā tīkla režīmu un samazina prioritāti
Cena	$Cost$	V-veida vai lineāra funkcija	Zemāka cena paaugstina alternatīvas pievilcību, ja nav būtisku tehnisku vai uzticamības trūkumu
RES/BESS pieejamība	$Benefit$	Lineāra vai līmeņu funkcija	Lielāka lokālā enerģētiskā elastība var paaugstināt alternatīvas prioritāti
Datu kvalitāte	$Benefit$	Līmeņu funkcija	Pilnīgāki un aktuālāki dati paaugstina lēmuma ticamību
Kiberrisks	$Cost$	Lineāra funkcija ar sliekšņiem vai līmeņu funkcija	Augstāks risks pazemina alternatīvas prioritāti vai kritiskā gadījumā izslēdz alternatīvu
Uzticamība	$Benefit$	Lineāra vai līmeņu funkcija	Augstāka darbspēja, *service uptime* un komunikācijas stabilitāte paaugstina alternatīvas prioritāti

Piezīme: preferenču funkcijas izvēle jāpielāgo konkrētā kritērija semantikai, datu precizitātei un praktiski nozīmīgām atšķirībām starp alternatīvām. Kritēriju virzieni un sliekšņi nodrošina, ka PROMETHEE modelis ne tikai salīdzina skaitliskas vērtības, bet arī interpretē to praktisko nozīmi EV uzlādes punkta izvēles kontekstā [27].

3.3.3. Kopējais preferences indekss

Pieļaujamo alternatīvu kopā A_t^{adm} katra alternatīva tiek salīdzināta ar katru citu alternatīvu pēc visiem kritērijiem. Ja pieļaujamo alternatīvu skaits laikā t ir m, tad katrai alternatīvu pāru kombinācijai $a, b \in A_t^{adm}$, kur a $a \neq b$, tiek aprēķināts kopējais preferences indekss:

$$\pi(a,b,t) = \sum_{j=1}^{n} w_j P_j(a,b,t), \tag{2.35}$$

Kritēriju svariem jāizpilda nosacījums:

$$\sum_{j=1}^{n} w_j = 1\,, w_j \geq 0 \tag{2.3}$$

Ja $\pi(a,b,t)$ ir tuva 1, tad alternatīva a būtiski dominē pār alternatīvu b. Ja $\pi(a,b,t)$ ir tuva 0, tad alternatīvai a nav būtiskas priekšrokas pār alternatīvu b.

Pašsalīdzinājumiem izmanto nosacījumu:

$$\pi(a,a,t) = 0, \tag{3.6}$$

Kopējais preferences indekss ir *PROMETHEE* aprēķina centrālais elements, jo tas sasaista trīs metodoloģiskās daļas: kritēriju vērtības, *AHP* svarus un preferenču funkcijas.

3.3.4. Pozitīvās, negatīvās un neto plūsmas aprēķins

Pēc kopējo preferences indeksu aprēķina katrai alternatīvai tiek noteikta pozitīvā, negatīvā un *neto* plūsma. Šīs plūsmas ļauj interpretēt alternatīvas relatīvo pozīciju pret pārējām pieļaujamajām alternatīvām.

Pozitīvā plūsma tiek aprēķināta atbilstoši 2.nodaļas definētajai formulai 2.36:

$$\phi^+(a,t) = \frac{1}{m-1} \sum_{\substack{b \in A^{adm} \\ b \neq a}} \pi(a,b,t), \tag{2.36}$$

kur $\phi^+(a,t)$ raksturo, cik lielā mērā alternatīva a dominē pār citām pieļaujamajām alternatīvām. Jo lielāka ir pozitīvā plūsma, jo vairāk alternatīvai ir priekšrocību salīdzinājumā ar pārējām alternatīvām. Un Negatīvā plūsma tiek aprēķināta atbilstoši 2.nodaļas definētajai formulai 2.37:

$$\phi^{-}(a,t) = \frac{1}{m-1}\sum_{\substack{b\in A^{adm} \\ b\neq a}} \pi(b,a,t), \quad (2.37)$$

kur $\phi^{-}(a,t)$ raksturo, cik lielā mērā citas alternatīvas dominē pār alternatīvu a. Jo lielāka ir negatīvā plūsma, jo vairāk konkrētajai alternatīvai ir relatīvu trūkumu salīdzinājumā ar pārējām alternatīvām.

PROMETHEE II pilnīgai alternatīvu rangēšanai tiek izmantota iepriekš definētā 2.nodaļas formula 2.38, lai aprēķinātu *neto* plūsmu:

$$\phi(a,t) = \phi^{+}(a,t) - \phi^{-}(a,t), \quad (2.38)$$

Neto plūsma $\phi(a,t)$ ir gala prioritātes rādītājs. Jo lielāka ir *neto* plūsma, jo augstāka ir alternatīvas prioritāte kopējā daudzkritēriju novērtējumā [13].

Neto plūsmas vērtība teorētiski var atrasties intervālā:

$$-1 \leq \phi(a,t) \leq 1, \quad (3.7)$$

Pozitīva *neto* plūsma nozīmē, ka alternatīva kopumā vairāk dominē pār citām alternatīvām, nekā tiek pārspēta. Negatīva *neto* plūsma nozīmē, ka citas alternatīvas kopumā dominē pār konkrēto alternatīvu. Ja *neto* plūsma ir tuva nullei, alternatīvas pozīcija ir kompromisa rakstura un tā nav izteikti pārāka vai sliktāka par citām.

Šī plūsmu interpretācija ir īpaši nozīmīga dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas uzdevumā. Alternatīva ar augstu pozitīvo plūsmu var būt laba pēc pieejamās jaudas, gaidīšanas laika vai datu kvalitātes, bet, ja tai vienlaikus ir augsta negatīvā plūsma tīkla noslodzes vai kiberdrošības riska dēļ, tās *neto* prioritāte var samazināties. Tādēļ P*ROMETHEE* rezultāts ļauj analizēt ne tikai to, kura alternatīva ir pirmajā vietā, bet arī kāpēc tā ir prioritāra vai kāpēc konkrēta alternatīva tiek pazemināta rangā.

Ja pieļaujamo alternatīvu kopā ir tikai viena alternatīva, tad pāru salīdzinājums nav iespējams. Šādā gadījumā algoritms šo alternatīvu var piešķirt kā vienīgo pieļaujamo izvēli, bet *PROMETHEE* plūsmu aprēķins netiek interpretēts kā salīdzinošs rangs.

3.3.5. Gala izvēle un rezerves alternatīvu secība

Pēc neto plūsmas aprēķina pieļaujamās alternatīvas tiek sakārtotas dilstošā secībā pēc $\phi(a,t)$. Gala izvēle laikā t tiek definēta kā alternatīva ar lielāko neto plūsmu atbilstoši 2. nodaļas definētajai 2.6 formulai:

$$a_t^* = arg\max_{a\in A_t^{adm}} \phi(a,t), \quad (2.6)$$

Šī formula nosaka rekomendēto uzlādes punktu konkrētajā laika momentā. Tomēr promocijas darba modelī būtiska ir ne tikai pirmā alternatīva, bet arī pilna alternatīvu secība. Tādēļ *PROMETHEE* rezultāts tiek interpretēts kā rangs atbilstoši 2. nodaļas definētajai 2.39 formulai:

$$R_t = \left(a_{(1)}, a_{(2)}, \dots, a_{(m)}\right), \quad \phi\left(a_{(1)},t\right) \geq \phi\left(a_{(2)},t\right) \geq \cdots \geq \phi\left(a_{(m)},t\right), \quad (2.39)$$

Šeit $a_{(1)}$ ir galvenā rekomendētā alternatīva, bet $a_{(2)}, \dots, a_{(m)}$ veido rezerves alternatīvu secību.

Rezerves alternatīvu secība ir būtiska uz uzticamību orientētā dinamiskā uzlādes punkta piešķiršanā, jo uzlādes infrastruktūras stāvoklis var mainīties īsā laikā. Pirmais izvēlētais punkts var kļūt aizņemts, var mainīties tā darbspējas statuss, var rasties komunikācijas traucējums, tīkla ierobežojums vai drošības risks. Šādā situācijā lēmumu atbalsta prototips var izmantot nākamo alternatīvu no ranga vai veikt pilnu pārrēķinu, ja ir būtiski mainījušās kritēriju vērtības.

Papildus gala izvēles noteikšanai iespējams aprēķināt starpību starp pirmās un otrās alternatīvas neto plūsmām:

$$\Delta\phi_{12}(t) = \phi\left(a_{(1)}, t\right) - \phi\left(a_{(2)}, t\right), \tag{2.43}$$

Šis rādītājs raksturo lēmuma stabilitāti. Ja $\Delta\phi_{12}(t)$ ir liela, pirmā alternatīva ir skaidri pārāka par otro. Ja $\Delta\phi_{12}(t)$ ir maza, gala izvēle ir jutīgāka pret datu, svaru vai scenārija izmaiņām, un rezerves alternatīvu secības saglabāšana kļūst īpaši nozīmīga.

Apkopojot, *PROMETHEE* prioritizācijas mehānisms šajā darbā nodrošina četras funkcijas: alternatīvu pāru salīdzināšanu, *AHP* svaru integrāciju, pozitīvās, negatīvās un neto plūsmas aprēķinu, kā arī pilna alternatīvu ranga iegūšanu. Tas ļauj dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas modeli izmantot ne tikai statiskai alternatīvu izvēlei, bet arī elastīgai lēmuma atjaunināšanai mainīgos ekspluatācijas apstākļos.

Izveidota *PROMETHEE* prioritizācijas mehānisms dinamiskai *EV* uzlādes punkta piešķiršanas struktūra balstoties uz *PROMETHEE* metodoloģiju, *EV* uzlādes staciju *PROMETHEE* lietojumu un autora līdzautoru *EV* lēmumu pieņemšanas sistēmas pētījumu [11], [18], [27].

Šajā sadaļā 2. nodaļā definētais dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas modelis tiek pārnests algoritmiskā izpildes secībā. Ja 3.2. sadaļā tika operacionalizēti kritēriji un sagatavoti *AHP* svari, bet 3.3. sadaļā definēta *PROMETHEE* prioritizācijas aprēķinu procedūra, tad šīs sadaļas uzdevums ir parādīt, kā no sākotnējās kandidātu kopas tiek iegūta pieļaujamo alternatīvu kopa, kā tiek piemēroti filtrēšanas nosacījumi un kā tiek veikta dinamiska lēmuma atjaunināšana.

Dinamiskās piešķiršanas algoritms balstās uz pieņēmumu, ka uzlādes punkta piemērotība laikā nav konstanta. Mainās *EV* stāvoklis, lietotāja pieprasījums, uzlādes punkta pieejamība, gaidīšanas laiks, pieejamā jauda, sadales tīkla slodze, datu kvalitāte un kiberdrošības indikatori. Tādēļ lēmums par piemērotāko uzlādes punktu netiek uztverts kā vienreizējs statisks aprēķins, bet kā atkārtojams un atjaunināms lēmumu process.

Validācijas datu vidē sākotnējie mērījumu dati var būt pieejami ar augstāku laika izšķirtspēju nekā gala rezultātu interpretācijas solis. Šajā darbā izmantotajā datu vidē slodžu profilu pamatizšķirtspēja ir 15 minūtes, savukārt dinamisko rezultātu kopsavilkuma interpretācijai var tikt izmantots 1 stundas solis. Detalizēta šīs datu sagatavošanas loģika tiek aprakstīta 4. nodaļā, bet 3. nodaļā šis princips tiek lietots tikai kā algoritmiskās realizācijas priekšnoteikums.

3.3.6. Kandidātu un pieļaujamo alternatīvu kopas

Dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas algoritms nesākas ar visu teorētiski pieejamo uzlādes staciju rangēšanu. Pirms *PROMETHEE* prioritizācijas tiek izveidota sākotnējā kandidātu kopa un pēc tam veikta nederīgo alternatīvu filtrēšana. Šāda secība ir metodoloģiski būtiska, jo *MCDM* rangēšanai jānotiek tikai starp tām alternatīvām, kuras konkrētajā laika momentā ir tehniski, ekspluatācijas, tīkla un drošības ziņā pieļaujamas.

Sākotnējā kandidātu kopa A_t^0 ietver tos uzlādes punktus, kas laika momentā t atrodas lietotājam sasniedzamā diapazonā un teorētiski var tikt apsvērti kā alternatīvas, pēc 2. nodaļas definētās formulas 2.40:

$$A_t^0 = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}, \tag{2.40}$$

Šajā posmā tiek ņemti vērā pamatnosacījumi, piemēram, ģeogrāfiskā sasniedzamība, brauciena laiks, savienotāja tips un uzlādes punkta piederība attiecīgajai izvēles teritorijai.

Pēc sākotnējās kandidātu kopas izveides tiek iegūta pieļaujamo alternatīvu kopa A_t^{adm}. Šajā kopā iekļauj tikai tās alternatīvas, kas izpilda obligātos filtrēšanas nosacījumus. Tādējādi pāreja no A_t^0 uz A_t^{adm} tiek interpretēta kā algoritmisks filtrēšanas posms pēc 2. nodaļas definētās formulas 2.41:

$$A_t^{adm} \subseteq A_t^0, \tag{2.41}$$

Šī pāreja nozīmē, ka modelis vispirms samazina alternatīvu telpu un tikai pēc tam piemēro *PROMETHEE* prioritizāciju. Praktiski tas novērš situāciju, kur augstu rangu iegūst alternatīva, kas nav savietojama ar konkrēto *EV*, ir darbnespējīga, nav sasniedzama, atrodas tehniski nepieļaujamā tīkla režīmā vai neatbilst minimālajām kiberdrošības prasībām.

3.3.7. Filtrēšanas nosacījumi

Filtrēšanas nosacījumi nosaka minimālās prasības, kurām alternatīvai jāatbilst, lai tā tiktu iekļauta pieļaujamo alternatīvu kopā. Šajā darbā filtrēšana aptver astoņas galvenās nosacījumu grupas: sasniedzamību, savietojamību, *EVSE* statusu, minimālo pieejamo jaudu, tīkla pieļaujamību, lietotāja robežas, datu kvalitāti un kiberdrošības minimālo slieksni.

Pieļaujamo alternatīvu kopu var aprakstīt kā sākotnējās kandidātu kopas apakškopu, kur katrai alternatīvai jāizpilda obligātie nosacījumi:

$$A_t^{adm} = \begin{Bmatrix} a \in A_t^0 | h_{reach}(a,t) = 1, h_{comp}(a,t) = 1, \\ h_{EVSE}(a,t) = 1, h_P(a,t) = 1, h_G(a,t) = 1, \\ h_U(a,t) = 1, h_D(a,t) = 1, h_{SEC}(a,t) = 1, \end{Bmatrix}, \tag{3.8}$$

Šeit h_{reach} - raksturo sasniedzamību, h_{comp} - tehnisko savietojamību, h_{EVSE} - uzlādes punkta darbspējas un statusa nosacījumus, h_P - minimālo pieejamo jaudu, h_G - tīkla pieļaujamību, h_U - lietotāja robežas, h_D - datu kvalitāti, h_{SEC} - minimālo kiberdrošības prasību izpildi.

Katrs filtrēšanas nosacījums tiek interpretēts bināri:

$$h_k(a,t) = \begin{cases} 1, ja\ alternatīva\ izpilda\ nosacījumu, \\ 0, ja\ alternatīva\ nosacījumu\ neizpilda \end{cases} \tag{3.9}$$

Šāda bināra interpretācija ļauj skaidri nošķirt filtrēšanas posmu no *PROMETHEE* rangēšanas posma. Filtrēšanas posmā tiek izslēgtas nederīgas alternatīvas, savukārt rangēšanas posmā tiek salīdzinātas tikai tās alternatīvas, kuras ir pieļaujamas.

Sasniedzamība nozīmē, ka uzlādes punkts atrodas *EV* faktiskajam atlikušajam nobraukumam, lietotāja maršrutam un pieļaujamajai novirzei atbilstošā diapazonā. Ja alternatīva nav sasniedzama bez pārmērīga riska vai neatbilst lietotāja mobilitātes situācijai, tā netiek rangēta.

Savietojamība ietver savienotāja tipu, *AC/DC* uzlādes veidu, *EV* pieņemamo uzlādes jaudu un stacijas tehnisko atbilstību konkrētajam transportlīdzeklim. *EVSE* un transportlīdzekļa tehniskā savietojamība ir būtiska, jo komunikācijas un uzlādes profilu neatbilstība var ietekmēt sesijas uzsākšanu un stabilitāti [22].

EVSE statuss raksturo, vai uzlādes punkts ir darbspējīgs, pieejams un nav kritiskā kļūdas vai apkopes režīmā. Šis filtrs nodrošina, ka modelis neiesaka uzlādes punktu, kura izmantošana praktiski nav iespējama.

Minimālā pieejamā jauda nosaka, vai uzlādes punkts spēj nodrošināt vismaz tādu jaudu, kas konkrētajā situācijā ir pieņemama. Šis nosacījums jāinterpretē kopā ar *EV* nepieciešamo enerģiju, lietotāja laika ierobežojumu un transportlīdzekļa pieņemamo uzlādes jaudu.

Tīkla pieļaujamība nozīmē, ka konkrētā uzlādes punkta izmantošana nedrīkst radīt nepieļaujamu lokālā tīkla pārslodzi, kritisku sprieguma novirzi vai citu ekspluatācijas risku. *EV* uzlādes infrastruktūras integrācijas pētījumi uzsver, ka uzlādes punktu izmantošana jāvērtē kopā ar sadales tīkla jaudas, sprieguma un slodzes ierobežojumiem [9], [10].

Lietotāja robežas ietver maksimāli pieļaujamo gaidīšanas laiku, attālumu, maršruta novirzi, uzlādes ilgumu un komforta ierobežojumus. Šis filtrs nodrošina, ka tehniski piemērota alternatīva netiek uzskatīta par pieļaujamu, ja tā praktiski neatbilst lietotāja situācijai.

Datu kvalitāte attiecas uz statusa datu aktualitāti, pilnīgumu un ticamību. Ja dati par alternatīvas pieejamību, tīkla režīmu vai drošības stāvokli ir novecojuši vai nepilnīgi, lēmums var kļūt nekorekts. Lēmuma atbalsta sistēma un *IoT* literatūrā uzsvērts, ka datu kvalitāte ir viens no galvenajiem priekšnosacījumiem uzticamai automatizētai lēmumu pieņemšanai [49].

Kiberdrošības minimālais slieksnis nosaka, ka alternatīvai jāatbilst minimālām digitālās drošības prasībām. Ja pastāv kritisks autentifikācijas, datu integritātes, komunikācijas vai pakalpojuma pieejamības risks, alternatīva tiek izslēgta vai vēlāk pārtraukta. *EV/XFC* kiberdrošības profils un *EV* uzlādes infrastruktūras kiberriska novērtēšanas ietvars pamato nepieciešamību iekļaut šādus indikatorus uzlādes infrastruktūras lēmumu modelī [12], [13].

3.3.tabula

Filtrēšanas nosacījumi dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas algoritmā

Filtrēšanas nosacījums	Pārbaudes būtība	Ja nosacījums netiek izpildīts	Saistītā kritēriju grupa
Sasniedzamība	Vai punkts ir sasniedzams pēc *EV* atlikušā nobraukuma, atrašanās vietas un maršruta	Alternatīva tiek izslēgta	Transportlīdzekļa / lietotāja kritēriji
Savietojamība	Vai *EV* un *EVSE* ir tehniski savietojami pēc savienotāja, uzlādes veida un jaudas	Alternatīva tiek izslēgta	Transportlīdzekļa / *EVSE* kritēriji
EVSE statuss	Vai uzlādes punkts ir darbspējīgs un nav kļūdas vai apkopes režīmā	Alternatīva tiek izslēgta	Uzlādes punkta / uzticamības kritēriji
Minimālā pieejamā jauda	Vai pieejamā jauda ir pietiekama konkrētajai uzlādes vajadzībai	Alternatīva tiek izslēgta vai pazemināta scenārijā	Uzlādes punkta / lietotāja kritēriji
Tīkla pieļaujamība	Vai papildu uzlādes slodze neizraisa nepieļaujamu tīkla risku	Alternatīva tiek izslēgta vai pārtraukta	Sadales tīkla kritēriji
Lietotāja robežas	Vai tiek ievērots maksimālais gaidīšanas laiks, attālums un maršruta novirze	Alternatīva tiek izslēgta	Lietotāja un ekspluatācijas kritēriji
Datu kvalitāte	Vai dati ir pietiekami pilnīgi, aktuāli un ticami	Alternatīva tiek izslēgta vai pazemināta rangā	Datu kvalitātes / uzticamības kritēriji
Kiberdrošības slieksnis	Vai nav kritiska autentifikācijas, komunikācijas, datu integritātes vai pieejamības riska	Alternatīva tiek izslēgta vai pārtraukta	Kiberdrošības / uzticamības kritēriji

Piezīme: filtrēšanas nosacījumi nodrošina, ka PROMETHEE rangēšanā nonāk tikai tās alternatīvas, kuras konkrētajā laika momentā ir izmantojamas. Daļa nosacījumu var būt stingri filtri, bet daļa — scenārija atkarīgi kritēriji vai penalizācijas faktori [9]-[11], [13], [22], [49].

3.3.8. Dinamiskās atjaunināšanas mehānisms

Dinamiskā piešķiršanas algoritma būtība ir tāda, ka uzlādes punkta izvēle nav vienreizējs un nemainīgs aprēķins. Uzlādes infrastruktūras stāvoklis, *EV* parametri, lietotāja maršruts, tīkla noslodze, gaidīšanas laiks, datu kvalitāte un kiberdrošības indikatori var mainīties laikā. Tādēļ modelim jāspēj atkārtoti aktualizēt kritēriju vērtības, pārskatīt pieļaujamo alternatīvu kopu un pārrēķināt *PROMETHEE* rangu.

Dinamisko atjaunināšanu var īstenot divos režīmos: periodiski vai notikum balstīti. Periodiska atjaunināšana nozīmē, ka modelis tiek pārrēķināts pēc noteikta laika intervāla. Notikum balstītā atjaunināšana nozīmē, ka pārrēķins tiek aktivizēts tad, ja notiek būtiskas izmaiņas, piemēram, izvēlētais uzlādes punkts kļūst aizņemts, pasliktinās tīkla režīms, samazinās datu kvalitāte, palielinās kiberrisks vai mainās lietotāja pieprasījuma parametri.

Notikumu balstīta atjaunināšana ir īpaši piemērota kiberfiziskām un *IoT* balstītām infrastruktūrām, kur sistēmas stāvoklis var mainīties nevis pēc iepriekš noteikta grafika, bet pēc konkrēta notikuma: iekārtas statusa maiņas, sakaru traucējuma, mērījuma novirzes, slodzes robežas pārsniegšanas vai drošības incidenta. Šāda pieeja ļauj samazināt nevajadzīgu pārrēķinu

skaitu, vienlaikus saglabājot spēju reaģēt uz būtiskām lēmumu vidi ietekmējošām izmaiņām [44], [51].

Dinamisko atjaunināšanu var konceptuāli aprakstīt kā atkārtotu aprēķinu ciklu:

$$D_t \longrightarrow A_t^0 \longrightarrow A_t^{adm} \longrightarrow C_t \longrightarrow R_t \longrightarrow a_t^*, \tag{3.10}$$

kur D_t ir laikā t pieejamie dati, A_t^0 - kandidātu alternatīvu kopa, A_t^{adm} - pieļaujamo alternatīvu kopa, C_t - kritēriju matrica, R_t - *PROMETHEE* rangs, a_t^* - izvēlētais uzlādes punkts.

Ja galvenā alternatīva a_t^* pēc datu atjaunināšanas vairs neatbilst filtrēšanas nosacījumiem, algoritms var izvēlēties nākamo alternatīvu no iepriekš iegūtās rezerves secības vai veikt pilnu pārrēķinu. Pilns pārrēķins ir nepieciešams tad, ja būtiski mainās vairāk nekā viena alternatīva, parādās jaunas alternatīvas vai mainās kritēriju vērtību struktūra.

Praktiski dinamiskā atjaunināšana ir būtiska validācijas scenāriju analīzei. Normālā scenārijā tā ļauj novērtēt modeļa stabilitāti. Tīkla noslodzes scenārijā tā parāda, vai modelis spēj izvairīties no tehniski nevēlamām alternatīvām. Lietotāja steidzamības scenārijā tā parāda, kā mainās prioritātes pie zema *SOC* vai īsa pieejamā laika. Kiberdrošības scenārijā tā ļauj pārbaudīt, vai paaugstināta riska alternatīvas tiek izslēgtas, pārtrauktas vai pārvietotas zemāk rangā.

3.3.9. Pseidoalgoritms

Dinamiskās filtrēšanas un piešķiršanas procedūru var apkopot kā secīgu pseidoalgoritmu. Tas parāda, kā 2. nodaļā definētais teorētiskais modelis un 3.2.–3.3. sadaļās operacionalizētie aprēķinu posmi tiek īstenoti praktiskā lēmumu procedūrā.

Algoritms 3.1. Uzticamības orientēta dinamiska uzlādes punkta piešķiršana ar AHP–PROMETHEE

Ievade: EV stāvokļa dati; lietotāja ierobežojumi; uzlādes punktu dati; sadales tīkla dati; datu kvalitātes indikatori; kiberdrošības indikatori; *AHP* svaru vektors; *PROMETHEE* preferenču funkcijas; aprēķinu solis Δt.

Izvade: ieteiktais uzlādes punkts a_t^*; pilns alternatīvu rangs R_t; rezerves alternatīvu secība; filtrēšanas un prioritizācijas pamatojums.

1. Noteikt, vai nepieciešama uzlādes punkta izvēle vai iepriekšējā lēmuma pārrēķins.
2. Iegūt vai aktualizēt *EV*, lietotāja, *EVSE*, tīkla, datu kvalitātes un kiberdrošības datus.
3. Sagatavot datus izvēlētajam aprēķinu solim Δt.
4. Izveidot sākotnējo kandidātu kopu A_t^0, iekļaujot sasniedzamus un teorētiski piemērotus uzlādes punktus.
5. Pārbaudīt sasniedzamības nosacījumu.
6. Pārbaudīt *EV* un *EVSE* tehnisko savietojamību.
7. Pārbaudīt *EVSE* darbspējas un pieejamības statusu.
8. Pārbaudīt minimālās pieejamās jaudas nosacījumu.
9. Pārbaudīt sadales tīkla pieļaujamību.
10. Pārbaudīt lietotāja robežas — maksimālo gaidīšanas laiku, attālumu un maršruta novirzi.
11. Pārbaudīt datu kvalitāti un aktualitāti.
12. Pārbaudīt kiberdrošības minimālo slieksni.
13. Izveidot pieļaujamo alternatīvu kopu A_t^{adm}.
14. Ja $A_t^{adm} = \emptyset$, aktivizēt atkāpšanās procedūru, piemēram, paplašināt meklēšanas diapazonu, samazināt lietotāja ierobežojumus vai atgriezt informāciju par pieejamu alternatīvu trūkumu.

15. Ja $A_t^{adm} \neq \emptyset$, aprēķināt operacionalizēto kritēriju vērtības katrai alternatīvai.
16. Piemērot *AHP* noteiktos kritēriju svarus.
17. Piemērot *PROMETHEE* preferenču funkcijas un aprēķināt alternatīvu pāru preferences indeksus.
18. Aprēķināt pozitīvo, negatīvo un neto plūsmu katrai alternatīvai.
19. Sakārtot alternatīvas dilstošā secībā pēc neto plūsmas.
20. Noteikt galveno rekomendāciju a_t^*.
21. Saglabāt pilnu rezerves alternatīvu secību R_t.
22. Aprēķināt pirmās un otrās alternatīvas neto plūsmas $\Delta\phi_{1-2}(t)$.
23. Ja $\Delta\phi_{1-2}(t)$ ir ļoti maza, norādīt izvēles jutīgumu vai saglabāt iepriekšējo rekomendāciju, ja tā joprojām ir pieļaujama.
24. Atjaunināt lēmumu pēc noteikta laika intervāla vai būtiska notikuma gadījumā.
25. Ja izvēlētais punkts kļūst nepieejams vai neatbilst filtriem, izmantot nākamo alternatīvu no rezerves secības vai veikt pilnu pārrēķinu.

Šis pseidoalgoritms nodrošina skaidru pāreju no datiem uz lēmumu. Tas arī ļauj validēt ne tikai gala izvēles rezultātu, bet visu piešķiršanas procesa loģiku: cik alternatīvu tiek izslēgtas filtrēšanā, kā mainās *PROMETHEE* rangs, cik bieži tiek izmantotas rezerves alternatīvas un kā dinamiskā atjaunināšana ietekmē lēmuma stabilitāti.

3.4.tabula

Dinamiskās filtrēšanas un piešķiršanas algoritma posmi

Posms	Ievades dati	Darbība	Rezultāts
Lēmuma aktivizācija	*SOC*, nepieciešamā enerģija, lietotāja pieprasījums, statusa izmaiņas	Nosaka, vai jāveic izvēle vai pārrēķins	Aktivizēts piešķiršanas process
Datu sagatavošana laikā (t)	*EV, EVSE*, tīkla, lietotāja, datu kvalitātes un drošības dati	Sagatavo aprēķinu soli un saskaņo datu slāņus	Laikā saskaņota aprēķinu datu kopa
Kandidātu kopas izveide	*EV* atrašanās vieta, uzlādes punktu datubāze, savietojamības dati	Atlasa sākotnēji sasniedzamus un teorētiski piemērotus punktus	A_t^0
Filtrēšana	*EV, EVSE*, tīkla, lietotāja, datu kvalitātes un drošības nosacījumi	Izslēdz nepieļaujamas alternatīvas	A_t^{adm}
Kritēriju vērtību aprēķins	Operacionalizētie indikatori un datu avoti	Aprēķina kritēriju vērtības pieļaujamajām alternatīvām	Kritēriju matrica C_t
Svaru piemērošana	*AHP* svaru vektors	Piesaista katram kritērijam relatīvo svaru	Svērta *MCDM* struktūra
PROMETHEE prioritizācija	Kritēriju vērtības, svari, preferenču funkcijas	Aprēķina plūsmas un rangu	R_t
Rezerves alternatīvu noteikšana	Pilns *PROMETHEE* rangs	Saglabā nākamās labākās alternatīvas	Rezerves secība
Dinamiska atjaunināšana	Jauni dati vai notikumi	Pārskata filtrus un pārrēķina rangu	Aktualizēts lēmums
Atkāpšanās procedūra	Tukša pieļaujamo alternatīvu kopa vai kritiska kļūme	Paplašina meklēšanu vai informē par nepieejamību	Alternatīva lēmuma procedūra

Piezīme: algoritms parāda, ka dinamiska uzlādes punkta piešķiršana nav tikai PROMETHEE aprēķins. Tā ietver kandidātu atlasi, datu laika soļa sagatavošanu, filtrēšanu, datu kvalitātes un drošības pārbaudi, AHP svaru izmantošanu, PROMETHEE rangēšanu, rezerves alternatīvu saglabāšanu un lēmuma atjaunināšanu laikā [9]–[11], [13], [22], [23], [27], [29], [31], [49].

Apkopojot, 3.4. sadaļā definētais algoritms sasaista teorētisko *MCDM* modeli ar praktisku izpildes loģiku. Tas nodrošina, ka modelis vispirms izslēdz nederīgas alternatīvas un tikai pēc tam salīdzina pieļaujamos uzlādes punktus ar *PROMETHEE*. Dinamiskās

atjaunināšanas mehānisms ļauj modelim reaģēt uz izmaiņām *EV* stāvoklī, uzlādes punktu pieejamībā, tīkla režīmā, datu kvalitātē un kiberdrošības indikatoros. Rezultātā tiek iegūta ne tikai viena rekomendētā alternatīva, bet arī pilna, uzticamības ziņā izmantojama rezerves alternatīvu secība.

3.4. Prototipa aprēķinu realizācijas un rezultātu interpretācijas loģika

Šajā sadaļā izstrādātā *AHP–PROMETHEE* metodoloģija tiek sasaistīta ar aprēķinu prototipa realizācijas loģiku. Prototips šajā promocijas darbā netiek interpretēts kā komerciāli gatava lēmumu atbalsta sistēma vai pilna mēroga operatora platforma. Tā uzdevums ir nodrošināt, ka 2. nodaļā formalizētais teorētiskais modelis un 3.2.–3.4. sadaļās definētā aprēķinu metodoloģija ir reproducējami pārbaudāma ar datiem, scenārijiem, *KPI* un vizuāli interpretējamiem rezultātiem.

Aprēķinu prototips kalpo kā metodoloģijas validācijas instruments. Tas ļauj strukturēti sagatavot ievades datus, piemērot filtrēšanas nosacījumus, izmantot *AHP* noteiktos svarus, izpildīt *PROMETHEE* prioritizāciju, iegūt alternatīvu rangu un salīdzināt rezultātus starp scenārijiem.

Prototipa rezultātu attēlošanai tiek izmantota aprēķinu rezultātu vizualizācijas un interpretācijas vide. Prototipa izstrādes laikā tā tika apzīmēta kā *Dashboard*, tomēr promocijas darba tekstā tā tiek interpretēta nevis kā atsevišķs programmatūras produkts, bet kā vizualizācijas slānis, kas padara *MCDM* aprēķinu rezultātus pārskatāmus, salīdzināmus un skaidrojamus.

3.4.1. Prototipa mērķis un loma metodoloģijas pārbaudē

Prototipa galvenais mērķis ir pārbaudīt, vai izstrādātais *AHP–PROMETHEE* modelis var tikt praktiski īstenots ar sagatavotajiem *EVSE*, barošanas avotu, tehniskajiem, ģeotelpiskajiem, uzticamības un scenāriju datiem. Tas nozīmē, ka prototips nodrošina ne tikai vienreizēju alternatīvas izvēli, bet pilnu validācijas ciklu:

$$Ievaddati \rightarrow Priekšapstrāde \rightarrow Filtrēšana \rightarrow AHP\ Svari \rightarrow PROMETHEE\ rangs \rightarrow Piešķiršana \rightarrow KPI\ un\ interpretācija$$

Tādējādi prototips šajā darbā pilda eksperimentālas lēmuma atbalsta sistēmas funkciju: tas apvieno datu sagatavošanu, kritēriju aprēķinu, *AHP* svaru piemērošanu, *PROMETHEE* ranga aprēķinu, scenāriju salīdzinājumu un rezultātu vizualizāciju. Šāda prototipa loma atbilst modeļorientētas vadības un lēmuma atbalsta sistēmas pieejai, kur modelis tiek izmantots ne tikai teorētiskai analīzei, bet arī lēmuma aprēķināšanai, pārbaudei un interpretācijai [56]. Modeļorientētas vadības avots tieši pamato *CPS/Industry 4.0* vidē izmantotu izpildāmu modeļu, prognozējošu modeļu un vadības algoritmu sasaisti ar praktisku sistēmu pārvaldību [56].

Šajā ķēdē katrs posms ir reproducējams. No vienas un tās pašas datu kopas, svaru konfigurācijas un scenārija tiek iegūts pārbaudāms rezultāts: kandidātu kopa, pieļaujamo alternatīvu kopa, kritēriju vērtības, *PROMETHEE* plūsmas, gala rangs, izvēlētais uzlādes punkts, rezerves alternatīvas un *KPI*.

Rezultātu vizualizācijas un interpretācijas vide neizmaina *AHP–PROMETHEE* matemātisko modeli, bet padara redzamu, kā dati pārvēršas lēmumā. Tādēļ tā šajā darbā tiek interpretēta kā lēmuma atbalsta sistēmas prototipa eksperimentālais interfeiss, kas ļauj pārbaudīt modeļa caurspīdīgumu, scenāriju salīdzināmību un rezultātu interpretējamību.

3.4.2. Prototipa funkcionālie slāņi

Izstrādātais prototips ietver vairākus savstarpēji saistītus slāņus: datu sagatavošanas slāni, ģeotelpisko slāni, scenāriju/periodu analīzes slāni, *MCDM* aprēķinu slāni, kiberdrošības

un uzticamības slāni, kā arī rezultātu interpretācijas slāni. Šāda struktūra ļauj sasaistīt uzlādes infrastruktūras fiziskos datus ar dinamisku lēmumu pieņemšanas modeli.

Šādu slāņojumu iespējams sasaistīt ar *IoT* un digitālā dvīņa arhitektūras principiem. Datu sagatavošanas slānis nodrošina ievaddatu kvalitāti un struktūru, *MCDM* slānis veic analītisko aprēķinu, bet interpretācijas slānis padara rezultātu saprotamu lēmuma pieņēmējam. Digitālā dvīņa kontekstā līdzīga loģika tiek izmantota infrastruktūras objektu, ģeotelpisko datu, mērījumu un analītisko rezultātu sasaistē [54].

3.5.tabula

Prototipa funkcionālā struktūra

Prototipa slānis	Saturs	Loma promocijas darbā
Datu sagatavošanas slānis	Slodžu profilu ielāde, laika zīmogu apstrāde, datu agregācija, trūkstošo vērtību pārbaude	Nodrošina aprēķinu datu sagatavošanu *MCDM* modelim
Ģeotelpiskais slānis	Uzlādes punktu izvietojums, attāluma interpretācija, anonimizētas validācijas zonas	Nodrošina telpisko kontekstu un sasniedzamības kritērija interpretāciju
Scenāriju un periodu slānis	Analizējamie periodi, *EV* pieprasījuma parametri, scenāriju konfigurācijas	Ļauj pārbaudīt modeļa darbību dažādos ekspluatācijas apstākļos
MCDM aprēķinu slānis	Filtrēšana, kritēriju vērtības, *AHP* svari, *PROMETHEE* plūsmas, rangs un assignment	Realizē promocijas darba metodoloģisko kodolu
Kiberdrošības un uzticamības slānis	Datu kvalitāte, komunikācijas statuss, kiberriska indikatori, drošības penalizācija	Nodrošina uz uzticamību orientētu piešķiršanas loģiku
Rezultātu interpretācijas slānis	Rangi, *KPI, MCDM* lēmumi, grafiki, kartes un salīdzinājumi	Padara aprēķinu rezultātus pārskatāmus un skaidrojamus

Piezīme: prototipa funkcionālā struktūra parāda, ka izstrādātais risinājums nav tikai matemātisks aprēķins, bet datu, scenāriju, ģeotelpiskās informācijas, MCDM algoritma un drošības indikatoru integrēta validācijas vide.

3.4.3. Aprēķinu moduļu struktūra

Prototipa aprēķinu realizācija tiek veidota modulāri. Modulāra struktūra ir nepieciešama, lai skaidri nodalītu datu sagatavošanu, filtrēšanu, kritēriju svēršanu, alternatīvu prioritizāciju, scenāriju izpildi, drošības indikatoru apstrādi un rezultātu vizualizāciju. Šāda nodalīšana ļauj pārbaudīt katru metodoloģijas posmu atsevišķi un vienlaikus saglabā kopējo aprēķinu plūsmu caurspīdīgu.

3.6.tabula

Prototipa aprēķinu moduļu struktūra

Modulis	Metodoloģiskā funkcija	Galvenā ievade	Galvenā izvade
data_models.py	*EV, EVSE*, tīkla, lietotāja, uzticamības un drošības datu struktūras	Tehniskie un scenāriju dati	Strukturēta ievades datu vide
preprocessing.py	Datu tīrīšana, sinhronizācija un agregācija	Slodžu profili un mērījumu dati	Aprēķiniem derīgi kritēriju dati
geo_map.py	Uzlādes punktu kartes, blīvuma un anonimizēto zonu izveide	Koordinātu dati	Ģeotelpiskais konteksts un attāluma dati
filters.py	Nederīgo alternatīvu izslēgšana	Kandidātu kopa un filtrēšanas nosacījumi	A_t^{adm}
ahp.py	Kritēriju svaru aprēķins un konsistences pārbaude	Pāru salīdzinājumu matricas	*AHP* svaru vektors
promethee.py	Alternatīvu prioritizācija	Kritēriju vērtības, svari, preferenču funkcijas	*PROMETHEE* plūsmas un rangs
assignment.py	Gala izvēles un rezerves secības noteikšana	*PROMETHEE* rangs	a_t^*, rezerves alternatīvas
cyber_layer.py	Datu kvalitātes, komunikācijas un kiberriska indikatoru apstrāde	Drošības un datu kvalitātes parametri	Drošības/uzticamības *KPI*
scenarios.py	Sezonu un scenāriju konfigurēšana	Periodu parametri, *EV* pieprasījums, sliekšņi	Scenāriju datu kopas

validation .py	*KPI* un bāzes pieeju salīdzinājums	Modeļa un bāzes pieeju rezultāti	Validācijas rādītāji
dashboard.py	Rezultātu vizualizācijas un interpretācijas ģenerēšana	Rangi, *KPI*, kartes, periodu dati	Interaktīvs rezultātu pārskats

Piezīme: moduļu struktūra nav paredzēta kā pilna programmatūras arhitektūras specifikācija. Tā parāda metodoloģiskās realizācijas loģiku, kas nepieciešama, lai AHP–PROMETHEE modelis būtu reproducējami pārbaudāms ar datiem, scenārijiem un rezultātu vizualizāciju [11], [27], [29], [48], [49].

3.4.4. *MCDM* lēmums jeb momentuzņēmums

Viens no būtiskākajiem prototipa elementiem ir *MCDM* lēmumi jeb lēmuma momentuzņēmums. Tas nozīmē, ka konkrētā laikā t tiek fiksēts pilns lēmuma stāvoklis: *EV* pieprasījums, kandidātu kopa, pieļaujamās alternatīvas, kritēriju vērtības, *AHP* svari, *PROMETHEE* plūsmas, izvēlētā alternatīva un rezerves secība.

MCDM lēmumi ļauj analizēt ne tikai gala rezultātu, bet arī pašu lēmuma veidošanās procesu. Tas ir būtiski, jo dinamiskā uzlādes punkta piešķiršanā gala izvēle var mainīties atkarībā no slodzes, pieejamības, datu kvalitātes vai drošības riska. Viena sezona vai periods var saturēt vairākus potenciālus lēmuma momentus, taču interpretācijas vajadzībām var tikt izvēlēts reprezentatīvs lēmumi, kas ļauj detalizēti parādīt *MCDM* aprēķina loģiku.

MCDM lēmumi struktūru var aprakstīt šādi:

$$S_t^{MCDM} = \{x_{EV}(t), A_t^0, A_t^{adm}, C_t, w, \phi^+(t), \phi^-(t), \phi(t), R_t, a_t^*\}, \quad (3.11)$$

Šajā kopā $x_{EV}(t)$ - EV pieprasījuma stāvoklis, A_t^0 - sākotnējā kandidātu kopa, A_t^{adm} - pieļaujamo alternatīvu kopa, C_t - kritēriju matrica, w - *AHP* svaru vektors, $\phi^+(t), \phi^-(t), \phi(t)$ - *PROMETHEE* plūsmas, R_t - pilns rangs, a_t^* - rekomendētā alternatīva.

Rezultātu interpretācijas vidē *MCDM* lēmumi tiek izmantots kā skaidrojošs panelis. Tajā redzams, kura alternatīva izvēlēta, kuras alternatīvas paliek rezervē, kāda ir neto plūsmas vērtība un kādi kritēriji ietekmējuši rangu. Tas nodrošina lēmuma pamatojuma pārskatāmību, ļaujot pētniekam vai lēmuma pieņēmējam izsekot, kā veidojies alternatīvu rangs un kāpēc konkrētā alternatīva ieguvusi augstāko prioritāti.

3.7.tabula

MCDM lēmumi sastāvdaļas

Lēmumi elements	Saturs	Interpretācija
EV pieprasījums	*SOC*, nepieciešamā enerģija, pieprasītā jauda, lietotāja ierobežojumi	Nosaka lēmuma sākuma situāciju
Kandidātu kopa	Sākotnēji apsveramās alternatīvas	Parāda izvēles telpu pirms filtrēšanas
Pieļaujamās alternatīvas	Alternatīvas pēc filtrēšanas	Parāda, kuras alternatīvas ir izmantojamas
Kritēriju matrica	Attālums, jauda, slodze, rezerve, gaidīšana, uzticamība, risks	Nodrošina *MCDM* aprēķina pamatu
AHP svari	Kritēriju relatīvais svarīgums	Parāda ekspertu prioritāšu struktūru
PROMETHEE plūsmas	$\phi^+(t), \phi^-(t), \phi(t)$	Parāda alternatīvu dominances un trūkumu struktūru
Gala rangs	Alternatīvu secība	Nodrošina galveno un rezerves izvēli
Izvēlētā alternatīva	a_t^*	Praktiska rekomendācija konkrētajā laikā
Rezerves secība	$a_{(2)}, \dots, a_{(m)}$	Nodrošina noturību, ja pirmā izvēle kļūst nepieejama

Piezīme: MCDM lēmumi ir būtisks validācijas elements, jo tas ļauj detalizēti interpretēt vienu konkrētu dinamiskās piešķiršanas lēmumu un sasaistīt to ar KPI un scenārija rezultātiem.

3.4.5. Kiberdrošības un uzticamības slāņa vieta prototipā

Prototipā ir iekļauts kiberdrošības un uzticamības slānis, kas atbilst promocijas darba uz uzticamību orientētajai pieejai. Šis slānis nav ārējs komentārs pēc *MCDM* aprēķina, bet daļa no lēmumu modeļa. Tas nozīmē, ka datu kvalitāte, komunikācijas stabilitāte, autentifikācijas drošība, datu integritāte un kiberriska indikators var ietekmēt alternatīvas filtrēšanu, *PROMETHEE* rangu vai gala neto plūsmas korekciju.

Kiberdrošības slāņa metodoloģiskais pamats šajā darbā balstās uz autora līdzautoru izstrādāto lēmumu atbalsta ietvaru kiberdrošības risku novērtēšanai *EV* uzlādes infrastruktūrā [13]. Minētajā publikācijā *AHP–PROMETHEE* balstītais kiberriska novērtēšanas ietvars tika izmantots drošības atribūtu svēršanai un risku prioritizācijai. Šajā promocijas darbā šī loģika tiek izmantota kā metodoloģisks pamats kiberdrošības riska slāņa integrācijai dinamiskā *EV* uzlādes punkta piešķiršanas modelī.

Kiberdrošības slānis prototipā tiek īstenots trīs veidos:

1. kā filtrēšanas nosacījums, ja risks pārsniedz maksimāli pieļaujamo robežu;
2. kā *PROMETHEE* minimizējams kritērijs;
3. kā gala prioritātes penalizācijas mehānisms specifiskos riska scenārijos.

Prototipa līmenī šis slānis ir būtisks, jo tas ļauj atšķirt tehniski pieejamu alternatīvu no uzticamas alternatīvas. Piemēram, uzlādes punkts var būt fiziski brīvs un jaudas ziņā piemērots, bet ar zemu datu kvalitāti, pasliktinātu komunikācijas stabilitāti vai paaugstinātu kiberrisku. Šādos gadījumos uzticamības un drošības slānis ļauj modeli padarīt piesardzīgāku, pazeminot alternatīvas prioritāti vai izslēdzot to no pieļaujamo alternatīvu kopas [12], [13], [51], [52].

Ja kiberriska indikators tiek izmantots kā penalizācijas slānis, riskam pielāgoto neto plūsmu var aprakstīt šādi:

$$\phi_{risk}(a,t) = \phi(a,t) - \lambda\rho_{cyb}(a,t). \tag{3.12}$$

kur $\phi_{risk}(a,t)$ - riskam pielāgotā neto plūsma, $\phi(a,t)$ - sākotnējā *PROMETHEE neto* plūsma, $\rho_{cyb}(a,t)$ - kiberriska indikators, λ - kiberriska penalizācijas koeficients.

Ja datu kvalitātes indikators netiek pilnā apjomā izmantots *PROMETHEE* kritēriju kopā, to var iekļaut korekcijā šādi:

$$\phi_{adj}(a,t) = \phi(a,t) - \lambda\rho_{cyb}(a,t) + \mu D_{qual}(a,t), \tag{3.13}$$

kur $D_{qual}(a,t)$ ir datu pilnīguma vai kvalitātes indikators, μ ir datu kvalitātes jutīguma koeficients.

Šāda korekcija izmantojama tikai tad, ja datu kvalitātes un kiberriska rādītāji nav jau iekļauti PROMETHEE kritērijos, lai izvairītos no dubultas uzskaites.

3.8.tabula

Kiberdrošības un uzticamības slāņa realizācija prototipā

Indikators	Prototipa interpretācija	Ietekme uz *MCDM* lēmumu
Datu pilnīgums	Vai statusa, slodzes un drošības dati ir pietiekami pilnīgi	Var paaugstināt vai pazemināt uzticamības vērtējumu
Datu vecums	Cik aktuāls ir pēdējais derīgais datu punkts	Novecojuši dati samazina alternatīvas uzticamību
Komunikācijas stabilitāte	Sakaru risinājumu un statusa datu ticamība	Ietekmē sesijas stabilitātes un datu uzticamības kritērijus
Autentifikācijas drošība	Piekļuves un lietotāja identifikācijas riska līmenis	Var tikt izmantota kā drošības kritērijs vai filtrs
Datu integritāte	Statusa, slodzes, uzlādes profila un mērījumu datu ticamība	Ietekmē lēmuma korektumu
Kiberrisks	Normalizēts riska indikators	Var filtrēt, penalizēt vai pazemināt alternatīvu rangā

Drošības penalizācija	Riskam pielāgota *neto* plūsmas korekcija	Samazina *neto* plūsmu riskantām alternatīvām

Piezīme: kiberdrošības slānis prototipā netiek interpretēts kā pilns tehniskais drošības audits. Tas tiek izmantots kā MCDM lēmumu ietekmējošs riska un uzticamības slānis, kas sasaista dinamiskās uzlādes punkta piešķiršanas modeli ar autora līdzautoru izstrādāto AHP–PROMETHEE kiberdrošības riska novērtēšanas ietvaru [13].

3.4.6. Rezultātu vizualizācijas un interpretācijas vide

Aprēķinu rezultātu vizualizācijas un interpretācijas vide apkopo aprēķinu rezultātus tā, lai validācijas secinājumi būtu pārskatāmi un interpretējami. Tā struktūrā tiek iekļauti gan datu kopsavilkumi, gan *MCDM* rezultāti, gan scenāriju salīdzinājumi.

Rezultātu interpretācijas vidē tiek attēloti šādi bloki:

- analizējamā perioda vai scenārija apraksts;
- validācijas objektu slodžu profilu kopsavilkums;
- *EV* pieprasījuma parametri;
- kandidātu un pieļaujamo alternatīvu skaits;
- filtrēšanas rezultāti;
- *MCDM* lēmumi;
- *PROMETHEE neto* plūsmas;
- alternatīvu rangs;
- izvēlētā alternatīva un rezerves alternatīvas;
- lietotāja, infrastruktūras, tīkla, uzticamības un drošības *KPI*;
- ģeotelpiskais uzlādes punktu slānis;
- kiberdrošības un datu kvalitātes indikatoru panelis.

3.9.tabula

Rezultātu vizualizācijas un interpretācijas vides bloki

Bloks	Attēlotā informācija	Saistība ar promocijas darba metodoloģiju
Perioda/scenārija bloks	Periods, scenārija parametri, datu kopsavilkums	Nodrošina scenāriju un periodu salīdzināšanu
Slodžu profilu panelis	*EVSE* un barošanas avotu jaudas profili	Pamato tīkla kritēriju aprēķinu
Karte	*EV* uzlādes punktu izvietojums un blīvums	Pamato sasniedzamības un lokālo īpatnību analīzi
MCDM lēmumi	Kritēriji, svari, rangs, izvēlētā alternatīva	Parāda lēmuma momenta aprēķinu
PROMETHEE panelis	*Neto* plūsmas un alternatīvu secība	Nodrošina rezultātu interpretāciju
KPI panelis	Lietotāja, tīkla, infrastruktūras, uzticamības un drošības *KPI*	Nodrošina validācijas pamatu
Kiberdrošības panelis	Kiberrisks, datu kvalitāte, penalizācija	Parāda uz uzticamību orientētā slāņa ietekmi

Rezultātu vizualizācijas un interpretācijas vide ļauj analizēt ne tikai gala izvēli, bet arī visu validācijas procesu. Piemēram, ja konkrētā scenārijā augstas jaudas alternatīva netiek izvēlēta, interpretācijas vide ļauj pārbaudīt, vai iemesls ir tīkla noslodze, jaudas rezerves trūkums, datu kvalitātes pazeminājums, kiberrisks vai citu kritēriju kombinācija.

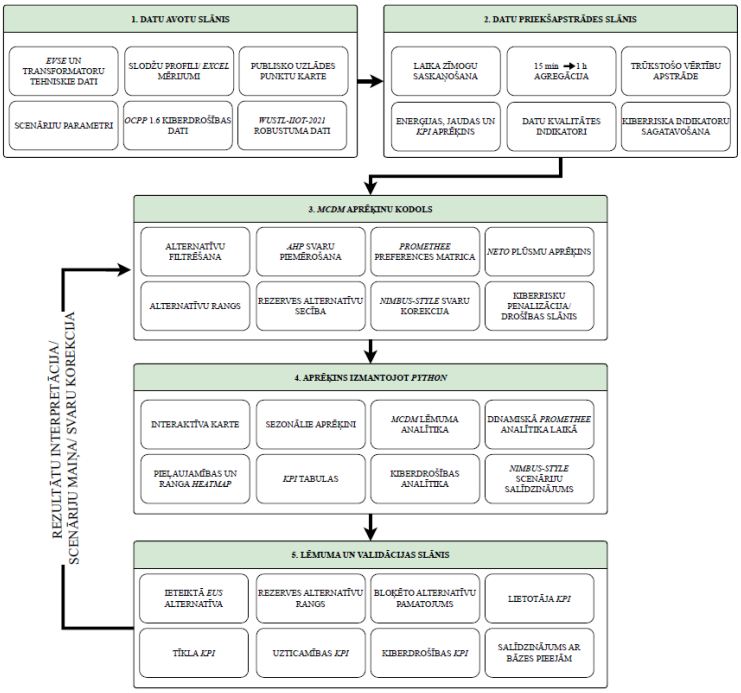
Šī vide tādējādi darbojas kā starpslānis starp aprēķinu kodolu un lēmuma interpretāciju. Tā neizmaina *MCDM* aprēķinu loģiku, bet padara to pārskatāmu, atkārtojamu un skaidrojamu.

3.4.7. Saistība ar lēmuma atbalsta sistēmas arhitektūru

Lai gan šajā promocijas darbā aprēķinu prototips netiek veidots kā komerciāla lēmuma atbalsta sistēmas platforma, tā loģika ir saderīga ar lēmumu atbalsta sistēmas arhitektūras pamatprincipiem. Lēmuma atbalsta sistēmas literatūrā lēmumu atbalsta sistēmas tiek interpretētas kā rīki sarežģītu un daļēji strukturētu lēmumu problēmu risināšanai, kuros nepieciešams apvienot datus, modeļus, analītikas procedūras un lēmuma interpretāciju [48]. Dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas uzdevums pilnībā atbilst šādai problēmu klasei, jo lēmumu ietekmē vairāki savstarpēji konfliktējoši un laikā mainīgi faktori.

Prototipa struktūru var sasaistīt ar četriem lēmuma atbalsta sistēmas slāņiem. Pirmais ir datu slānis, kurā tiek iegūti un sagatavoti *EV, EVSE*, sadales tīkla, ģeotelpiskie, datu kvalitātes un kiberdrošības dati. Otrais ir modeļu un analītikas slānis, kurā tiek īstenota filtrēšana, *AHP* svaru piemērošana, *PROMETHEE* prioritizācija un riskam pielāgota korekcija. Trešais ir scenāriju un validācijas slānis, kurā tiek analizēti normālie, pīķa slodzes, lietotāja steidzamības un kiberdrošības scenāriji. Ceturtais ir interpretācijas slānis, kurā rezultāti tiek attēloti ar karti, *MCDM* lēmumi, *KPI* un rangu vizualizācijām.

Šī struktūra parāda, ka lēmuma atbalsta sistēma šajā darbā nav tikai lietotāja saskarne vai programmatūras produkts. Tā ir metodoloģijas praktiskās realizācijas forma, kur teorētiskais *MCDM* modelis tiek pārnests uz pārbaudāmu aprēķinu un vizualizācijas vidi. Zinātniskais kodols joprojām ir kritēriju sistēma, *AHP* svarošana, *PROMETHEE* prioritizācija, dinamiska filtrēšana un uzticamības/kiberdrošības integrācija, bet vizualizācijas vide ir šīs metodoloģijas validācijas un interpretācijas slānis. Vizuāla struktūra attēlota attēlā Nr.3.2.



3.2. att. Prototipa un rezultātu vizualizācijas vides vieta lēmuma atbalsta sistēmas arhitektūrā
Avots: autora veidots, balstoties uz lēmuma atbalsta sistēmas attīstības, IoT enerģijas pārvaldības, EV lēmumu pieņemšanas sistēmas un kiberdrošības riska novērtēšanas literatūru [11]–[13], [48], [49].

Turpmākā attīstībā šādu lēmumu atbalsta sistēmas prototipu iespējams papildināt ar digitālā dvīņa un prognozējošās analītikas elementiem. Digitālais dvīnis ļautu sasaistīt uzlādes infrastruktūras fiziskos objektus, sadales tīkla parametrus, ģeotelpiskos datus un vēsturiskos mērījumus vienotā modelēšanas vidē [54]. Savukārt prognozējošās uzturēšanas un anomāliju noteikšanas metodes varētu palīdzēt savlaicīgi identificēt uzlādes iekārtu darbspējas vai datu kvalitātes pasliktināšanos, pirms tā būtiski ietekmē gala lēmumu [57]. Predictive maintenance avots tieši aptver anomāliju noteikšanu, prognozēšanu, diagnostiku, optimizāciju un lēmumu atbalsta rīkus dinamiskās sistēmās. Šajā darbā šie elementi netiek pilnā apjomā realizēti, taču prototipa slāņotā struktūra ļauj tos integrēt turpmākos pētījumos.

3.5. Trešās nodaļas secinājumi

Trešajā nodaļā otrajā nodaļā izstrādātais uz uzticamību orientētais dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas *MCDM* modelis tika pārnests no teorētiska formulējuma uz praktiski izpildāmu aprēķinu metodoloģiju. Nodaļā tika definēta kritēriju operacionalizācija, *AHP* svaru izmantošana, *PROMETHEE* prioritizācijas aprēķinu procedūra, dinamiskās filtrēšanas algoritms un prototipa aprēķinu realizācijas loģika. Tādējādi nodaļa veido pāreju no teorētiskā modeļa uz datu, scenāriju un validācijas vidi, kas tiek detalizēta nākamajās nodaļās.

Otrajā nodaļā definētais teorētiskais *MCDM* modelis trešajā nodaļā tika pārveidots aprēķinu metodoloģijā. Tas nozīmē, ka alternatīvu kopa, kritēriju sistēma, *AHP* svaru loģika, *PROMETHEE* prioritizācija un uzticamības/kiberdrošības integrācija tika sasaistīta ar konkrētu aprēķinu secību.

Kritēriju sistēma tika operacionalizēta, katrai kritēriju grupai nosakot aprēķināmu indikatoru, iespējamo datu avotu, *MCDM* virzienu un lomu modelī. Tas ļauj teorētiski definētos transportlīdzekļa, uzlādes punkta, sadales tīkla, lietotāja, ekonomiskos, *RES/BESS*, uzticamības un kiberdrošības kritērijus izmantot praktiskā alternatīvu vērtēšanā.

Nodaļā tika precizēts, ka atsevišķi kritēriji modelī var darboties dažādās lomās: kā filtrēšanas nosacījumi, kā *PROMETHEE* rangēšanas kritēriji vai kā gala prioritātes korekcijas faktori. Šāds dalījums ir būtisks, jo ne visas alternatīvas drīkst nonākt rangēšanas posmā, tehniski, tīkla, datu kvalitātes vai kiberdrošības ziņā nepieļaujamas alternatīvas vispirms ir jāizslēdz.

AHP metode tika izmantota kā kritēriju svaru noteikšanas instruments, nevis kā gala alternatīvu izvēles metode. Tika definēta lokālo un globālo svaru pārnese uz *PROMETHEE* aprēķinu, kā arī scenāriju svaru korekcijas iespēja, kas nepieciešama jutīguma analīzei un dažādu ekspluatācijas režīmu salīdzināšanai.

PROMETHEE metode tika operacionalizēta kā galvenais alternatīvu prioritizācijas mehānisms. Nodaļā tika definēta kritēriju virzienu interpretācija, preferenču funkciju izmantošana, kopējā preferences indeksa aprēķins, pozitīvās, negatīvās un neto plūsmas noteikšana, kā arī gala ranga un rezerves alternatīvu secības iegūšana.

Dinamiskās filtrēšanas un piešķiršanas algoritms nodrošina, ka modelis vispirms izveido kandidātu kopu, pēc tam izslēdz nepieļaujamās alternatīvas un tikai tad veic *PROMETHEE* prioritizāciju. Šāda secība samazina risku, ka modelis rekomendē uzlādes punktu, kas konkrētajā brīdī nav sasniedzams, savietojams, darbspējīgs, tīkla ziņā pieļaujams vai drošības ziņā uzticams.

Dinamiskās atjaunināšanas mehānisms ļauj pielāgot uzlādes punkta izvēli laikā mainīgiem apstākļiem. Modelis var tikt pārrēķināts periodiski vai notikum balstīti, piemēram, mainoties *EV* stāvoklim, uzlādes punkta pieejamībai, gaidīšanas laikam, sadales tīkla noslodzei, datu kvalitātei vai kiberdrošības riska līmenim.

Rezerves alternatīvu secības noteikšana ir būtiska uz uzticamību orientētas piešķiršanas sastāvdaļa. *PROMETHEE* pilnais rangs ļauj ne tikai izvēlēties primāro uzlādes punktu, bet arī

saglabāt nākamās piemērotākās alternatīvas gadījumam, ja sākotnēji izvēlētais punkts kļūst nepieejams vai vairs neatbilst filtrēšanas nosacījumiem.

Prototipa aprēķinu realizācijas loģika parāda, ka izstrādātais *MCDM* modelis ir reproducējami īstenojams datu un scenāriju vidē. Prototips ietver datu sagatavošanu, filtrēšanu, *AHP* svaru piemērošanu, *PROMETHEE* rangēšanu, kiberdrošības un uzticamības slāni, *KPI* aprēķinu un rezultātu interpretāciju.

Aprēķinu rezultātu vizualizācijas un interpretācijas vide nodrošina *MCDM* rezultātu pārskatāmību un ļauj izsekot alternatīvu prioritātes veidošanās loģikai. Tajā iespējams analizēt sākotnējo kandidātu kopu un pieļaujamo alternatīvu kopu, alternatīvu izslēgšanas iemeslus, kritēriju vērtības, ar *AHP* noteiktos kritēriju svarus, *PROMETHEE* plūsmas, gala rangējumu un rezerves alternatīvas, kā arī uzticamības un kiberdrošības indikatoru ietekmi uz iegūtajiem rezultātiem.

Kiberdrošības un uzticamības slānis tika integrēts aprēķinu metodoloģijā kā daļa no lēmuma kvalitātes novērtējuma. Tas ļauj vērtēt ne tikai uzlādes punkta tehnisko un lietotāja ērtības piemērotību, bet arī datu aktualitāti, komunikācijas stabilitāti, autentifikācijas drošību, datu integritāti un kiberriska ietekmi uz gala izvēli.

Trešās nodaļas rezultātā ir izveidota pilna algoritmiskā bāze nākamajiem promocijas darba posmiem. Ceturtajā nodaļā šī metodoloģija tiek sasaistīta ar datu, scenāriju un eksperimentālās vides izveidi, savukārt piektajā nodaļā tā tiek izmantota modeļa validācijai, salīdzināšanai ar vienkāršotām piešķiršanas pieejām un uzticamības/kiberdrošības slāņa pienesuma novērtēšanai.

4. DATU, SCENĀRIJU UN EKSPERIMENTĀLĀS VIDES IZVEIDE

4.1. Datu struktūra *MCDM* modeļa validācijai

Lai izstrādāto uz uzticamību orientēto dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas modeli būtu iespējams validēt, nepieciešama datu struktūra, kas sasaista 2. nodaļā definēto teorētisko *MCDM* modeli ar 3. nodaļā izstrādāto aprēķinu metodoloģiju. Validācijas datu struktūrai jānodrošina iespēja katru uzlādes alternatīvu aprakstīt ar tehniskajiem, ekspluatācijas, ģeotelpiskajiem, sadales tīkla, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības parametriem.

Šajā promocijas darbā validācijas vide tiek veidota kā metodoloģiska un scenāriju balstīta eksperimentālā vide, nevis kā pilna mēroga lauka eksperiments ar tiešu pieslēgumu reāllaika *CPO, CSO, DSO* un *EV* lietotāju sistēmām. Šāda pieeja ļauj kontrolētos apstākļos pārbaudīt, vai *AHP–PROMETHEE* modelis spēj strukturēti integrēt lietotāja, infrastruktūras, tīkla, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības kritērijus uzlādes punkta izvēlē.

Validācijas datu struktūra šajā darbā tiek veidota ne tikai kā ievaddatu tabulu kopums, bet kā metodoloģiska saite starp fizisko infrastruktūru, mērījumiem, aprēķinātajiem indikatoriem un *MCDM* lēmuma modeli. Šāda pieeja atbilst datu balstītas infrastruktūras pārvaldības loģikai, kur objektu tehniskie parametri, ģeotelpiskā informācija, mērījumi un sistēmas stāvokļa indikatori tiek apvienoti vienotā analītiskā vidē [54]. Tādēļ katrs datu slānis šajā nodaļā tiek sasaistīts ar konkrētu lomu *MCDM* modelī: alternatīvu ģenerēšanu, filtrēšanu, kritēriju aprēķinu, scenāriju modelēšanu vai *KPI* novērtēšanu.

Validācijas datu struktūras mērķis ir nodrošināt, lai katrai alternatīvai būtu iespējams noteikt tās tehniskos parametrus, atļauto un uzstādīto jaudu, piesaisti transformatoram vai barošanas avotam, slodzes profilu, attāluma raksturojumu, datu kvalitātes indikatoru un scenāriju līmenī arī uzticamības un kiberdrošības rādītājus.

4.1.1. Validācijas objektu kopējā struktūra

Promocijas darba validācijas vide tiek veidota, izmantojot četras anonimizētas *EV* uzlādes infrastruktūras vietas:

$$V = \{RIGA1, RIGA2, PIERIGA1, PIERIGA2\}, \tag{4.1}$$

RIGA1 un *RIGA2* reprezentē pilsētas tipa uzlādes infrastruktūras objektus, savukārt *PIERIGA1* un *PIERIGA2* reprezentē Pierīgas jeb piepilsētas tipa objektus. Šāds dalījums ir nozīmīgs, jo uzlādes punkta piemērotību ietekmē ne tikai nominālā jauda vai attālums līdz lietotājam, bet arī lokālais elektroapgādes konteksts, pieslēguma jaudas rezerve, infrastruktūras blīvums, pieejamā datu struktūra un komunikācijas risinājumi. Šī pieeja atbilst autora līdzautoru 2024. gada publikācijā uzsvērtajai nepieciešamībai *EV* pārvaldībā ņemt vērā viedās tehnoloģijas un lokālās īpatnības [11].

Katrs validācijas objekts tiek interpretēts kā lokāla kiberfiziska uzlādes infrastruktūras vienība:

$$v_i = \{T_i, TR_i, B_i, EUS_i, P_i(t), D_i(t), SEC_i(t)\}, \tag{4.2}$$

kur T_i - teritorijas tips, TR_i - transformatora vai transformatoru tehniskie dati, B_i - barošanas avota vai kontrolskaitītāja slānis, EUS_i - uzlādes infrastruktūras slānis, $P_i(t)$ - laikatkarīgie slodžu profili, $D_i(t)$ - datu kvalitātes un uzticamības indikatori, $SEC_i(t)$ - kiberdrošības indikatoru vai scenāriju slānis.

Promocijas darba eksperimentālajā vidē dati tiek strukturēti četrās galvenajās grupās. Pirmā grupa ir statiskie tehniskie dati: transformatoru nominālā jauda, sprieguma līmenis, īsslēguma spriegums, zudumi, uzstādītā un atļautā *EUS* jauda, uzlādes punktu skaits, *AC/DC*

struktūra, kabeļu un aizsardzības risinājumi, zemējuma dati un komunikācijas aprīkojums. Otrā grupa ir dinamiskie slodžu profili: barošanas avotu un *EUS* jaudas laika rindas, kas ļauj aprēķināt noslodzes koeficientu, jaudas rezervi, *EVSE* slodzes īpatsvaru un potenciālo pārslodzes risku. Trešā grupa ir scenāriju dati: *EV* pieprasījuma parametri, lietotāja ierobežojumi, gaidīšanas laika pieņēmumi, datu kvalitātes traucējumi un kiberdrošības riska līmeņi. Ceturtā grupa ir ģeotelpiskie dati: *EV* sākuma punkts, anonimizētās validācijas zonas un attālumi līdz uzlādes alternatīvām.

Gala validācijas datu vide aptver četrus anonimizētus *EV* uzlādes infrastruktūras objektus: divus pilsētas objektus (*RIGA1* un *RIGA2*) un divus piepilsētas objektus (*PIERIGA1* un *PIERIGA2*). Kopā validācijas modelī iekļautas septiņas *EUS* alternatīvas ar 25 uzlādes vietām, no kurām 20 ir *AC* un 5 ir *DC* uzlādes vietas. Kopējā *EUS* uzstādītā jauda ir 598,00 kW, savukārt kopējā atļautā/aprēķina jauda ir 463,32 kW. Dinamisko datu slāni veido 11 slodžu profilu objekti: septiņi *EUS* profili un četri barošanas avotu profili.

4.1.tabula

Validācijas objektu kopējā struktūra

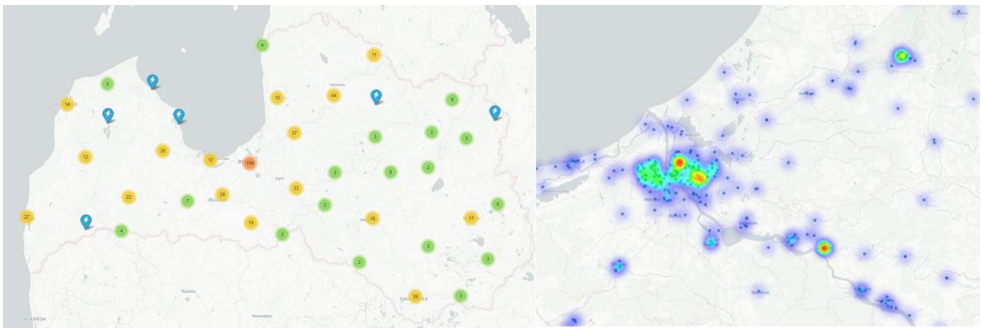
Validācijas objekts	Teritorijas tips	Elektroapgādes struktūra	Uzlādes infrastruktūras struktūra	Dinamisko datu slānis	Validācijas nozīme
RIGA1	Pilsētas teritorija	Divi 630 kVA transformatori: $RIGA1_{TR1}$ un $RIGA1_{TR2}$	3 *EUS* objekti, kopā 10 uzlādes vietas: 6 *AC* un 4 *DC*	$RIGA1_{BAR1\,TR1}$, $RIGA1_{BAR1\,TR2}$, $RIGA1_{EUS1}$, $RIGA1_{EUS2}$, $RIGA1_{EUS3}$	Pilsētas objekts ar kombinētu *AC/DC* uzlādi un atsevišķu transformatoru slodžu sadalījumu
RIGA2	Pilsētas teritorija	Divi 400 kVA transformatori: $RIGA2_{TR1}$ un $RIGA2_{TR2}$	2 *EUS* objekti, kopā 10 *AC* uzlādes vietas	$RIGA2_{BAR1\,TR1}$, $RIGA2_{BAR1\,TR2}$, $RIGA2_{EUS1}$, $RIGA2_{EUS2}$	Pilsētas objekts ar pilnībā *AC* uzlādes struktūru un atšķirīgu atļautās/uzstādītās jaudas attiecību
PIERIGA1	Pierīgas teritorija	Viens 250 kVA transformators $PIERIGA1_{TR2}$	1 *EUS* objekts, 2 *AC* uzlādes vietas	$PIERIGA1_{EUS1}$	Pierīgas objekts ar mazāku uzlādes infrastruktūras mērogu
PIERIGA2	Pierīgas teritorija	Viens 160 kVA transformators $PIERIGA2_{TR1}$	1 *EUS* objekts, 3 uzlādes vietas: 1 *DC* un 2 *AC*	$PIERIGA2_{EUS1}$	Pierīgas objekts ar jauktu *AC/DC* struktūru, slodzes kontroles ierīci un mazāku transformatora jaudu

Piezīme: validācijas objektu nosaukumi ir anonimizēti. Tie neietver precīzas adreses, klientu identificējošu informāciju vai komercnosaukumus. Precīzas objektu koordinātas promocijas darba publiskajā attēlojumā netiek norādītas.

Kopumā validācijas vide ietver septiņas *EUS* alternatīvas: $RIGA1_{EUS1}$, $RIGA1_{EUS2}$, $RIGA1_{EUS3}$, $RIGA2_{EUS1}$, $RIGA2_{EUS2}$, $PIERIGA1_{EUS1}$ un $PIERIGA2_{EUS1}$. Tās tiek izmantotas kā *MCDM* alternatīvas, kuras var tikt filtrētas, vērtētas un rangētas ar *PROMETHEE* metodi. Papildus tiek analizēti barošanas avotu profili, kas ļauj sasaistīt *EUS* slodzi ar attiecīgo elektroapgādes objektu.

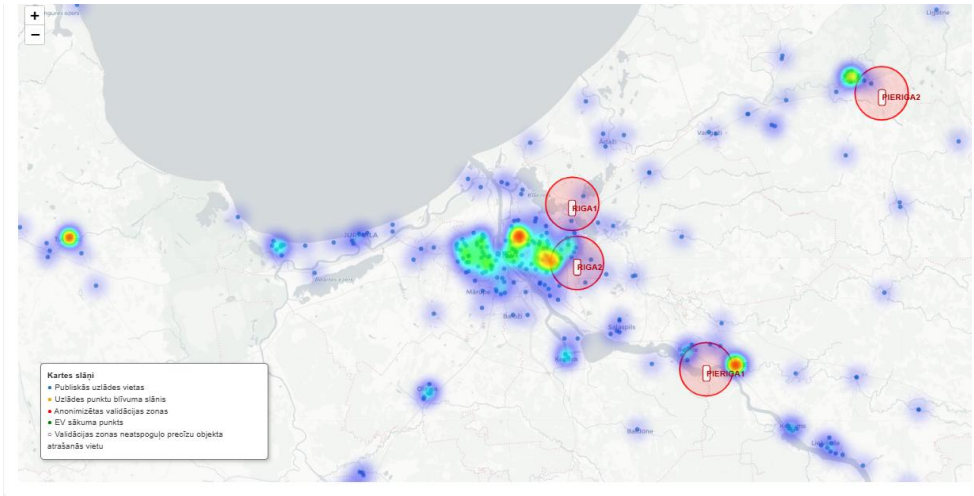
Lai pamatotu dinamiskās uzlādes punkta piešķiršanas telpisko raksturu, eksperimentālās vides sagatavošanā tiek izmantots Latvijas *EV* uzlādes punktu ģeotelpiskais slānis, 4.1.attēls. Tas nodrošina infrastruktūras izvietojuma kontekstu, ļauj interpretēt uzlādes punktu blīvumu un pamato pilsētas/Pierīgas scenāriju nepieciešamību. Kartes mērķis nav veikt

pilnu Latvijas uzlādes infrastruktūras optimizāciju, bet gan parādīt, ka uzlādes punkta izvēle ir ne tikai tehnisks, bet arī telpisks lēmums.



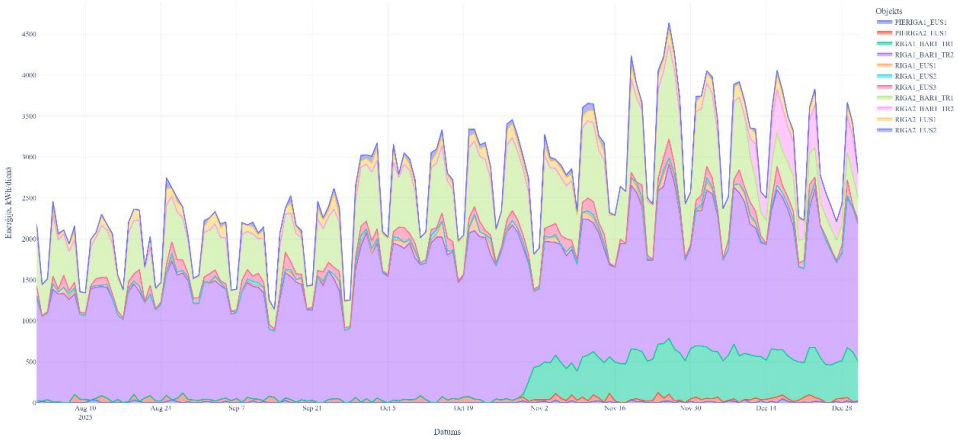
4.1. att. Latvijas *EV* uzlādes punktu telpiskais izvietojums un blīvuma struktūra
Avots: autora veidots, izmantojot EV uzlādes punktu koordinātu datu kopu un Python/Folium ģeotelpiskās vizualizācijas rīkus.

Lai saglabātu infrastruktūras objektu konfidencialitāti, validācijas objektu precīzās koordinātas netiek publiskotas. Attēlos tās tiek aizstātas ar anonimizētām validācijas zonām, saglabājot telpiskās analīzes loģiku, bet neatklājot elektroapgādes un uzlādes infrastruktūras pieslēguma vietas.



4.2. att. Anonimizētās validācijas zonas un *EV* sākuma punkts eksperimentālajā vidē
Avots: autora veidots. Validācijas objektu precīzas atrašanās vietas netiek attēlotas; kartē izmantotas anonimizētas zonas.

Papildus ģeotelpiskajam slānim validācijas sākumā ir lietderīgi parādīt arī dinamisko slodžu profilu piemēru. Tas palīdz lasītājam saprast, ka validācijas vide nebalstās tikai uz statisku objektu aprakstu, bet ietver laikā mainīgus mērījumus. Slodžu profilu attēlā ieteicams parādīt vienu reprezentatīvu periodu, kurā redzamas barošanas avota un ar to saistīto *EUS* slodzes līknes.



4.3. att. Barošanas avotu un *EUS* slodžu profilu piemērs validācijas periodā

Avots: autora veidots, izmantojot validācijas objektu barošanas avotu un EUS slodžu profilu datus.

4.1.2. *EV* un uzlādes pieprasījuma dati

Dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas modelī lēmuma iniciators ir elektriskais transportlīdzeklis un tā uzlādes nepieciešamība. *EV* netiek interpretēts tikai kā transportlīdzeklis, bet kā datu avots, kura stāvoklis nosaka uzlādes vajadzību, sasniedzamības ierobežojumus, pieņemamo uzlādes jaudu un lietotāja prasības.

Atbilstoši 2. nodaļā definētajam modelim *EV* stāvokļa vektoru var pierakstīt šādi:

$$x_{EV}(t) = \left[SOC(t), E_{req}(t), R_{rem}(t), P_{acc}(t), u_{pref}(t)\right], \tag{2.7}$$

EV lietotāja uzvedība būtiski ietekmē uzlādes sākuma laiku, nepieciešamo enerģijas daudzumu un pieļaujamo elastību [6]. Tādēļ validācijas scenārijos *EV* pieprasījums tiek definēts nevis kā izolēts enerģijas daudzums, bet kā lēmuma situācija, kur konkrētam EV noteiktā laikā jāizvēlas piemērotākā uzlādes alternatīva. Šāda pieeja atbilst *EV* pārvaldības un viedo tehnoloģiju integrācijas literatūrai, kur uzsvērta transportlīdzekļa, lietotāja un lokālās infrastruktūras savstarpējā saistība [11]. *EV* tehniskās uzbūves un uzlādes procesa interpretācijā tiek ņemti vērā arī *EV* pamatelementi: akumulators, uzlādes sistēma, elektromotors un kontroles elektronika [34], savukārt *IoT-enabled EV* monitoringa literatūra pamato *BMS* datu, *SOC/SOH* novērtējuma un attālinātas uzraudzības izmantošanu lēmumu atbalstam [41].

Uzlādes pieprasījuma notikumu validācijas modelī var aprakstīt šādi:

$$q_r = \left[t_r, SOC_r, E_{req,r}, P_{acc,r}, L_{EV,r}, u_{pref,r}\right], \tag{4.3}$$

kur q_r ir r-tais uzlādes pieprasījums, t_r - pieprasījuma laiks, SOC_r - sākotnējais akumulatora uzlādes līmenis, $E_{req,r}$ - nepieciešamais enerģijas daudzums, $P_{acc,r}$ - *EV* pieņemamā uzlādes jauda, $L_{EV,r}$ - *EV* atrašanās vieta vai sākuma punkts, $u_{pref,r}$ - lietotāja ierobežojumi.

Ja ir zināma akumulatora kapacitāte un mērķa uzlādes līmenis, nepieciešamo enerģijas daudzumu var aprēķināt šādi:

$$E_{req}(t) = \frac{\left(SOC_{target} - SOC(t)\right) * E_{bat}}{100} * \frac{1}{\eta_{ch}}, \tag{4.4}$$

kur SOC_{target} ir vēlamais uzlādes līmenis, E_{bat} - akumulatora kapacitāte, η_{ch} - uzlādes procesa lietderības koeficients.

Ja konkrētā validācijas scenārijā faktiskie *BMS* dati nav pieejami, $SOC(t)), SOC_{target}, E_{bat}$ un $P_{acc}(t)$ tiek definēti scenāriju veidā. Tas ļauj kontrolēt eksperimenta nosacījumus un pārbaudīt *MCDM* modeļa reakciju dažādās uzlādes vajadzību situācijās.

4.2.tabula

EV un uzlādes pieprasījuma datu elementi validācijas modelī

Datu elements	**Apzīmējums**	**Datu avots validācijas vidē**	***MCDM* loma**
Akumulatora uzlādes līmenis	$SOC(t)$	Scenāriju dati vai *BMS/EV* dati, ja pieejami	Aktivizē uzlādes nepieciešamību un ietekmē steidzamību
Nepieciešamā enerģija	$E_{req}(t)$	Aprēķins no mērķa *SOC* un akumulatora kapacitātes vai scenāriju dati	Nosaka nepieciešamo uzlādes apjomu
Atlikušais nobraukums	$R_{rem}(t)$	*EV* dati vai scenāriju pieņēmums	Izmantojams sasniedzamības filtram
Pieņemamā uzlādes jauda	$P_{acc}(t)$	*EV* tehniskie dati vai scenāriju pieņēmums	Ierobežo maksimāli izmantojamo *AC/DC* uzlādes jaudu
EV atrašanās vieta	$L_{EV}(t)$	Ģeotelpisks sākuma punkts validācijas scenārijā	Nosaka attāluma un maršruta novirzes kritēriju
Lietotāja preferences	$u_{pref}(t)$	Scenāriju dati vai lietotāja profils	Nosaka maksimālo gaidīšanas laiku, pieļaujamo novirzi un komforta robežas

Promocijas darba ģeotelpiskajā validācijas vidē tiek definēts transportlīdzekļa sākuma punkts $L_{EV}(t)$. Tas ļauj aprēķināt attālumu līdz anonimizētajiem validācijas objektiem un izveidot attāluma kritēriju *MCDM* vajadzībām. Tā kā attālums ir minimizējams kritērijs, tā normalizēto vērtību var aprēķināt šādi:

$$\tilde{d}(a,t) = \frac{d_{max}(t) - d(a,t)}{d_{max}(t) - d_{min}(t)}, \tag{4.5}$$

kur $d(a)$ ir attālums no EV līdz alternatīvai a, d_{min} un d_{max} ir minimālais un maksimālais attālums alternatīvu kopā.

Šāda normalizācija nodrošina, ka mazāks attālums dod lielāku kritērija vērtību un līdz ar to labāku alternatīvas novērtējumu.

4.1.3. Uzlādes punktu un operatora dati

Uzlādes punktu un operatora dati validācijas modelī raksturo katras alternatīvas tehnisko un ekspluatācijas piemērotību. Ja 2. nodaļā uzlādes punkts tika definēts kā *MCDM* alternatīva, tad šajā sadaļā tas tiek pārnests uz konkrētu datu struktūru, kur alternatīvas apraksta uzstādītā jauda, atļautā jauda, uzlādes punktu skaits, *AC/DC* struktūra, savienotāja veids, pieejamība, gaidīšanas laiks, operatora statuss, komunikācijas risinājumi un izmantošanas intensitāte.

Šāda pieeja ir saskaņā ar elektrotransportlīdzekļu uzlādes infrastruktūras un tās integrācijas elektroenerģijas tīklā literatūru, kur uzlādes infrastruktūra tiek raksturota ne tikai pēc fiziskās jaudas, bet arī pēc vadības, komunikācijas, pieejamības un ekspluatācijas konteksta [10], [11], [16], [22], [33].

Katras alternatīvas uzlādes punkta stāvokli validācijas modelī var aprakstīt ar vektoru:

$$x_{CP}(a,t) = \begin{bmatrix} P_{ch}^{avail}(a,t), W(a,t), L(a), \\ C_{conn}(a), S_{op}(a,t), p(a,t), U_{int}(a,t) \end{bmatrix}, \quad (4.6)$$

kur P_{ch}^{avail} ir pieejamā uzlādes jauda, $W(a,t)$ - gaidīšanas laika vai noslodzes indikators, $L(a)$ - atrašanās vietas vai sasniedzamības raksturojums, $C_{conn}(a)$ - savienotāja un uzlādes tipa savietojamība, $S_{op}(a,t)$ - ekspluatācijas statuss, $p(a,t)$ - cena vai tarifs, $U_{int}(a,t)$ - izmantošanas intensitātes indikators.

Validācijas objektos uzlādes infrastruktūra ir atšķirīga gan pēc kopējās jaudas, gan pēc *AC/DC* struktūras. *RIGA1* objektā ir 10 uzlādes vietas, no kurām 6 ir *AC* un 4 ir *DC*. *RIGA2* objektā ir 10 *AC* uzlādes vietas. *PIERIGA1* objektā ir 2 *AC* uzlādes vietas, savukārt *PIERIGA2* objektā ir jaukta struktūra, viena *DC* uzlādes vieta un divas *AC* uzlādes vietas. Šī dažādība ļauj pārbaudīt, vai *MCDM* modelis spēj korekti salīdzināt alternatīvas ar atšķirīgu tehnisko konfigurāciju un jaudas ierobežojumiem.

4.3.tabula

Uzlādes infrastruktūras tehniskā struktūra validācijas objektos

Objekts / *EUS*	**Vieta**	**Transf.**	**Tips**	**Punkti**	**Uzstādītā jauda, kW**	**Atļautā jauda, kW**	**Viena punkta jauda, kW**	**Pieejamība**	**Kiberrisks**	**Cena, €/kWh**	**Attālums, km**	**Komunikācijas / vadības raksturojums**
$RIGA1_{EUS1}$	*RIGA1*	$RIGA1_{TR2}$	*DC*	4	100	100	25	0,95	0,15	0,35	26,23	*PoE* komutatori, *4G* maršrutētāji, *Cat5e/CAT6* vadības kabeļi, *EUS* vadības moduļi
$RIGA1_{EUS2}$	*RIGA1*	$RIGA1_{TR1}$	*AC*	2	44	44	22	0,9	0,3	0,3	26,23	Sakaru tips shēmā nav pilnībā identificēts
$RIGA1_{EUS3}$	*RIGA1*	$RIGA1_{TR1}$	*AC*	4	88	69,3	22	0,9	0,25	0,3	26,23	Ārējā sadalne; pieejami zemējuma, izolācijas un cilpas mērījumi; sakaru tips nav pilnībā identificēts
$RIGA2_{EUS1}$	*RIGA2*	$RIGA2_{TR1}$	*AC*	6	132	51,5	22	0,9	0,2	0,3	25,72	Daļai iekārtu *F/UTP CAT5E* sakari; *EUS6* sakariem *SIM* karte
$RIGA2_{EUS2}$	*RIGA2*	$RIGA2_{TR2}$	*AC*	4	88	83	22	0,9	0,2	0,3	25,72	*CK-1* pieslēgums, *AC wallbox* struktūra, zemējuma dati
$PIERIGA1_{EUS1}$	*PIERIGA1*	$PIERIGA1_{TR2}$	*AC*	2	44	64	22	0,85	0,35	0,28	17,49	Vadības modulis redzams, bet *4G/Ethernet* tips nav droši identificēts
$PIERIGA2_{EUS1}$	*PIERIGA2*	$PIERIGA2_TR1$	*AC/ DC*	3	102	51,52	58	0,92	0,15	0,34	23,14	*Etrel Load Guard, 4G* maršrutētājs, *Cat5e F/UTP* sakaru kabeļi uz *EUS1/EUS2.1/EUS2.2*

Piezīme: uzstādītās un atļautās jaudas atšķirība ir būtiska MCDM validācijā, jo nomināli lielāka uzlādes infrastruktūras jauda ne vienmēr nozīmē lielāku operatīvi pieejamu jaudu. Šī atšķirība tieši ietekmē filtrēšanas nosacījumus, jaudas rezerves kritēriju un tīkla pieļaujamības novērtējumu.

Uzlādes punkta izmantošanas intensitāti var aprēķināt no *EVSE* slodzes profiliem. Attiecību pret uzstādīto jaudu var definēt šādi:

$$u_{inst}(a,t) = \frac{P_{EUS}(a,t)}{P_{inst}(a)}, \tag{4.7}$$

kur $P_{EUS}(a,t)$ - konkrētās *EUS* aktīvā jauda laikā t, $P_u(a)$ - uzstādītā jauda.

Ja nepieciešams vērtēt atļautās jaudas izmantošanu, var izmantot attiecību:

$$u_{allow}(a,t) = \frac{P_{EUS}(a,t)}{P_{allow}(a)}, \tag{4.8}$$

kur $P_{allow}(a)$ - atļautā vai aprēķina jauda.

Šie rādītāji ļauj noteikt, cik intensīvi konkrētā uzlādes infrastruktūra tiek izmantota un cik tuvu tā atrodas atļautās jaudas robežai.

Uzlādes punkta dati šajā validācijas vidē raksturo gan tehnisko, gan operacionālo alternatīvas stāvokli. Tehniskais stāvoklis ietver uzstādīto un atļauto jaudu, uzlādes punktu skaitu, *AC/DC* struktūru un pieslēguma parametrus, bet operacionālais stāvoklis: pieejamību, noslodzi, gaidīšanas laiku un datu aktualitāti. Tā kā uzlādes punkts darbojas kā digitāli savienots infrastruktūras mezgls, operatora dati ir jāvērtē kopā ar komunikācijas un datu kvalitātes indikatoriem [50], [51].

Gaidīšanas laiks validācijas modelī var tikt iegūts divos veidos. Ja operatora dati par rindām vai rezervācijām ir pieejami, tos var izmantot tieši. Ja šādi dati nav pieejami, gaidīšanas laiks tiek modelēts scenāriju veidā vai atvasināts no izmantošanas intensitātes. Šajā promocijas darbā gaidīšanas laiks tiek interpretēts kā scenāriju un noslodzes datu kombinēts indikators, jo pieejamie Excel slodžu profili galvenokārt raksturo jaudas patēriņu, nevis pilnu sesiju līmeņa rindu dinamiku.

4.1.4. Sadales tīkla dati

Sadales tīkla datu slānis ir nepieciešams, lai *MCDM* modelis neaprobežotos ar lietotāja ērtības un uzlādes punkta tehnisko parametru salīdzināšanu. Kā pamatots 1. un 2. nodaļā, *EV* uzlādes slodze var ietekmēt transformatoru un līniju noslodzi, sprieguma režīmu, jaudas rezervi un lokālo tīkla darbības pieļaujamību [9], [10], [37], [38]. Tādēļ validācijas modelī katra uzlādes alternatīva tiek sasaistīta ar attiecīgo elektroapgādes objektu, transformatoru vai barošanas avota slodzes profilu.

Sadales tīkla dati nodrošina, ka modelis ņem vērā tīkla darbības apstākļus. Šajā darbā uzlādes punkts netiek vērtēts tikai kā lietotājam pieejams pakalpojums, bet arī kā papildu slodze konkrētā tīkla mezglā. Tādēļ validācijas datu struktūrā būtiska nozīme ir transformatoru nominālajai jaudai, esošajai slodzei, brīvajai jaudas rezervei, maksimālās noslodzes riskam un tīkla notikumiem. Elektroenerģijas sistēmu operatīvās vadības pētījumi apstiprina, ka jaudas rezerve, balansēšana un režīma stabilitāte ir būtiski faktori tīkla darbības drošumam [53].

Sadales tīkla datu struktūra validācijas modelī ietver statiskos transformatoru un pieslēgumu parametrus, kā arī dinamiskos slodžu profilus. Statiskie dati raksturo tīkla jaudas un tehniskās robežas, savukārt dinamiskie dati ļauj noteikt, kā konkrētā laikā mainās slodze un pieejamā jaudas rezerve.

4.4.tabula

Transformatoru dati validācijas objektos

Objekts	**Transformators**	**Nominālā jauda, kVA**	**Sprieguma līmenis**	**Grupa**	P_k, **W**	r_k, %	u_k/z_k, %	P_0, **W**	i_0, %	***EUS*** **uzstādītā jauda, kW**	***EUS*** **atļautā jauda, kW**	P_{inst}/S_n	$P_{allowed}/S_n$
$RIGA1$	$RIGA1_{TR1}$	630	10,5/0,42 kV	Dyn11	5735	0,910	5,59	554	0,170	132	113,30	22,1 %	18,9 %
$RIGA1$	$RIGA1_{TR2}$	630	10,5/0,42 kV	Dyn11	5648	0,897	5,51	561	0,180	100	100	16,7 %	16,7 %
$RIGA2$	$RIGA2_{TR1}$	400	10/0,4 kV	Dyn11	4066	1,016	3,8	614	0,220	132	51,50	34,7 %	13,6 %
$RIGA2$	$RIGA2_{TR2}$	400	10/0,4 kV	Dyn11	4034	1,008	3,7	616	0,220	88	83	23,2 %	21,8 %
$PIERIGA1$	$PIERIGA1_{TR2}$	250	20/0,42 kV	Dyn11	3003	1,201	3,77	399	0,233	44	64	18,5 %	26,9 %
$PIERIGA2$	$PIERIGA2_{TR1}$	160	20/0,4 kV	Yzn11	2300	1,438	3,95	350	0,800	102	51,52	67,1 %	33,9 %

Piezīme: transformatoru nominālā jauda un pieslēgtās EUS jaudas struktūra ir būtiska tīkla noslodzes un jaudas rezerves kritēriju aprēķinam. Mazākas nominālās jaudas objekti, piemēram, PIERIGA2, ir īpaši nozīmīgi pīķa slodzes un tīkla pieļaujamības scenārijos.

Sadales tīkla stāvokli, kas saistīts ar konkrētu alternatīvu a, var aprakstīt ar šādu vektoru:

$$x_G(a,t) = \begin{bmatrix} P_{feed}(a,t), P_{EUS}(a,t), P_{allow}(a), \\ S_{TR}(a), P_{res}(a,t), e_G(a,t) \end{bmatrix}, \quad (4.9)$$

kur $P_{load}(a,t)$ - barošanas avota vai kontrolskaitītāja slodze, $P_{EUS}(a,t)$ - attiecīgās uzlādes infrastruktūras slodze, $P_{allow}(a)$ - atļautā vai aprēķina jauda, $S_{TR}(a)$ - transformatora nominālā jauda, $P_{res}(a,t)$ - pieejamā jaudas rezerve, $e_G(a,t)$ - tīkla notikumu vai ierobežojumu indikators.

RIGA1 un *RIGA2* objektiem barošanas avota slodžu profili ļauj sasaistīt *EUS* slodzi ar attiecīgo transformatoru. *RIGA1* gadījumā $RIGA1_{BAR1_{TR1}}$ baro $RIGA1_{EUS2}$ un $RIGA1_{EUS3}$, savukārt $RIGA1_{BAR1_{TR2}}$ baro $RIGA1_{EUS1}$. RIGA2 gadījumā $RIGA2_{BAR1_{TR1}}$ baro $RIGA2_{EUS1}$, bet $RIGA2_{BAR1_{TR2}}$ baro $RIGA2_{EUS2}$. Šī pieslēguma loģika nodrošina, ka tīkla noslodzes un jaudas rezerves indikatori tiek aprēķināti pret pareizo elektroapgādes objektu.

4.5.tabula

Barošanas avotu un *EUS* slodžu profilu sasaistes loģika

Objekts	Barošanas avota profils	Saistītie EUS profili	Uzlādes vietas	Uzstādītā jauda, kW	Atļautā jauda, kW	Interpretācija validācijā
RIGA1	$RIGA1_{BAR1_{TR1}}$	$RIGA1_{EUS2}$; $RIGA1_{EUS3}$	6 *AC*	132	113,30	*AC* uzlādes slodzes ietekme uz $RIGA1_{TR1}$ barošanas avotu
RIGA1	$RIGA1_{BAR1_{TR2}}$	$RIGA1_{EUS1}$	4 *DC*	100	100,00	*DC* uzlādes slodzes ietekme uz $RIGA1_{TR2}$ barošanas avotu
RIGA2	$RIGA2_{BAR1_{TR1}}$	$RIGA2_{EUS1}$	6 *AC*	132	51,50	*AC* objekts ar būtiski ierobežotu atļauto jaudu
RIGA2	$RIGA2_{BAR1_{TR2}}$	$RIGA2_{EUS2}$	4 *AC*	88	83,00	*AC* objekts ar augstāku atļautās/uzstādītās jaudas attiecību
PIERIGA1	—	$PIERIGA1_{EUS1}$	2 *AC*	44	64,00	Mazāks Pierīgas objekts; slodzes profils primāri raksturo *EUS* darbību
PIERIGA2	—	$PIERIGA2_{EUS1}$	2 *AC* + 1 *DC*	102	51,52	Pierīgas *AC/DC* objekts ar *Etrel Load Guard* slodzes kontroli

Piezīme: PIERIGA1 un PIERIGA2 gadījumā pieejamais laikatkarīgais slodzes slānis primāri raksturo EUS profilu. Ja nav atsevišķa barošanas avota kopējās slodzes profila, tīkla noslodzes scenārijos EUS slodzi var izmantot kopā ar scenārijā definētu fona slodzi vai aprēķinu pret atļauto pieslēguma jaudu.

No pieejamajiem slodžu profiliem var aprēķināt vairākus tīkla kritērijus. Ja pieejama aktīvā jauda, pieslēguma noslodzes koeficientu var definēt kā:

$$k_{load}(a,t) = \frac{P_{feed}(a,t)}{P_{allow}(a)}, \quad (4.10)$$

Brīvo jaudas rezervi aprēķina šādi:

$$P_{res}(a,t) = P_{allow}(a) - P_{feed}(a,t), \quad (4.11)$$

Ja tiek analizēta potenciāla jaunas uzlādes sesijas ietekme ar nepieciešamo jaudu $P_{req}(a,t)$, pārslodzes riska indikatoru var definēt šādi:

$$r_{over}(a,t) = max\left(0, \frac{P_{feed}(a,t)+P_{req}(a,t)-P_{allow}(a)}{P_{allow}(a)}\right), \quad (4.12)$$

Ja $r_{over}(a,t) > 0$, tad jaunas uzlādes sesijas pievienošana konkrētajā mezglā pārsniegtu atļautās jaudas robežu. Šāds indikators var darboties kā filtrēšanas nosacījums vai kā tīkla riska kritērijs atkarībā no scenārija.

EVSE slodzes relatīvo īpatsvaru kopējā barošanas avota slodzē var aprēķināt šādi:

$$\eta_{EVSE}(a,t) = \frac{P_{EUS}(a,t)}{P_{feed}(a,t)}, \tag{4.13}$$

Ja $P_{load}(a,t) = 0$, indikators netiek aprēķināts vai tiek apstrādāts ar datu priekšapstrādes noteikumu, kas definēts 4.2. sadaļā.

Būtisks validācijas datu ierobežojums ir tas, ka pieejamajā slodžu profilu datu kopā nav pietiekamas sprieguma un fāžu strāvu informācijas, lai pilnvērtīgi aprēķinātu sprieguma novirzes un fāžu nesimetrijas indikatorus. Tādēļ sprieguma novirze un fāžu nesimetrijas koeficients, kas 2. nodaļā definēti kā metodoloģiski nozīmīgi tīkla kritēriji, šajā validācijas datu kopā tiek interpretēti divējādi. Pirmkārt, tie saglabājas modeļa teorētiskajā kritēriju sistēmā kā paredzēti indikatori gadījumam, ja šādi dati ir pieejami. Otrkārt, 4. un 5. nodaļas scenāriju analīzē tos iespējams aizstāt ar scenārijiski definētiem tīkla riska indikatoriem vai analizēt kā datu ierobežojumu.

Šis ierobežojums vienlaikus parāda datu infrastruktūras attīstības virzienu. Pilnvērtīgai dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas ieviešanai būtu nepieciešama plašāka sadales tīkla digitālā datu vide, kur mērījumi, ģeotelpiskie objekti, tehniskie parametri un notikumu dati tiek sasaistīti vienotā infrastruktūras modelī. Sadales tīkla digitālā dvīņa pieeja ļauj šādu integrāciju īstenot, apvienojot tīkla objektu telpiskos datus, vizuālās inspekcijas informāciju un analītiskos rezultātus [54].

Šis ierobežojums nemazina modeļa metodoloģisko nozīmi, jo galvenā validācijas daļa balstās uz pieejamajiem un aprēķināmajiem indikatoriem: uzlādes slodzi, barošanas avota slodzi, atļauto jaudu, jaudas rezervi, noslodzes koeficientu un potenciālo pārslodzes risku.

4.1.5. Uzticamības un kiberdrošības dati

Uzticamības un kiberdrošības datu slānis ir būtisks, jo izstrādātais modelis nav tikai dinamiska uzlādes punkta izvēles metode, bet uz uzticamību orientēta *MCDM* pieeja. *EV* uzlādes infrastruktūra ir kiberfiziska sistēma, kur fiziskā elektroenerģijas nodošana ir saistīta ar digitālo komunikāciju, operatora platformām, autentifikāciju, maksājumu sistēmām, datu integritāti un pakalpojuma pieejamību [8], [12], [13], [24], [25].

Tādēļ alternatīvas piemērotību nevar vērtēt tikai pēc attāluma, jaudas un gaidīšanas laika. Jāņem vērā arī tas, vai dati par alternatīvu ir aktuāli, vai komunikācija ir stabila, vai operatora statuss ir uzticams un vai pastāv paaugstināts kiberdrošības risks.

Komunikācijas stabilitātes indikators ir īpaši svarīgs, jo dinamiskais *MCDM* modelis pieņem lēmumu, balstoties uz aktuāliem datiem. Sakaru tīklu noturības literatūrā uzsvērts, ka kritiski pakalpojumi jāspēj uzturēt arī traucējumu, pārslodzes, tehnoloģisku atteiču vai ļaunprātīgu darbību apstākļos [52]. Šī iemesla dēļ validācijas modelī datu vecums un komunikācijas traucējumi tiek interpretēti kā lēmuma uzticamības samazinājuma faktori, nevis tikai kā tehniskas datu nepilnības.

Uzticamības un kiberdrošības datu vektoru validācijas modelī var aprakstīt šādi:

$$x_{\frac{REL}{SEC}}(a,t) = \begin{bmatrix} D_{comp}(a,t), D_{age}(a,t), Com(a,t), \\ Auth(a,t), Int(a,t), Avail(a,t), \rho_{cyb}(a,t) \end{bmatrix}, \tag{4.14}$$

kur $D_{comp}(a,t)$ - datu pilnīguma indikators, $D_{age}(a,t)$ - datu vecums, $Com(a,t)$ - komunikācijas stabilitāte, $Auth(a,t)$ - autentifikācijas drošības indikators, $Int(a,t)$ - datu

integritātes indikators, $Avail(a,t)$ - pakalpojuma vai operatora platformas pieejamības indikators, $\rho_{cyb}(a,t)$ - kiberriska novērtējums.

Datu kvalitāte ir viens no galvenajiem uzticama lēmuma priekšnosacījumiem. Ja uzlādes punkta statuss, slodze vai pieejamība ir novecojusi vai nepilnīga, *MCDM* modelis var matemātiski korekti aprēķināt rangu, bet praktiski rekomendēt nederīgu alternatīvu. Tādēļ datu pilnīgumu var definēt šādi:

$$D_{comp}(a) = \frac{N_{valid}(a)}{N_{expected}(a)}, \tag{4.15}$$

kur $N_{valid}(a)$ - derīgo datu ierakstu skaits, $N_{expected}(a)$ - sagaidāmais ierakstu skaits izvēlētajā validācijas periodā.

Savukārt datu vecumu var definēt kā:

$$D_{age}(a,t) = t - t_{last}(a), \tag{4.16}$$

kur $t_{last}(a)$ - pēdējā derīgā datu atjauninājuma laiks, $D_{comp}(a)$ - maksimizējams indikators, $D_{age}(a,t)$ - minimizējams indikators.

Uzticamības novērtējumu alternatīvai a var definēt kā vairāku apakšindikatoru kombināciju:

$$R_{rel}(a,t) = \sum_{r=1}^{q} \alpha_r \tilde{r}_r(a,t), \qquad \sum_{r=1}^{q} \alpha_r = 1, \tag{4.17}$$

kur $R_{rel}(a,t)$ - alternatīvas uzticamības novērtējums, $r_r(a,t)$ - normalizēta uzticamības apakšindikatora vērtība, α_r - attiecīgā apakšindikatora svars.

Šajā promocijas darbā uzticamības apakšindikatori var ietvert uzlādes punkta darbspēju, datu pilnīgumu, komunikācijas stabilitāti, operatora statusa ticamību, pieejamību un notikumu/pārtraukumu indikatorus [12], [13], [22].

Kiberdrošības riska rādītājs tiek definēts kā minimizējams indikators:

$$\rho_{cyb}(a,t) = \sum_{l=1}^{p} \beta_l \tilde{\rho}_l(a,t), \qquad \sum_{l=1}^{p} \beta_l = 1, \tag{4.18}$$

kur $\rho_{cyb}(a,t)$ - alternatīvas kiberriska novērtējums, $\rho_l(a,t)$ - normalizēta l-tā kiberriska indikatora vērtība, β_l - šī indikatora relatīvais svars.

Kiberriska indikatoru grupas ietver autentifikāciju, datu integritāti, komunikācijas drošību, pakalpojuma pieejamības risku, incidentu atklāšanas spēju un trešo pušu vai mākoņpakalpojumu atkarības [8], [12], [13], [24], [25].

4.6.tabula

Uzticamības un kiberdrošības datu elementi validācijas modelī

Datu elements	**Apzīmējums**	**Iespējamais datu avots**	**Kritērija virziens**	***MCDM* loma**
Datu pilnīgums	$D_{comp}(a)$	Excel slodžu profilu ierakstu pārbaude	Maksimizējams	Datu uzticamības kritērijs
Datu vecums	$D_{age}(a,t)$	Pēdējā derīgā mērījuma laiks	Minimizējams	Datu aktualitātes kritērijs
Komunikācijas stabilitāte	Com	Sakaru risinājumu apraksts, operatora dati vai scenārijs	Maksimizējams	Uzticamības un sesijas stabilitātes kritērijs
Autentifikācijas drošība	$Auth$	Drošības modelis, operatora dati vai ekspertu vērtējums	Maksimizējams	Kiberdrošības kritērijs
Datu integritāte	Int	Statusa datu ticamība, risku modelis vai scenārijs	Maksimizējams	Lēmuma korektuma un drošības kritērijs
Pakalpojuma pieejamība	$Avail$	*EVSE*/operatora statuss, uptime, scenārijs	Maksimizējams	Uzticamības kritērijs un filtrs

Kiberriska indikators	$\rho_{cyb}(a,t)$	Autora kiberriska ietvars, *OCPP/IIoT* dati, scenāriji	Minimizējams	Filtrs, *PROMETHEE* kritērijs vai penalizācijas faktors

Piezīme: kiberdrošības indikatori validācijas modelī netiek interpretēti kā pilns tehniskais drošības audits. Tie kalpo kā lēmumu ietekmējošs riska slānis, kas ļauj analizēt, kā paaugstināts autentifikācijas, komunikācijas, datu integritātes vai pakalpojuma pieejamības risks maina uzlādes punkta prioritāti.

Šajā sadaļā definētā datu struktūra sagatavo pamatu 4.2. sadaļai, kur tiek aprakstīta datu priekšapstrāde: laika zīmogu sinhronizācija, trūkstošo vērtību apstrāde, mērvienību vienādošana, *benefit/cost* tipa kritēriju normalizācija un sliekšņu definēšana filtrēšanas un *PROMETHEE* prioritizācijas vajadzībām.

4.2. Datu priekšapstrāde

Pēc validācijas datu struktūras definēšanas nākamais solis ir datu priekšapstrāde. Tās uzdevums ir sagatavot heterogēnos *EV, EUS*, barošanas avotu, sadales tīkla, datu kvalitātes un kiberdrošības indikatoru datus izmantošanai *MCDM* aprēķinu modelī [58]. Tā kā izstrādātais *AHP–PROMETHEE* modelis balstās uz vairāku atšķirīgu datu slāņu integrāciju, datu priekšapstrāde ir būtisks metodoloģiskais posms starp neapstrādātiem validācijas datiem un kritēriju matricu C_t.

Šajā promocijas darbā datu priekšapstrāde tiek veikta trīs galvenajos virzienos. Pirmkārt, tiek veikta datu tīrīšana un sinhronizācija, lai nodrošinātu vienotu laika soli, korektu mērvienību lietojumu, trūkstošo vērtību apstrādi un barošanas avotu sasaisti ar atbilstošajiem *EUS* profiliem. Otrkārt, tiek veikta kritēriju normalizācija, kas ļauj dažādu mērogu indikatorus salīdzināt vienotā *MCDM* novērtēšanas telpā. Treškārt, tiek noteikti sliekšņi un robežvērtības, kas nepieciešamas alternatīvu filtrēšanai, scenāriju analīzei un *PROMETHEE* preferenču funkciju interpretācijai.

4.2.1. Datu tīrīšana un sinhronizācija

Validācijas datu pamatā ir slodžu profilu *Excel* faili, kas raksturo *RIGA1, RIGA2, PIERIGA1* un *PIERIGA2* objektu *EUS* un barošanas avotu jaudas laika rindas. Lai šos datus varētu izmantot *MCDM* modelī, tie vispirms tiek pārbaudīti un sagatavoti vienotā struktūrā.

Datu tīrīšanas un sinhronizācijas posmā tiek veiktas šādas darbības: laika zīmogu formāta pārbaude, datu ierakstu sakārtošana hronoloģiskā secībā, dublikātu izņemšana, trūkstošo vērtību identificēšana, fiziski neiespējamu vērtību kontrole, mērvienību vienādošana, jaudas zīmju interpretācija un barošanas avotu sasaistes pārbaude ar attiecīgajiem EUS profiliem.

Priekšapstrādes rezultātā katrs slodzes profils tiek pārveidots standartizētā formā:

$$D_{raw} \rightarrow D_{clean} \rightarrow D_{\Delta t}, \tag{4.19}$$

kur D_{raw} - sākotnējie neapstrādātie dati, D_{clean} - iztīrītie un strukturētie dati, $D_{\Delta t}$ - dati izvēlētajā laika solī.

Sākotnējie slodžu dati tiek sagatavoti 15 minūšu laika solī. Šāds solis ir pietiekami detalizēts, lai atspoguļotu *EUS* un barošanas avotu slodzes dinamiku, vienlaikus saglabājot pārskatāmu aprēķinu apjomu. Validācijas kopsavilkumiem un aprēķinu rezultātu vizualizācijas un interpretācijas videi dati var tikt agregēti 1 stundas solī. Šāda agregācija ļauj vieglāk interpretēt sezonālos, diennakts un scenāriju rezultātus, nezaudējot galveno slodzes dinamikas informāciju.

Koda fragments 4.1. "Slodžu profilu priekšapstrāde"

```
def prepare_timeseries(df, time_col="timestamp", power_col="P_kW"):
    df = df.copy()
```

```
    df[time_col] = pd.to_datetime(df[time_col])
    df = df.sort_values(time_col)
    df = df.drop_duplicates(subset=[time_col])

    df[power_col] = pd.to_numeric(df[power_col], errors="coerce")
    df.loc[df[power_col] < 0, power_col] = 0

    df = df.set_index(time_col)
    df = df.resample("15min").mean()

    completeness = df[power_col].notna().sum() / len(df)
    df[power_col] = df[power_col].interpolate(limit_direction="both")

    return df, completeness
```

Šis fragments parāda slodzes profila priekšapstrādes pamatprincipu: laika zīmogu sakārtošanu, dublikātu izņemšanu, fiziski neiespējamu negatīvu jaudas vērtību korekciju, 15 minūšu laika soļa sagatavošanu un datu pilnīguma indikatora aprēķinu.

4.7.tabula

Datu tīrīšanas un sinhronizācijas posmi

Posms	Pārbaudes saturs	Rezultāts
Laika zīmogu pārbaude	Datuma un laika formāts, secība, dublikāti	Vienota laika ass
Trūkstošo vērtību pārbaude	Tukšie ieraksti, nepilnas rindas, pārtraukumi laika rindās	Datu pilnīguma indikators
Fiziski neiespējamu vērtību kontrole	Negatīvas jaudas vērtības, pārmērīgi pīķi, neatbilstošas mērvienības	Kļūdainu ierakstu identificēšana
Mērvienību vienādošana	kW, kWh, A, V, laika intervāli	Salīdzināmi dati
Profila piesaiste objektam	*EUS* profils pret transformatoru/barošanas avotu	Korekta tīkla kritēriju aprēķina bāze
Laika soļa sagatavošana	15 min pamatdati, 1 h agregācija kopsavilkumiem	Dati *MCDM* aprēķiniem un interpretācijai

Ja atsevišķā profilā ir neliels trūkstošo ierakstu skaits, to iespējams aizstāt ar interpolāciju, tuvāko derīgo vērtību vai perioda vidējo vērtību, ja šāda aizstāšana neizkropļo slodzes dinamiku. Ja trūkstošo vērtību īpatsvars ir būtisks, konkrētais periods tiek atzīmēts kā zemākas datu kvalitātes periods, un tas var ietekmēt datu kvalitātes kritēriju vai alternatīvas pieļaujamību.

Datu pilnīguma indikators tiek aprēķināts kā derīgo ierakstu attiecība pret sagaidāmo ierakstu skaitu. Šis indikators ir svarīgs ne tikai kā tehnisks priekšapstrādes rādītājs, bet arī kā uzticamības kritērijs. Ja dati nav pietiekami pilnīgi vai aktuāli, *MCDM* modelis var matemātiski korekti aprēķināt rangu, bet praktiski rekomendēt neatbilstošu alternatīvu.

4.2.2. Kritēriju normalizācija

Pēc datu tīrīšanas un sinhronizācijas nākamais solis ir kritēriju normalizācija. Tā nepieciešama tāpēc, ka *MCDM* modelī tiek izmantoti dažādu mērvienību un mērogu indikatori: attālums, gaidīšanas laiks, jauda, tīkla noslodze, jaudas rezerve, datu pilnīgums, datu vecums, kiberrisks un uzticamība.

Normalizācijas mērķis ir pārveidot kritērijus vienotā interpretācijas skalā, kur lielāka normalizētā vērtība nozīmē labāku alternatīvas stāvokli. Tas nodrošina, ka *PROMETHEE* preferenču funkcijas darbojas konsekventi un ka *benefit* un *cost* tipa kritēriji tiek salīdzināti pareizā virzienā.

$Benefit$ tipa kritērijiem, kuros lielāka vērtība ir vēlama, normalizācija tiek definēta šādi:

$$\tilde{x}_j(a,t) = \frac{x_j(a,t) - x_j^{min}}{x_j^{max}(t) - x_j^{min}}, \quad (2.17)$$

$Cost$ tipa kritērijiem, kuros mazāka vērtība ir vēlama, normalizācija tiek definēta šādi:

$$\tilde{x}_j(a,t) = \frac{x_j^{max}(t) - x_j(a,t)}{x_j^{max} - x_j^{min}}, \quad (2.18)$$

Ja konkrētajā laika momentā visām alternatīvām ir vienāda kritērija vērtība, t. i., $x_j^{max}(t) = x_j^{min}$, kritērijs konkrētajā solī nespēj diferencēt alternatīvas. Šādā gadījumā normalizēto vērtību var noteikt kā neitrālu vērtību vai izslēgt kritēriju no konkrētā laika soļa jutīguma interpretācijas:

$$\tilde{x}_j(a,t) = 0{,}5, ja\ x_j^{max}(t) = x_j^{min}, \quad (4.20)$$

Normalizācija šajā darbā nav tikai matemātiska mērogošana, bet arī priekšnoteikums korektai dažādu indikatoru salīdzināšanai. Transporta un ilgtspējas indikatoru literatūrā uzsvērts, ka indikatoram jāspēj vienkāršotā veidā reprezentēt analizējamo parādību un vienlaikus būt izmantojamam lēmumu pieņemšanas kontekstā [58]. Tādēļ normalizācijas virziens tiek noteikts pēc katra kritērija *MCDM* nozīmes: $benefit$ kritērijiem lielāka vērtība uzlabo alternatīvu, bet $cost$ kritērijiem lielāka vērtība pasliktina alternatīvu.

Koda fragments 4.2. "Benefit/cost kritēriju normalizācija"

```
def normalize_criterion(values, criterion_type):
    x_min = values.min()
    x_max = values.max()

    if x_max == x_min:
        return pd.Series(0.5, index=values.index)

    if criterion_type == "benefit":
        return (values - x_min) / (x_max - x_min)

    if criterion_type == "cost":
        return (x_max - values) / (x_max - x_min)

    raise ValueError("criterion_type must be 'benefit' or 'cost'")
```

Funkcija realizē $benefit$ un $cost$ tipa kritēriju normalizāciju vienotā skalā no 0 līdz 1. Ja visām alternatīvām konkrētajā laika solī kritērija vērtība ir vienāda, tiek piešķirta neitrāla vērtība 0,5, jo šis kritērijs konkrētajā solī nediferencē alternatīvas.

4.8.tabula

Kritēriju normalizācijas interpretācija

Kritērijs	Tips	Normalizācijas interpretācija	MCDM nozīme
Attālums līdz uzlādes punktam	*Cost*	Mazāks attālums dod lielāku normalizēto vērtību	Lietotājam ērtāka alternatīva
Gaidīšanas laiks	*Cost*	Mazāks gaidīšanas laiks dod lielāku vērtību	Samazina kopējo uzlādes procesa kavējumu

Pieejamā uzlādes jauda	*Benefit*	Lielāka pieejamā jauda dod lielāku vērtību	Ātrāka potenciālā uzlāde
Uzlādes punkta pieejamība	*Benefit*	Pieejama un darbspējīga alternatīva iegūst augstāku vērtību	Praktiska izmantojamība
Tīkla noslodzes koeficients	*Cost*	Mazāka noslodze dod lielāku vērtību	Mazāks pārslodzes risks
Jaudas rezerve	*Benefit*	Lielāka rezerve dod lielāku vērtību	Tehniski drošāka alternatīva
EVSE slodzes īpatsvars	*Cost* vai kontekstuāls	Augstāks īpatsvars var norādīt uz lokālu koncentrētu uzlādes slodzi	Tīkla ietekmes novērtējums
Datu pilnīgums	*Benefit*	Pilnīgāki dati dod lielāku vērtību	Uzticamāks lēmums
Datu vecums	*Cost*	Jaunāki dati dod lielāku vērtību	Aktuālāks lēmums
Kiberrisks	*Cost*	Zemāks risks dod lielāku vērtību	Drošāka alternatīva
Uzticamība	*Benefit*	Augstāka uzticamība dod lielāku vērtību	Noturīgāka rekomendācija

Normalizācija neizmaina kritēriju būtību, bet nodrošina to savietojamību *MCDM* aprēķinā. Piemēram, attālums kilometros, jauda kilovatos un kiberriska indekss nav tieši salīdzināmi, bet pēc normalizācijas tos iespējams izmantot vienotā prioritizācijas procedūrā.

PROMETHEE aprēķinos normalizācija nav vienīgais iespējamais priekšapstrādes veids, jo *PROMETHEE* spēj darboties arī ar sākotnējām kritēriju vērtībām, ja preferenču funkcijas un sliekšņi ir definēti atbilstoši mērvienībām. Tomēr šajā promocijas darbā normalizācija tiek izmantota, lai nodrošinātu vienotu interpretācijas loģiku starp kritērijiem, scenārijiem un validācijas periodiem.

4.2.3. Sliekšņu un robežvērtību noteikšana

Sliekšņu un robežvērtību noteikšana ir nepieciešama divu iemeslu dēļ. Pirmkārt, tā nodrošina alternatīvu filtrēšanu, izslēdzot uzlādes punktus, kas konkrētajā situācijā nav tehniski, lietotāja, tīkla, datu kvalitātes vai drošības ziņā pieļaujami. Otrkārt, sliekšņi nepieciešami *PROMETHEE* preferenču funkciju interpretācijai, lai nelielas un praktiski nenozīmīgas atšķirības starp alternatīvām neradītu nepamatotas ranga svārstības.

Filtrēšanas nosacījumus var pierakstīt ar indikatorfunkciju:

$$h_i(a,t) = \begin{cases} 1, ja\ nosacījums\ ir\ izpildīts, \\ 0, ja\ nosacījums\ nav\ izpildīts. \end{cases}, \tag{2.44}$$

Pieļaujamo alternatīvu kopu var definēt šādi:

$$A_t^{adm} = \begin{cases} a \in A_t | h_{reach} = 1, h_{comp} = 1, h_{stat} = 1, \\ h_P = 1, h_G = 1, h_U = 1, h_D = 1, h_{sec} = 1 \end{cases}, \tag{4.21}$$

kur h_{reach} - sasniedzamības nosacījums, h_{comp} - *EV* un *EVSE* savietojamība, h_{stat} - *EVSE* darbspēja, h_P - minimālās jaudas nosacījums, h_G - sadales tīkla pieļaujamība, h_U - lietotāja robežas, h_D - datu kvalitātes nosacījums, h_{sec} - kiberdrošības minimālais slieksnis.

Koda fragments 4.3. "Alternatīvu filtrēšana"

```
def is_admissible(row, thresholds):
    checks = {
        "reach": row["distance_km"] <= thresholds["max_distance_km"],
        "compatibility": row["compatible"] == 1,
        "status": row["evse_available"] == 1,
       "power": row["available_power_kW"] >= thresholds["min_power_kW"],
```

```
        "grid": row["load_factor"] <= thresholds["max_load_factor"],
        "user": row["waiting_time_min"] <= thresholds["max_wait_min"],
                                "data":      row["data_completeness"]      >=
thresholds["min_data_completeness"],
        "security": row["cyber_risk"] <= thresholds["max_cyber_risk"],
    }

    return all(checks.values()), checks
```

Šis fragments realizē bināro filtrēšanas loģiku, kur katrai alternatīvai tiek pārbaudīti sasniedzamības, savietojamības, *EVSE* statusa, jaudas, tīkla, lietotāja, datu kvalitātes un kiberdrošības nosacījumi. Alternatīva tiek iekļauta pieļaujamo alternatīvu kopā tikai tad, ja visi obligātie nosacījumi ir izpildīti.

4.9.tabula

Filtrēšanas sliekšņu un robežvērtību piemēri validācijas modelī

Nosacījums	Interpretācija	Ietekme uz modeli
Sasniedzamības slieksnis	*EV* spēj sasniegt uzlādes punktu ar pieejamo enerģiju un pieļaujamo maršruta novirzi	Nesasniedzama alternatīva tiek izslēgta
Savietojamības slieksnis	*EV* un *EVSE* savienotājs, *AC/DC* tips un jaudas robežas ir saderīgas	Nesavietojama alternatīva tiek izslēgta
EVSE statuss	Uzlādes punkts nav kļūdas, apkopes vai nepieejamības režīmā	Nedarbspējīga alternatīva tiek izslēgta
Minimālā pieejamā jauda	Pieejamā jauda ir pietiekama konkrētajai uzlādes vajadzībai	Alternatīva tiek izslēgta vai pazemināta scenārijā
Maksimālais gaidīšanas laiks	Lietotājs nepieņem ilgāku gaidīšanu par noteikto robežu	Alternatīva tiek izslēgta vai pazemināta rangā
Tīkla noslodzes robeža	Slodze nepārsniedz atļauto vai scenārijā definēto robežu	Alternatīva tiek izslēgta vai penalizēta
Jaudas rezerves robeža	Pieejamā rezerve ir pietiekama pieprasītajai uzlādes jaudai	Alternatīva tiek pazemināta vai izslēgta
Datu kvalitātes slieksnis	Dati ir pietiekami pilnīgi un aktuāli	Zemas kvalitātes dati pazemina uzticamību vai izslēdz alternatīvu
Kiberriska slieksnis	Kiberriska līmenis nepārsniedz pieļaujamo robežu	Augsta riska alternatīva tiek penalizēta vai izslēgta

Sliekšņi tiek izmantoti arī *PROMETHEE* preferenču funkcijās. Katram kritērijam var definēt indifferences slieksni q_j un preferences slieksni p_j, kur:

$$0 \leq q_j \leq p_j\,, \tag{4.22}$$

Indifferences slieksnis q_j nozīmē, ka atšķirība starp alternatīvām vēl nav praktiski būtiska. Preferences slieksnis p_j nozīmē, ka atšķirība jau ir pietiekami liela, lai vienai alternatīvai piešķirtu pilnu priekšroku pār otru.

4.10.tabula

PROMETHEE sliekšņu interpretācija galvenajiem kritērijiem

Kritērijs	Sliekšņa interpretācija	Lēmuma stabilitātes nozīme
Gaidīšanas laiks	Nelielas minūšu atšķirības var būt indifferences zonā	Novērš pārmērīgu ranga maiņu nenozīmīgu atšķirību dēļ
Attālums	Neliela maršruta starpība var netikt uzskatīta par būtisku	Nodrošina lietotājam praktiski interpretējamu izvēli
Pieejamā uzlādes jauda	Priekšroka pieaug līdz *EV* pieņemamās jaudas robežai	Novērš nepamatotu pārvērtēšanu virs *EV* tehniskā limita

Noslodzes koeficients	Pieaugot noslodzei, priekšroka samazinās	Ļauj atšķirt normālu un saspringtu tīkla režīmu
Jaudas rezerve	Lielāka rezerve dod priekšroku pēc noteikta sliekšņa	Paaugstina tehniski drošākas alternatīvas prioritāti
Kiberrisks	Mazas riska atšķirības var būt indifferences zonā, bet augsts risks rada pilnu negatīvu priekšroku	Ļauj modelēt riskam pielāgotu prioritizāciju
Datu kvalitāte	Nelielas datu pilnīguma atšķirības nav būtiskas, bet zema kvalitāte pazemina prioritāti	Saista datu uzticamību ar gala lēmumu

Sliekšņu noteikšana ir īpaši svarīga dinamiskā modelī, jo bez sliekšņiem nelielas un praktiski nenozīmīgas datu izmaiņas var radīt biežas ranga svārstības. Tādēļ sliekšņi kalpo ne tikai tehniskai kritēriju interpretācijai, bet arī lēmuma stabilitātes nodrošināšanai. Tas ir būtiski 5. nodaļā paredzētajai ranga stabilitātes un *reassignment frequency* analīzei.

4.3. Eksperimentālās vides arhitektūra

Pēc validācijas datu struktūras un priekšapstrādes loģikas definēšanas nepieciešams noteikt eksperimentālās vides arhitektūru, kurā izstrādātais *AHP–PROMETHEE* modelis tiek pārbaudīts. Eksperimentālās vides uzdevums ir nodrošināt reproducējamu aprēķinu ķēdi no ievaddatiem līdz uzlādes alternatīvu rangam, izvēlētajai alternatīvai un validācijas *KPI*.

Eksperimentālās vides arhitektūra tiek veidota kā slāņota lēmumu atbalsta sistēmas aprēķinu vide. Datu slānis nodrošina ievaddatu importu, tīrīšanu un sinhronizāciju; kritēriju slānis pārveido ievaddatus aprēķināmos indikatoros; *MCDM* slānis piemēro *AHP* svarus un *PROMETHEE* rangēšanu; rezultātu slānis saglabā izvēlēto alternatīvu, rezerves alternatīvas, neto plūsmas, *KPI* un scenāriju salīdzinājumus. Šāda slāņota pieeja atbilst *IoT* un *service-oriented automation* arhitektūru principiem, kur datu avoti, analītiskie moduļi un lēmumu rezultāti tiek organizēti savstarpēji sasaistītās funkcijās [44], [51].

Eksperimentālā vide šajā promocijas darbā netiek interpretēta kā pilna mēroga komerciāla lēmumu atbalsta sistēmas vai reāllaika operatora platforma. Tā ir pētnieciska aprēķinu un scenāriju vide, kurā iespējams kontrolēti pārbaudīt, kā izstrādātais *MCDM* modelis reaģē uz datu, slodzes, lietotāja pieprasījuma, uzticamības un kiberdrošības faktoru izmaiņām. Tādējādi eksperimentālā vide veido pāreju starp 3. nodaļā definēto algoritmisko metodoloģiju un 5. nodaļā veicamo modeļa validāciju.

4.3.1. Aprēķinu vides apraksts

Eksperimentālā vide tiek veidota *Python* aprēķinu vidē, izmantojot strukturētus ievades datus, datu priekšapstrādes procedūras, filtrēšanas nosacījumus, *AHP* svaru vektoru, *PROMETHEE* prioritizācijas aprēķinus un *KPI* aprēķina moduļus. Šāda pieeja nodrošina, ka katrs validācijas scenārijs ir atkārtojams un ka aprēķinu rezultātus iespējams salīdzināt starp dažādiem periodiem, objektiem un piešķiršanas pieejām.

Eksperimentālajā vidē tiek izmantoti šādi galvenie ievades datu bloki:

- anonimizētie validācijas objekti un to tehniskā struktūra;
- *EUS* un barošanas avotu slodžu profili;
- *EV* uzlādes pieprasījuma scenāriji;
- ģeotelpiskie dati un *EV* sākuma punkts;
- *AHP* kritēriju svari;
- *PROMETHEE* preferenču funkciju parametri;
- filtrēšanas sliekšņi;
- datu kvalitātes un uzticamības indikatori;
- kiberdrošības riska scenāriju indikatori;
- validācijas *KPI* aprēķina noteikumi.

Eksperimentālās vides ievaddatu kopu var pierakstīt šādi:

$$D_{exp} = \begin{bmatrix} D_{tech}, D_{load}, D_{EV}, D_{geo}, D_{AHP}, \\ D_{PROM}, D_{thr}, D_{qual}, D_{sec}, D_{KPI} \end{bmatrix}, \quad (4.28)$$

kur D_{tech} - tehniskie dati, D_{load} - slodžu profili, D_{EV} - pieprasījuma dati, D_{geo} - ģeotelpiskie dati, D_{AHP} - *AHP* svaru dati, D_{PROM} - *PROMETHEE* parametri, D_{thr} - filtrēšanas sliekšņi, D_{qual} - datu kvalitātes indikatori, D_{sec} - kiberdrošības indikatori, D_{KPI} - *KPI* aprēķina konfigurācija.

4.11.tabula

Eksperimentālās vides ievades datu bloki

Datu bloks	Saturs	Loma eksperimentālajā vidē
Tehniskie dati	Transformatori, *EUS* jauda, *AC/DC* struktūra, uzlādes vietu skaits, komunikācijas risinājumi	Nosaka alternatīvu tehnisko piemērotību
Slodžu profili	Barošanas avotu un *EUS* jaudas laika rindas	Nodrošina tīkla noslodzes, jaudas rezerves un slodzes riska aprēķinu
EV pieprasījuma dati	*SOC*, nepieciešamā enerģija, pieņemamā jauda, lietotāja ierobežojumi	Definē lēmuma situāciju
Ģeotelpiskie dati	*EV* sākuma punkts, anonimizētās validācijas zonas, attālumi	Nodrošina sasniedzamības un attāluma kritēriju
AHP svari	Kritēriju un apakškritēriju relatīvie svari	Nosaka kritēriju ietekmi *PROMETHEE* aprēķinā
PROMETHEE parametri	Kritēriju virzieni, preferenču funkcijas, sliekšņi	Nodrošina alternatīvu aprēķinu
Filtrēšanas sliekšņi	Sasniedzamība, jauda, tīkla robežas, datu kvalitāte, kiberrisks	Izslēdz nepieļaujamas alternatīvas
Datu kvalitātes indikatori	Datu pilnīgums, datu vecums, statusa ticamība	Ietekmē uzticamības kritērijus
Kiberdrošības indikatori	Autentifikācija, integritāte, komunikācija, risks	Nodrošina security-aware izvēles slāni
KPI konfigurācija	Lietotāja, infrastruktūras, tīkla, uzticamības un drošības rādītāji	Nodrošina validācijas rezultātu salīdzināmību

Šāda struktūra ļauj katru validācijas scenāriju izpildīt vienotā loģikā. Mainot tikai scenārija konfigurāciju, piemēram, *EV* pieprasījumu, tīkla slodzi, datu kvalitāti vai kiberriska līmeni, iespējams pārbaudīt, kā mainās *MCDM* modelī iegūtais uzlādes punktu rangs un izvēlētā alternatīva.

4.3.2. Modeļa izpildes secība

Eksperimentālās vides izpildes secība atbilst 3. nodaļā definētajam dinamiskās filtrēšanas un piešķiršanas algoritmam. Vispirms tiek sagatavoti ievaddati, pēc tam aprēķināti kritēriji, izveidota kandidātu kopa, veikta filtrēšana, piemēroti AHP svari un izpildīts *PROMETHEE* rangēšanas aprēķins. Pēc tam tiek noteikta izvēlētā alternatīva, rezerves alternatīvu secība un validācijas *KPI*.

Modeļa izpildes ķēdi var pierakstīt šādi:

$$D_{exp} \rightarrow D_{prep} \rightarrow C_t \rightarrow A_t^0 \rightarrow A_t^{adm} \rightarrow w \rightarrow \phi(a,t) \rightarrow R_t \rightarrow a_t^* \rightarrow KPI$$

Šī izpildes secība ir saderīga arī ar digitālā dvīņa turpmāku integrāciju. Pašreizējā validācijas vidē digitālais dvīnis netiek realizēts pilnā apjomā, tomēr datu struktūra ļauj nākotnē sasaistīt uzlādes punktus, sadales tīkla objektus, ģeotelpiskos datus un vēsturiskos mērījumus vienotā infrastruktūras reprezentācijā. Sadales tīkla digitālā dvīņa pētījumi parāda, ka šāda

pieeja var uzlabot infrastruktūras pārvaldību, attālinātu analīzi un datu balstītu lēmumu pieņemšanu [54].

Koda fragments 4.4. "Viena dinamiskās piešķiršanas soļa izpilde"

```
def run_assignment_step(data_t, weights, thresholds):
    candidates = data_t.copy()

    candidates["is_admissible"] = candidates.apply(
        lambda row: is_admissible(row, thresholds)[0],
        axis=1
    )

    admissible = candidates[candidates["is_admissible"]]

    if admissible.empty:
        return None, pd.DataFrame(), "No admissible alternatives"

    criteria_matrix = build_criteria_matrix(admissible)
    promethee_result = promethee_ranking(criteria_matrix, weights)

    selected = promethee_result.sort_values(
        "net_flow",
        ascending=False
    ).iloc[0]

    return selected, promethee_result, "OK"
```

Šis fragments parāda viena dinamiskās piešķiršanas soļa izpildi: kandidātu kopas sagatavošanu, filtrēšanu, kritēriju matricas izveidi, *PROMETHEE* rangēšanu un gala alternatīvas izvēli pēc neto plūsmas.

4.12.tabula

Modeļa izpildes secība eksperimentālajā vidē

Posms	Darbība	Rezultāts
Ievaddatu sagatavošana	Tiek ielādēti tehniskie dati, slodžu profili, scenāriji un svari	D_{exp}
Datu priekšapstrāde	Tiek veikta tīrīšana, laika soļa sagatavošana, normalizācija	D_{prep}
Kritēriju aprēķins	Tiek aprēķināti attāluma, jaudas, noslodzes, gaidīšanas, uzticamības un drošības kritēriji	C_t
Kandidātu kopas izveide	Tiek atlasītas sākotnēji sasniedzamās un teorētiski piemērotās alternatīvas	A_t^0
Filtrēšana	Tiek piemēroti tehniskie, tīkla, lietotāja, datu un drošības nosacījumi	A_t^{adm}
AHP svaru piemērošana	Kritērijiem tiek piesaistīti globālie svari	w
PROMETHEE aprēķins	Tiek aprēķinātas pozitīvās, negatīvās un neto plūsmas	ϕ, ϕ^+, ϕ^-
Ranga veidošana	Alternatīvas tiek sakārtotas pēc neto plūsmas	R_t
Gala izvēle	Tiek noteikta pirmā un rezerves alternatīvas	a_t^* rezerves secība
KPI aprēķins	Tiek aprēķināti lietotāja, infrastruktūras, tīkla, uzticamības un drošības rādītāji	KPI

Šī izpildes secība ir būtiska, jo tā skaidri nodala filtrēšanas posmu no prioritizācijas posma. Filtrēšana novērš nepieļaujamu alternatīvu nonākšanu rangēšanā, savukārt *PROMETHEE* prioritizācija salīdzina tikai tās alternatīvas, kas konkrētajā laika momentā atbilst minimālajām prasībām. Tādējādi modelis ne tikai izvēlas labāko alternatīvu no pieejamajām, bet vispirms pārbauda, vai alternatīvas vispār ir izmantojamas.

4.3.3. Rezultātu saglabāšana un vizualizācija

Katram validācijas scenārijam tiek saglabāti gan starprezultāti, gan gala rezultāti. Tas ir nepieciešams, lai 5. nodaļā varētu analizēt ne tikai izvēlēto uzlādes punktu, bet arī visu lēmuma veidošanās procesu: kā tika izveidota kandidātu kopa, kuras alternatīvas tika izslēgtas, kā veidojās kritēriju vērtības, kādi bija *PROMETHEE* plūsmu rezultāti un kā mainījās *KPI* starp scenārijiem.

Rezultātu datu kopu var pierakstīt šādi:

$$Y_s = \begin{bmatrix} A_t^0, A_t^{adm}, F_t, C_t, w, \phi(a,t), \phi^+(a,t), \\ \phi^-(a,t), R_t, a_t^*, KPI_s \end{bmatrix}, \tag{4.30}$$

kur Y_s - scenārija s rezultātu kopa, F_t - filtrēšanas rezultāti un izslēgšanas iemesli, KPI_s - attiecīgā scenārija validācijas rādītāji.

4.13.tabula

Saglabājamie rezultāti eksperimentālajā vidē

Rezultātu elements	Saturs	Izmantošana 5. nodaļā
Kandidātu kopa	Sākotnēji apsveramās alternatīvas	Alternatīvu pieejamības analīze
Pieļaujamā kopa	Alternatīvas pēc filtrēšanas	Admissible alternatives loss aprēķins
Filtrēšanas iemesli	Sasniedzamība, statuss, jauda, tīkls, datu kvalitāte, kiberrisks	Modeļa skaidrojamības analīze
Kritēriju matrica	Kritēriju vērtības katrai alternatīvai	Ranga veidošanās interpretācija
AHP svari	Kritēriju relatīvā nozīme	Svaru jutīguma analīze
PROMETHEE plūsmas	ϕ, ϕ^+, ϕ^-	Alternatīvu dominances analīze
Gala rangs	Alternatīvu secība	Pirmās un rezerves alternatīvu analīze
Izvēlētā alternatīva	a_t^*	*Assignment success* un salīdzinošā analīze
Rezerves secība	Nākamās alternatīvas rangā	*Reserve availability* un pārrēķina noturība
KPI	Lietotāja, infrastruktūras, tīkla, uzticamības un drošības rādītāji	Modeļa validācija un salīdzinājums

Rezultātu vizuālai interpretācijai tiek izmantota aprēķinu rezultātu vizualizācijas un interpretācijas vide. Tā apkopo slodžu profilus, ģeotelpisko kontekstu, *MCDM* momentuzņēmumu, *PROMETHEE* plūsmas, izvēlēto alternatīvu, rezerves secību un *KPI*. Šī vide netiek interpretēta kā atsevišķs promocijas darba zinātniskais rezultāts, bet kā palīgrīks, kas ļauj pārskatāmi parādīt *AHP–PROMETHEE* metodoloģijas darbību.

Aprēķinu rezultātu vizualizācijas un interpretācijas vide ir īpaši nozīmīga tāpēc, ka tā ļauj skaidrot lēmumu. Ja konkrētajā scenārijā netiek izvēlēta tuvākā vai jaudīgākā alternatīva, ar rezultātu paneļiem iespējams redzēt, vai iemesls ir tīkla noslodze, datu kvalitāte, gaidīšanas laiks, kiberdrošības risks vai citu kritēriju kombinācija. Tādējādi validācijas vide nodrošina ne tikai gala skaitlisko rezultātu, bet arī lēmuma interpretējamību.

4.4. Scenāriju sistēma

Scenāriju sistēma ir nepieciešama, lai izstrādāto *MCDM* modeli varētu pārbaudīt dažādos ekspluatācijas apstākļos. Tā kā dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas problēma ir atkarīga no laikā mainīgiem datiem, vienas statiskas validācijas epizodes nepietiek, lai novērtētu modeļa darbību. Nepieciešams analizēt, kā modelis reaģē uz sezonālām slodzes izmaiņām, pilsētas un piepilsētas infrastruktūras atšķirībām, tīkla noslodzes pieaugumu, datu kvalitātes pasliktināšanos un kiberdrošības riska scenārijiem.

Šajā promocijas darbā scenāriji netiek izmantoti, lai simulētu pilnu valsts mēroga *EV* mobilitātes sistēmu. To mērķis ir metodoloģiski pārbaudīt *AHP–PROMETHEE* modeļa darbības loģiku kontrolētos apstākļos. Tāpēc katrs scenārijs tiek definēts kā datu, svaru, sliekšņu un riska faktoru konfigurācija, kas ļauj analizēt konkrētu modeļa aspektu.

Scenāriju s var raksturot šādi:

$$S_s = [T_s, Q_s, W_s, G_s, D_s, SEC_s, \Theta_s], \tag{4.31}$$

kur T_s - analizējamais periods, Q_s - EV pieprasījuma parametri, W_s - kritēriju svaru konfigurācija, G_s - tīkla noslodzes vai jaudas rezerves nosacījumi, D_s - datu kvalitātes nosacījumi, SEC_s - kiberdrošības riska nosacījumi, Θ_s - filtrēšanas un *PROMETHEE* sliekšņu konfigurācija.

4.4.1. Scenāriju validācijas datu tvērums

Sākotnējā datu kvalitātes slānī katram no 11 profiliem ir 10 300 ieraksti, kopā 113 300 mērījumu rindas. Priekšapstrādes posmā gala aprēķinu kopā saglabātas 113 289 rindas jeb 10 299 ieraksti katram datu objektam. Datu periods gala aprēķinos ir no 2025. gada 1. augusta plkst. 01:00 līdz 2025. gada 31. decembra plkst. 23:45 ar 15 minūšu soli. Sākotnējā datu kvalitātes pārbaudē identificēti 88 dublētu laika zīmogu ieraksti. Apstrādātajā validācijas kopā kopējais elektroenerģijas apjoms ir 403 104,55 kWh, savukārt *raw/site KPI* slānī kopējais apjoms ir 403 129,67 kWh.

4.14.tabula

Objektu slodžu profilu KPI

Objekts	Tips	Rindas	Enerģija, kWh	Vidējā jauda, kW	Maks. jauda, kW	P_{95} jauda, kW	Maks. noslodze
PIERIGA1	pierīga	10 300	1 001,09	0,29	10,40	0,90	4,4 %
PIERIGA2	pierīga	10 300	5 329,78	1,49	48,67	6,65	32,0 %
RIGA1	pilsēta	51 500	281 651,36	16,92	156,54	76,37	26,2 %
RIGA2	pilsēta	41 200	115 147,44	8,62	109,58	39,26	28,8 %

Validācijas scenāriju pamatā ir anonimizēto objektu slodžu profili un tehniskie dati. Kopējā validācijas vide aptver četras uzlādes infrastruktūras vietas, septiņas *EUS* alternatīvas un ar tām saistītos barošanas avotu vai *EUS* slodžu profilus. Pieejamie dati aptver periodu no 01.08.2025. līdz 31.12.2025., kas ļauj analizēt vasaras, rudens un ziemas ekspluatācijas apstākļus.

4.15.tabula

Scenāriju validācijas datu tvērums

Rādītājs	Vērtība	Nozīme validācijā
Validācijas vietas	4	Pilsētas un piepilsētas objektu salīdzināšana
EUS alternatīvas	7	*PROMETHEE* rangēšanas alternatīvu kopa
Kopējais uzlādes vietu skaits	25 (20 AC, 5 DC)	Uzlādes infrastruktūras mēroga raksturojums

Slodžu profilu datu objekti	11 (7 *EUS* un 4 barošanas avoti)	*EUS* un barošanas avotu dinamisko datu slānis
Raw mērījumu rindas	113 300	Sākotnējais laika rindu tvērums pirms gala priekšapstrādes
Apstrādātās mērījumu rindas	113 289	Gala aprēķinu datu kopa dinamiskai validācijai
Raw validācijas periods	01.08.2025. 01:00 – 01.01.2026. 00:00	Sākotnējo failu laika robežas
Apstrādātais validācijas periods	01.08.2025. 01:00–31.12.2025. 23:45	Gala aprēķinos izmantotā laika ass
Laika solis	15 min	Reāllaika dinamiskās validācijas solis
Dublēto laika zīmogu ieraksti	88	Identificēti datu kvalitātes pārbaudē
Datu pilnīgums	100 %	Visiem galvenajiem profiliem pēc validācijas
Kopējā enerģija apstrādātajā kopā	403 104,55 kWh	Tiek izmantota 5. nodaļas aprēķinu rezultātu sasaistē
Kopējā enerģija *raw/site KPI* slānī	403 129,67 kWh	Sākotnējās datu kvalitātes un objekta *KPI* slāņa enerģijas summa
EUS kopējā uzstādītā/atļautā jauda	598,00 / 463,32 kW	Alternatīvu tehniskās kapacitātes raksturojums
Galvenie datu un aprēķinu lauki	76 unikāli lauki galvenajās validācijas lapās	Tehniskie dati, *EUS* statika, distance/cena, datu kvalitāte, slodzes *KPI* un scenāriju *KPI*

Šis datu tvērums ir pietiekams, lai validētu *MCDM* modeļa aprēķinu loģiku, bet tas nav interpretējams kā pilna mēroga Latvijas *EV* uzlādes infrastruktūras statistisks novērtējums. Datu kopa tiek izmantota metodoloģiskai pārbaudei, kur galvenais uzdevums ir analizēt modeļa spēju integrēt dažādus kritērijus un nodrošināt interpretējamu uzlādes punkta piešķiršanu.

4.4.2. Bāzes scenārijs

Bāzes scenārijs raksturo normālu ekspluatācijas režīmu, kur nav īpaši pastiprināta tīkla, uzticamības vai kiberdrošības riska. Šajā scenārijā tiek izmantoti bāzes *AHP* svari, standarta filtrēšanas sliekšņi un pieejamie slodžu profili. Bāzes scenārijs kalpo kā atskaites punkts, ar kuru 5. nodaļā tiek salīdzināti citi scenāriji un vienkāršotās piešķiršanas pieejas.

Bāzes scenārijā tiek pieņemts, ka *EV* pieprasījums ir tipisks: transportlīdzeklim nepieciešama uzlāde, bet nav ārkārtas steidzamības, un lietotājs ir gatavs pieņemt mērenu attālumu vai gaidīšanas laiku. Šādā situācijā modelim jālīdzsvaro lietotāja ērtība, uzlādes punkta pieejamība, jaudas kritēriji, tīkla noslodze, datu kvalitāte un uzticamība.

Bāzes scenārija mērķis nav pierādīt, ka viena konkrēta alternatīva vienmēr ir labākā, bet gan nodrošināt atskaites konfigurāciju, kurā iespējams pārbaudīt modeļa darbību normālos apstākļos. No šī scenārija 5. nodaļā tiek atvasināti salīdzinājumi ar tuvākās stacijas izvēles pieeju, īsākā gaidīšanas laika pieeju, lielākās pieejamās jaudas pieeju, pieeju bez sadales tīkla stāvokļa ievērošanas un pieeju bez kiberdrošības risku integrācijas.

4.16.tabula

Bāzes scenārija konfigurācija

Elements	Konfigurācija	Interpretācija
Periods	Izvēlēts reprezentatīvs validācijas periods	Normāla ekspluatācijas situācija
EV pieprasījums	Vidējs *SOC*, standarta nepieciešamā enerģija, normāls gaidīšanas limits	Bez ārkārtas steidzamības
Kritēriju svari	Bāzes *AHP* svari	Līdzsvarota lietotāja, tīkla, infrastruktūras un uzticamības loģika

Tīkla slodze	Faktiskais slodžu profils	Bez papildu pīķa noslodzes
Datu kvalitāte	Pieejamie validācijas dati pēc priekšapstrādes	Normāls datu kvalitātes režīms
Kiberdrošība	Standarta riska līmenis	Bez paaugstināta riska scenārija
Rezultāts	*PROMETHEE* rangs un izvēlētā alternatīva	Atskaite salīdzinošajai analīzei

4.4.3. Sezonālie scenāriji

Sezonālie scenāriji ļauj analizēt, kā *MCDM* modelis darbojas dažādos gada periodos. Validācijas datu periods no augusta līdz decembrim ļauj definēt vismaz trīs sezonāli atšķirīgus režīmus: vasaras, rudens un ziemas periodu.

Vasaras scenārijs raksturo periodu ar iespējami zemāku apkures slodzi un citādu uzlādes paradumu struktūru. Rudens scenārijs raksturo pārejas periodu, kur slodzes profils var kļūt mainīgāks. Ziemas scenārijs raksturo paaugstinātas enerģijas vajadzības apstākļus, kuros *EV* patēriņš, akumulatora efektivitāte un lietotāja uzlādes nepieciešamība var būt nelabvēlīgāka.

Sezonālos scenārijus var definēt šādi:

$$S_{season} = \{S_{summer}, S_{autumn}, S_{winter}\}, \tag{4.33}$$

4.17.tabula

Sezonālo scenāriju struktūra

Scenārijs	Lēmumi moments	72 h interpretācijas logs	Dinamiskā validācija	Validācijas nozīme
Vasaras scenārijs	2025-08-15 10:00	2025-08-13 22:00–2025-08-16 22:00	288 dinamiskie soļi	Pārbauda modeli vasaras režīmā
Rudens scenārijs	2025-10-15 16:00	2025-10-14 04:00–2025-10-17 04:00	288 dinamiskie soļi	Pārbauda modeli pārejas periodā
Ziemas scenārijs	2025-12-15 13:00	2025-12-14 01:00–2025-12-17 01:00	288 dinamiskie soļi	Pārbauda modeli ziemas slodzes režīmā

Sezonālo scenāriju rezultāti netiek analizēti šajā nodaļā. Šeit tiek definēta scenāriju struktūra un datu periods, savukārt 5. nodaļā tiek analizēts, vai un kā mainās izvēlētā alternatīva, *PROMETHEE neto* plūsmas, ranga stabilitāte, pieļaujamo alternatīvu skaits un *reassignment frequency*.

4.4.4. Pilsētas un piepilsētas scenāriji

Pilsētas un piepilsētas scenāriji nepieciešami, lai analizētu, vai *MCDM* modelis korekti ņem vērā lokālās infrastruktūras atšķirības. *RIGA1* un *RIGA2* reprezentē pilsētas tipa objektus, kuros ir lielāks uzlādes vietu skaits, vairāki *EUS* objekti un lielāka uzlādes infrastruktūras koncentrācija. *PIERIGA1* un *PIERIGA2* reprezentē mazāka mēroga piepilsētas objektus ar mazāku transformatoru jaudu, ierobežotāku uzlādes infrastruktūru un atšķirīgu *AC/DC* struktūru.

Pilsētas un piepilsētas scenāriju nošķiršana ir metodoloģiski svarīga, jo uzlādes infrastruktūras piemērotība ir atkarīga no lokālajiem tehniskajiem un ekspluatācijas apstākļiem. Pilsētas objektos parasti nozīmīgāka ir augstāka infrastruktūras koncentrācija, lielāks lietotāju pieprasījums un potenciāli lielāka vienlaicīguma ietekme, savukārt piepilsētas objektos būtiskāki var būt tīkla jaudas ierobežojumi, mazāks rezerves alternatīvu skaits un komunikācijas/datu pieejamības nenoteiktība. Šāda lokālo raksturlielumu iekļaušana saskan ar indikatoru pieeju, kur vērtēšanas rādītāji jāpielāgo konkrētajam lēmuma kontekstam [45], [58].

Šāds dalījums ļauj pārbaudīt, vai modelis spēj salīdzināt alternatīvas ne tikai pēc jaudas vai attāluma, bet arī pēc lokālā elektroapgādes konteksta. Piemēram, pilsētas objektā var būt vairāk alternatīvu un lielāka uzlādes infrastruktūras kapacitāte, bet arī sarežģītāka slodzes

sadale. Piepilsētas objektā alternatīvu skaits var būt mazāks, bet atsevišķas jaudas vai slodzes izmaiņas var būt nozīmīgākas transformatora noslodzes skatījumā.

4.18.tabula

Pilsētas un piepilsētas scenāriju salīdzināšanas loģika

Scenāriju grupa	Objekti	Raksturīgās pazīmes	Validācijas jautājums
Pilsētas scenārijs	*RIGA1, RIGA2*	Vairāki *EUS* objekti, lielāks uzlādes punktu skaits, *AC/DC* vai *AC* koncentrācija	Vai modelis spēj izvēlēties starp vairākām pilsētas alternatīvām, ņemot vērā jaudu, slodzi un pieejamību?
Piepilsētas scenārijs	*PIERIGA1, PIERIGA2*	Mazāks transformatoru nominmāls, mazāks alternatīvu skaits, jaukta *AC/DC* struktūra	Vai modelis korekti vērtē mazākas jaudas objektus un tīkla ierobežojumus?
Jauktais scenārijs	Visi objekti	Pilsētas un piepilsētas alternatīvas vienā kopā	Vai *PROMETHEE* rangs līdzsvaro attālumu, jaudu, tīklu un uzticamību?

Pilsētas un piepilsētas scenāriji ļauj sasaistīt validāciju ar promocijas darba pamatideju, ka *EV* uzlādes punkta izvēle jāpielāgo lokālajiem apstākļiem. Šī pieeja saskan ar autora līdzautoru publikācijā attīstīto lokālo īpatnību integrācijas loģiku *EV* pārvaldībā [11].

4.4.5. Slodzes un pīķa scenāriji

Slodzes un pīķa scenāriji tiek izmantoti, lai pārbaudītu, kā *MCDM* modelis darbojas situācijās, kur sadales tīkla slodze palielinās un uzlādes punkta izvēle var būtiski ietekmēt lokālo tīkla režīmu. Šie scenāriji ir īpaši nozīmīgi, jo promocijas darba hipotēze paredz, ka pieeja, kas ņem vērā sadales tīkla stāvokli un uzlādes piešķiršanas uzticamību, var nodrošināt pamatotāku izvēli nekā vienkāršotas pieejas, kurās tīkla darbības režīms netiek ņemts vērā.

Slodzes un pīķa scenāriji ir nepieciešami, lai pārbaudītu, vai modelis spēj pazemināt tādu alternatīvu prioritāti, kas lietotājam varētu šķist pievilcīga, bet konkrētajā brīdī rada lielāku tīkla noslodzes vai jaudas rezerves samazinājuma risku. Šie scenāriji sasaista *EV* uzlādes punkta izvēli ar elektroenerģijas sistēmas operatīvās vadības problēmām, kur būtiska ir slodžu, rezervju un režīma stabilitātes kontrole [53].

Pīķa scenārijā tiek analizēti laika periodi, kuros barošanas avota vai *EUS* slodze ir paaugstināta. Papildus var tikt definēts *EV* uzlādes pieprasījums ar noteiktu nepieciešamo jaudu $P_{req}(t)$, lai pārbaudītu, vai konkrētā alternatīva spēj šo pieprasījumu apkalpot, nepārsniedzot atļautās jaudas vai scenārijā definētās tīkla robežas. Tīkla pīķa slodzes indikatoru var definēt, izmantojot noslodzes koeficientu, atbilstoši formulai 4.10 un pārslodzes riska indikatoru nosaka atbilstoši 4.12 formulai

Ja $r_{over}(a,t) > 0$, tad konkrētajā scenārijā papildu uzlādes slodze pārsniedz atļautās jaudas robežu. Šādos apstākļos alternatīva var tikt izslēgta filtrēšanas posmā vai būtiski pazemināta *PROMETHEE* rangā.

4.19.tabula

Slodzes un pīķa scenāriju konfigurācija

Scenārijs	Konfigurācija	Validācijas mērķis
Normālas slodzes scenārijs	Faktiskais slodzes profils bez papildu pīķa	Pārbauda modeļa darbību ikdienas apstākļos
Paaugstinātas slodzes scenārijs	Izvēlēti augstākas slodzes periodi	Pārbauda tīkla kritēriju ietekmi uz rangu
Papildu *EV* pieprasījuma scenārijs	Esošajai slodzei pievienots $P_{req}(t)$	Pārbauda jaudas rezerves pietiekamību
Sarbības režīma integrācijas scenārijs	Tīkla kritēriji iekļauti *MCDM* modelī	Parāda tīkla slāņa pienesumu
Bez sadales tīkla darbības režīma integrācijas	Tīkla kritēriji izslēgti vai ignorēti	Salīdzinošā bāze 5. nodaļai

Šie scenāriji sagatavo pamatu 5. nodaļas salīdzinošajai analīzei, kur modelis, kas ņem vērā sadales tīkla stāvokli, tiek salīdzināts ar pieeju, kas izvēli balsta tikai uz lietotāja un uzlādes punkta kritērijiem.

4.4.6. Datu kvalitātes un kiberdrošības scenāriji

Datu kvalitātes un kiberdrošības scenāriji ir nepieciešami, lai pārbaudītu, vai uzticamības, datu kvalitātes un digitālās drošības kritēriju integrācija būtiski ietekmē dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas rezultātu. Šajos scenārijos tiek analizēts, kā uzlādes punkta izvēli ietekmē datu pilnīguma samazināšanās, datu vecuma pieaugums, komunikācijas traucējumi, paaugstināts kiberrisks vai drošības penalizācija.

Datu kvalitātes scenārijā var tikt samazināts datu pilnīguma indikators D_{comp} vai palielināts datu vecuma indikators D_{age}. Tas ļauj pārbaudīt, vai *MCDM* modelis pazemina alternatīvas, par kurām nav pietiekami aktuālu vai ticamu datu.

Datu kvalitātes degradāciju var modelēt šādi:

$$D_{qual}^{deg}(a,t) = D_{qual}(a,t) - \delta_D, \tag{4.36}$$

kur $D_{qual}^{deg}(a,t)$ - degradētais datu kvalitātes indikators, δ_D - scenārijā definētais datu kvalitātes samazinājums.

Kiberdrošības scenārijā paaugstināts risks tiek modelēts ar kiberriska indikatoru $\rho_{cyb}(a,t)$. Ja tiek izmantota penalizācijas loģika, riskam pielāgoto prioritātes izmantošanā izmanto iepriekš definēto formulu 3.23.

Šie scenāriji balstās uz *EV* uzlādes infrastruktūras kiberdrošības profilu, *ENISA* apdraudējumu ainavas, *ISO/SAE 21434* riska domāšanas un autora līdzautoru 2026. gada *AHP–PROMETHEE* kiberriska novērtēšanas ietvara metodoloģisko pamatu [12], [13], [24], [25]. *OCPP* un *WUSTL* datu slāņi šajā nodaļā tiek interpretēti kā drošības scenāriju pamatojošie datu avoti un kiberdrošības indikatoru validācijas slānis, bet detalizēta drošības rezultātu analīze tiek veikta 5. nodaļā.

4.20.tabula

Datu kvalitātes, tīkla un kiberdrošības scenāriju struktūra

Scenārijs	Atslēga *Excel* datos	Mainīgais faktors	Gala *Excel* ietekme uz pieļaujamo kopu	Validācijas jautājums
Normāls režīms	*normal*	Faktiskie dati bez papildu degradācijas	7/7 alternatīvas lēmumi scenārijos	Bāzes salīdzināšanas režīms
Datu kvalitātes degradācija	*data_degradation*	Stingrs datu kvalitātes filtrs	0/7 alternatīvas konkrētajos lēmumi brīžos	Pārbauda atkāpšanās/*no-assignment* situāciju
Kiberdrošības riska režīms	*cyber_risk*	Paaugstināts kiberrisks daļai alternatīvu	2/7 alternatīvas; *admissible ratio* 28,57 %	Pārbauda *security-aware* filtrēšanu un penalizāciju
Tīkla noslodzes režīms	*grid_stress*	Pastiprināts tīkla noslodzes kritērijs	7/7 alternatīvas; mainās neto plūsmas intensitāte	Pārbauda tīkla stāvokļa prioritizāciju
Kombinētais stress	*combined_stress*	Kiberdrošības un tīkla/datu riska kombinācija	2/7 alternatīvas; *admissible ratio* 28,57 %	Pārbauda modeļa noturību vairāku risku apstākļos

Šo scenāriju mērķis nav modelēt pilnu kiberdrošības incidenta tehnisko gaitu, bet gan pārbaudīt, vai kiberdrošības un datu kvalitātes indikatori ietekmē *MCDM* lēmumu tieši un interpretējami.

4.4.7. Uz uzticamības kritērijiem orientēts svaru jutīguma scenārijs

Papildus datu kvalitātes un slodzes scenārijiem validācijas vidē tiek definēts arī uz uzticamības kritērijiem orientēts svaru jutīguma scenārijs. Prototipa izstrādes laikā šī konfigurācija tika apzīmēta kā *NIMBUS-style* scenārijs, tomēr promocijas darba tekstā to lietderīgāk interpretēt kā uzticamības orientētu svaru jutīguma scenāriju, nevis kā atsevišķu jaunu *MCDM* metodi.

Šī scenārija mērķis ir pārbaudīt, kā mainās *PROMETHEE* rangs, ja palielinās uzticamības, datu kvalitātes, kiberdrošības un tīkla kritēriju nozīme. Bāzes *AHP* svaru vektors tiek koriģēts ar scenāriju reizinātājiem, kas tika definēti pēc formulas 3.5.

4.21.tabula

Uzticamības kritēriju svaru jutīguma scenārija interpretācija

Pastiprinātā kritēriju grupa	Scenārija interpretācija	Sagaidāmā ietekme
Sadales tīkla kritēriji	Paaugstināta tīkla noslodzes nozīme	Samazinās alternatīvu prioritāte ar zemu jaudas rezervi vai augstu noslodzi
Datu kvalitāte	Pieaug datu aktualitātes un pilnīguma nozīme	Zemāk rangā nonāk alternatīvas ar nepilnīgiem vai novecojušiem datiem
Uzticamība	Pastiprināta darbspējas un pakalpojuma pieejamības nozīme	Priekšroka alternatīvām ar stabilāku ekspluatācijas stāvokli
Kiberdrošība	Paaugstināta riska penalizācijas nozīme	Riskantas alternatīvas tiek pazeminātas vai izslēgtas
Rezerves secība	Lielāka nozīme lēmuma noturībai	Palielinās pilna ranga un rezerves alternatīvu nozīme

Šis scenārijs 5. nodaļā tiek izmantots, lai novērtētu, vai izstrādātais modelis patiešām maina izvēli uzticamības un drošības faktoru ietekmē, nevis tikai formāli pievieno šos kritērijus bez būtiskas ietekmes uz gala rangu.

4.4.8. Scenāriju salīdzināšanas princips

Visi scenāriji tiek salīdzināti pēc vienotas loģikas. Salīdzināšanas mērķis ir noteikt, kā mainās uzlādes punkta izvēle, alternatīvu rangs, neto plūsmas, pieļaujamo alternatīvu skaits, rezerves alternatīvu pieejamība un *KPI*, mainoties ekspluatācijas, tīkla, datu kvalitātes vai kiberdrošības nosacījumiem.

Scenāriju salīdzināšanai tiek analizēti šādi jautājumi:

- vai mainās pirmā alternatīva a_t^*;
- vai mainās rezerves alternatīvu secība;
- kā mainās *PROMETHEE neto* plūsmas;
- kā mainās starpība $\Delta\phi_{12}(t)$;
- vai samazinās pieļaujamo alternatīvu skaits;
- vai pieaug pārrēķinu vai pāradresēšanas biežums;
- vai modelis, kurā tiek ņemts vērā sadales tīkla darbības režīms, atšķiras no pieejas, kurā tīkla stāvoklis netiek ņemts vērā;
- vai modelis, kurā tiek integrēti kiberdrošības riski, atšķiras no pieejas, kurā kiberdrošības aspekts netiek ņemts vērā;
- vai uz piešķiršanas uzticamību orientēta kritēriju svaru konfigurācija maina gala izvēli.

Scenāriju salīdzinājuma rezultātus var apkopot šādi:

$$\Delta R_s = R_s - R_{base}, \tag{4.39}$$

kur R_s - scenārija s rangs, R_{base} - bāzes scenārija rangs.

Tā kā rangs ir sakārtota alternatīvu secība, praktiskajā validācijā ΔR_s tiek interpretēts nevis kā vienkārša aritmētiska starpība, bet kā ranga izmaiņu kopums: pirmās alternatīvas maiņa, alternatīvu pozīciju maiņa, neto plūsmu izmaiņas un rezerves alternatīvu secības izmaiņas.

4.22.tabula

Scenāriju salīdzināšanas kritēriji

Salīdzināšanas kritērijs	Interpretācija	Nozīme validācijā
Pirmās alternatīvas maiņa	Vai mainās a_t^*	Parāda scenārija ietekmi uz gala izvēli
Rezerves secības maiņa	Vai mainās otrā un nākamās alternatīvas	Parāda lēmuma noturību
Neto plūsmas izmaiņas	Kā mainās $\phi(a,t)$	Parāda prioritāšu intensitātes izmaiņas
$\Delta\phi_{12}$	Pirmās un otrās alternatīvas starpība	Parāda ranga stabilitāti
Pieļaujamo alternatīvu skaits	A_t^{adm} apjoms	Parāda filtrēšanas ietekmi
kiberdrošības riska penalizācijas ietekme	Ranga izmaiņa pie kiberriska penalizācijas	Parāda drošības slāņa pienesumu
datu kvalitātes ietekme	Ranga izmaiņa pie datu kvalitātes degradācijas	Parāda datu uzticamības nozīmi
adales tīkla stāvokli ņemoša pieeja pret pieeju bez sadales tīkla stāvokļa ievērošanas	Salīdzinājums ar tīkla kritēriju ignorēšanu	Parāda sadales tīkla kritēriju nozīmi
uz uzticamību orientēta pieeja pret bāzes pieeju	Salīdzinājums ar bāzes svaru konfigurāciju	Parāda uzticamības orientācijas pienesumu

Šāda scenāriju sistēma nodrošina strukturētu pamatu 5. nodaļai. Tajā tiks pārbaudīts, vai izstrādātais *AHP–PROMETHEE* modelis sniedz pamatotāku un uzticamāku izvēli nekā vienkāršotas piešķiršanas pieejas, un vai uzticamības, datu kvalitātes, kiberdrošības un sadales tīkla kritēriju iekļaušana būtiski ietekmē uzlādes punkta izvēli.

4.5. Novērtēšanas rādītāji

Lai 5. nodaļā varētu validēt izstrādāto *AHP–PROMETHEE* modeli, nepieciešams definēt novērtēšanas rādītājus jeb *KPI*. Šie rādītāji ļauj analizēt ne tikai to, kura alternatīva tiek izvēlēta, bet arī to, kā modelis ietekmē lietotāja pieredzi, infrastruktūras izmantošanu, sadales tīkla noslodzi, lēmuma stabilitāti, datu kvalitāti un kiberdrošības risku.

KPI sistēma šajā darbā tiek veidota, lai novērtētu ne tikai gala izvēli, bet arī lēmuma ietekmi uz lietotāju, infrastruktūru, sadales tīklu, uzticamību un drošību. Indikatoru literatūrā uzsvērts, ka rādītāji var kalpot gan kā mērīšanas instruments, gan kā lēmumu atbalsta instruments [45], [58]. Tādēļ promocijas darba *KPI* netiek izmantoti tikai rezultātu aprakstam, bet arī hipotēzes pārbaudei vai uzticamības orientēts *MCDM* modelis nodrošina pamatotāku uzlādes punkta piešķiršanu nekā vienkāršotas pieejas.

Šajā promocijas darbā *KPI* tiek strukturēti piecās grupās:

$$KPI = [KPI_U, KPI_I, KPI_G, KPI_R, KPI_{SEC}], \tag{4.40}$$

kur KPI_U - lietotāja līmeņa rādītāji, KPI_I - infrastruktūras līmeņa rādītāji, KPI_G - sadales tīkla līmeņa rādītāji, KPI_R - uzticamības rādītāji, KPI_{SEC} - kiberdrošības un datu kvalitātes rādītāji.

KPI definēšanas mērķis ir nodrošināt, ka 5. nodaļā izstrādātais modelis tiek vērtēts nevis pēc viena rezultāta, bet pēc vairākiem savstarpēji saistītiem aspektiem. Tas ir būtiski, jo dinamiska *EV* uzlādes punkta piešķiršana pēc būtības ir kompromisa problēma: lietotājam ērtākā alternatīva ne vienmēr ir labākā tīkla vai uzticamības skatījumā, bet tehniski drošākā alternatīva ne vienmēr ir tuvākā vai ātrākā lietotājam.

4.5.1. Lietotāja līmeņa *KPI*

Lietotāja līmeņa *KPI* raksturo, cik labi modelis apmierina konkrētā *EV* lietotāja vajadzības. Šajā grupā tiek iekļauti gaidīšanas laiks, attālums vai maršruta novirze, piešķiršanas sekmīgums un nepieciešamās uzlādes apmierināšanas līmenis.

Vidējo gaidīšanas laiku var aprēķināt šādi:

$$\overline{W} = \frac{1}{N}\sum_{r=1}^{N} W(a_r^*, t_r), \tag{4.41}$$

kur $\overline{W}$ - vidējais gaidīšanas laiks, N - uzlādes pieprasījumu skaits, $W(a_r^*, t_r)$ - gaidīšanas laiks izvēlētajā alternatīvā, a_r^* - pieprasījuma brīdī t_r.

Maršruta novirzes vai attāluma rādītāju var definēt kā vidējo attālumu līdz izvēlētajai alternatīvai:

$$\bar{d} = \frac{1}{N}\sum_{r=1}^{N} d(a_r^*, t_r), \tag{4.42}$$

kur $d(a_r^*, t_r)$ - attālums no EV sākuma punkta līdz izvēlētajam uzlādes punktam.

Piešķiršanas sekmīguma rādītājs raksturo, cik bieži modelis spēj atrast vismaz vienu pieļaujamu alternatīvu:

$$ASR = \frac{N_{success}}{N} * 100\%, \tag{4.43}$$

kur ASR - sekmīgas uzlādes punkta piešķiršanas īpatsvars (*assignment success rate*), $N_{success}$ - sekmīgo piešķiršanas gadījumu skaits, N - kopējais pieprasījumu skaits.

Nepieciešamās uzlādes apmierināšanas līmeni var definēt kā attiecību starp faktiski nodrošināto un pieprasīto enerģiju:

$$RCS = \frac{E_{delivered}}{E_{req}} * 100\%, \tag{4.44}$$

kur RCS - nepieciešamās uzlādes nodrošinājuma pakāpe (*required charge satisfaction)*, $E_{delivered}$ - piegādātā enerģija, E_{req} - lietotājam nepieciešamā enerģija.

4.23. tabula

Lietotāja līmeņa *KPI*

Rādītājs	Formula	Vēlamais virziens	Interpretācija
Vidējais gaidīšanas laiks	$\overline{W}$	Minimāls	Mazāks gaidīšanas laiks uzlabo lietotāja pieredzi
Vidējais attālums / maršruta novirze	$\bar{d}$	Minimāls	Mazāka novirze nozīmē ērtāku izvēli
Assignment success rate	ASR	Maksimāls	Parāda, cik bieži modelis atrod pieļaujamu alternatīvu
Required charge satisfaction	RCS	Maksimāls	Parāda, vai izvēle nodrošina nepieciešamo enerģiju

Lietotāja *KPI* 5. nodaļā tiek izmantoti, lai salīdzinātu *AHP–PROMETHEE* modeli ar vienkāršotām pieejām, piemēram, tuvākās stacijas vai īsākā gaidīšanas laika izvēli. Šie rādītāji ļauj parādīt, vai uzticamības un tīkla kritēriju iekļaušana būtiski nepasliktina lietotāja pieredzi.

4.5.2. Infrastruktūras līmeņa *KPI*

Infrastruktūras līmeņa *KPI* raksturo, kā modelis izmanto pieejamo uzlādes infrastruktūru. Šie rādītāji ir nepieciešami, lai analizētu, vai izvēles algoritms pārmērīgi koncentrējas uz vienu alternatīvu vai arī nodrošina līdzsvarotāku uzlādes punktu izmantošanu.

Uzstādītās jaudas izmantošanas rādītājs tiek definēts kā:

$$U_{inst}(a,t) = \frac{P_{EUS}(a,t)}{P_{inst}(a)} * 100\%, \quad (4.45)$$

kur $P_{EUS}(a,t)$ - konkrētās EUS slodze laikā t, $P_{inst}(a)$ - uzstādītā jauda.

Atļautās jaudas izmantošanas rādītājs tiek definēts šādi:

$$U_{allow}(a,t) = \frac{P_{EUS}(a,t)}{P_{allow}(a)} * 100\%, \quad (4.46)$$

Šis rādītājs validācijā ir īpaši nozīmīgs, jo vairākos objektos uzstādītā jauda būtiski atšķiras no atļautās vai aprēķina jaudas. Līdz ar to alternatīva ar lielāku uzstādīto jaudu ne vienmēr ir labākā izvēle, ja tās atļautā jauda vai pieslēguma rezerve ir ierobežota.

Infrastruktūras izmantošanas līdzsvaru var novērtēt pēc izvēļu sadalījuma starp alternatīvām. Vienkāršots līdzsvara rādītājs var tikt definēts kā alternatīvu izvēles biežuma standartnovirze:

$$\sigma_{assign} = \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left(f_i - \bar{f}\right)^2}, \quad (4.47)$$

kur f_i - i-tās alternatīvas izvēles biežums, $\bar{f}$ - vidējais izvēles biežums, m - alternatīvu skaits.

Mazāka standartnovirze norāda uz līdzsvarotāku infrastruktūras izmantošanu.

4.24.tabula

Infrastruktūras līmeņa *KPI*

Rādītājs	Formula	Vēlamais virziens	Interpretācija
Izmantošana pret uzstādīto jaudu	U_{inst}	Atkarīgs no scenārija	Parāda, cik intensīvi tiek izmantota uzstādītā *EUS* jauda
Izmantošana pret atļauto jaudu	U_{allow}	Nepārsniegt robežu	Parāda, vai *EUS* tuvojas atļautās jaudas robežai
Izvēļu sadalījuma līdzsvars	σ_{assign}	Zemāks	Parāda, vai izvēles nav pārmērīgi koncentrētas vienā punktā
Rezerves alternatīvu izmantošana	Rezerves izvēles gadījumu skaits	Atkarīgs no scenārija	Parāda, cik bieži nepieciešama otrā vai nākamā alternatīva

Infrastruktūras *KPI* ļauj 5. nodaļā analizēt, vai *MCDM* modelis ne tikai izvēlas matemātiski labāko alternatīvu, bet arī atbalsta praktiski līdzsvarotu uzlādes infrastruktūras izmantošanu.

4.5.3. Sadales tīkla līmeņa *KPI*

Sadales tīkla līmeņa *KPI* raksturo modeļa spēju ņemt vērā lokālā elektroapgādes tīkla ierobežojumus. Šī *KPI* grupa ir būtiska promocijas darba hipotēzes pārbaudei, jo viens no darba uzdevumiem ir parādīt, ka pieeja, kurā tiek ņemts vērā sadales tīkla stāvoklis, var samazināt tehniski riskantu uzlādes punktu izvēli.

Tīkla pārkāpumu īpatsvaru var definēt šādi:

$$GVR = \frac{N_{viol}}{N} * 100\%, \quad (4.48)$$

kur GVR - elektrotīkla darbības ierobežojumu pārkāpumu īpatsvars (*grid violation ratio)*, N_{viol} - gadījumu skaits, kuros tiek pārsniegta tīkla noslodzes, jaudas rezerves vai cita definēta robeža, N - kopējais lēmumu skaits.

Jaudas rezerves vidējo vērtību var aprēķināt šādi:

$$\bar{P}_{res} = \frac{1}{N}\sum_{r=1}^{N} P_{res}(a_r^*, t_r), \quad (4.49)$$

kur $P_{res}(a_r^*, t_r)$ - jaudas rezerve izvēlētajā alternatīvā.

Slodzes novirzi no pieļaujamās robežas var aprēķināt šādi:

$$\Delta P_{load}(a,t) = P_{feed}(a,t) - P_{allow}(a), \tag{4.50}$$

Ja $\Delta P_{load}(a,t) > 0$, tad alternatīva pārsniedz atļauto jaudu vai scenārijā definēto robežu. Šāds gadījums tiek interpretēts kā tīkla pārkāpums vai pārslodzes risks.

Sprieguma novirzes gadījumu rādītāju teorētiski var definēt šādi:

$$UVR = \frac{N_{\Delta U > \Delta U_{max}}}{N} * 100\%, \tag{4.51}$$

kur UVR - sprieguma pieļaujamo robežu pārkāpumu īpatsvars (*voltage violation ratio*), $N_{\Delta U > \Delta U_{max}}$ - gadījumu skaits, kuros sprieguma novirze pārsniedz pieļaujamo robežu.

Fāžu nesimetrijas gadījumu rādītāju teorētiski var definēt šādi:

$$UBR = \frac{N_{k_{unb} > k_{unb,max}}}{N} * 100, \tag{4.52}$$

Šajā promocijas darbā sprieguma un fāžu nesimetrijas *KPI* tiek saglabāti kā metodoloģiski paredzēti rādītāji, taču konkrētajā validācijas datu kopā tie nav pilnvērtīgi aprēķināmi, jo visiem validācijas objektiem nav pieejami pilni sprieguma un fāžu strāvu dati. Tāpēc 5. nodaļā galvenā tīkla *KPI* analīze balstās uz noslodzes koeficientu, jaudas rezervi, atļautās jaudas izmantošanu un pārslodzes riska indikatoru.

4.25. tabula

Sadales tīkla līmeņa *KPI*

Rādītājs	Formula	Vēlamais virziens	Piezīme
Grid violation ratio	GVR	Minimāls	Galvenais tīkla pārkāpumu rādītājs
Vidējā jaudas rezerve	$\bar{P}_{res}$	Maksimāla	Parāda tehniski drošāku izvēli
Slodzes novirze	ΔP_{load}	Nepārsniegt 0	Pozitīva vērtība norāda uz pārslodzes risku
Voltage violation ratio	UVR	Minimāls	Metodoloģiski paredzēts, bet konkrētajā datu kopā ierobežoti aprēķināms
Unbalance violation ratio	UBR	Minimāls	Metodoloģiski paredzēts, bet konkrētajā datu kopā ierobežoti aprēķināms

Tīkla *KPI* nodrošina iespēju pārbaudīt, vai *MCDM* modelis faktiski samazina tādu piešķīrumu īpatsvaru, kas var pasliktināt sadales tīkla ekspluatācijas režīmu. Šeit īpaši nozīmīgi ir pārslodzes risks, brīvā jaudas rezerve, kritisko mezglu aktivizācija un tīkla notikumu ietekme. Šie rādītāji ļauj validācijā salīdzināt izstrādāto modeli ar pieejām, kurās netiek ņemts vērā sadales tīkla stāvoklis, kur uzlādes punkts tiek izvēlēts, neņemot vērā sadales tīkla stāvokli [53].

Sadales tīkla *KPI* 5. nodaļā tiek izmantoti, lai salīdzinātu pieeju, kurā tiek ņemts vērā sadales tīkla stāvoklis, ar pieeju, kurā sadales tīkla stāvoklis netiek ņemts vērā. Ja pieeja, kurā netiek ņemts vērā sadales tīkla stāvoklis, izvēlas alternatīvu ar augstāku tīkla pārslodzes risku, tas pamato tīkla kritēriju iekļaušanu *MCDM* modelī.

4.5.4. Uzticamības un kiberdrošības *KPI*

Uzticamības un kiberdrošības *KPI* ir īpaši nozīmīgi, jo tie ļauj novērtēt, kā uzticamības, datu kvalitātes un digitālās drošības kritēriju integrācija ietekmē dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas rezultātu. Šie rādītāji ļauj novērtēt, vai uzticamības, datu kvalitātes un

kiberdrošības slānis patiešām ietekmē gala izvēli, vai arī tas ir tikai formāli pievienots kritēriju kopai.

Ranga stabilitāti var definēt kā gadījumu īpatsvaru, kuros pirmā alternatīva nemainās starp diviem secīgiem aprēķinu soļiem:

$$RS = \frac{N_{stable}}{N-1} * 100\%, \tag{4.53}$$

kur RS - alternatīvu rangējuma stabilitāte (*ranking stability*), N_{stable} - gadījumu skaits, kuros $a_t^* = a_{t-1}^*$.

Pāradresēšanas biežumu var aprēķināt šādi:

$$RF = \frac{N_{reassign}}{N} * 100\%, \tag{4.54}$$

kur RF - uzlādes punkta pārpiešķiršanas biežums (*reassignment frequency*), $N_{reassign}$ - gadījumu skaits, kuros sākotnējā izvēle tiek mainīta uz citu alternatīvu.

Kiberdrošības penalizācijas ietekmi var definēt kā vidējo atšķirību starp sākotnējo *PROMETHEE neto* plūsmu un riskam pielāgoto *neto* plūsmu:

$$SPI = \frac{1}{N}\sum_{r=1}^{N}|\phi(a_r, t_r) - \phi_{risk}(a_r, t_r)|, \tag{4.55}$$

kur SPI - kiberdrošības riska korekcijas ietekme uz rezultātu (*security penalty impact)*.

Datu kvalitātes ietekmi var definēt kā vidējo *neto* plūsmas izmaiņu datu kvalitātes degradācijas scenārijā:

$$DQI = \frac{1}{N}\sum_{r=1}^{N}\left|\phi_{base}(a_r, t_r) - \phi_{Ddeg}(a_r, t_r)\right|, \tag{4.56}$$

kur DQI - datu kvalitātes ietekme uz rezultātu (*data quality impact)*, ϕ_{base} - bāzes scenārija neto plūsma, ϕ_{Ddeg} - datu degradācijas scenārija *neto* plūsma.

Pieļaujamo alternatīvu zudumu var aprēķināt šādi:

$$AAL = \frac{|A_t^0| - |A_t^{adm}|}{|A_t^0|}, \tag{4.57}$$

kur AAL - pieļaujamo alternatīvu zudums (*admissible alternatives loss)*, $|A_t^0|$ - sākotnējo kandidātu skaits, $|A_t^{adm}|$ - ir pieļaujamo alternatīvu skaits pēc filtrēšanas.

Rezerves alternatīvu pieejamību var definēt kā gadījumu īpatsvaru, kuros pēc filtrēšanas ir pieejamas vismaz divas alternatīvas:

$$RA = \frac{N_{|A_t^{adm}|\geq 2}}{N} * 100\%, \tag{4.58}$$

Šis rādītājs ir būtisks, jo uzticamības orientēts modelis nedrīkst balstīties tikai uz vienu izvēli. Ja pieejama rezerves alternatīva, sistēma var reaģēt uz izmaiņām bez pilnīgas lēmuma procedūras sabrukuma.

Koda fragments 4.5. "Uzticamības KPI aprēķins"

```
def calculate_reliability_kpis(results):
    ranking_stability = (
        results["selected"].eq(results["selected"].shift(1)).sum()
        / (len(results) - 1)
    ) * 100
```

```
    reassignment_frequency = (
        results["reassigned"].sum()
        / len(results)
    ) * 100

    admissible_loss = (
        (results["n_candidates"] - results["n_admissible"])
        / results["n_candidates"]
    ).mean() * 100

    reserve_availability = (
        (results["n_admissible"] >= 2).sum()
        / len(results)
    ) * 100

    return {
        "ranking_stability_pct": ranking_stability,
        "reassignment_frequency_pct": reassignment_frequency,
        "admissible_alternatives_loss_pct": admissible_loss,
        "reserve_availability_pct": reserve_availability,
    }
```

Šis fragments sasaista 4.5. sadaļā definētos uzticamības *KPI* ar aprēķinu realizāciju. Tas ļauj noteikt ranga stabilitāti, pāradresēšanas biežumu, pieļaujamo alternatīvu zudumu un rezerves alternatīvu pieejamību validācijas periodā.

4.26.tabula

Uzticamības un kiberdrošības *KPI*

Rādītājs	Formula	Vēlamais virziens	Interpretācija
Ranking stability	*RS*	Augsts	Parāda, cik stabila ir pirmā alternatīva laikā
Reassignment frequency	*RF*	Zems, bet ne obligāti nulle	Parāda, cik bieži nepieciešama pāradresēšana
Security penalty impact	*SPI*	Atkarīgs no riska	Parāda, cik būtiski kiberrisks ietekmē neto plūsmu
Data quality impact	*DQI*	Minimāls normālā režīmā	Parāda, cik jutīgs modelis ir pret datu kvalitātes pasliktināšanos
Admissible alternatives loss	*AAL*	Atkarīgs no scenārija	Parāda filtrēšanas ietekmi uz alternatīvu kopu
Reserve availability	*RA*	Augsts	Parāda, vai sistēmai ir izmantojamas rezerves alternatīvas

Uzticamības un drošības *KPI* ir būtiski, jo tie ļauj novērtēt, vai uzticamības, datu kvalitātes un kiberdrošības kritēriju integrācija faktiski ietekmē dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas rezultātu. *Ranking stability* raksturo, cik stabils ir alternatīvu rangs pie datu vai scenārija izmaiņām; *reassignment frequency* parāda, cik bieži modelim jāmaina sākotnējā izvēle; *security penalty impact* un *data quality impact* parāda, cik lielā mērā drošības un datu kvalitātes slāņi ietekmē gala prioritāti. Šie KPI ļauj parādīt, ka kiberdrošība un datu kvalitāte nav dekoratīvs papildinājums, bet pilnvērtīga lēmuma uzticamību ietekmējoša dimensija [51], [52].

Šie KPI 5. nodaļā tiks izmantoti, lai parādītu, ka kiberdrošības un datu kvalitātes slānis nav dekoratīvs pielikums, bet tieši ietekmē alternatīvu pieļaujamību, rangu, *neto* plūsmu un rezerves izvēles noturību.

4.5.5. *KPI* izmantošana modeļa validācijā

Definētie *KPI* tiek izmantoti trīs validācijas līmeņos. Pirmajā līmenī tiek novērtēts *AHP–PROMETHEE* modeļa bāzes scenārijs, analizējot izvēlēto alternatīvu, neto plūsmas, gaidīšanas laiku, tīkla slodzi un rezerves alternatīvu pieejamību. Otrajā līmenī modelis tiek salīdzināts ar vienkāršotām pieejām: tuvākās stacijas izvēli, īsākā gaidīšanas laika izvēli, lielākās pieejamās jaudas izvēli, pieeju bez sadales tīkla stāvokļa ievērošanas un pieeju bez kiberdrošības risku integrācijas. Trešajā līmenī tiek analizēta scenāriju un jutīguma ietekme, īpašu uzmanību pievēršot tīkla noslodzes, datu kvalitātes, kiberdrošības un uz uzticamības kritērijiem orientētas svaru konfigurācijas scenārijiem.

KPI izmantošana validācijā ļauj sasaistīt promocijas darba hipotēzi ar izmērāmiem rezultātiem. Ja *AHP–PROMETHEE* modelis samazina tīkla pārkāpumu risku, saglabā pieņemamu lietotāja pieredzi, nodrošina augstu rezerves alternatīvu pieejamību un reaģē uz datu kvalitātes vai kiberdrošības riska izmaiņām, tad tas apstiprina darba pamatpieņēmumu par uzticamības orientētas *MCDM* pieejas lietderību dinamiskai *EV* uzlādes punkta piešķiršanai.

4.6. Datu un scenāriju ierobežojumi

Promocijas darba validācijas vide ir veidota kā metodoloģiska un scenāriju balstīta pārbaude. Tā ļauj pārbaudīt izstrādātā *AHP–PROMETHEE* modeļa darbības loģiku, kritēriju integrāciju, filtrēšanas mehānismu, ranga veidošanos un uzticamības/kiberdrošības slāņa ietekmi. Vienlaikus šai validācijas pieejai ir vairāki ierobežojumi, kas jāņem vērā rezultātu interpretācijā.

4.6.1. Datu pieejamības un detalizācijas ierobežojumi

Pirmais ierobežojums ir saistīts ar datu pieejamību un detalizāciju. Validācijā izmantotie dati ietver *EV* uzlādes infrastruktūras tehniskos parametrus un slodžu profilus, taču tie neietver pilnu reāllaika informāciju par visiem *EV* lietotājiem, *SOC*, maršrutiem, uzlādes sesiju ilgumiem, rezervācijām un faktiskajām rindām.

Tādēļ *EV* pieprasījuma dati, lietotāja preferences un gaidīšanas laika rādītāji daļēji tiek definēti scenāriju veidā. Šāda pieeja ir pietiekama metodoloģiskai validācijai, taču tā nav interpretējama kā pilns lietotāju uzvedības modelis. Reālā *CPO/CSO* vidē šie dati būtu jāiegūst no lietotņu, rezervācijas sistēmu, *EVSE* sesiju žurnālu un *BMS* datu integrācijas.

Otrs datu ierobežojums attiecas uz sprieguma un fāžu nesimetrijas indikatoriem. Teorētiskajā modelī šie kritēriji ir nozīmīgi, jo *EV* uzlāde var ietekmēt sprieguma režīmu un fāžu slodzes līdzsvaru. Tomēr konkrētajā validācijas datu kopā nav pilnvērtīgu sprieguma un fāžu strāvu datu visiem validācijas objektiem. Tāpēc sprieguma novirze un fāžu nesimetrija šajā darbā tiek saglabāta kā metodoloģiski paredzēti kritēriji, bet praktiskajā validācijā galvenā tīkla analīze balstās uz slodzi, atļauto jaudu, jaudas rezervi un pārslodzes riska indikatoriem.

4.6.2. Laika izšķirtspējas un agregācijas ierobežojumi

Validācijas datu pamatizšķirtspēja ir 15 minūtes. Šāds solis ir piemērots slodžu profilu analīzei un tīkla noslodzes novērtēšanai, tomēr tas nav pietiekams, lai modelētu ļoti īsas operatīvas izmaiņas sekundes vai minūtes līmenī, piemēram, *EVSE* savienojuma kļūdas, īslaicīgas komunikācijas aiztures, momentānas sprieguma svārstības vai sesijas sākuma pārejas procesus.

Rezultātu pārskatāmībai daļa kopsavilkumu tiek agregēta 1 stundas solī. Šāda agregācija atvieglo sezonālo, diennakts un scenāriju salīdzinājumu, bet vienlaikus izlīdzina īsterminā

slodzes svārstības. Tāpēc 1 stundas rezultāti jāinterpretē kā validācijas un vizualizācijas kopsavilkumi, nevis kā sekundes līmeņa operatīvas vadības modelis.

4.6.3. Kiberdrošības un uzticamības datu ierobežojumi

Kiberdrošības un uzticamības slānis šajā darbā tiek iekļauts kā *MCDM* lēmumu ietekmējošs riska un datu kvalitātes slānis. Tomēr validācijas objektiem nav pieejami pilni reāli kiberdrošības incidentu žurnāli, *SOC/SIEM* dati, detalizēti *OCPP* ziņojumu žurnāli vai autentifikācijas notikumu vēsture.

Tāpēc kiberdrošības scenāriji tiek balstīti uz literatūrā un autora līdzautoru pētījumā definētiem kiberriska indikatoriem, kā arī uz atsevišķiem drošības datu slāņiem. Tas ļauj pārbaudīt, kā kiberrisks ietekmē *MCDM* rangu, bet tas neaizstāj pilnu tehnisko kiberdrošības auditu.

Šī ierobežojuma dēļ darbā tiek skaidri nošķirtas divas lietas: kiberdrošības riska integrācija lēmumu pieņemšanas modelī un pilns *EVSE* kiberdrošības tehniskais novērtējums. Promocijas darba fokuss ir pirmais, proti, kā kiberdrošības riska indikatori var ietekmēt dinamisku uzlādes punkta piešķiršanu.

4.6.4. Telpiskā mēroga un anonimizācijas ierobežojumi

Ģeotelpiskā validācijas vide izmanto anonimizētas validācijas zonas, nevis publiski atklātas precīzas objektu koordinātas. Šāds risinājums ir nepieciešams, jo validācijas objekti ir saistīti ar elektroapgādes un uzlādes infrastruktūru, kuras precīza atrašanās vieta un tehniskā pieslēguma informācija nav nepieciešama promocijas darba metodoloģiskajam mērķim.

Anonimizācija saglabā telpiskās analīzes loģiku: attālumu, pilsētas/piepilsētas raksturu un alternatīvu sasniedzamību, bet neļauj identificēt konkrētu pieslēguma vietu. Tas nozīmē, ka ģeotelpiskie rezultāti jāinterpretē kā validācijas vides telpiskais konteksts, nevis kā publiska infrastruktūras lokāciju datubāze.

Turklāt validācija balstās uz četriem anonimizētiem objektiem un septiņām *EUS* alternatīvām. Šis apjoms ir piemērots metodoloģiskai pārbaudei, bet nav pietiekams, lai izdarītu statistiski vispārinātus secinājumus par visu Latvijas *EV* uzlādes infrastruktūru.

4.6.5. Scenāriju validācijas ierobežojumi

Scenāriju sistēma ļauj pārbaudīt modeļa reakciju uz dažādiem apstākļiem: sezonālām slodzes izmaiņām, pīķa slodzi, datu kvalitātes degradāciju, kiberdrošības riskiem un svaru konfigurāciju, kurā lielāka nozīme tiek piešķirta uzticamības kritērijiem. Tomēr scenāriji ir kontrolēti eksperimenti, nevis pilna realitātes simulācija.

Tas nozīmē, ka scenāriju rezultāti jāinterpretē kā metodoloģiska validācija: tie parāda, kā modelis reaģē uz noteiktām izmaiņām, bet neprognozē visu iespējamo *EV* lietotāju, *CPO*, *DSO* un tirgus dalībnieku uzvedību reālā ekspluatācijā.

Scenārijos izmantotie svari, sliekšņi un riska līmeņi ir definēti, lai pārbaudītu modeļa jutīgumu un interpretējamību. Reālā ieviešanā šie parametri būtu jāpielāgo operatora tehniskajām prasībām, lietotāju uzvedībai, datu kvalitātes līmenim un kiberdrošības politikai.

4.6.6. Modeļa robežas

Izstrādātais modelis nav pilns transporta plūsmas simulators. Tas neaprēķina visu *EV* kustību pilsētā vai valstī, bet izmanto *EV* sākuma punktu, attālumu, sasniedzamību un lietotāja ierobežojumus kā *MCDM* kritērijus.

Modelis nav arī elektroenerģijas tirgus optimizācijas modelis. Cena var tikt iekļauta kā kritērijs, bet darba mērķis nav prognozēt elektroenerģijas cenu, balansēšanas izmaksas vai tirgus dalībnieku stratēģijas.

Tāpat modelis nav detalizēts slodzes plūsmas aprēķina rīks. Tas izmanto pieejamos slodžu profilus, atļautās jaudas, noslodzes un jaudas rezerves indikatorus, lai pamatotu *MCDM* izvēli. Pilnai tīkla režīmu analīzei reālā ieviešanā būtu nepieciešams integrēt sadales tīkla aprēķinu modeli.

Modelis nav arī pilns digitālais dvīnis. Tas ietver datu, scenāriju, ģeotelpisko un *MCDM* aprēķinu vidi, bet neveido pilnu *EV–CPO–DSO*–lietotāja sistēmas digitālo dvīni ar reāllaika divvirzienu datu plūsmām un vadības komandām.

Visbeidzot, modelis nav pilns kiberdrošības audits. Kiberdrošības indikatori tiek izmantoti kā lēmumu ietekmējošs *MCDM* slānis, nevis kā pilns ievainojamību, penetrācijas testu vai drošības arhitektūras novērtējums.

Apkopojot, promocijas darba validācijas pieeja ir piemērota izstrādātā *MCDM* modeļa metodoloģiskai pārbaudei. Tā ļauj analizēt, vai *AHP–PROMETHEE* modelis spēj integrēt lietotāja, infrastruktūras, tīkla, uzticamības un kiberdrošības kritērijus dinamiskā uzlādes punkta piešķiršanā. Vienlaikus rezultāti jāinterpretē šīs metodoloģiskās un scenāriju validācijas robežās.

4.7. Ceturtās nodaļas secinājumi

Ceturtajā nodaļā izveidotā validācijas vide nodrošina pāreju no teorētiskā *AHP–PROMETHEE* modeļa uz aprēķināmu eksperimentālo procedūru. Gala validācijas datu kopa aptver četrus anonimizētus objektus, septiņas *EUS* alternatīvas, 25 uzlādes vietas un 11 dinamisko slodžu profilu objektus. Apstrādātā laika rindu kopa satur 113 289 mērījumu rindas ar 15 minūšu soli, kas ļauj pārbaudīt dinamisku alternatīvu filtrēšanu, *PROMETHEE* rangu un rezerves secību dažādos sezonālos un stresa scenārijos. Datu kopā tieši aprēķināmi jaudas, noslodzes, jaudas rezerves, datu pilnīguma, pieļaujamo alternatīvu un ranga stabilitātes rādītāji, savukārt sprieguma novirzes un fāžu nesimetrijas indikatori konkrētajā validācijas kopā saglabāti kā metodoloģiski paredzēti, bet pilnā apjomā neaprēķināmi rādītāji.

Ceturtajā nodaļā tika definēta validācijas datu struktūra, kas sasaista teorētisko *MCDM* modeli ar praktiski aprēķināmiem indikatoriem. Datu struktūra ietver *EV* pieprasījuma, uzlādes punktu, sadales tīkla, ģeotelpiskos, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības slāņus.

Validācijas vide tika veidota, izmantojot četrus anonimizētus *EV* uzlādes infrastruktūras objektus: *RIGA1, RIGA2, PIERIGA1* un *PIERIGA2, RIGA1* un *RIGA2* reprezentē pilsētas tipa uzlādes infrastruktūru, savukārt *PIERIGA1* un *PIERIGA2* piepilsētas objektus ar atšķirīgu transformatoru jaudu, *EUS* struktūru un uzlādes punktu konfigurāciju.

Kopumā validācijas vide ietver septiņas *EUS* alternatīvas, kas tiek izmantotas kā *MCDM* rangēšanas objekti. Katra alternatīva tiek raksturota pēc tehniskajiem parametriem, atļautās un uzstādītās jaudas, *AC/DC* struktūras, slodzes profila, pieslēguma konteksta, datu kvalitātes un scenāriju līmenī arī kiberdrošības rādītājiem.

Nodaļā tika definēta datu priekšapstrādes loģika. Tā ietver laika zīmogu pārbaudi, datu tīrīšanu, trūkstošo vērtību kontroli, mērvienību vienādošanu, 15 minūšu datu soļa sagatavošanu un 1 stundas agregāciju validācijas kopsavilkumiem.

Tika definēta *benefit* un *cost* tipa kritēriju normalizācija, kas nodrošina dažādu mērvienību indikatoru salīdzināmību *MCDM* aprēķinā. Normalizācija ļauj vienotā vērtēšanas telpā izmantot attālumu, gaidīšanas laiku, jaudu, tīkla noslodzi, datu pilnīgumu, datu vecumu, uzticamību un kiberrisku.

Tika noteikti filtrēšanas sliekšņi un robežvērtības, kas nepieciešamas pieļaujamo alternatīvu kopas izveidei. Šie sliekšņi nodrošina, ka *PROMETHEE* rangēšanā nonāk tikai tās alternatīvas, kas konkrētajā situācijā ir sasniedzamas, savietojamas, darbspējīgas, tīkla ziņā pieļaujamas, datu kvalitātes ziņā pietiekamas un drošības ziņā pieņemamas.

Nodaļā tika izveidota eksperimentālās vides arhitektūra, kas nosaka aprēķinu secību no ievaddatiem līdz *KPI*. Šī vide ietver tehniskos datus, slodžu profilus, *EV* pieprasījuma

scenārijus, ģeotelpiskos datus, *AHP* svarus, *PROMETHEE* parametrus, filtrēšanas sliekšņus, datu kvalitātes un kiberdrošības indikatorus.

Tika definēta scenāriju sistēma, kas ietver bāzes, sezonālos, pilsētas un piepilsētas, slodzes un pīķa slodzes, datu kvalitātes un kiberdrošības scenārijus, kā arī svaru jutīguma scenāriju, kurā lielāka nozīme piešķirta uzticamības, datu kvalitātes, sadales tīkla pieļaujamības un kiberdrošības kritērijiem. Šī scenāriju sistēma veido pamatu modeļa salīdzinošajai validācijai 5. nodaļā.

Tika definēti novērtēšanas rādītāji piecās grupās: lietotāja, infrastruktūras, sadales tīkla, uzticamības un kiberdrošības *KPI*. Šie rādītāji ļaus 5. nodaļā analizēt ne tikai gala izvēlēto uzlādes punktu, bet arī gaidīšanas laiku, attālumu, jaudas izmantošanu, tīkla pārkāpumu risku, ranga stabilitāti, pāradresēšanas biežumu, datu kvalitātes ietekmi un kiberdrošības penalizācijas ietekmi.

Nodaļā tika skaidri definēti validācijas ierobežojumi. Validācija ir metodoloģiska un scenāriju balstīta, nevis pilna mēroga lauka eksperiments. Pieejamajā datu kopā nav pilnu *EV SOC*, lietotāju maršrutu, rindu, sprieguma, fāžu nesimetrijas un kiberdrošības incidentu datu, tāpēc daļa kritēriju tiek analizēti scenāriju līmenī vai saglabāti kā metodoloģiski paredzēti rādītāji.

Ceturtās nodaļas rezultātā ir sagatavota pilna eksperimentālā bāze 5. nodaļai. Nākamajā nodaļā definētie dati, scenāriji, filtrēšanas nosacījumi un *KPI* tiek izmantoti, lai validētu *AHP–PROMETHEE* modeli, salīdzinātu to ar vienkāršotām piešķiršanas pieejām un novērtētu uzticamības, datu kvalitātes un kiberdrošības slāņa pienesumu dinamiskā *EV* uzlādes punkta piešķiršanā.

5. MODEĻA VALIDĀCIJA UN REZULTĀTU ANALĪZE

5.1. Validācijas pieeja un salīdzināmās piešķiršanas stratēģijas

Šajā nodaļā tiek veikta 2. un 3. nodaļā izstrādātā *AHP–PROMETHEE* balstītā dinamiskās *EV* uzlādes punkta piešķiršanas modeļa validācija. Ja 4. nodaļā tika definēta datu, scenāriju un eksperimentālās vides struktūra, tad 5. nodaļas uzdevums ir pārbaudīt, vai izstrādātais modelis praktiski spēj aprēķināt interpretējamu uzlādes punktu rangu, nodrošināt dinamisku piešķiršanas lēmumu un dot pamatotāku rezultātu nekā vienkāršotas izvēles pieejas.

Validācija tiek balstīta uz eksperimentālās validācijas vides aprēķinu rezultātiem, kuros izmantotas četras anonimizētas validācijas vietas, septiņas *EUS* alternatīvas, vienpadsmit slodžu profilu datu objekti un gala aprēķinu kopā 113 289 apstrādātas mērījumu rindas. Sākotnējā datu kvalitātes slānī bija 113 300 ieraksti, bet pēc priekšapstrādes gala validācijas aprēķinos izmantota 113 289 rindu kopa. Pilnā slodzes *KPI* datu slānī analizētais kopējais enerģijas apjoms ir 403 104,55 kWh, savukārt objektu un vietu *KPI* kopsavilkuma slānī kopējais enerģijas apjoms ir 403 129,67 kWh. Šīs vērtības netiek savstarpēji aizstātas, jo tās attiecas uz atšķirīgiem aprēķinu kopsavilkuma slāņiem. Papildus kopējam datu periodam tiek analizēti sezonālie validācijas periodi un reprezentatīvi lēmuma momenti, kas ļauj novērtēt gan perioda *KPI*, gan konkrētu *PROMETHEE* ranga aprēķinu rezultātus.

Validācijas mērķis nav pierādīt, ka viena konkrēta uzlādes stacija vienmēr ir optimāla. Dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas uzdevumā piemērotākā alternatīva ir atkarīga no konkrētā laika momenta, *EV* pieprasījuma, pieejamās jaudas, gaidīšanas laika, tīkla noslodzes, jaudas rezerves, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības riska. Tādēļ validācijas priekšmets ir nevis viena statiska izvēle, bet modeļa spēja atkārtoti un interpretējami rangēt alternatīvas mainīgos apstākļos.

Validācijā tiek pārbaudīti trīs galvenie aspekti. Pirmkārt, tiek pārbaudīts, vai *AHP–PROMETHEE* modelis spēj aprēķināt pilnu un interpretējamu uzlādes punktu rangu, kur katrai alternatīvai ir noteikta pozitīvā plūsma, negatīvā plūsma, *neto* plūsma un vieta rangā. Otrkārt, tiek analizēts, vai izvēlētā alternatīva un rezerves alternatīvu secība mainās atkarībā no sezonas, tīkla noslodzes, datu kvalitātes un kiberdrošības scenārijiem. Treškārt, tiek salīdzināts, vai pilnais uz uzticamību orientētais modelis dod pamatotāku rezultātu nekā vienkāršotas izvēles stratēģijas, kas balstās tikai uz vienu vai ierobežotu kritēriju kopu.

Promocijas darba kontekstā pilnais modelis tiek interpretēts kā uz uzticamību orientēta *AHP–PROMETHEE* pieeja. *AHP* tiek izmantota kritēriju svaru noteikšanai, savukārt *PROMETHEE* alternatīvu pāru salīdzināšanai un gala ranga aprēķināšanai [27], [29]. Šāda pieeja ir piemērota situācijām, kur lēmumu nevar reducēt uz vienu optimizācijas kritēriju, jo uzlādes punkta piemērotību vienlaikus ietekmē lietotāja ērtība, infrastruktūras pieejamība, sadales tīkla stāvoklis, datu kvalitāte un kiberdrošības risks. Dinamiskās atjaunināšanas aspekts papildus sasaistāms ar laikatkarīgu prioritāšu un slīdošā horizonta lēmumu pieņemšanas pieejām [23], [31].

Pilnā modeļa validācijā izmantotā kritēriju sistēma ietver deviņus kritērijus:

- uzticamību;
- jaudas rezervi;
- kiberrisku;
- datu kvalitāti;
- tīkla noslodzi;
- pieejamo uzlādes jaudu;
- attālumu;
- gaidīšanas laiku;

- cenu.

Šie kritēriji nav vienādi pēc virziena. Uzticamība, jaudas rezerve, datu kvalitāte un pieejamā uzlādes jauda ir maksimizējami kritēriji, savukārt kiberrisks, tīkla noslodze, attālums, gaidīšanas laiks un cena ir minimizējami kritēriji. Pilnā modeļa izvēli laikā t aprēķina pēc formulas 2.6.

Lai nodrošinātu ne tikai vienas alternatīvas izvēli, bet arī rezerves alternatīvu secību, tiek veidots pilns *PROMETHEE* rangs atbilstoši vienādojumam 2.40. Pirmās un otrās alternatīvas neto plūsmas starpība tiek izmantota kā lēmuma stabilitātes indikators atbilstoši vienādojumam 2.44.

Ja $\Delta\phi_{12}(t)$ ir liela, pirmā alternatīva ir pārliecinoši pārāka par otro. Ja šī starpība ir maza, tad nelielas izmaiņas kritēriju vērtībās, svaros, tīkla noslodzē vai kiberriska indikatorā var mainīt gala izvēli.

Lai novērtētu pilnā modeļa pienesumu, tas tiek salīdzināts ar vairākām vienkāršotām piešķiršanas stratēģijām. Šīs stratēģijas atspoguļo praksē bieži sastopamas izvēles loģikas: izvēlēties tuvāko uzlādes punktu, izvēlēties punktu ar īsāko gaidīšanas laiku, izvēlēties lielāko pieejamo jaudu vai ignorēt noteiktu kritēriju grupu, piemēram, sadales tīkla vai kiberdrošības faktorus.

5.1.tabula

Salīdzināmās uzlādes punkta piešķiršanas stratēģijas

Pieeja	Izvēles loģika	Matemātiska interpretācija	Ierobežojums
Tuvākā stacija	Izvēlas alternatīvu ar mazāko attālumu līdz *EV*	$a_t^d = \arg\min_{a \in A_t^{adm}} d(a,t)$	Ignorē jaudu, gaidīšanu, tīkla stāvokli, datu kvalitāti un kiberrisku
Īsākais gaidīšanas laiks	Izvēlas alternatīvu ar mazāko gaidīšanas laiku	$a_t^W = \arg\min_{a \in A_t^{adm}} W(a,t)$	Var izvēlēties tehniski vai tīkla ziņā mazāk piemērotu alternatīvu
Lielākā pieejamā jauda	Izvēlas alternatīvu ar lielāko pieejamo uzlādes jaudu	$a_t^P = \arg\max_{a \in A_t^{adm}} P_{ch}^{avail}(a,$	Ignorē, vai lielāka jauda ir nepieciešama, sasniedzama vai tīkla ziņā pieļaujama
Pieeja bez tīkla kritērijiem	*PROMETHEE* rangs bez tīkla noslodzes un jaudas rezerves kritērijiem	$\phi_{noG}(a,t)$, kur tīkla kritēriju svari ir 0 un pārējie svari normalizēti	Neņem vērā lokālo sadales tīkla ietekmi
Pieeja bez kiberdrošības kritērija	*PROMETHEE* rangs bez kiberriska kritērija un drošības penalizācijas	$\phi_{noSEC}(a,t)$, kur kiberriska kritērija svars ir 0	Neņem vērā kiberdrošības un datu integritātes risku
Pilnais uz uzticamību orientētais *AHP–PROMETHEE* modelis	Izmanto visus lietotāja, infrastruktūras, tīkla, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības kritērijus	$a_t^* = \arg\max_{a \in A_t^{adm}} \phi(a,t)$	Sarežģītāks, bet interpretējams daudzkritēriju modelis

Tuvākās stacijas stratēģija tiek izmantota kā vienkāršākais lietotāja ērtības etalons. Tā pieņem, ka labākā alternatīva ir tā, kura atrodas vistuvāk *EV* sākuma punktam. Šī pieeja ir intuitīva, bet tā neņem vērā uzlādes punkta tehnisko stāvokli, pieejamo jaudu, gaidīšanas laiku, tīkla noslodzi, datu kvalitāti un drošības risku. Līdz ar to tuvākā stacija var būt ģeogrāfiski izdevīga, bet vienlaikus nepiemērota no uzticamības orientācijas skatpunkta.

Īsākā gaidīšanas laika stratēģija pieņem, ka lietotājam svarīgākais ir pēc iespējas ātrāk sākt uzlādi. Šajā gadījumā izvēle tiek veikta pēc minimālā $W(a,t)$. Tomēr šāda pieeja var radīt situāciju, kur tiek izvēlēta alternatīva ar zemāku pieejamo jaudu, sliktāku datu kvalitāti, lielāku kiberrisku vai mazāku tīkla jaudas rezervi.

Lielākās pieejamās jaudas stratēģija izvēlas alternatīvu ar lielāko pieejamo uzlādes jaudu $P_{ch}^{avail}(a,t)$. Tā ir tehniski pievilcīga gadījumos, kad lietotājs vēlas samazināt uzlādes ilgumu, tomēr lielāka uzlādes jauda pati par sevi negarantē labāku lēmumu. Jaudas kritērijs jāinterpretē kopā ar *EV* pieņemamo uzlādes jaudu, nepieciešamo enerģiju, tīkla noslodzi un jaudas rezervi.

Pieeja bez tīkla kritērijiem tiek izmantota, lai pārbaudītu sadales tīkla kritēriju pienesumu. Šajā pieejā no *PROMETHEE* aprēķina tiek izslēgti vai ar nulles svaru aizstāti tīkla noslodzes un jaudas rezerves kritēriji. Pēc tam iegūtā izvēle tiek novērtēta ar tiem pašiem tīkla *KPI*, kas tiek izmantoti pilnajam modelim: tīkla ierobežojumu pārkāpumu īpatsvaru, slodzes novirzi, jaudas rezervi un kritisko mezglu aktivizāciju.

Pieeja bez kiberdrošības kritērija tiek izmantota kiberdrošības slāņa ietekmes pārbaudei. Šajā pieejā kiberriska kritērijs $\rho_{cyb}(a,t)$ netiek izmantots *PROMETHEE* rangēšanā, un netiek piemērota drošības penalizācija. Rezultātā iespējams pārbaudīt, vai modelis bez kiberdrošības slāņa izvēlētos alternatīvas, kurām ir paaugstināts autentifikācijas, komunikācijas, datu integritātes vai pakalpojuma pieejamības risks. Šī salīdzināšana ir būtiska, jo promocijas darba hipotēze paredz, ka uzticamības orientēta pieeja ietver ne tikai fizisko infrastruktūras pieejamību, bet arī kiberfizisko drošumu [12], [13], [24], [25].

Pilnais uz uzticamību orientētais *AHP–PROMETHEE* modelis apvieno visas kritēriju grupas vienā prioritizācijas procesā. Tas nozīmē, ka alternatīva netiek izvēlēta tikai tāpēc, ka tā ir tuvākā, ātrākā, jaudīgākā vai lētākā. Tā tiek izvēlēta tāpēc, ka konkrētajā laika momentā tai ir labākais kompromiss starp lietotāja vajadzībām, *EUS* tehnisko piemērotību, sadales tīkla pieļaujamību, datu kvalitāti, uzticamību un kiberdrošības risku.

Validācijas salīdzināšana tiek veikta pēc vienotas loģikas. Katram scenārijam un laika momentam tiek noteikta sākotnējā kandidātu kopa A_t^0, piemēroti filtrēšanas nosacījumi, aprēķināta pieļaujamo alternatīvu kopa A_t^{adm}, izveidota kritēriju matrica C_t, aprēķināts *PROMETHEE* rangs R_t un noteikta izvēlētā alternatīva a_t^*. Vienkāršotajām pieejām tiek piemērota to attiecīgā izvēles loģika, bet rezultāti tiek novērtēti ar tām pašām *KPI* grupām, kas izmantotas pilnajam modelim.

5.2.tabula

Validācijas jautājumi un izmantojamie rādītāji

Validācijas jautājums	Pārbaudes objekts	Izmantojamie rādītāji
Vai modelis aprēķina interpretējamu rangu?	*PROMETHEE* pozitīvā, negatīvā un *neto* plūsma	$\phi^+(a,t), \phi^-(a,t), \phi(a,t)$ rangs R_t
Vai izvēle mainās dinamiskos apstākļos?	Laika rindas un sezonālie scenāriji	Izvēlētā alternatīva, atkārtotas piešķiršanas biežums, ranga stabilitāte
Vai modelis saglabā piešķiršanas spēju?	Pieļaujamo alternatīvu kopa	Veiksmīgas piešķiršanas īpatsvars, vidējais pieļaujamo *EUS* skaits
Vai pilnais modelis pārspēj vienkāršotas pieejas?	Salīdzinājums ar vienkāršotajām stratēģijām	Lietotāja, infrastruktūras, tīkla, uzticamības un drošības *KPI*
Vai tīkla kritērijiem ir ietekme?	Pieeja ar tīkla kritērijiem pret pieeju bez tīkla kritērijiem	Tīkla ierobežojumu pārkāpumu īpatsvars, jaudas rezerve, slodzes novirze
Vai kiberdrošības kritērijiem ir ietekme?	Pieeja ar kiberdrošības kritēriju pret pieeju bez kiberdrošības kritērija	Kiberriska penalizācijas ietekme, kiberriska izraisītas ranga izmaiņas
Vai svaru izmaiņas maina izvēli?	Bāzes svari pret uz uzticamību orientētu svaru konfigurāciju	Izvēles maiņas, *neto* plūsmas izmaiņas, ranga stabilitāte

Validācijas rezultāti tiek interpretēti četros līmeņos. Pirmajā līmenī tiek analizēta pamata *AHP–PROMETHEE* darbība: kritēriju svari, alternatīvu plūsmas un gala rangs. Otrajā līmenī tiek analizēta dinamiskā piešķiršana laikā: cik bieži mainās izvēle, cik bieži nepieciešama atkārtota piešķiršana un cik stabils ir rangs. Trešajā līmenī tiek veikta salīdzinošā analīze ar vienkāršotajām stratēģijām. Ceturtajā līmenī tiek analizēta uzticamības orientācijas

pievienotā vērtība: tīkla risku samazinājums, datu kvalitātes ietekme, kiberriska penalizācija un rezerves alternatīvu nozīme.

Tādējādi šī sadaļa nosaka 5. nodaļas validācijas metodoloģisko pamatu. Turpmākajās sadaļās vispirms tiek analizēti *AHP* svaru un *PROMETHEE* ranga rezultāti, pēc tam tiek vērtēti bāzes un sezonālie scenāriji, salīdzinātas vienkāršotās piešķiršanas stratēģijas un izvērtēta uzticamības, tīkla un kiberdrošības kritēriju ietekme uz gala lēmumu.

5.2. *AHP* svaru un *PROMETHEE* ranga aprēķina rezultāti

Šajā sadaļā tiek analizēti *AHP* svaru un *PROMETHEE* ranga aprēķina rezultāti. Sadaļas mērķis ir parādīt, kā 3. nodaļā definētā *AHP–PROMETHEE* metodoloģija praktiski tiek izmantota uzlādes punktu alternatīvu prioritizācijai. Atšķirībā no vienkāršotām piešķiršanas pieejām, kur lēmums tiek balstīts uz vienu kritēriju, piemēram, attālumu, gaidīšanas laiku vai pieejamo jaudu, izstrādātajā modelī gala izvēle tiek iegūta, integrējot vairākas savstarpēji konfliktējošas kritēriju grupas.

Validācijas vidē tiek izmantotas septiņas *EUS* alternatīvas:

$$A = \begin{Bmatrix} RIGA1_{EUS1}, RIGA1_{EUS2}, RIGA1_{EUS3}, \\ RIGA2_{EUS1}, RIGA2_{EUS2}, \\ PIERIGA1_{EUS1}, PIERIGA2_{EUS1}. \end{Bmatrix}, \quad (5.1)$$

AHP svaru rezultāti šajā sadaļā tiek izmantoti kā kritēriju relatīvās nozīmības struktūra, savukārt *PROMETHEE* aprēķins parāda, kā šie svari kopā ar aktuālajām kritēriju vērtībām tiek pārvērsti alternatīvu rangā. Lai novērtētu ne tikai viena lēmuma momenta rezultātu, bet arī sezonālu ranga stabilitāti, *PROMETHEE* aprēķini veikti trīs reprezentatīvos sezonālajos lēmuma momentos: vasarā, rudenī un ziemā.

5.3.tabula

Sezonālie lēmumi scenāriji *PROMETHEE* ranga aprēķinam

Scenārijs	Lēmumi laiks	Kandidātu skaits	Pieļaujamo alternatīvu skaits
Vasara — Augusts	15.08.2025 10:00	7	7
Rudens — Oktobris	15.10.2025 16:00	7	7
Ziema — decembris	15.12.2025 13:00	7	7

Šāda pieeja ļauj pārbaudīt, vai izstrādātais *AHP–PROMETHEE* modelis spēj ģenerēt interpretējamu alternatīvu rangu dažādos ekspluatācijas apstākļos un vai pirmā izvēle saglabājas stabila, mainoties sezonālajiem slodzes, tīkla noslodzes un *EUS* pieejamības parametriem.

5.2.1. Bāzes *AHP* kritēriju svari

Bāzes scenārijā izmantotā kritēriju sistēma ietver deviņus kritērijus: uzticamību, jaudas rezervi, kiberrisku, datu kvalitāti, tīkla noslodzi, pieejamo uzlādes jaudu, attālumu, gaidīšanas laiku un cenu. Šie kritēriji aptver gan lietotāja vajadzības, gan uzlādes infrastruktūras, sadales tīkla, datu kvalitātes un kiberdrošības aspektus.

5.4.tabula

Bāzes *AHP* kritēriju svari dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas modelī

Kritērijs	Apzīmējums	Kritērija tips	Bāzes svars
Uzticamība	R_{rel}	Maksimizējams	0,19466
Jaudas rezerve	P_{res}	Maksimizējams	0,17775
Kiberrisks	ρ_{cyb}	Minimizējams	0,15564
Datu kvalitāte	D_{qual}	Maksimizējams	0,10629
Tīkla noslodze	k_{load}	Minimizējams	0,10276

Pieejamā uzlādes jauda	P_{ch}^{avail}	Maksimizējams	0,09784
Attālums līdz uzlādes punktam	d	Minimizējams	0,06461
Gaidīšanas laiks	W	Minimizējams	0,05511
Cena	p	Minimizējams	0,04534
Kopā			**1**

Avots: autora aprēķini, balstoties uz eksperimentālās validācijas vides bāzes AHP svaru konfigurāciju.

No tabulas redzams, ka lielākais svars bāzes modelī ir piešķirts uzticamībai (0,19466), jaudas rezervei (0,17775) un kiberriskam (0,15564). Kopā šie trīs kritēriji veido:

$$w_{R+P+\rho} = 0{,}19466 + 0{,}17775 + 0{,}15564 = 0{,}52805$$

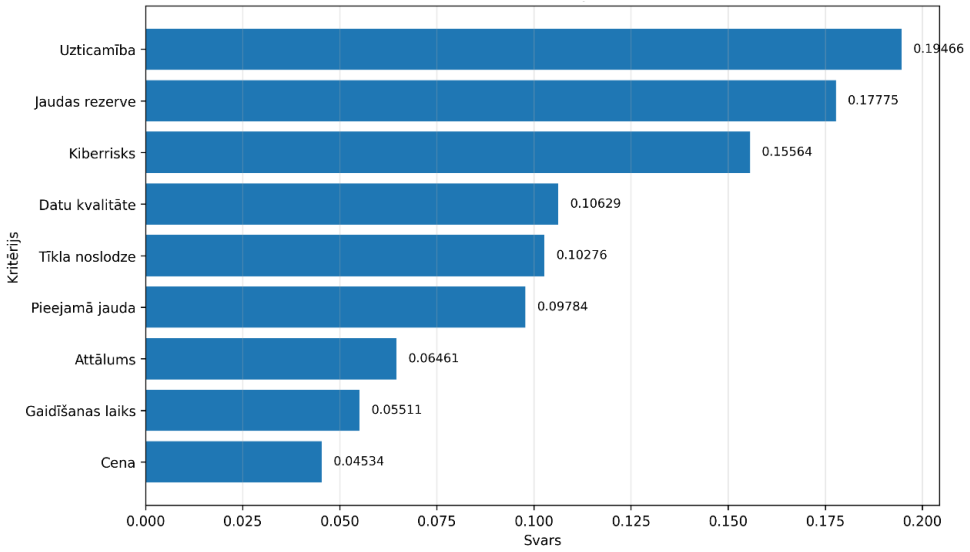
Tas nozīmē, ka 52,805 % no kopējās kritēriju nozīmības ir saistīti ar uzticamību, tīkla jaudas rezervi un kiberdrošības risku. Ja šai grupai pieskaita arī datu kvalitāti (0,10629) un tīkla noslodzi (0,10276), tad uz uzticamību orientētais kritēriju bloks veido:

$$w_{REL} = 0{,}19466 + 0{,}17775 + 0{,}15564 + 0{,}10629 + 0{,}10276 = 0{,}73710$$

Tādējādi 73,710 % no kopējā svara bāzes scenārijā ir saistīti ar uzticamību, tīkla pieļaujamību, datu kvalitāti un kiberdrošību. Savukārt lietotāja komforta kritēriji šaurā nozīmē — attālums, gaidīšanas laiks un cena — kopā veido:

$$w_{user} = 0{,}06461 + 0{,}05511 + 0{,}04534 = 0{,}16506$$

Tas nozīmē, ka attālums, gaidīšanas laiks un cena kopā veido 16,506 % no kopējā svara. Šis rezultāts ir būtisks promocijas darba kontekstā, jo parāda, ka izstrādātais modelis nav lietotāja komforta modelis šaurā nozīmē. Tā pamatā ir uz uzticamību orientēta pieeja, kur lēmumu būtiski ietekmē infrastruktūras darbspēja, jaudas rezerve, datu kvalitāte, tīkla noslodze un kiberdrošības risks.



5.1.att. Bāzes *AHP* kritēriju svaru sadalījums dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas modelī

Avots: autora veidots, balstoties uz bāzes AHP svaru konfigurāciju.

5.2.2. Uz uzticamību orientētie koriģētie svari

Papildus bāzes svaru konfigurācijai validācijas vidē tika izmantota arī uz uzticamību orientēta svaru jutīguma konfigurācija, kas prototipa izstrādes laikā tika apzīmēta kā *NIMBUS* konfigurācija. Šī konfigurācija netiek interpretēta kā jaunas *MCDM* metodes ieviešana, bet kā svaru jutīguma pārbaude. Tās mērķis ir analizēt, vai alternatīvu rangs mainās, ja tiek pastiprināti uzticamības, kiberdrošības, datu kvalitātes un jaudas rezerves kritēriji.

Šajā konfigurācijā tiek palielināta uzticamības, kiberriska, jaudas rezerves un datu kvalitātes ietekme, vienlaikus samazinot attāluma, gaidīšanas laika, cenas un pieejamās uzlādes jaudas relatīvo nozīmi. Tas ļauj pārbaudīt, kā modelis reaģē situācijā, kur lēmuma pieņēmējs dod priekšroku sistēmas drošumam, nevis tikai lietotāja īstermiņa ērtībai.

Koriģētie svari tiek iegūti, sākotnējo svaru reizinot ar scenārija reizinātāju un pēc tam normalizējot atbilstoši iepriekš definētajai formulai 3.5.

5.5.tabula

Bāzes un uz uzticamību orientēto koriģēto kritēriju svaru salīdzinājums

Kritērijs	Virziens	Bāzes svars	Uz uzticamību orientētais svars	Izmaiņa	Izmaiņa, %
Uzticamība	Maksimizējams	0,19466	0,21755	0,02289	11,76%
Jaudas rezerve	Maksimizējams	0,17775	0,18277	0,00501	2,82%
Kiberrisks	Minimizējams	0,15564	0,17395	0,01831	11,76%
Datu kvalitāte	Maksimizējams	0,10629	0,10929	0,003	2,82%
Tīkla noslodze	Minimizējams	0,10276	0,10107	-0,0017	-1,65%
Pieejamā uzlādes jauda	Maksimizējams	0,09784	0,08748	-0,01036	-10,59%
Attālums	Minimizējams	0,06461	0,0491	-0,01551	-24,00%
Gaidīšanas laiks	Minimizējams	0,05511	0,04435	-0,01076	-19,53%
Cena	Minimizējams	0,04534	0,03446	-0,01088	-24,00%

Uz uzticamību orientētajā konfigurācijā lielākais svars saglabājas uzticamībai (0,21755), jaudas rezervei (0,18277) un kiberriskam (0,17395). Salīdzinājumā ar bāzes konfigurāciju uzticamības svars palielinās par 11,76 %, kiberriska svars par 11,76 %, bet jaudas rezerves un datu kvalitātes svari palielinās par 2,82 %. Vienlaikus samazinās pieejamās uzlādes jaudas, attāluma, gaidīšanas laika un cenas relatīvā nozīme.

Uzticamības, jaudas rezerves, kiberriska, datu kvalitātes un tīkla noslodzes kritēriju bloks bāzes konfigurācijā kopā veido:

$$w_{REL,base} = 0{,}19466 + 0{,}17775 + 0{,}15564 + 0{,}10629 + 0{,}10276 = 0{,}73710$$

Tātad bāzes konfigurācijā ar uzticamību, tīkla pieļaujamību, datu kvalitāti un kiberdrošību saistītais kritēriju bloks veido 73,710 % no kopējā svara.

Uz uzticamību orientētajā konfigurācijā tas pats kritēriju bloks kopā veido:

$$w_{REL}^{(s)} = 0{,}21755 + 0{,}18277 + 0{,}17395 + 0{,}10929 + 0{,}10107 = 0{,}78463$$

Tātad uz uzticamību orientētajā konfigurācijā šis kritēriju bloks veido 78,463 % no kopējā svara. Salīdzinājumā ar bāzes scenārija 73,710 % tas nozīmē, ka uzticamības, jaudas rezerves, datu kvalitātes un kiberdrošības dimensija tiek pastiprināta par 4,753 procentpunktiem.

Savukārt lietotāja komforta un izmaksu kritēriji, attālums, gaidīšanas laiks un cena, bāzes konfigurācijā kopā veido:

$$w_{user,base} = 0{,}06461 + 0{,}05511 + 0{,}04534 = 0{,}16506$$

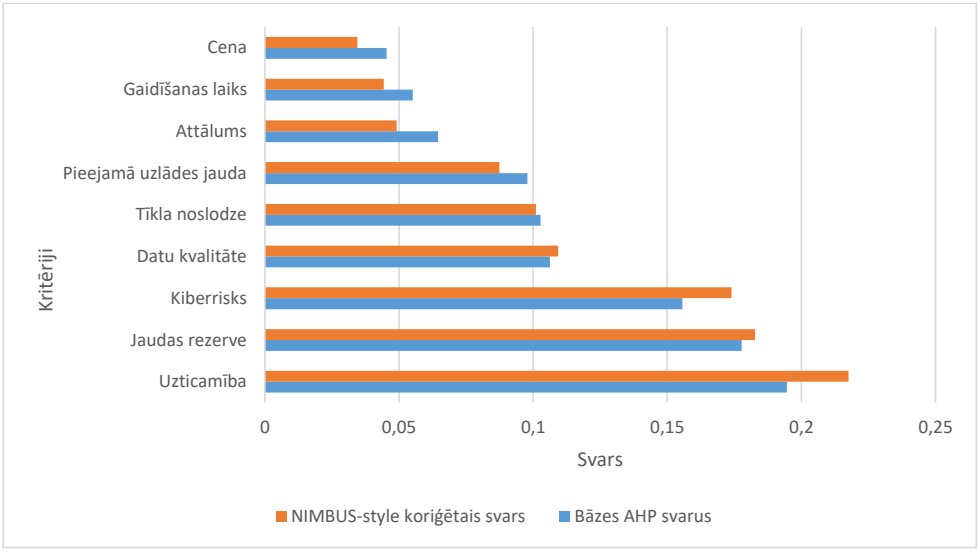
Tātad bāzes konfigurācijā attāluma, gaidīšanas laika un cenas kopējais svars ir 16,506 %.

Uz uzticamību orientētajā konfigurācijā šo kritēriju kopējais svars ir:

$$w_{user}^{(s)} = 0{,}04910 + 0{,}04435 + 0{,}03446 = 0{,}12791$$

Tātad lietotāja komforta un izmaksu kritēriju kopējais svars samazinās līdz 12,791 %. Salīdzinājumā ar bāzes konfigurāciju tas ir samazinājums par 3,715 procentpunktiem.

Šāda svaru pārdale nozīmē, ka uz uzticamību orientētā konfigurācija nepārvērš modeli par vienkritērija drošības vai uzticamības modeli, bet pārbīda prioritāšu līdzsvaru par labu sistēmas darbspējai, datu ticamībai, jaudas rezervei un kiberdrošības riska kontrolei. Tajā pašā laikā attālums, gaidīšanas laiks un cena saglabājas modelī, taču tiem ir mazāka relatīvā ietekme uz gala *PROMETHEE* rangu.



5.2.att. Bāzes un uz uzticamību orientēto koriģēto kritēriju svaru salīdzinājums

Avots: autora veidots, balstoties uz bāzes un koriģēto svaru konfigurāciju.

5.2.3. Sezonālo validācijas periodu un lēmuma momentu pamatojums

Lai pārbaudītu *AHP–PROMETHEE* modeļa darbību dažādos ekspluatācijas apstākļos, validācijā tika izmantoti trīs sezonāli periodi un katram periodam izvēlēts viens reprezentatīvs lēmuma moments. Šāda pieeja ļauj apvienot divus analīzes līmeņus: dinamiskā perioda analīzi un konkrēta lēmuma momenta detalizētu interpretāciju.

Dinamiskā perioda analīze parāda, kā labākās alternatīvas *PROMETHEE neto* plūsma ϕ mainās laikā, savukārt lēmuma momenta aprēķins ļauj detalizēti analizēt konkrētā brīža alternatīvu rangu, pirmās trīs alternatīvas, neto plūsmas starpību un kritēriju profilus. Tādējādi lēmuma momenta aprēķins netiek izmantots kā izolēts rezultāts, bet kā reprezentatīvs punkts plašākā dinamiskajā laika intervālā.

Šajā darbā katram sezonālajam periodam tika analizēts 72 stundu logs ar 15 minūšu soli, kas veido 288 laika soļus vienā periodā. Šāds solis ir pietiekami detalizēts, lai novērtētu slodzes un prioritāšu dinamiku, vienlaikus saglabājot rezultātu pārskatāmību.

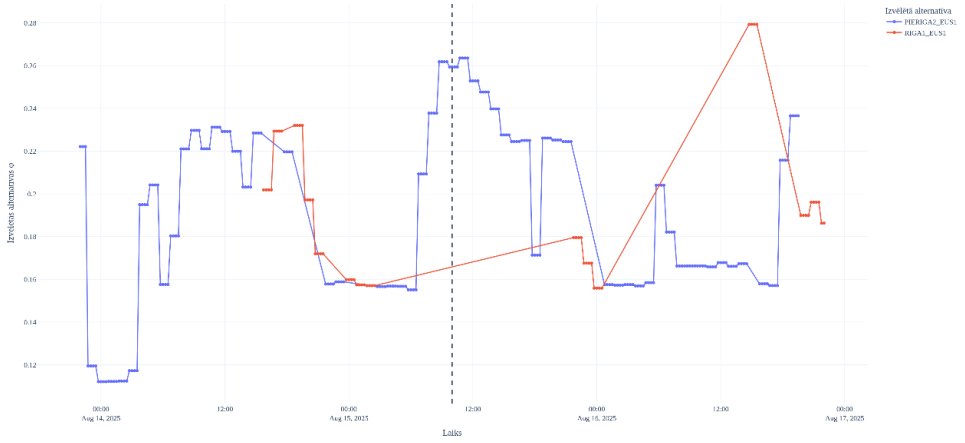
Katrā sezonā tika izvēlēts viens lēmuma moments t_s, kurā tiek veikts detalizēts *PROMETHEE II* ranga un pirmo trīs alternatīvu kritēriju profila aprēķins. Lēmuma momenta izvēle ir nepieciešama, lai ne tikai parādītu, kura alternatīva iegūst pirmo vietu, bet arī izskaidrotu, kāpēc tā iegūst augstāko rangu. Šim nolūkam tiek izmantotas pirmo trīs alternatīvu neto plūsmas diagrammas un radar diagrammas, kurās salīdzināti galvenie kritēriji: uzticamība, datu kvalitāte, jaudas rezerve, zems kiberrisks, zema tīkla noslodze un *PROMETHEE neto* plūsma.

5.6.tabula

Sezonālie validācijas periodi un lēmuma momenti

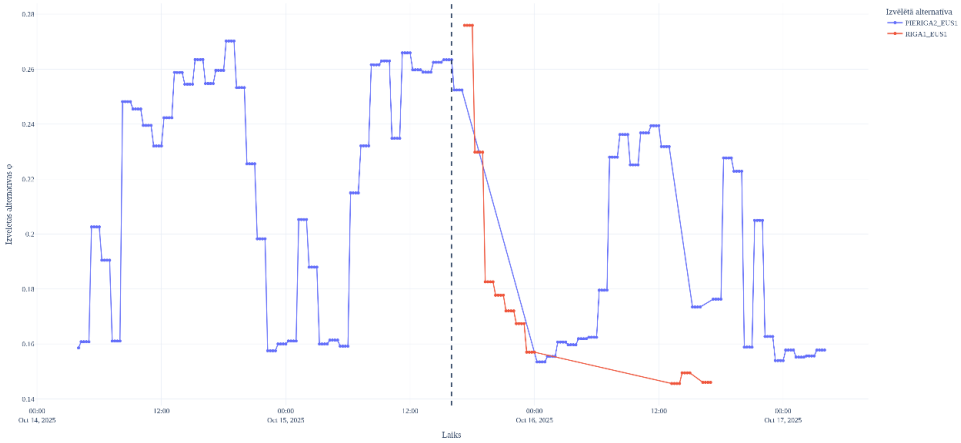
Sezona	Dinamiskais periods	Aprēķina solis	Laika soļu skaits	Lēmuma moments	Lēmuma momenta interpretācija
Vasara	15.08.2025 00:00–18.08.2025 00:00	15 min	288	15.08.2025 10:00	Scenārijs ar mazāko pirmās un otrās alternatīvas starpību, īpaši uz uzticamību orientētajā konfigurācijā
Rudens	15.10.2025 00:00–18.10.2025 00:00	15 min	288	15.10.2025 16:00	Scenārijs ar izteiktāko pirmās alternatīvas pārsvaru pār otro alternatīvu
Ziema	15.12.2025 00:00–18.12.2025 00:00	15 min	288	15.12.2025 13:00	Ziemas režīms ar lielāku enerģijas pieprasījuma un tīkla noslodzes nozīmi

Dinamiskās neto plūsmas grafiki parāda, ka bāzes un uz uzticamību orientētās konfigurācijas laika profili ir salīdzināmi, tomēr uz uzticamību orientētajā konfigurācijā pirmās alternatīvas neto plūsma parasti ir nedaudz augstāka. Tas nozīmē, ka uzticamības, kiberdrošības, datu kvalitātes un jaudas rezerves kritēriju pastiprināšana neizraisa haotisku ranga maiņu, bet nostiprina alternatīvas ar labāku uz uzticamību orientētu profilu.



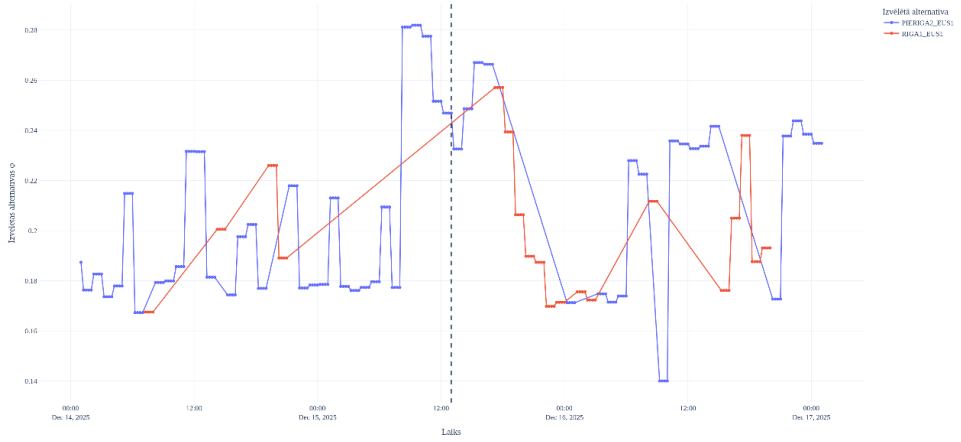
5.3.att. Labākās alternatīvas *PROMETHEE neto* plūsma ϕ laikā vasaras periodā ar lēmuma momentu

Avots: autora veidots, balstoties uz eksperimentālās validācijas vides aprēķinu rezultātiem.



5.4.att. Labākās alternatīvas *PROMETHEE neto* plūsma ϕ laikā rudens periodā ar lēmuma momentu

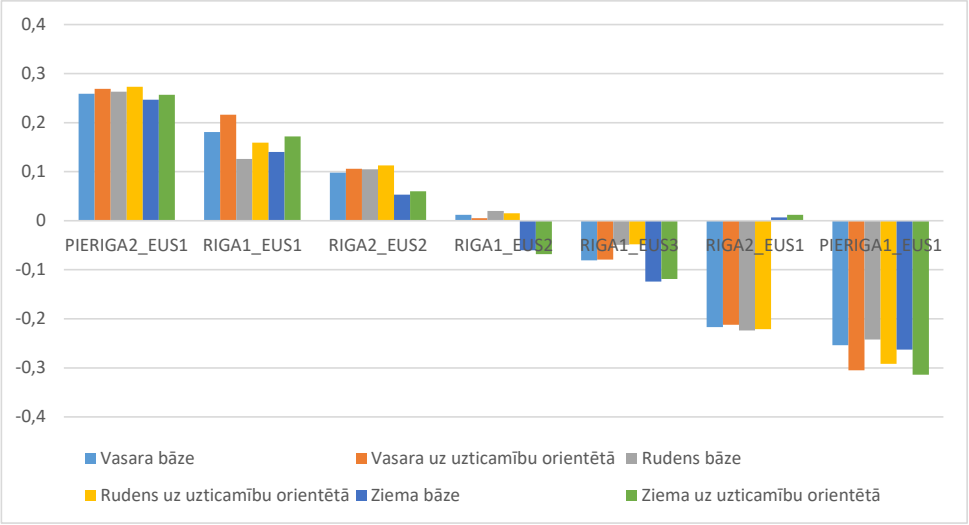
Avots: autora veidots, balstoties uz eksperimentālās validācijas vides aprēķinu rezultātiem.



5.5.att. Labākās alternatīvas *PROMETHEE neto* plūsma ϕ laikā ziemas periodā ar lēmuma momentu

Avots: autora veidots, balstoties uz eksperimentālās validācijas vides aprēķinu rezultātiem.

Sezonālo lēmuma momentu *PROMETHEE II* rezultāti parāda, ka $PIERIGA2_{EUS1}$ iegūst pirmo vietu visās trīs sezonās gan bāzes, gan uz uzticamību orientētajā konfigurācijā. Otrajā vietā visos analizētajos gadījumos ir $RIGA1_{EUS1}$. Tas nozīmē, ka svaru korekcija nemaina galveno rekomendāciju, bet ietekmē neto plūsmas starpību starp pirmo un otro alternatīvu. Uz uzticamību orientētajā konfigurācijā šī starpība samazinās, jo $RIGA1_{EUS1}$ relatīvā konkurētspēja pieaug.

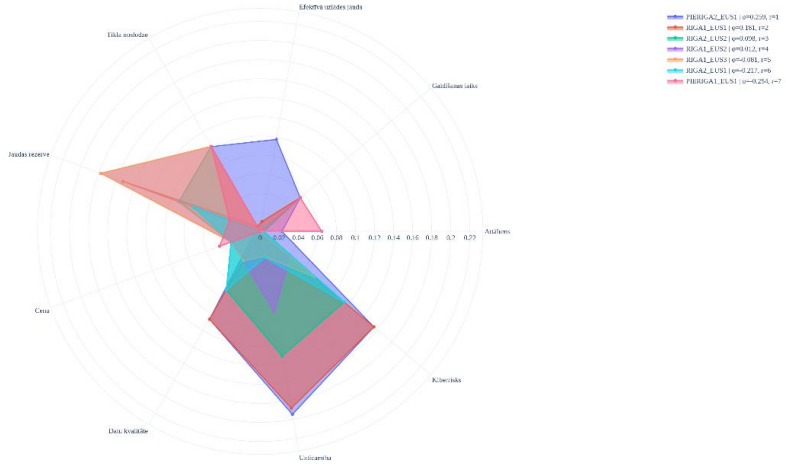


5.6.att. *PROMETHEE II* neto plūsmas lēmuma momentā gan bāzes konfigurācija, gan uz uzticamību orientētā konfigurācija

Avots: autora veidots, balstoties uz PROMETHEE II lēmuma momenta aprēķiniem.

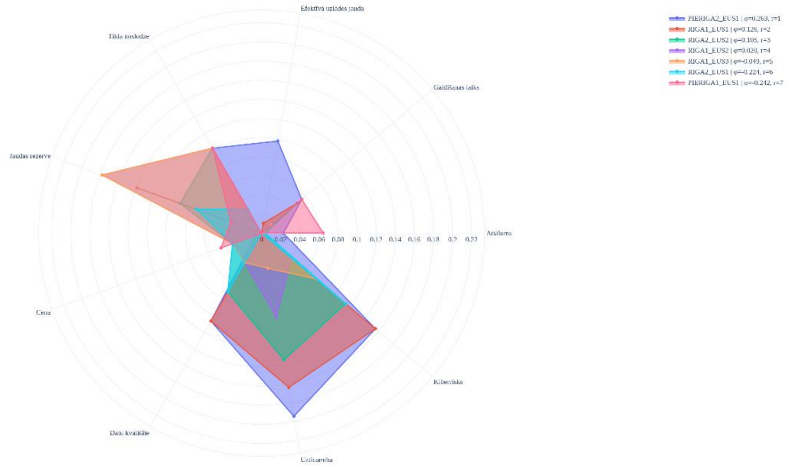
Lai skaidrotu pirmo trīs alternatīvu rezultātu, tiek izmantotas radar diagrammas. Tās parāda, ka $PIERIGA2_{EUS1}$ iegūst pirmo vietu nevis viena dominējoša kritērija dēļ, bet kopējā svērtā kritēriju profila rezultātā. Šai alternatīvai ir labvēlīgs uzticamības un kiberdrošības profils, kā arī pietiekami konkurētspējīgs kopējais vērtējums pret citām *EUS* alternatīvām.

$RIGA1_{EUS1}$ saglabā nozīmīgu lomu kā galvenā rezerves alternatīva, jo tai ir augsta pieejamā uzlādes jauda un stabils tehniskais profils, tomēr gala *PROMETHEE* vērtējumā tā netiek novērtēta augstāk par $PIERIGA2_{EUS1}$. $RIGA2_{EUS2}$ vairākos scenārijos saglabā trešo vietu, bet tās kopējais profils nav pietiekams, lai apsteigtu pirmās divas alternatīvas.



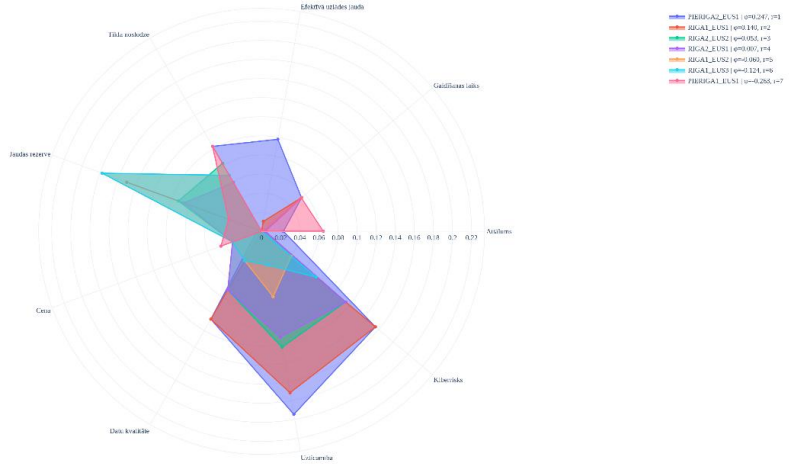
5.7.att. Vasaras lēmuma momenta *EUS* alternatīvu svērtais *MCDM* profils bāzes konfigurācijā

Avots: autora veidots, balstoties uz normalizētajiem kritērijiem un PROMETHEE II aprēķinu rezultātiem



5.8.att. Rudens lēmuma momenta *EUS* alternatīvu svērtais *MCDM* profils bāzes konfigurācijā

Avots: autora veidots, balstoties uz normalizētajiem kritērijiem un PROMETHEE II aprēķinu rezultātiem



5.9.att. Ziemas lēmuma momenta *EUS* alternatīvu svērtais *MCDM* profils bāzes konfigurācijā

Avots: autora veidots, balstoties uz normalizētajiem kritērijiem un PROMETHEE II aprēķinu rezultātiem

Lēmuma momentu aprēķinu nozīme ir tā, ka tie ļauj pāriet no jautājuma "kura alternatīva uzvar?" uz jautājumu "kāpēc šī alternatīva uzvar?". Šajā darbā $PIERIGA2_{EUS1}$ saglabā pirmo vietu, jo tās kopējais kritēriju profils ir līdzsvarotāks nekā pārējām alternatīvām. Vienlaikus radar diagrammas parāda, ka rezerves alternatīvas nav nejaušas: $RIGA1_{EUS1}$ saglabā būtisku nozīmi kā otrā izvēle, bet $RIGA2_{EUS2}$ saglabā konkurētspēju vairākos sezonālajos lēmuma momentos.

Tādējādi sezonālo periodu un lēmuma momentu izmantošana nostiprina modeļa interpretējamību. Dinamiskais periods parāda ranga uzvedību laikā, lēmuma momenta aprēķins parāda konkrētā brīža prioritizāciju, bet radar diagrammas ļauj izskaidrot alternatīvu priekšrocības un trūkumus pēc kritēriju profila. Šāda pieeja ir būtiska lēmuma atbalsta sistēma kontekstā, jo lēmumu atbalsta sistēmai jāspēj ne tikai aprēķināt rekomendāciju, bet arī pamatot, kāpēc konkrētā alternatīva ir prioritāra.

5.2.4. *PROMETHEE* ranga aprēķina rezultāti sezonālajos lēmuma scenārijos

Pēc AHP svaru noteikšanas pieļaujamās alternatīvas tiek rangētas ar *PROMETHEE II* metodi. Katram lēmuma momentam t tiek aprēķināta pozitīvā plūsma $\phi^{+}(a,t)$, negatīvā plūsma $\phi^{-}(a,t)$, un *neto* plūsma $\phi(a,t)$ pēc formulas 2.39.

Pozitīvā plūsma parāda, cik lielā mērā alternatīva dominē pār citām alternatīvām. Negatīvā plūsma parāda, cik lielā mērā citas alternatīvas dominē pār konkrēto alternatīvu. *Neto* plūsma ir gala prioritātes rādītājs, jo lielāka ir $\phi(a,t)$, jo augstāka ir alternatīvas prioritāte.

PROMETHEE aprēķini veikti trīs sezonālajos lēmuma momentos: vasaras scenārijā 2025-08-15 10:00, rudens scenārijā 2025-10-15 16:00 un ziemas scenārijā 2025-12-15 13:00. Visos trīs gadījumos visas septiņas alternatīvas izpilda sākotnējos filtrēšanas nosacījumus, tādēļ tās tiek iekļautas *PROMETHEE II* rangēšanā.

5.7.tabula

PROMETHEE II lēmuma rezultātu kopsavilkums sezonālajos scenārijos

Sezona	Svaru konfigurācija	Labākā alternatīva	ϕ_1	Otrā alternatīva	ϕ_2	$\Delta\phi_{12}$	Pieļaujamās alternatīvas
Vasara	Bāzes	$PIERIGA2_{EUS1}$	0,259391	$RIGA1_{EUS1}$	0,181426	0,077964	7/7
Vasara	Uz uzticamību orientētā	$PIERIGA2_{EUS1}$	0,268799	$RIGA1_{EUS1}$	0,215763	0,053036	7/7
Rudens	Bāzes	$PIERIGA2_{EUS1}$	0,263437	$RIGA1_{EUS1}$	0,126437	0,137	7/7
Rudens	Uz uzticamību orientētā	$PIERIGA2_{EUS1}$	0,27346	$RIGA1_{EUS1}$	0,159237	0,114222	7/7
Ziema	Bāzes	$PIERIGA2_{EUS1}$	0,246861	$RIGA1_{EUS1}$	0,139898	0,106963	7/7
Ziema	Uz uzticamību orientētā	$PIERIGA2_{EUS1}$	0,256556	$RIGA1_{EUS1}$	0,172286	0,08427	7/7

Gala aprēķinu rezultāti parāda, ka visos trīs sezonālajos lēmuma momentos un abās svaru konfigurācijās pirmo vietu saglabā $PIERIGA2_{EUS1}$. Tas nozīmē, ka šī alternatīva ir stabilākā pēc kopējā *PROMETHEE II neto* plūsmas novērtējuma gan vasaras, gan rudens, gan ziemas lēmuma momentos. Otrajā vietā visos analizētajos gadījumos ir $RIGA1_{EUS1}$, kas norāda, ka šī alternatīva veido galveno rezerves izvēli.

Bāzes svaru konfigurācijā $PIERIGA2_{EUS1}$ *neto* plūsma ir 0,259391 vasarā, 0,263437 rudenī un 0,246861 ziemā. Savukārt $RIGA1_{EUS1}$ *neto* plūsma ir 0,181426 vasarā, 0,126437 rudenī un 0,139898 ziemā. Tādējādi pirmās un otrās alternatīvas *neto* plūsmas starpība ir 0,077964 vasarā, 0,137 rudenī un 0,106963 ziemā.

No šiem rezultātiem redzams, ka bāzes konfigurācijā vismazākā starpība starp pirmo un otro alternatīvu ir vasaras lēmuma momentā. Tas nozīmē, ka vasaras scenārijā $RIGA1_{EUS1}$ ir salīdzinoši tuvāk $PIERIGA2_{EUS1}$ nekā rudens un ziemas scenārijos. Savukārt rudens lēmuma momentā pirmās alternatīvas pārsvars ir visizteiktākais, jo $\Delta\phi_{12}$ sasniedz 0,137.

Uz uzticamību orientētajā konfigurācijā $PIERIGA2_{EUS1}$ saglabā pirmo vietu visās sezonās, bet tās *neto* plūsma nedaudz palielinās: vasarā līdz 0,268799, rudenī līdz 0,273460 un ziemā līdz 0,256556. Tas nozīmē, ka uzticamības, datu kvalitātes, jaudas rezerves un

kiberdrošības kritēriju pastiprināšana neizmaina galveno rekomendāciju, bet nostiprina $PIERIGA2_{EUS1}$ kā kopumā piemērotāko alternatīvu.

Vienlaikus uz uzticamību orientētajā konfigurācijā samazinās pirmās un otrās alternatīvas *neto* plūsmas starpība: vasarā līdz 0,053036, rudenī līdz 0,114222 un ziemā līdz 0,084270. Tas nozīmē, ka uzticamības un drošības kritēriju pastiprināšana palielina arī $RIGA1_{EUS1}$ relatīvo konkurētspēju. Tādēļ uz uzticamību orientētā svaru konfigurācija nemaina pirmo alternatīvu, bet ietekmē rezerves alternatīvas nozīmi un samazina attālumu starp pirmo un otro vietu.

Kopumā 5.7. tabulas rezultāti parāda, ka $PIERIGA2_{EUS1}$ ir stabila pirmā izvēle visos analizētajos sezonālajos lēmuma momentos. Tomēr $\Delta\phi_{12}$ vērtības apliecina, ka lēmuma stabilitāte nav vienāda visās sezonās un svaru konfigurācijās. Visjutīgākais ir vasaras uz uzticamību orientētais scenārijs, kur $\Delta\phi_{12}$ ir tikai 0,053036, savukārt visstabilākais ir rudens bāzes scenārijs, kur $\Delta\phi_{12}$ sasniedz 0,137. Tas apstiprina pilna *PROMETHEE* ranga nozīmi: Lēmuma atbalsta sistēma nedrīkst aprobežoties tikai ar pirmās alternatīvas nosaukumu, bet tai jāuztur arī rezerves alternatīvu secība un neto plūsmas starpības interpretācija.

5.2.5. Detalizēti *PROMETHEE* plūsmas rezultāti

Detalizētie *PROMETHEE II* rezultāti parāda katras alternatīvas pozitīvo, negatīvo un *neto* plūsmu katrā sezonālajā lēmuma momentā gan bāzes, gan uz uzticamību orientētajā svaru konfigurācijā.

5.8.tabula

PROMETHEE II pozitīvā, negatīvā un neto plūsma sezonālajos lēmuma scenārijos

Sezona	Svari	Rangs	Alternatīva	ϕ^+	ϕ^-	ϕ
Rudens	Bāzes	1	$PIERIGA2_{EUS1}$	0,409645	0,146209	0,263437
Rudens	Bāzes	2	$RIGA1_{EUS1}$	0,299732	0,173296	0,126437
Rudens	Bāzes	3	$RIGA2_{EUS2}$	0,215630	0,110781	0,104849
Rudens	Bāzes	4	$RIGA1_{EUS2}$	0,198375	0,178054	0,020321
Rudens	Bāzes	5	$RIGA1_{EUS3}$	0,168843	0,217873	-0,049030
Rudens	Bāzes	6	$RIGA2_{EUS1}$	0,096928	0,321058	-0,224130
Rudens	Bāzes	7	$PIERIGA1_{EUS1}$	0,135613	0,377497	-0,241883
Rudens	Uz uzticamību orientētā	1	$PIERIGA2_{EUS1}$	0,415536	0,142077	0,273460
Rudens	Uz uzticamību orientētā	2	$RIGA1_{EUS1}$	0,318579	0,159342	0,159237
Rudens	Uz uzticamību orientētā	3	$RIGA2_{EUS2}$	0,222878	0,109877	0,113001
Rudens	Uz uzticamību orientētā	4	$RIGA1_{EUS2}$	0,200114	0,185350	0,014764
Rudens	Uz uzticamību orientētā	5	$RIGA1_{EUS3}$	0,171808	0,219330	-0,047522
Rudens	Uz uzticamību orientētā	6	$RIGA2_{EUS1}$	0,099765	0,320808	-0,221043
Rudens	Uz uzticamību orientētā	7	$PIERIGA1_{EUS1}$	0,112337	0,404235	-0,291897
Vasara	Bāzes	1	$PIERIGA2_{EUS1}$	0,408214	0,148823	0,259391
Vasara	Bāzes	2	$RIGA1_{EUS1}$	0,332029	0,150603	0,181426
Vasara	Bāzes	3	$RIGA2_{EUS2}$	0,216311	0,117813	0,098498
Vasara	Bāzes	4	$RIGA1_{EUS2}$	0,195641	0,183542	0,012099
Vasara	Bāzes	5	$RIGA1_{EUS3}$	0,160920	0,241919	-0,080999
Vasara	Bāzes	6	$RIGA2_{EUS1}$	0,098889	0,315757	-0,216868
Vasara	Bāzes	7	$PIERIGA1_{EUS1}$	0,137864	0,391411	-0,253547
Vasara	Uz uzticamību orientētā	1	$PIERIGA2_{EUS1}$	0,413553	0,144754	0,268799
Vasara	Uz uzticamību orientētā	2	$RIGA1_{EUS1}$	0,352801	0,137038	0,215763
Vasara	Uz uzticamību orientētā	3	$RIGA2_{EUS2}$	0,223265	0,117526	0,105739
Vasara	Uz uzticamību orientētā	4	$RIGA1_{EUS2}$	0,196899	0,191481	0,005418
Vasara	Uz uzticamību orientētā	5	$RIGA1_{EUS3}$	0,163374	0,241914	-0,078540
Vasara	Uz uzticamību orientētā	6	$RIGA2_{EUS1}$	0,102080	0,314190	-0,212110
Vasara	Uz uzticamību orientētā	7	$PIERIGA1_{EUS1}$	0,114472	0,419540	-0,305068
Ziema	Bāzes	1	$PIERIGA2_{EUS1}$	0,398140	0,151280	0,246861
Ziema	Bāzes	2	$RIGA1_{EUS1}$	0,293817	0,153919	0,139898
Ziema	Bāzes	3	$RIGA2_{EUS2}$	0,176961	0,123686	0,053275

Ziema	Bāzes	4	$RIGA2_{EUS1}$	0,154190	0,147466	0,006724
Ziema	Bāzes	5	$RIGA1_{EUS2}$	0,148663	0,208408	-0,059745
Ziema	Bāzes	6	$RIGA1_{EUS3}$	0,139391	0,263058	-0,123667
Ziema	Bāzes	7	$PIERIGA1_{EUS1}$	0,136961	0,400306	-0,263345
Ziema	Uz uzticamību orientētā	1	$PIERIGA2_{EUS1}$	0,403819	0,147262	0,256556
Ziema	Uz uzticamību orientētā	2	$RIGA1_{EUS1}$	0,312987	0,140701	0,172286
Ziema	Uz uzticamību orientētā	3	$RIGA2_{EUS2}$	0,183246	0,123290	0,059956
Ziema	Uz uzticamību orientētā	4	$RIGA2_{EUS1}$	0,159811	0,147547	0,012265
Ziema	Uz uzticamību orientētā	5	$RIGA1_{EUS2}$	0,149741	0,217374	-0,067633
Ziema	Uz uzticamību orientētā	6	$RIGA1_{EUS3}$	0,142297	0,261309	-0,119012
Ziema	Uz uzticamību orientētā	7	$PIERIGA1_{EUS1}$	0,114982	0,429400	-0,314418

No 5.8. tabulas redzams, ka $PIERIGA2_{EUS1}$ visos analizētajos sezonālajos lēmuma momentos iegūst pozitīvu un visaugstāko *PROMETHEE II neto* plūsmu. Bāzes konfigurācijā šīs alternatīvas *neto* plūsma ir 0,259391 vasarā, 0,263437 rudenī un 0,246861 ziemā. Uz uzticamību orientētajā konfigurācijā attiecīgās vērtības palielinās līdz 0,268799 vasarā, 0,273460 rudenī un 0,256556 ziemā.

Otrajā vietā visos gadījumos atrodas $RIGA1_{EUS1}$. Tas nozīmē, ka šī alternatīva veido galveno rezerves izvēli, ja pirmā alternatīva kļūst nepieejama, tīkla ziņā nevēlama vai drošības ziņā riskanta. Trešajā vietā visos sezonālajos scenārijos atrodas $RIGA2_{EUS2}$, savukārt pārējās alternatīvas iegūst zemāku prioritāti.

Negatīva *neto* plūsma nav interpretējama kā alternatīvas absolūta nederība. Visas septiņas alternatīvas analizētajos lēmuma momentos ir pieļaujamas, taču negatīva ϕ vērtība nozīmē, ka konkrētā alternatīva kopējā daudzkritēriju salīdzinājumā biežāk tiek pārspēta nekā dominē pār citām alternatīvām. Tāpēc $RIGA2_{EUS1}$, $PIERIGA1_{EUS1}$, $RIGA1_{EUS2}$ vai $RIGA1_{EUS3}$ var būt tehniski izmantojamas, bet konkrētajos lēmuma momentos tās nav optimālākās izvēles pēc kopējā kritēriju profila.

5.2.6. Svaru ietekme uz *PROMETHEE* rezultātu

AHP svaru struktūra tieši ietekmē *PROMETHEE* preferences indeksu, jo katra kritērija preference tiek reizināta ar attiecīgo svaru. Tādēļ kritēriji ar lielāku svaru vairāk ietekmē alternatīvu savstarpējo dominanci. Bāzes scenārijā lielākā ietekme ir uzticamībai, jaudas rezervei, kiberriskam, datu kvalitātei un tīkla noslodzei. Tas nozīmē, ka alternatīva ar labu attāluma vai cenas rādītāju netiek automātiski izvēlēta, ja tai ir sliktāks uzticamības, datu kvalitātes vai kiberdrošības profils.

Uz uzticamību orientētajā konfigurācijā uzticamības svars palielinās no 0,19466 līdz 0,21755, kiberriska svars no 0,15564 līdz 0,17395, jaudas rezerves svars no 0,17775 līdz 0,18277, bet datu kvalitātes svars no 0,10629 līdz 0,10929. Vienlaikus pieejamās uzlādes jaudas svars samazinās no 0,09784 līdz 0,08748, attāluma svars no 0,06461 līdz 0,04910, gaidīšanas laika svars no 0,05511 līdz 0,04435, bet cenas svars no 0,04534 līdz 0,03446. Tīkla noslodzes svars nedaudz samazinās no 0,10276 līdz 0,10107, tomēr tas joprojām saglabā būtisku ietekmi kopējā kritēriju blokā.

Lai novērtētu šo svaru izmaiņu ietekmi uz gala rangu, katram sezonālajam lēmuma momentam tika aprēķināts arī *PROMETHEE II* rezultāts ar uz uzticamību orientētajiem koriģētajiem svariem.

5.9.tabula

Bāzes un uz uzticamību orientētās konfigurācijas salīdzinājums

Sezona	Bāzes 1. alternatīva	Bāzes 2. alternatīva	Uz uzticamību orientētā 1. alternatīva	Uz uzticamību orientētā 2. alternatīva	Galvenā izmaiņa
Vasara	$PIERIGA2_{EUS1}$	$RIGA1_{EUS1}$	$PIERIGA2_{EUS1}$	$RIGA1_{EUS1}$	*TOP-1* un *TOP-2* saglabājas nemainīgi; mainās neto plūsmas starpība
Rudens	$PIERIGA2_{EUS1}$	$RIGA1_{EUS1}$	$PIERIGA2_{EUS1}$	$RIGA1_{EUS1}$	*TOP-1* un *TOP-2* saglabājas nemainīgi; mainās neto plūsmas starpība
Ziema	$PIERIGA2_{EUS1}$	$RIGA1_{EUS1}$	$PIERIGA2_{EUS1}$	$RIGA1_{EUS1}$	*TOP-1* un *TOP-2* saglabājas nemainīgi; mainās neto plūsmas starpība

No 5.9. tabulas redzams, ka uz uzticamību orientētā svaru konfigurācija nemaina pirmo un otro alternatīvu. Gan bāzes, gan uz uzticamību orientētajā konfigurācijā visās sezonās pirmo vietu iegūst $PIERIGA2_{EUS1}$, bet otro vietu $RIGA1_{EUS1}$. Tātad galvenā rekomendācija ir stabila pret svaru konfigurācijas maiņu. Tomēr mainās *neto* plūsmas vērtības un pirmās un otrās alternatīvas savstarpējā distance, kas ir būtiski lēmuma stabilitātes interpretācijai.

5.10.tabula

Bāzes un uz uzticamību orientētās konfigurācijas pirmo divu alternatīvu neto plūsmas salīdzinājums

Scenārijs	Bāzes labākā ϕ_1	Bāzes $\Delta\phi_{12}$	Koriģētā labākā ϕ_1	Koriģētā $\Delta\phi_{12}$	Interpretācija
Vasara — augusts	0,259391	0,077964	0,268799	0,053036	*TOP-1* saglabājas, bet $\Delta\phi$ samazinās uz uzticamību orientētā konfigurācijā
Rudens — oktobris	0,263437	0,137000	0,273460	0,114222	*TOP-1* saglabājas, bet $\Delta\phi$ samazinās uz uzticamību orientētā konfigurācijā
Ziema — decembris	0,246861	0,106963	0,256556	0,084270	*TOP-1* saglabājas, bet $\Delta\phi$ samazinās uz uzticamību orientētā konfigurācijā

Koriģēto svaru rezultāti parāda, ka pirmās alternatīvas $PIERIGA2_{EUS1}$ *neto* plūsma visos scenārijos palielinās. Vasarā tā pieaug no 0,259391 līdz 0,268799, rudenī no 0,263437 līdz 0,273460, bet ziemā no 0,246861 līdz 0,256556. Tas nozīmē, ka uzticamības, datu kvalitātes, kiberdrošības un jaudas rezerves kritēriju pastiprināšana nostiprina $PIERIGA2_{EUS1}$ kā galveno alternatīvu.

Vienlaikus $\Delta\phi_{12}$ uz uzticamību orientētajā konfigurācijā kļūst mazāks visos trīs scenārijos. Vasarā tas samazinās no 0,077964 līdz 0,053036, rudenī no 0,137000 līdz 0,114222, bet ziemā no 0,106963 līdz 0,084270. Tas nozīmē, ka $RIGA1_{EUS1}$ kļūst relatīvi konkurētspējīgāka, tomēr neapsteidz $PIERIGA2_{EUS1}$.

Detalizētās normalizēto kritēriju matricas, *PROMETHEE* preferenču matrica, kā arī ϕ^+ un ϕ^- plūsmu diagrammas katram sezonālajam scenārijam ir izmantojamas rezultātu pārbaudei un interpretācijai. Pamattekstā tās tiek izmantotas kā aprēķinu caurskatāmības pierādījums, savukārt pilnu grafisko komplektu lietderīgi ievietot pielikumā.

5.2.7. *PROMETHEE* ranga interpretācija

PROMETHEE aprēķina rezultāts parāda, ka gala izvēle netiek noteikta pēc viena dominējoša kritērija. Ja modelis būtu balstīts tikai uz attālumu, tuvākā alternatīva varētu iegūt augstāku prioritāti. Tomēr pilnais *AHP–PROMETHEE* modelis ņem vērā arī uzticamību, jaudas rezervi, kiberrisku, datu kvalitāti, tīkla noslodzi, pieejamo jaudu, gaidīšanas laiku un cenu.

$PIERIGA2_{EUS1}$ iegūst pirmo vietu visos trīs sezonālajos scenārijos, jo tās kopējais kritēriju profils ir labvēlīgāks nekā pārējām alternatīvām. Šī alternatīva ir piepilsētas *EUS* ar jauktu *AC/DC* struktūru, kas apvieno *DC* uzlādes iespēju un *AC* uzlādes punktus. Turklāt šai alternatīvai ir labvēlīgs uzticamības un kiberdrošības profils, kas uz uzticamību orientētajā konfigurācijā vēl vairāk nostiprina tās pozīciju.

$RIGA1_{EUS1}$ visos sezonālajos scenārijos iegūst otro vietu, un tā interpretējama kā galvenā rezerves alternatīva. Šī alternatīva ir *DC* uzlādes alternatīva ar 4 uzlādes punktiem, 100 kW uzstādīto un 100 kW atļauto jaudu. Tās priekšrocība ir augsta pieejamā uzlādes jauda un stabils tehniskais profils, tomēr *PROMETHEE* kopvērtējumā tā neapsteidz $PIERIGA2_{EUS1}$.

$RIGA2_{EUS2}$ visos sezonālajos scenārijos saglabā trešo vietu. Tas norāda, ka šī alternatīva ir konkurētspējīga, bet tās kopējais profils nav pietiekams, lai apsteigtu $PIERIGA2_{EUS1}$ un $RIGA1_{EUS1}$. Pārējās alternatīvas $RIGA1_{EUS2}$, $RIGA1_{EUS3}$, $RIGA2_{EUS1}$ un $PIERIGA1_{EUS1}$ saglabā zemākas vietas rangā, jo tās kopējā daudzkritēriju salīdzinājumā biežāk tiek pārspētas nekā dominē pār citām alternatīvām.

$PIERIGA1_{EUS1}$ visos trīs scenārijos atrodas ranga lejasdaļā. Lai gan šī alternatīva var būt ģeogrāfiski izdevīga noteiktos gadījumos, kopējā *PROMETHEE* vērtējumā to pazemina vājāks kritēriju profils. Tas apstiprina promocijas darba pamatnostādni, ka tuvākā alternatīva ne vienmēr ir optimālākā, ja lēmumā vienlaikus jāņem vērā infrastruktūras, tīkla, datu un drošības kritēriji.

Tādējādi *PROMETHEE* rezultāts nodrošina ne tikai galveno izvēli, bet arī pilnu rezerves alternatīvu secību. Tas ir būtiski dinamiskā *EV* uzlādes punkta piešķiršanā, jo izvēlētā alternatīva var kļūt aizņemta, tehniski nepieejama, tīkla ziņā nevēlama vai drošības ziņā riskanta. Šādā gadījumā lēmuma atbaksta sistēma var izmantot *PROMETHEE* rangu, lai noteiktu nākamo piemērotāko alternatīvu bez pilnīgas lēmuma loģikas pārdefinēšanas.

5.2.8. Sadaļas kopsavilkums

Šajā sadaļā tika analizēti *AHP* svaru un *PROMETHEE* ranga aprēķina rezultāti. Bāzes *AHP* svaru struktūra parāda, ka izstrādātais modelis ir uz uzticamību orientēts, nevis tikai uz lietotāja komfortu balstīts. Uzticamības, jaudas rezerves, kiberriska, datu kvalitātes un tīkla noslodzes kritēriji kopā veido 73,710 % no kopējā bāzes svara, savukārt attālums, gaidīšanas laiks un cena kopā veido 16,506 %.

Uz uzticamību orientētā svaru konfigurācija pastiprina uzticamības, jaudas rezerves, kiberdrošības un datu kvalitātes nozīmi. Šajā konfigurācijā uzticamības, jaudas rezerves, kiberriska, datu kvalitātes un tīkla noslodzes kopējais svars palielinās līdz 78,463 %, bet attāluma, gaidīšanas laika un cenas kopējais svars samazinās līdz 12,791 %. Tas ļauj pārbaudīt modeļa jutīgumu pret situācijām, kur lēmumu pieņēmējs vairāk prioritizē sistēmas uzticamību, drošību un tīkla pieļaujamību.

Sezonālie *PROMETHEE II* lēmuma momentu rezultāti parāda, ka $PIERIGA2_{EUS1}$ saglabā pirmo vietu visos trīs scenārijos. Bāzes konfigurācijā tās *neto* plūsma ir 0,259391 vasarā, 0,263437 rudenī un 0,246861 ziemā. Uz uzticamību orientētajā konfigurācijā tās *neto* plūsma palielinās līdz 0,268799 vasarā, 0,273460 rudenī un 0,256556 ziemā.

Otrajā vietā visos analizētajos gadījumos atrodas $RIGA1_{EUS1}$. Tas nozīmē, ka svaru konfigurācijas maiņa neizmaina pirmās un otrās alternatīvas secību, bet samazina pirmās un otrās alternatīvas *neto* plūsmas starpību. Tādējādi uz uzticamību orientētā konfigurācija

nemaina galveno rekomendāciju, bet palielina rezerves alternatīvas nozīmi un ļauj precīzāk interpretēt lēmuma stabilitāti.

Tādējādi 5.2. sadaļā iegūtie rezultāti apstiprina, ka *AHP–PROMETHEE* modelis spēj aprēķināt interpretējamu uzlādes punktu rangu, kurā redzama gan alternatīvu dominances struktūra, gan pirmās izvēles un rezerves alternatīvu secība. Nākamajā sadaļā šie rezultāti tiek izmantoti bāzes scenārija validācijai, vērtējot piešķiršanas panākumu īpatsvaru, izvēļu biežumu, pieļaujamo alternatīvu skaitu un *KPI* rezultātus validācijas periodos.

5.3. Bāzes scenārija validācijas rezultāti

Bāzes scenārija validācijas mērķis ir pārbaudīt, vai izstrādātais *AHP–PROMETHEE* modelis normālos ekspluatācijas apstākļos spēj nodrošināt stabilu, interpretējamu un tehniski pamatotu *EV* uzlādes punkta piešķiršanu. Atšķirībā no 5.2. sadaļas, kur tika analizēti atsevišķi sezonālie lēmuma momenti, šajā sadaļā tiek vērtēta modeļa darbība ilgākos sezonālos validācijas periodos.

Bāzes scenārijā netiek piemērota papildu tīkla pīķa slodzes, datu kvalitātes degradācijas vai paaugstināta kiberdrošības riska korekcija. Tiek izmantoti bāzes *AHP* svari, standarta filtrēšanas nosacījumi un faktiskie validācijas datu periodi. Šāda konfigurācija kalpo kā references režīms turpmākai salīdzināšanai ar vienkāršotām piešķiršanas pieejām, stresa scenārijiem un uz uzticamību orientēto svaru jutīguma analīzi.

5.3.1. Bāzes scenārija validācijas periodi

Bāzes scenārija dinamiskā validācija veikta trīs sezonālos 72 stundu periodos: vasarā, rudenī un ziemā. Aprēķins veikts ar 15 minūšu soli, tādēļ katrā sezonālajā periodā iegūti 288 dinamiskās uzlādes punkta piešķiršanas rezultāti, bet kopā trīs sezonās 864 lēmuma momenti.

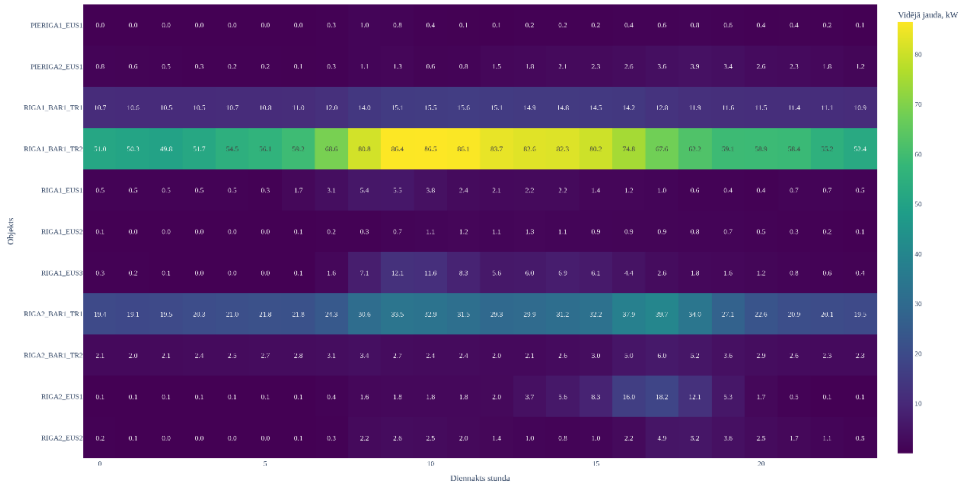
5.11.tabula

Bāzes scenārija sezonālie validācijas periodi

Sezona	Dinamiskais periods	Aprēķina solis	Laika soļi	Lēmuma moments	72 h slodzes loga periods
Vasara	15.08.2025 00:00–18.08.2025 00:00	15 min	288	15.08.2025 10:00	13.08.2025 22:00–16.08.2025 22:00
Rudens	15.10.2025 00:00–18.10.2025 00:00	15 min	288	15.10.2025 16:00	14.10.2025 04:00–17.10.2025 04:00
Ziema	15.12.2025 00:00–18.12.2025 00:00	15 min	288	15.12.2025 13:00	14.12.2025 01:00–17.12.2025 01:00

Šāda periodu izvēle ļauj novērtēt modeļa darbību dažādos slodzes un ekspluatācijas apstākļos. Vasaras periods raksturo zemāku analizētā 72 stundu loga enerģijas apjomu, rudens periods augstāko analizētās enerģijas apjomu konkrētajos validācijas logos, savukārt ziemas periods ļauj novērtēt modeļa darbību paaugstināta sezonālā patēriņa apstākļos salīdzinājumā ar vasaras periodu.

Lai pirms KPI interpretācijas parādītu slodzes datu struktūru, bāzes scenārija analīzē papildus izmantojams pilnā validācijas perioda slodzes sadalījuma attēls. Tas ļauj vizuāli pamatot, ka validācijas objektiem ir atšķirīgi diennakts slodzes profili un ka EUS slodzes nav vienmērīgi sadalītas visā periodā.



5.10.att. Vidējās slodzes sadalījums pa validācijas objektiem un diennakts stundām pilnā validācijas periodā

Avots: autora veidots, balstoties uz eksperimentālās validācijas vides slodžu profilu datiem.

5.3.2. Bāzes scenārija *KPI* salīdzinājums pa sezonām

Bāzes scenārija validācijā katram sezonālajam periodam tika aprēķināti galvenie dinamiskās piešķiršanas rādītāji: analizētā 72 stundu loga enerģija, piešķiršanas panākumu īpatsvars, vidējais pieļaujamo *EUS* skaits, minimālais pieļaujamo *EUS* skaits, pieļaujamo alternatīvu īpatsvars, pieļaujamo alternatīvu zudums, rezerves alternatīvu pieejamība, ranga stabilitāte, atkārtotas piešķiršanas biežums un vidējā pirmās un otrās alternatīvas *PROMETHEE neto* plūsmas starpība $\Delta\phi_{12}$.

5.12.tabula

Bāzes scenārija *KPI* salīdzinājums pa sezonām

Rādītājs	Vasara	Rudens	Ziema
72 h loga enerģija, kWh	580,18	1187,15	1004,30
Piešķiršanas panākumu īpatsvars	100,00 %	100,00 %	100,00 %
Vidējais pieļaujamo *EUS* skaits	6,98	6,98	6,94
Minimālais pieļaujamo *EUS* skaits	6	6	6
Pieļaujamo alternatīvu īpatsvars	99,70 %	99,65 %	99,21 %
Pieļaujamo alternatīvu zudums	0,30 %	0,35 %	0,79 %
Rezerves alternatīvu pieejamība	100,00 %	100,00 %	100,00 %
Ranga stabilitāte	85,42 %	90,28 %	86,46 %
Atkārtotas piešķiršanas biežums	14,58 %	9,72 %	13,54 %
Vidējā $\Delta\phi_{12}$	0,06211	0,08461	0,08440

No 5.12. tabulas redzams, ka visos trīs sezonālajos periodos piešķiršanas panākumu īpatsvars sasniedz 100 %. Tas nozīmē, ka modelis katrā no 864 analizētajiem lēmuma momentiem spēj identificēt vismaz vienu pieļaujamu uzlādes alternatīvu. Šis rezultāts ir būtisks, jo tas apliecina, ka bāzes scenārija filtrēšanas nosacījumi nav pārmērīgi ierobežojoši un neizraisa situācijas, kurās lēmumu atbalsta sistēma nespētu sniegt rekomendāciju.

Vidējais pieļaujamo *EUS* skaits saglabājas ļoti augsts 6,98 vasarā, 6,98 rudenī un 6,94 ziemā no maksimāli septiņām alternatīvām. Minimālais pieļaujamo *EUS* skaits visās sezonās ir 6, kas nozīmē, ka pat nelabvēlīgākajos bāzes scenārija lēmuma momentos modelim saglabājas vairākas rezerves alternatīvas. Pieļaujamo alternatīvu īpatsvars ir 99,70 % vasarā, 99,65 %

rudenī un 99,21 % ziemā, savukārt pieļaujamo alternatīvu zudums ir attiecīgi tikai 0,30 %, 0,35 % un 0,79 %.

Analizētā 72 stundu loga enerģija ir 580,18 kWh vasarā, 1187,15 kWh rudenī un 1004,30 kWh ziemā. Tātad konkrētajos validācijas logos lielākais enerģijas apjoms ir rudens periodā, savukārt ziemas periodā enerģijas apjoms ir lielāks nekā vasarā, bet mazāks nekā rudenī. Neskatoties uz šīm slodzes atšķirībām, modelis saglabā 100 % piešķiršanas panākumu īpatsvaru un augstu pieļaujamo alternatīvu īpatsvaru visās sezonās.

Rezerves alternatīvu pieejamība visos trīs periodos ir 100 %. Tas nozīmē, ka katrā analizētajā lēmuma momentā pēc pirmās alternatīvas izvēles modelim saglabājas vismaz viena izmantojama rezerves alternatīva. Šis rezultāts ir būtisks dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas kontekstā, jo izvēlētā alternatīva var kļūt aizņemta, tehniski nepieejama, tīkla ziņā nevēlama vai drošības ziņā riskanta.

5.3.3. Ranga stabilitāte un atkārtotas piešķiršanas biežums

Ranga stabilitāte bāzes scenārijā tiek vērtēta pēc tā, cik bieži izvēlētā pirmā alternatīva nemainās starp secīgiem aprēķinu soļiem. Jo augstāks ranga stabilitātes rādītājs, jo stabilāks ir modelis dinamiskā laikā. Atkārtotas piešķiršanas biežums savukārt parāda, cik bieži modelim nepieciešams mainīt sākotnējo izvēli uz citu alternatīvu.

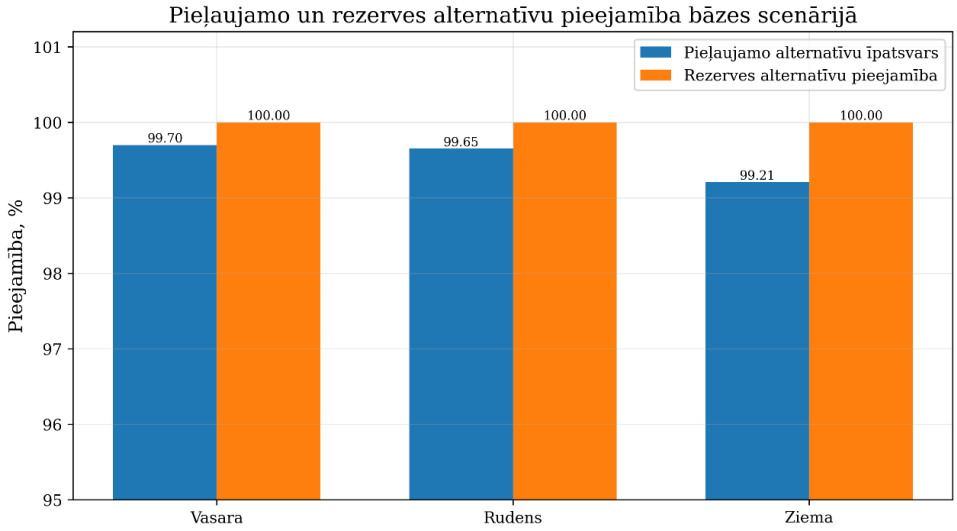
Bāzes scenārijā ranga stabilitāte ir 85,42 % vasarā, 90,28 % rudenī un 86,46 % ziemā. Attiecīgi atkārtotas piešķiršanas biežums ir 14,58 % vasarā, 9,72 % rudenī un 13,54 % ziemā. Tas nozīmē, ka stabilākais no analizētajiem bāzes scenārija periodiem ir rudens, savukārt lielākā dinamiskā mainība novērojama vasarā.

Vasaras periodā ranga stabilitāte ir 85,42 %, bet atkārtotas piešķiršanas biežums 14,58 %. Vienlaikus vidējā pirmās un otrās alternatīvas neto plūsmas starpība ir $\Delta\phi_{12} = 0{,}06211$, kas ir mazākā no visiem trim sezonālajiem periodiem. Tas norāda, ka vasaras periodā pirmās un otrās alternatīvas konkurence ir ciešāka, tādēļ modelis biežāk reaģē uz izmaiņām kritēriju vērtībās.

Rudens periodā ranga stabilitāte palielinās līdz 90,28 %, bet atkārtotas piešķiršanas biežums samazinās līdz 9,72 %. Vidējā $\Delta\phi_{12}$ vērtība ir 0,08461, kas nozīmē, ka pirmā alternatīva ir skaidrāk atdalīta no otrās nekā vasaras periodā. Tādēļ rudens periods šajos aprēķinos ir stabilākais pēc ranga saglabāšanās kritērija.

Ziemas periodā ranga stabilitāte ir 86,46 %, bet atkārtotas piešķiršanas biežums 13,54 %. Vidējā $\Delta\phi_{12}$ vērtība ir 0,08440, kas ir ļoti tuva rudens perioda vērtībai. Tas nozīmē, ka ziemā pirmās alternatīvas pārsvars pār otro ir līdzīgs rudens periodam, taču izvēles maiņa laikā notiek biežāk nekā rudenī.

Ranga stabilitātes un atkārtotas piešķiršanas biežuma rezultāti parāda, ka dinamiskā atjaunināšana modelī nav haotiska. Modelis neveic nepamatoti biežas pārslēgšanās starp alternatīvām, bet vienlaikus saglabā spēju reaģēt uz mainīgiem apstākļiem. Tas ir būtiski uz uzticamību orientētai pieejai, jo pārāk stabils modelis var ignorēt būtiskas izmaiņas, savukārt pārāk jutīgs modelis var radīt nestabilas un lietotājam grūti interpretējamas rekomendācijas.



5.11.att. Pieļaujamo alternatīvu skaita izmaiņas laikā bāzes scenārija sezonālajos validācijas periodā.

Avots: autora veidots, balstoties uz bāzes scenārija sezonālās validācijas rezultātiem.

5.3.4. Pieļaujamo alternatīvu un rezerves secības nozīme

Bāzes scenārijā vidējais pieļaujamo *EUS* skaits visos trīs periodos ir tuvs maksimālajam alternatīvu skaitam. Tas nozīmē, ka pēc filtrēšanas gandrīz vienmēr ir pieejamas vairākas alternatīvas. Šis rezultāts ir būtisks, jo dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas modelis nedrīkst balstīties tikai uz vienu alternatīvu. Pilns *PROMETHEE* rangs nodrošina galveno izvēli un rezerves secību gadījumam, ja pirmā alternatīva kļūst nepieejama vai vairs neatbilst filtrēšanas nosacījumiem.

Pieļaujamo alternatīvu īpatsvars vasarā ir 99,70 %, rudenī 99,65 %, bet ziemā 99,21 %. Tādējādi arī ziemas periodā, kur pieļaujamo alternatīvu zudums ir nedaudz lielāks nekā vasarā un rudenī, modelis saglabā pietiekamu alternatīvu kopu. Ziemas perioda pieļaujamo alternatīvu zudums ir 0,79 %, kas joprojām ir neliels un neliecina par būtisku alternatīvu telpas sašaurināšanos bāzes scenārijā.

No uz uzticamību orientēta skatupunkta tas nozīmē, ka rezerves alternatīvu secība ir praktiski izmantojama. Ja izvēlētā alternatīva kļūst nepieejama, sistēmai nav jāatgriežas pilnīgā nenoteiktībā tā var izmantot nākamo alternatīvu no *PROMETHEE* ranga vai veikt pārrēķinu ar aktualizētiem datiem. Šāda pieeja ir būtiska lēmumu atbalsta sistēmām, jo tā samazina atkarību no vienas rekomendācijas un nodrošina darbības nepārtrauktību mainīgos apstākļos.

Pieļaujamo alternatīvu analīze arī parāda, ka filtrēšanas mehānisms bāzes scenārijā darbojas līdzsvaroti. Tas izslēdz alternatīvas tikai tad, ja tās konkrētajā brīdī neatbilst filtrēšanas nosacījumiem, bet nepārvērš modeli par pārāk ierobežojošu sistēmu. Tādējādi *PROMETHEE* rangs saglabā praktisku nozīmi ne tikai kā pirmās izvēles noteikšanas mehānisms, bet arī kā rezerves alternatīvu prioritizācijas instruments.

5.3.5. Bāzes scenārija rezultātu interpretācija

Bāzes scenārija validācija parāda, ka izstrādātais *AHP–PROMETHEE* modelis spēj darboties stabili un interpretējami ilgākā laika periodā. Visos trīs sezonālajos periodos piešķiršanas panākumu īpatsvars ir 100 %, kas nozīmē, ka modelis spēj nodrošināt uzlādes punkta rekomendāciju katrā analizētajā lēmuma momentā. Augsts pieļaujamo alternatīvu

īpatsvars parāda, ka filtrēšanas loģika nav pārmērīgi ierobežojoša un saglabā praktiski izmantojamu rezerves alternatīvu secību.

Bāzes scenārija rezultāti rāda, ka visaugstākā ranga stabilitāte ir rudens periodā 90,28 %, savukārt zemākā ranga stabilitāte ir vasaras periodā 85,42 %. Vasarā ir arī mazākā vidējā pirmās un otrās alternatīvas neto plūsmas starpība, $\Delta\phi_{12} = 0{,}06211$, kas norāda uz ciešāku konkurenci starp labākajām alternatīvām un lielāku izvēles jutīgumu. Ziemas periods atrodas starp šiem diviem režīmiem: ranga stabilitāte ir 86,46 %, atkārtotas piešķiršanas biežums 13,54 %, bet vidējā $\Delta\phi_{12}$ vērtība ir 0,08440.

Enerģijas ziņā analizētajos 72 stundu logos lielākais apjoms ir rudens periodā 1187,15 kWh, pēc tam seko ziemas periods ar 1004,30 kWh un vasaras periods ar 580,18 kWh. Šī slodzes atšķirība neizraisa piešķiršanas panākumu īpatsvara samazināšanos, jo visās sezonās modelis saglabā 100 % spēju atrast pieļaujamu alternatīvu. Tas apliecina, ka bāzes režīmā modelis spēj saglabāt darbspēju arī atšķirīgos sezonālos slodzes apstākļos.

Tādējādi bāzes scenārijs apstiprina, ka izstrādātais modelis spēj nodrošināt dinamisku, bet ne haotisku uzlādes punkta piešķiršanu. Modelis saglabā augstu piešķiršanas panākumu īpatsvaru, augstu rezerves alternatīvu pieejamību un pietiekamu ranga stabilitāti, vienlaikus ļaujot pamatoti reaģēt uz sezonālām un ekspluatācijas izmaiņām. Bāzes scenārija rezultāti veido references līmeni turpmākajai salīdzinošajai analīzei ar vienkāršotām piešķiršanas pieejām, stresa scenārijiem un uz uzticamību orientēto svaru jutīguma analīzi.

5.4. Salīdzinošā analīze ar vienkāršotām piešķiršanas pieejām

Šajā sadaļā tiek veikta izstrādātā *AHP–PROMETHEE* modeļa salīdzinošā analīze ar vienkāršotām *EV* uzlādes punkta piešķiršanas pieejām. Salīdzinājuma mērķis ir pārbaudīt promocijas darba hipotēzes praktisko aspektu vai daudzkritēriju, uz uzticamību orientēta dinamiska piešķiršanas pieeja nodrošina pamatotāku izvēli nekā pieejas, kas balstās uz vienu dominējošu kritēriju.

Salīdzinājumā tiek izmantotas četras piešķiršanas pieejas: pilnais *AHP–PROMETHEE* modelis, tuvākās alternatīvas izvēle, īsākā gaidīšanas laika izvēle un lielākās efektīvās uzlādes jaudas izvēle. Pilnais *AHP–PROMETHEE* modelis izmanto visus 5.2. sadaļā definētos kritērijus: attālumu, gaidīšanas laiku, efektīvo uzlādes jaudu, tīkla noslodzi, jaudas rezervi, cenu, datu kvalitāti, uzticamību un kiberrisku. Savukārt vienkāršotās pieejas izmanto tikai vienu dominējošu kritēriju.

5.4.1. Piešķiršanas metožu izvēlēto alternatīvu salīdzinājums

Salīdzinājums veikts trīs sezonālajos lēmuma momentos, kas izmantoti arī 5.2. sadaļā: vasaras, rudens un ziemas scenārijā. Tabulā 5.13. parādīts, kuru alternatīvu izvēlas katra piešķiršanas pieeja.

5.13.tabula

Piešķiršanas metožu izvēlēto alternatīvu salīdzinājums sezonālajos lēmumi momentos

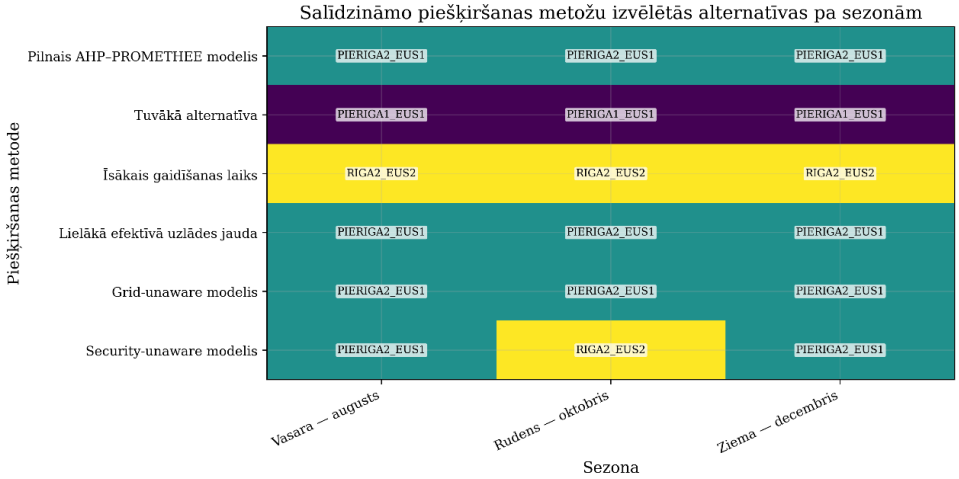
Piešķiršanas metode	Vasara	Rudens	Ziema
Pilnais *AHP–PROMETHEE* modelis	$PIERIGA2_{EUS1}$	$PIERIGA2_{EUS1}$	$PIERIGA2_{EUS1}$
Tuvākā alternatīva	$PIERIGA1_{EUS1}$	$PIERIGA1_{EUS1}$	$PIERIGA1_{EUS1}$
Īsākais gaidīšanas laiks	$RIGA2_{EUS2}$	$RIGA2_{EUS2}$	$RIGA2_{EUS2}$
Lielākā efektīvā uzlādes jauda	$PIERIGA2_{EUS1}$	$PIERIGA2_{EUS1}$	$PIERIGA2_{EUS1}$

No tabulas redzams, ka pilnais *AHP–PROMETHEE* modelis visos trīs sezonālajos lēmuma momentos izvēlas $PIERIGA2_{EUS1}$. Tādu pašu izvēli konkrētajos lēmuma momentos dod arī lielākās efektīvās uzlādes jaudas pieeja. Tomēr tas nenozīmē, ka šīs pieejas ir metodoloģiski līdzvērtīgas. Lielākās efektīvās uzlādes jaudas pieeja sakrīt ar pilno modeli

tāpēc, ka konkrētajos lēmuma momentos $PIERIGA2_{EUS1}$ vienlaikus ir konkurētspējīga arī pēc uzticamības, datu kvalitātes, kiberriska un tīkla pieļaujamības kritērijiem.

Tuvākās alternatīvas pieeja visos trīs sezonālajos lēmuma momentos izvēlas $PIERIGA1_{EUS1}$. Šī alternatīva ir ģeogrāfiski tuvākā, taču tā nav augstāk novērtētā pilnajā daudzkritēriju modelī. Tas apstiprina darba teorētisko pieņēmumu, ka tuvākā uzlādes vieta ne vienmēr ir piemērotākā alternatīva, ja lēmumā vienlaikus jāņem vērā infrastruktūras, tīkla, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības kritēriji.

Īsākā gaidīšanas laika pieeja visos trīs lēmuma momentos izvēlas $RIGA2_{EUS2}$. Šī alternatīva ir labvēlīga no gaidīšanas laika viedokļa, tomēr pilnais modelis tai nepiešķir pirmo vietu, jo tās kopējais daudzkritēriju profils ir vājāks nekā $PIERIGA2_{EUS1}$. Tas parāda, ka gaidīšanas laiks ir būtisks, bet nepietiekams kritērijs uz uzticamību orientētai uzlādes punkta piešķiršanai.



Attēls 5.12. Salīdzināmo piešķiršanas metožu izvēlētās alternatīvas pa sezonām
Avots: autora veidots, balstoties uz eksperimentālās validācijas vides aprēķinu rezultātiem.

5.4.2. Izvēlēto alternatīvu pilnā pieļaujamība

Lai pārbaudītu, vai vienkāršotās metodes neizvēlas tehniski nederīgas alternatīvas, katras metodes izvēlētā alternatīva tika pārbaudīta pret pilno filtru kopu. Filtru kopa ietver sasniedzamību, savietojamību, minimālo pieejamo jaudu, gaidīšanas laiku, tīkla pieļaujamību, datu kvalitāti un kiberdrošības slieksni.

5.14.tabula

Piešķiršanas metožu izvēlēto alternatīvu pilnās pieļaujamības īpatsvars

Piešķiršanas metode	Pilnās pieļaujamības īpatsvars
Pilnais *AHP–PROMETHEE* modelis	100%
Tuvākā alternatīva	100%
Īsākais gaidīšanas laiks	100%
Lielākā efektīvā uzlādes jauda	100%

Tabula 5.14. parāda, ka konkrētajos sezonālajos lēmuma momentos visas salīdzinātās metodes izvēlas alternatīvas, kas formāli atbilst pilnajiem pieļaujamības nosacījumiem. Tādēļ šajā salīdzinājumā atšķirība starp metodēm nav saistīta ar bināru derīgumu vai nederīgumu. Atšķirība ir saistīta ar izvēlētās alternatīvas kvalitāti daudzkritēriju nozīmē.

Šis rezultāts ir būtisks, jo vienkāršota metode var izvēlēties tehniski pieļaujamu alternatīvu, taču šī alternatīva var būt mazāk piemērota, ja tiek vērtēta uzticamība, datu kvalitāte, kiberrisks un tīkla ietekme. Līdz ar to pilnā *AHP–PROMETHEE* modeļa pienesums nav tikai nederīgu alternatīvu izslēgšana, bet arī pieļaujamo alternatīvu strukturēta prioritizācija.

5.4.3. Izvēlēto alternatīvu riska profila salīdzinājums

Lai izvērtētu metožu atšķirības detalizētāk, tika salīdzināta izvēlēto alternatīvu tīkla noslodzes relatīvā vērtība, kiberrisks, datu kvalitāte, uzticamība, efektīvā uzlādes jauda un attālums. Šie rādītāji ļauj parādīt, ka metodes var izvēlēties formāli pieļaujamas alternatīvas, bet to riska un uzticamības profili var būt būtiski atšķirīgi.

5.15.tabula

Piešķiršanas metožu izvēlēto alternatīvu riska profila salīdzinājums

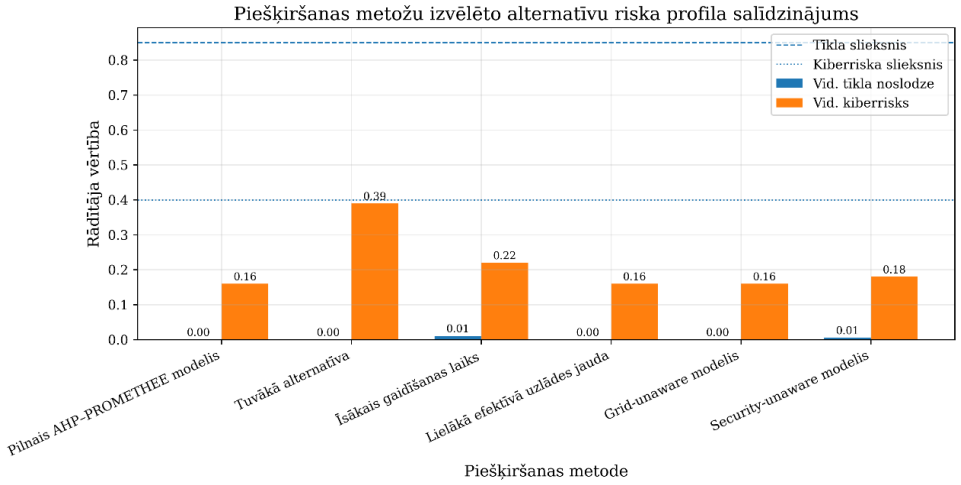
Piešķiršanas metode	Vid. tīkla noslodze	Vid. kiberrisks	Vid. datu kvalitāte	Vid. uzticamība	Vid. efektīvā jauda, kW	Vid. attālums, km
Pilnais *AHP–PROMETHEE* modelis	0,000272	0,16	0,90	0,942799	50,00	23,14
Tuvākā alternatīva	0,000159	0,39	0,60	0,839859	22,00	17,49
Īsākais gaidīšanas laiks	0,010918	0,22	0,80	0,908297	22,00	25,72
Lielākā efektīvā uzlādes jauda	0,000272	0,16	0,90	0,942799	50,00	23,14

No tabulas redzams, ka pilnais *AHP–PROMETHEE* modelis izvēlas alternatīvu ar zemu kiberrisku, augstu datu kvalitāti un augstu uzticamību. $PIERIGA2_{EUS1}$ gadījumā kiberriska vērtība ir 0,16, datu kvalitāte 0,90, bet uzticamības rādītājs 0,943. Tas nozīmē, ka izvēlētā alternatīva nav tikai tehniski pieļaujama, bet arī labi atbilst uz uzticamību orientētai lēmuma loģikai.

Tuvākās alternatīvas pieeja izvēlas $PIERIGA1_{EUS1}$, jo tai ir mazākais attālums 17,49 km. Tomēr šai alternatīvai ir augstāks kiberrisks 0,39, zemāka datu kvalitāte 0,60, un zemāks uzticamības rādītājs 0,840. Tas parāda, ka ģeogrāfiski tuvāka izvēle var būt mazāk piemērota no uzticamības un drošības skatpunkta.

Īsākā gaidīšanas laika pieeja izvēlas $RIGA2_{EUS2}$. Šī alternatīva ir pieļaujama un praktiski izmantojama, tomēr tās kiberriska vērtība ir augstāka nekā pilnā modeļa izvēlei, bet datu kvalitāte un uzticamības rādītājs ir zemāki nekā $PIERIGA2_{EUS1}$. Tādēļ gaidīšanas laiks viens pats nav pietiekams, lai raksturotu alternatīvas piemērotību dinamiskā uzlādes punkta piešķiršanas uzdevumā.

Lielākās efektīvās uzlādes jaudas pieeja šajos lēmuma momentos sakrīt ar pilno *AHP–PROMETHEE* modeli. Tomēr šis rezultāts nav interpretējams kā pierādījums, ka pietiek tikai ar uzlādes jaudas kritēriju. Konkrētajos scenārijos $PIERIGA2_{EUS1}$ ir labvēlīga ne tikai pēc efektīvās uzlādes jaudas, bet arī pēc uzticamības, datu kvalitātes un kiberdrošības profila. Citās ekspluatācijas situācijās tikai pēc jaudas izvēlēta alternatīva varētu nebūt piemērotākā.



5.13.att. Piešķiršanas metožu izvēlēto alternatīvu riska profila salīdzinājums
Avots: autora veidots, balstoties uz riska profila KPI aprēķiniem.

5.4.4. Salīdzinošās analīzes interpretācija

Salīdzinošā analīze parāda, ka vienkāršotās piešķiršanas pieejas var dot tehniski pieļaujamu rezultātu, tomēr tās nesniedz pilnu pamatojumu alternatīvas izvēlei. Tuvākā alternatīva samazina attālumu, bet var izvēlēties alternatīvu ar augstāku kiberrisku, zemāku datu kvalitāti un zemāku uzticamību. Īsākā gaidīšanas laika pieeja samazina lietotāja gaidīšanu, bet ne vienmēr nodrošina labāko kopējo uzticamības, tīkla un drošības profilu. Lielākās efektīvās uzlādes jaudas pieeja konkrētajos lēmuma momentos sakrīt ar pilno modeli, bet pati par sevi neņem vērā datu kvalitātes, kiberdrošības un tīkla risku līdzsvaru.

Pilnais *AHP–PROMETHEE* modelis nodrošina interpretējamu un daudzkritēriju pamatotu izvēli. Tā priekšrocība nav tikai tajā, ka tas atrod pieļaujamu alternatīvu, bet tajā, ka tas ļauj skaidrot, kāpēc konkrētā alternatīva ir labāka par citām. Šajā modelī vienā vērtēšanas telpā tiek integrēti lietotāja, infrastruktūras, tīkla, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības kritēriji.

No promocijas darba hipotēzes skatupunkta šis rezultāts ir būtisks. Tas apstiprina, ka dinamiska *EV* uzlādes punkta piešķiršana nav reducējama uz tuvākās, ātrākās vai jaudīgākās alternatīvas izvēli. Uz uzticamību orientētas piešķiršanas gadījumā piemērotākā alternatīva ir tā, kurai konkrētajā lēmuma brīdī ir labākais kopējais daudzkritēriju profils.

5.4.5. Sadaļas kopsavilkums

5.4. sadaļā pilnais *AHP–PROMETHEE* modelis tika salīdzināts ar trim vienkāršotām piešķiršanas pieejām: tuvākās alternatīvas, īsākā gaidīšanas laika un lielākās efektīvās uzlādes jaudas izvēli. Rezultāti parāda, ka visas metodes konkrētajos sezonālajos lēmuma momentos izvēlas formāli pieļaujamas alternatīvas, tomēr to izvēļu kvalitāte būtiski atšķiras.

Pilnais *AHP–PROMETHEE* modelis visos sezonālajos lēmuma momentos izvēlas $PIERIGA2_{EUS1}$. Tuvākās alternatīvas pieeja izvēlas $PIERIGA1_{EUS1}$, kurai ir mazāks attālums, bet augstāks kiberrisks, zemāka datu kvalitāte un zemāka uzticamība. Īsākā gaidīšanas laika pieeja izvēlas $RIGA2_{EUS2}$, kas ir pieļaujama alternatīva, tomēr tai ir vājāks kopējais uzticamības un drošības profils nekā pilnā modeļa izvēlei. Lielākās efektīvās uzlādes jaudas pieeja šajos lēmuma momentos sakrīt ar pilno modeli, tomēr šī sakritība ir konkrēto datu rezultāts, nevis pierādījums, ka pietiek ar viena kritērija izmantošanu.

Tādējādi salīdzinošā analīze apstiprina, ka pilnais *AHP–PROMETHEE* modelis sniedz plašāku un pamatotāku lēmuma interpretāciju nekā vienkāršotas pieejas. Tas ne tikai izvēlas tehniski pieļaujamu alternatīvu, bet arī līdzsvaro efektīvo uzlādes jaudu, tīkla noslodzi, jaudas rezervi, datu kvalitāti, uzticamību, kiberrisku, attālumu, gaidīšanas laiku un cenu. Nākamajā sadaļā šī validācija tiek paplašināta ar scenāriju un stresa apstākļu analīzi.

5.5. Scenāriju un stresa apstākļu analīze

Šajā sadaļā tiek analizēta izstrādātā *AHP–PROMETHEE* modeļa darbība papildu scenārijos, kuros tiek mainīti tīkla, datu kvalitātes un kiberdrošības nosacījumi. Atšķirībā no 5.3. sadaļas, kur tika vērtēta modeļa darbība bāzes sezonālajos periodos, šajā sadaļā uzmanība tiek pievērsta tam, kā modelis reaģē uz nelabvēlīgākiem vai ierobežojošākiem apstākļiem.

Scenāriju analīzes mērķis ir pārbaudīt, vai modelis saglabā piešķiršanas spēju arī tad, ja daļa alternatīvu kļūst mazāk piemērotas tīkla, datu kvalitātes vai kiberdrošības apsvērumu dēļ. Tas ir būtiski promocijas darba hipotēzes pārbaudei, jo uz uzticamību orientētam modelim jāspēj ne tikai izvēlēties labāko alternatīvu normālā režīmā, bet arī reaģēt uz situācijām, kurās pieaug ekspluatācijas risks.

5.5.1. Stresa scenāriju definīcija

Stresa scenāriji tiek veidoti, izmantojot 4. nodaļā definēto scenāriju sistēmu. Katrs scenārijs maina vienu vai vairākus lēmumu vidi ietekmējošus faktorus: tīkla noslodzi, datu kvalitāti, kiberriska līmeni vai šo faktoru kombināciju. Salīdzināšanai tiek izmantots bāzes scenārijs, kurā nav piemērota papildu degradācija vai riska korekcija.

5.16.tabula

Stresa scenāriju konfigurācija

Scenārijs	Mainīgais faktors	Mērķis	Sagaidāmā ietekme
Bāzes scenārijs	Nav papildu degradācijas	References režīms	Maksimāla salīdzināšanas bāze
Pīķa slodzes scenārijs	Paaugstināta tīkla slodze vai samazināta jaudas rezerve	Pārbaudīt tīkla kritēriju ietekmi	Var samazināt tīkla ziņā riskantu alternatīvu prioritāti
Datu kvalitātes degradācija	Samazināts datu pilnīgums vai palielināts datu vecums	Pārbaudīt datu uzticamības ietekmi	Var samazināt pieļaujamo alternatīvu kopu
Kiberdrošības scenārijs	Paaugstināts kiberrisks vai drošības sliekšņa pastiprināšana	Pārbaudīt kiberdrošības slāņa ietekmi	Var izslēgt vai pazemināt augsta riska alternatīvas
Kombinēts stress	Datu kvalitātes un kiberdrošības riska kombinācija	Pārbaudīt modeļa darbību nelabvēlīgākā režīmā	Var būtiski samazināt alternatīvu rezervi

Stresa scenāriju rezultāti tiek salīdzināti ar bāzes scenāriju pēc galvenajiem rādītājiem: piešķiršanas panākumu īpatsvara, vidējā pieļaujamo alternatīvu skaita, pieļaujamo alternatīvu īpatsvara un vidējās labākās alternatīvas *PROMETHEE neto* plūsmas. Šie rādītāji ļauj novērtēt, vai modelis saglabā lēmuma izpildāmību, alternatīvu rezervi un prioritizācijas spēju arī nelabvēlīgos apstākļos.

5.5.2. Stresa scenāriju *KPI* salīdzinājums

Stresa scenāriju *KPI* salīdzinājums apkopots 5.17. tabulā. Šajā tabulā bāzes scenārijs kalpo kā references vērtība, savukārt pārējie scenāriji parāda modeļa reakciju uz atsevišķu riska faktoru pastiprināšanu.

5.17.tabula

Stresa scenāriju vidējo *KPI* salīdzinājums

Scenārijs	Piešķiršanas panākumu īpatsvars	Vid. pieļaujamo alternatīvu skaits	Pieļaujamo alternatīvu īpatsvars	Vid. TOP-1 ϕ	Interpretācija
Normāls režīms	100,00 %	7,00	100,00 %	0,256563	References režīms; visas alternatīvas pieļaujamas
Tīkla noslodzes režīms	100,00 %	7,00	100,00 %	0,261456	Tīkla noslodzes korekcija nemaina pieļaujamo kopu lēmumi līmenī
Datu kvalitātes degradācija	0,00 %	0,00	0,00 %	—	Stingrs datu kvalitātes filtrs izslēdz visas alternatīvas
Kiberdrošības riska režīms	100,00 %	2,00	28,57 %	0,309073	Drošības filtrs sašaurina izvēles telpu līdz 2/7 alternatīvām
Kombinētais stress	100,00 %	2,00	28,57 %	0,309073	Rezultāts sakrīt ar kiberdrošības stresa režīmu; pieļaujamas 2/7 alternatīvas

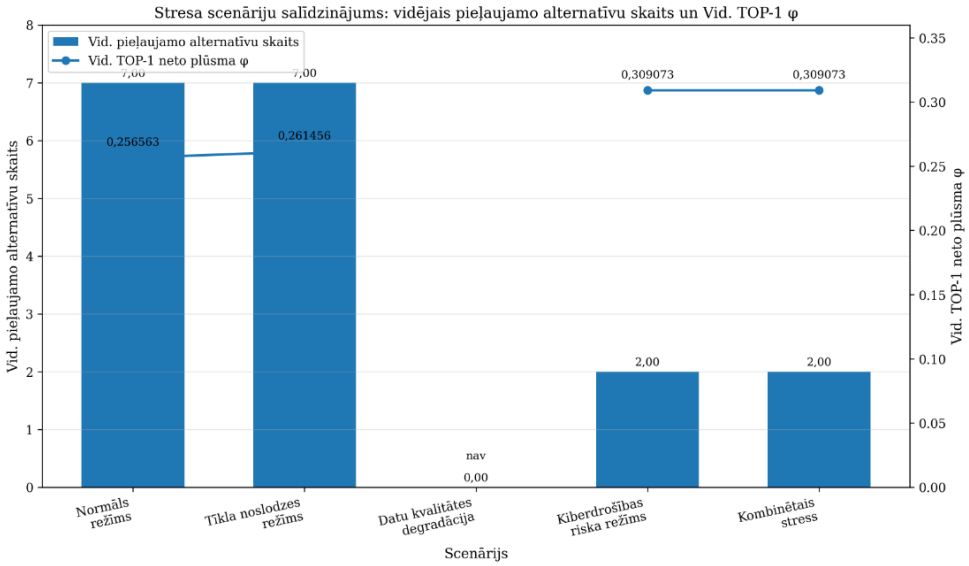
No 5.17. tabulas redzams, ka normālā režīmā visas septiņas alternatīvas ir pieļaujamas un piešķiršanas panākumu īpatsvars ir 100 %. Vidējā labākās alternatīvas *PROMETHEE neto* plūsma ir 0,256563. Šis scenārijs kalpo kā references punkts pārējo stresa scenāriju interpretācijai.

Tīkla noslodzes režīmā piešķiršanas panākumu īpatsvars saglabājas 100 %, vidējais pieļaujamo alternatīvu skaits ir 7,00, un pieļaujamo alternatīvu īpatsvars ir 100 %. Tas nozīmē, ka konkrētajā validācijas konfigurācijā tīkla noslodzes korekcija nemaina alternatīvu pieļaujamību lēmuma momenta līmenī. Tomēr vidējā *TOP-1 neto* plūsma palielinās līdz 0,261456, kas norāda, ka tīkla kritēriju korekcija ietekmē alternatīvu prioritizāciju, nevis bināro pieļaujamību.

Datu kvalitātes degradācijas scenārijā rezultāts būtiski atšķiras no pārējiem scenārijiem. Stingra datu kvalitātes filtra ietekmē pieļaujamo alternatīvu skaits samazinās līdz 0 no 7, pieļaujamo alternatīvu īpatsvars ir 0 %, un piešķiršanas panākumu īpatsvars ir 0 %. Šajā gadījumā *PROMETHEE* rangs netiek aprēķināts, jo nav nevienas pieļaujamas alternatīvas.

Kiberdrošības riska režīmā modelis saglabā 100 % piešķiršanas panākumu īpatsvaru, tomēr pieļaujamo alternatīvu skaits samazinās līdz 2 no 7 jeb 28,57 %. Tas nozīmē, ka kiberdrošības filtrs būtiski sašaurina izvēles telpu, bet pilnībā neliedz modelim sniegt rekomendāciju. Šajā scenārijā modelis joprojām spēj izvēlēties $PIERIGA2_{EUS1}$ kā labāko alternatīvu, un vidējā *TOP-1 neto* plūsma ir 0,309073.

Kombinētajā stresa scenārijā rezultāti sakrīt ar kiberdrošības riska režīmu: pieļaujamas ir 2 no 7 alternatīvām, pieļaujamo alternatīvu īpatsvars ir 28,57 %, piešķiršanas panākumu īpatsvars saglabājas 100 %, un vidējā *TOP-1 neto* plūsma ir 0,309073. Tas norāda, ka šajā konfigurācijā kiberdrošības filtrs ir dominējošais ierobežojošais faktors.



Attēls 5.14. Stresa scenāriju *KPI* salīdzinājums

Avots: autora veidots, balstoties uz eksperimentālās validācijas vides aprēķinu rezultātiem.

5.5.3. Pīķa slodzes scenārija interpretācija

Tīkla noslodzes scenārijā piešķiršanas panākumu īpatsvars saglabājas 100 %, vidējais pieļaujamo alternatīvu skaits ir 7,00, un pieļaujamo alternatīvu īpatsvars ir 100 %. Tas nozīmē, ka konkrētajā validācijas datu kopā tīkla noslodzes korekcija nav pietiekama, lai samazinātu pieļaujamo alternatīvu kopu.

Tomēr šis rezultāts nenozīmē, ka tīkla kritērijam nav nozīmes. Tīkla noslodzes režīmā vidējā labākās alternatīvas *PROMETHEE neto* plūsma palielinās no 0,256563 līdz 0,261456. Tas parāda, ka tīkla korekcija ietekmē alternatīvu savstarpējo prioritizāciju, lai gan tā neizraisa alternatīvu izslēgšanu.

Šo rezultātu var interpretēt divējādi. No vienas puses, tas parāda, ka analizētajā datu kopā nav tik izteiktu tīkla pārslodzes gadījumu, lai tīkla noslodzes scenārijs būtiski samazinātu alternatīvu pieļaujamību. No otras puses, *PROMETHEE neto* plūsmas izmaiņa parāda, ka tīkla kritēriju korekcija tomēr ietekmē alternatīvu relatīvo prioritāti. Tāpēc tīkla noslodzes scenārijs ir svarīgs ne tikai alternatīvu izslēgšanai, bet arī ranga jutīguma novērtēšanai.

5.5.4. Datu kvalitātes degradācijas scenārija interpretācija

Datu kvalitātes degradācijas scenārijā tiek piemērots stingrs datu kvalitātes filtrs. Tā rezultātā pieļaujamo alternatīvu skaits samazinās līdz 0 no 7, pieļaujamo alternatīvu īpatsvars ir 0 %, un piešķiršanas panākumu īpatsvars ir 0 %. Šis rezultāts parāda, ka datu kvalitātes slānis var būt ne tikai prioritizācijas faktors, bet arī pilnvērtīgs pieļaujamības nosacījums.

Tā kā šajā scenārijā nav nevienas pieļaujamas alternatīvas, *PROMETHEE II* rangs netiek veidots. Līdz ar to vidējā *TOP-1 neto* plūsma un ranga stabilitāte šajā scenārijā nav interpretējama. Šādu gadījumu lēmuma atbalsta sistēmas līmenī nedrīkst interpretēt kā "sliktāko alternatīvu izvēli". Pareizā interpretācija ir: modelis konstatē, ka pieejamie dati nav pietiekami uzticami, lai pamatoti rekomendētu kādu no uzlādes alternatīvām.

No praktiskās ieviešanas skatpunkta tas nozīmē, ka datu kvalitāte ir kritisks priekšnosacījums lēmuma pieņemšanai. Ja dati ir nepilnīgi, novecojuši vai neatbilst minimālajam kvalitātes slieksnim, sistēmai jāaktivizē atkāpšanās procedūra: jāpieprasa datu

aktualizācija, jāizmanto rezerves datu avots, jāmaina piešķiršanas logs vai jānodod lēmums operatoram manuālai izvērtēšanai.

Šis rezultāts ir būtisks promocijas darba hipotēzes kontekstā, jo tas parāda, ka datu kvalitāte nav dekoratīvs papildkritērijs. Tā tieši nosaka, vai dinamiska uzlādes punkta piešķiršana vispār ir izpildāma. Līdz ar to uz uzticamību orientētā modelī datu kvalitātes slānis ir jāuzskata par vienu no centrālajiem lēmuma uzticamības elementiem.

5.5.5. Kiberdrošības scenārija interpretācija

Kiberdrošības riska scenārijā pieļaujamo alternatīvu skaits samazinās līdz 2 no 7, bet pieļaujamo alternatīvu īpatsvars ir 28,57 %. Tas ir būtisks alternatīvu kopas sašaurinājums, tomēr modelis saglabā 100 % piešķiršanas panākumu īpatsvaru. Tas nozīmē, ka kiberdrošības filtrs būtiski ierobežo izvēles telpu, bet pilnībā neaptur lēmuma pieņemšanas procesu.

Šajā scenārijā vidējā labākās alternatīvas *PROMETHEE neto* plūsma ir 0,309073, kas ir augstāka nekā normālajā režīmā. Tas skaidrojams ar to, ka pēc augsta kiberriska alternatīvu izslēgšanas vai pazemināšanas atlikušās pieļaujamās alternatīvas savstarpēji diferencējas izteiktāk. Citiem vārdiem, lēmuma telpa kļūst šaurāka, bet atlikušās alternatīvas tiek skaidrāk nošķirtas pēc *PROMETHEE neto* plūsmas.

Šis rezultāts parāda, ka kiberdrošības slānis būtiski maina lēmuma telpu. Ja kiberdrošības risks pārsniedz pieļaujamo slieksni, alternatīva vairs nav tikai "mazāk vēlama"; tā var kļūt nepieļaujama. Tādējādi kiberdrošības kritērijs darbojas ne tikai kā gala ranga korekcija, bet arī kā drošības filtrs.

No praktiskās ieviešanas skatpunkta tas nozīmē, ka kiberdrošības indikatoru iekļaušana var būtiski ietekmēt rekomendāciju. Uzlādes punkts, kas ir tehniski pieejams un lietotājam ērts, var kļūt nepiemērots, ja tā datu integritātes, autentifikācijas vai komunikācijas drošības profils nav pietiekams.

5.5.6. Kombinētā stresa scenārija interpretācija

Kombinētajā stresa scenārijā tiek apvienoti datu kvalitātes un kiberdrošības riska faktori. Rezultāti rāda, ka šajā konfigurācijā pieļaujamas ir 2 no 7 alternatīvām, pieļaujamo alternatīvu īpatsvars ir 28,57 %, un piešķiršanas panākumu īpatsvars saglabājas 100 %. Vidējā *TOP-1 PROMETHEE neto* plūsma ir 0,309073.

Tas nozīmē, ka konkrētajā validācijas konfigurācijā kombinētā stresa rezultātu nosaka kiberdrošības filtrs. Ja kiberdrošības slānis jau ir būtiski sašaurinājis alternatīvu kopu līdz 2 no 7 alternatīvām, papildu datu kvalitātes faktors šajā konfigurācijā vairs nerada lielāku alternatīvu kopas samazinājumu nekā kiberdrošības scenārijs pats par sevi.

Šo rezultātu nedrīkst interpretēt kā datu kvalitātes slāņa nenozīmīgumu. Atsevišķā datu kvalitātes degradācijas scenārijā stingrs datu kvalitātes filtrs izslēdz visas alternatīvas. Taču kombinētajā scenārijā gala rezultātu nosaka tas filtrs, kas konkrētajā konfigurācijā ir dominējošais. Šajā gadījumā dominējošais ierobežojošais faktors ir kiberdrošības slānis.

Kombinētā stresa scenārijs apstiprina, ka uzticamības orientētā modelī dažādi ierobežojumi var mijiedarboties nelineāri. Vienā situācijā lēmuma izpildāmību var ierobežot datu kvalitāte, citā kiberdrošība, bet vēl citā tīkla noslodze vai jaudas rezerve. Tāpēc dinamiskai lēmuma atbalsta sistēmas videi ir svarīgi ne tikai aprēķināt gala rangu, bet arī identificēt, kurš kritēriju slānis konkrētajā brīdī visvairāk ierobežo alternatīvu kopu.

5.5.7. Sadaļas kopsavilkums

Stresa scenāriju analīze parāda, ka izstrādātais *AHP–PROMETHEE* modelis dažādos ierobežojošos apstākļos reaģē atšķirīgi. Normālā režīmā un tīkla noslodzes režīmā visas septiņas alternatīvas saglabājas pieļaujamas, un piešķiršanas panākumu īpatsvars ir 100 %. Tas

nozīmē, ka šajos scenārijos modelis spēj ne tikai sniegt rekomendāciju, bet arī saglabā pilnu alternatīvu rezervi.

Datu kvalitātes degradācijas scenārijā pieļaujamo alternatīvu skaits samazinās līdz nullei, un piešķiršanas panākumu īpatsvars ir 0 %. Šis rezultāts parāda, ka, ja datu kvalitāte neatbilst minimālajām prasībām, modelis nedrīkst mehāniski izvēlēties kādu no alternatīvām. Šādā situācijā nepieciešama atkāpšanās procedūra, datu aktualizācija vai operatora iesaiste.

Kiberdrošības riska scenārijā un kombinētajā stresa scenārijā modelis saglabā 100 % piešķiršanas panākumu īpatsvaru, tomēr pieļaujamo alternatīvu kopa sašaurinās līdz 2 no 7 alternatīvām. Tas parāda, ka kiberdrošības slānis būtiski ietekmē dinamiskās piešķiršanas elastību, bet ne vienmēr pilnībā pārtrauc lēmuma pieņemšanu.

Kopumā 5.5. sadaļas rezultāti apstiprina, ka uzticamības, datu kvalitātes un kiberdrošības kritēriji nav dekoratīvs pielikums modelim. Tie maina alternatīvu pieļaujamību, ranga struktūru un lēmuma izpildāmību. Nākamajā sadaļā tiek analizēts, cik jutīgs ir modelis pret kritēriju svaru un kiberriska penalizācijas izmaiņām.

5.6. Jutīguma analīze

Jutīguma analīzes mērķis ir pārbaudīt, cik stabils ir izstrādātais *AHP–PROMETHEE* modelis pret kritēriju svaru, kiberriska ietekmes un tīkla kritēriju nozīmīguma izmaiņām. Tā kā daudzkritēriju lēmumu modelī gala rangs ir atkarīgs gan no alternatīvu kritēriju vērtībām, gan no kritēriju svaru sadalījuma, jutīguma analīze ir nepieciešama, lai pārliecinātos, ka iegūtais rezultāts nav nejaušs vai pārmērīgi atkarīgs no vienas konkrētas svaru konfigurācijas.

Šajā sadaļā tiek analizēti četri jutīguma aspekti: bāzes un uz uzticamību orientētās svaru konfigurācijas salīdzinājums dinamiskajā periodā, kiberriska kritērija svara palielināšanas ietekme, tiešas kiberriska penalizācijas ietekme un tīkla kritēriju svara palielināšanas ietekme. Jutīguma analīzē tiek izmantota 3. nodaļā definētā svaru korekcijas loģika: sākotnējais *AHP* svars tiek reizināts ar attiecīgā scenārija reizinātāju, pēc tam visi kritēriju svari tiek normalizēti, lai to summa saglabātos vienāda ar vienu. Kritērija svara korekciju pieraksta pēc 3.5. formulas.

5.6.1. Bāzes un uz uzticamību orientētās konfigurācijas salīdzinājums

Bāzes un uz uzticamību orientētās svaru konfigurācijas salīdzinājums 5.2. nodaļā tika veikts sezonālajos lēmuma momentos. Šajā sadaļā šī pati loģika tiek paplašināta uz pilnu dinamisko validācijas periodu. Atšķirībā no atsevišķiem lēmuma momentiem pilna perioda analīze parāda, kā modelis darbojas ilgākā laikā, kad mainās slodzes profils, pieļaujamo alternatīvu kopa, tīkla noslodze, datu kvalitāte un kiberdrošības ietekme.

Pilnā augusts – decembris periodā analizēti 3672 lēmuma momenti. Rezultāti parāda, ka bāzes konfigurācijā visbiežāk izvēlētā alternatīva ir $PIERIGA2_{EUS1}$, kas izvēlēta 2832 laika soļos jeb 77,12 % gadījumu. Otrā nozīmīgākā alternatīva ir $RIGA1_{EUS1}$, kas izvēlēta 837 laika soļos jeb 22,79 % gadījumu. Savukārt $RIGA2_{EUS2}$ izvēlēta tikai 3 laika soļos jeb 0,08 % gadījumu.

Uz uzticamību orientētajā konfigurācijā izvēļu sadalījums mainās. $PIERIGA2_{EUS1}$ joprojām saglabā lielāko īpatsvaru, tomēr tās izvēļu skaits samazinās līdz 2237 laika soļiem jeb 60,92 %. Vienlaikus $RIGA1_{EUS1}$ izvēļu skaits pieaug līdz 1433 laika soļiem jeb 39,03 %. Tas nozīmē, ka uzticamības, datu kvalitātes un kiberdrošības kritēriju pastiprināšana palielina $RIGA1_{EUS1}$ konkurētspēju ilgākā dinamiskā periodā.

5.18.tabula

Izvēlēto alternatīvu skaits pilnā augusts – decembris periodā

Svaru konfigurācija	Izvēlētā alternatīva	Laika soļi	Īpatsvars
Bāzes	$PIERIGA2_{EUS1}$	2832	77,12 %
Bāzes	$RIGA1_{EUS1}$	837	22,79 %
Bāzes	$RIGA2_{EUS2}$	3	0,08 %

Uz uzticamību orientētā	$PIERIGA2_{EUS1}$	2237	60,92 %
Uz uzticamību orientētā	$RIGA1_{EUS1}$	1433	39,03 %
Uz uzticamību orientētā	$RIGA2_{EUS2}$	2	0,05 %

Šis rezultāts ir būtisks, jo tas parāda atšķirību starp atsevišķu lēmuma momentu analīzi un pilna dinamiskā perioda analīzi. Sezonālajos lēmuma momentos $PIERIGA2_{EUS1}$ saglabā pirmo vietu, savukārt pilnā dinamiskā periodā redzams, ka uz uzticamību orientētā konfigurācija būtiski palielina $RIGA1_{EUS1}$ īpatsvaru. Tātad modelis nav piesaistīts vienai nemainīgai alternatīvai, bet reaģē uz laika gaitā mainīgiem kritēriju profiliem.

Pilna perioda dinamiskie *KPI* parāda, ka abās svaru konfigurācijās piešķiršanas sekmīguma īpatsvars ir 100,00 %. Vidējais pieļaujamo *EUS* skaits ir 6,97, pieļaujamo alternatīvu zudums ir 0,39 %, un rezerves alternatīvu pieejamība ir 100,00 %. Tas nozīmē, ka svaru konfigurācijas maiņa nesamazina modeļa spēju nodrošināt derīgu piešķiršanas rezultātu.

5.19.tabula

Pilna augusts–decembris perioda dinamiskie *KPI*

Svaru konfigurācija	Bāzes	Uz uzticamību orientētā
Laika soļi	3672	3672
Piešķiršanas sekmīgums	100,00%	100,00%
Vid. pieļaujamo *EUS* skaits	6,97	6,97
Pieļaujamo alternatīvu zudums	0,39%	0,39%
Rezerves pieejamība	100,00%	100,00%
Ranga stabilitāte	85,81%	80,53%
Piešķiršanas maiņas biežums	14,19%	19,47%
Vid. $\Delta\phi_{12}$	0,07012	0,06162

Uz uzticamību orientētajā konfigurācijā ranga stabilitāte samazinās no 85,81 % līdz 80,53 %, bet piešķiršanas maiņas biežums pieaug no 14,19 % līdz 19,47 %. Šis rezultāts nav vērtējams negatīvi, jo piešķiršanas sekmīgums saglabājas 100,00 %. Tas norāda, ka uz uzticamību orientētā konfigurācija padara modeli jutīgāku pret dinamiskām uzticamības, tīkla un kiberdrošības profila izmaiņām, bet nepasliktina tā spēju piešķirt derīgu uzlādes alternatīvu.

5.6.2. Kiberriska kritērija svara jutīguma analīze

Kiberriska kritērija svara jutīguma analīzē tiek pārbaudīts, vai gala izvēle mainās, ja kiberriska kritērijam tiek piešķirta lielāka vai mazāka nozīme. Šajā testā kiberriska svara reizinātājs tiek mainīts diapazonā no 0,25 līdz 4,00. Pēc katras svara izmaiņas visi kritēriju svari tiek atkārtoti normalizēti, un *PROMETHEE II* rangs tiek aprēķināts no jauna.

Jutīguma analīze parāda, ka kiberriska kritērija svara palielināšana būtiski ietekmē alternatīvu *neto* plūsmas vērtības un savstarpējo attālumu, tomēr gala izvēle nemainās haotiski. Bāzes svaru punktā rezultātam jāsakrīt ar 5.2. sadaļas *PROMETHEE* aprēķinu, kur sezonālajos lēmuma momentos pirmo vietu saglabā $PIERIGA2_{EUS1}$. Palielinot kiberriska nozīmi, pieaug tādu alternatīvu konkurētspēja, kurām ir labāks uzticamības, datu kvalitātes un kiberdrošības profils, īpaši $RIGA1_{EUS1}$ gadījumā.

Šis rezultāts parāda, ka kiberriska kritērijs modelī nav dekoratīvs papildinājums. Tas spēj ietekmēt ne tikai gala *neto* plūsmas vērtību, bet arī alternatīvu relatīvo tuvumu pirmajai vietai. Tajā pašā laikā mērenas kiberriska svara izmaiņas nepadara modeli nestabilu, jo ranga izmaiņas notiek tikai tad, ja mainītā kritēriju nozīme būtiski pārkārto alternatīvu kopējo profilu.

5.6.3. Kiberriska penalizācijas ietekme

Papildus kiberriska svara maiņai tika analizēta arī tieša kiberriska penalizācija. Šajā gadījumā *PROMETHEE neto* plūsma tiek koriģēta, atņemot kiberriska rādītājam proporcionālu penalizācijas vērtību atbilstoši 3.23 formulai.

Šāda pieeja ļauj pārbaudīt, vai alternatīva ar labvēlīgiem lietotāja, jaudas vai tīkla kritērijiem nezaudē prioritāti, ja tai ir paaugstināts kiberdrošības risks. Penalizācijas loģika īpaši svarīga uz uzticamību orientētā modelī, jo kiberdrošības risks var būt ne tikai viens no kritērijiem, bet arī gala prioritātes korekcijas faktors.

Penalizācijas analīze parāda, ka, palielinot γ, alternatīvu koriģētā neto plūsma samazinās proporcionāli kiberriska līmenim. Lielāks samazinājums rodas alternatīvām ar augstāku kiberriska vērtību. Tādējādi augsta riska alternatīvas nevar kļūt dominējošas tikai tāpēc, ka tām ir labvēlīga cena, īsāks attālums, mazāks gaidīšanas laiks vai lielāka efektīvā uzlādes jauda.

5.20.tabula

Kiberriska penalizācijas ietekme uz labāko alternatīvu

Penalizācijas aspekts	Modeļa reakcija	Interpretācija
$\gamma = 0$	Tiek izmantota sākotnējā *PROMETHEE neto* plūsma	Kiberrisks darbojas tikai kā kritērijs
$\gamma > 0$	Neto plūsma tiek samazināta proporcionāli kiberriskam	Augstāka riska alternatīvas tiek pazemināta s
Augsts kiberrisks	Lielāka prioritātes korekcija	Drošības slānis ietekmē gala izvēli
Zems kiberrisks	Mazāka prioritātes korekcija	Drošākas alternatīvas saglabā konkurētspēju

Kiberriska penalizācija darbojas kā papildu drošības mehānisms. Tā ne tikai maina alternatīvu rangu, bet arī padara lēmumu interpretējamāku: ja kāda alternatīva zaudē prioritāti, to var tieši sasaistīt ar augstāku kiberriska rādītāju. Tas ir būtiski lēmuma atbalsta sistēmas ieviešanas kontekstā, jo operatoram jāspēj saprast, kāpēc tehniski pieejama un lietotājam ērta alternatīva netiek rekomendēta kā pirmā izvēle.

Ja gala kodā tiek ģenerēta atsevišķa kiberriska penalizācijas jutīguma karte, to var ievietot pēc 5.20. tabulas. Ja šāds attēls netiek ģenerēts, šajā sadaļā pietiek ar tabulu un formulu, jo penalizācijas loģika jau ir skaidri interpretējama.

5.6.4. Tīkla kritēriju svara jutīguma analīze

Tīkla kritēriju jutīguma analīzē tiek pastiprināti divi kritēriji: tīkla noslodze un jaudas rezerve. Šis tests ir īpaši nozīmīgs promocijas darba kontekstā, jo darba hipotēze paredz, ka dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas modelim jāspēj ņemt vērā sadales tīkla tehnisko stāvokli, nevis tikai lietotāja ērtību, uzlādes punkta pieejamību vai uzlādes jaudu.

Tīkla kritēriju svara reizinātājs tiek mainīts diapazonā no 0,50 līdz 3,00. Pēc katras svara izmaiņas tīkla noslodzes un jaudas rezerves kritēriji iegūst lielāku vai mazāku nozīmi kopējā *PROMETHEE* prioritizācijas procesā.

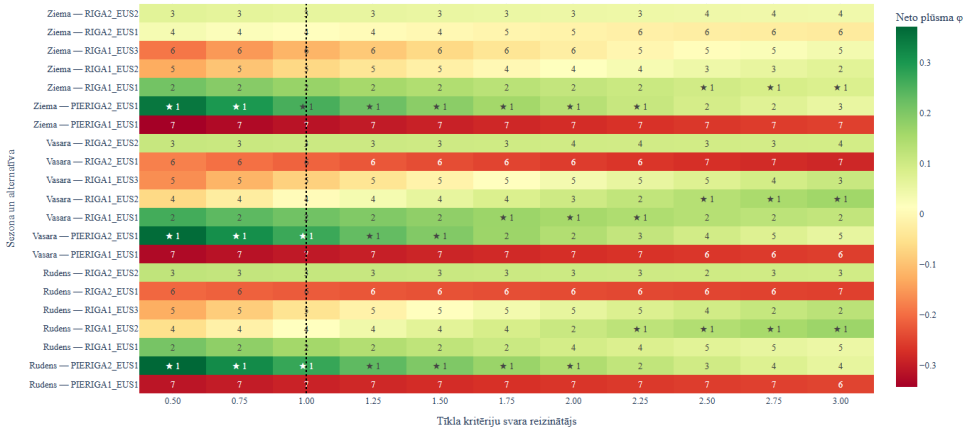
Rezultāti parāda, ka tīkla kritēriju pastiprināšana ir viens no jutīgākajiem mehānismiem gala izvēles maiņai. Atšķirībā no kiberriska svara izmaiņām, tīkla kritēriju pastiprināšana noteiktos gadījumos spēj pārkārtot pirmo vietu par labu alternatīvām ar labāku tīkla noslodzes un jaudas rezerves profilu. Tas nozīmē, ka modelis nav mehāniski piesaistīts vienai alternatīvai, bet spēj pielāgoties situācijām, kurās sadales tīkla stāvoklis kļūst par dominējošu ierobežojumu.

5.21.tabula

Tīkla kritēriju svara jutīguma interpretācija

Tīkla kritēriju svara režīms	Sagaidāmā modeļa reakcija	Interpretācija
Zems tīkla svars	Lielāka nozīme lietotāja un infrastruktūras kritērijiem	Modelis vairāk orientējas uz pieejamību, attālumu, gaidīšanu un jaudu
Bāzes tīkla svars	Sabalansēts lietotāja, tīkla un uzticamības kritēriju līdzsvars	Atbilst pamata *AHP–PROMETHEE* konfigurācijai
Augsts tīkla svars	Pieaug tīkla noslodzes un jaudas rezerves ietekme	Modelis sāk priekšroku dot tīkla ziņā labvēlīgākām alternatīvām
Ļoti augsts tīkla svars	Iespējama pirmās alternatīvas maiņa	Tīkla stāvoklis kļūst par dominējošu lēmuma faktoru

Šis rezultāts ir metodoloģiski pozitīvs. Uz uzticamību orientētam modelim jābūt pietiekami stabilam, lai nelielas svaru svārstības neradītu haotisku rangu maiņu, bet vienlaikus pietiekami adaptīvam, lai būtiski mainītos, ja kāda kritēriju grupa kļūst dominējoša. Tīkla kritēriju jutīguma analīze parāda, ka tieši šāda īpašība modelī pastāv.



5.15. att. Tīkla kritēriju svara jutīguma karte

Avots: autora veidots, balstoties uz tīkla kritēriju svara jutīguma aprēķinu rezultātiem.

5.6.5. Dominējošo alternatīvu kopsavilkums jutīguma analīzē

Jutīguma analīzes rezultāti parāda, ka modelis vienlaikus saglabā stabilitāti un pielāgojamību. Stabilitāte redzama tajā, ka piešķiršanas sekmīguma īpatsvars gan bāzes, gan uz uzticamību orientētajā konfigurācijā saglabājas 100,00 %. Arī vidējais pieļaujamo *EUS* skaits un rezerves pieejamība nemainās būtiski, kas nozīmē, ka svaru korekcija nepadara modeli neizpildāmu.

Pielāgojamība redzama izvēļu sadalījuma maiņā. Uz uzticamību orientētajā konfigurācijā $PIERIGA2_{EUS1}$ joprojām saglabā lielāko izvēļu īpatsvaru, taču $RIGA1_{EUS1}$ kļūst būtiski konkurētspējīgāka. Tas nozīmē, ka uzticamības, datu kvalitātes un kiberdrošības kritēriju pastiprināšana reāli ietekmē dinamiskās piešķiršanas rezultātu.

Tīkla kritēriju svara jutīguma analīze parāda, ka modelis spēj mainīt gala izvēli situācijās, kurās tīkla noslodze un jaudas rezerve kļūst par dominējošiem faktoriem. Šis rezultāts apstiprina, ka sadales tīkla slānis nav tikai papildinformācija, bet pilnvērtīgs lēmuma faktors.

No promocijas darba hipotēzes skatpunkta tas ir nozīmīgi, jo apliecina, ka dinamiska *EV* uzlādes punkta piešķiršana nav reducējama uz statisku prioritāšu sarakstu. Modelis spēj

saglabāt stabilu lēmuma struktūru, bet vienlaikus reaģēt uz mainīgiem tīkla, datu kvalitātes un kiberdrošības apstākļiem.

5.6.6. Sadaļas kopsavilkums

5.6. sadaļā tika veikta *AHP–PROMETHEE* modeļa jutīguma analīze. Tika pārbaudīta uz uzticamību orientētās svaru konfigurācijas ietekme, kiberriska kritērija svara maiņa, kiberriska penalizācija un tīkla kritēriju svara pastiprināšana.

Rezultāti parāda, ka modelis saglabā 100,00 % piešķiršanas sekmīgumu gan bāzes, gan uz uzticamību orientētajā konfigurācijā. Vidējais pieļaujamo *EUS* skaits abās konfigurācijās ir 6,97, pieļaujamo alternatīvu zudums ir 0,39 %, bet rezerves alternatīvu pieejamība ir 100,00 %. Tas apliecina, ka svaru konfigurācijas maiņa nesamazina modeļa spēju nodrošināt derīgu uzlādes punkta piešķiršanu.

Uz uzticamību orientētā konfigurācija maina izvēļu sadalījumu pilnā dinamiskajā periodā: $PIERIGA2_{EUS1}$ izvēļu īpatsvars samazinās no 77,12 % līdz 60,92 %, savukārt $RIGA1_{EUS1}$ īpatsvars pieaug no 22,79 % līdz 39,03 %. Tas parāda, ka uzticamības un kiberdrošības kritēriju pastiprināšana nepadara modeli statisku, bet pārkārto alternatīvu prioritātes atbilstoši uzticamākiem un drošākiem profiliem.

Kiberriska svara un kiberriska penalizācijas analīze parāda, ka drošības slānis ietekmē alternatīvu neto plūsmas un ranga interpretāciju. Savukārt tīkla kritēriju svara jutīguma analīze parāda vislielāko ietekmi uz gala izvēli, jo pie ļoti augstas tīkla kritēriju nozīmes modelis spēj pārorientēties uz tīkla ziņā labvēlīgākām alternatīvām.

Kopumā jutīguma analīze apstiprina, ka izstrādātais modelis nav pārmērīgi jutīgs pret nelielām svaru izmaiņām, bet spēj adaptēties, ja kāda kritēriju grupa kļūst dominējoša. Tas nostiprina promocijas darba pamatargumentu, ka dinamiska *EV* uzlādes punkta piešķiršana jābalsta uz interpretējamu daudzkritēriju modeli, kas vienlaikus nodrošina stabilu izvēli un spēju reaģēt uz tīkla, datu kvalitātes un kiberdrošības apstākļu izmaiņām.

5.7. Uzticamības un kiberdrošības slāņa pienesuma novērtējums

Šajā sadaļā tiek novērtēts uzticamības, datu kvalitātes un kiberdrošības slāņa pienesums dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas modelī. Iepriekšējās 5. nodaļas sadaļās tika parādīts, ka *AHP–PROMETHEE* modelis spēj aprēķināt interpretējamu alternatīvu rangu, saglabāt augstu piešķiršanas sekmīgumu un reaģēt uz sezonāliem, tīkla un kritēriju svaru izmaiņu scenārijiem. Šajā sadaļā uzmanība tiek pievērsta jautājumam, vai uzticamības un kiberdrošības komponente būtiski ietekmē gala lēmumu.

Promocijas darba kontekstā uzticamība netiek interpretēta tikai kā uzlādes iekārtas fiziska darbspēja. Tā ietver arī pieejamību, datu pilnīgumu, datu aktualitāti, komunikācijas stabilitāti, pakalpojuma nepārtrauktību, rezerves alternatīvu pieejamību un kiberdrošības riska kontroli. Tādēļ uzticamības un kiberdrošības slāņa pienesums tiek vērtēts pēc tā, kā šie indikatori ietekmē alternatīvu filtrēšanu, *PROMETHEE* rangu, *neto* plūsmu, rezerves secību un lēmuma stabilitāti.

5.7.1. Uzticamības un drošības *KPI* novērtēšanas loģika

Uzticamības un kiberdrošības slāņa ietekme tiek vērtēta ar 4. nodaļā definētajiem *KPI*: ranga stabilitāte, pāradresēšanas biežums, kiberriska penalizācijas ietekme, datu kvalitātes ietekme, pieļaujamo alternatīvu zudums un rezerves alternatīvu pieejamība. Šie rādītāji ļauj analizēt ne tikai to, kura alternatīva ir izvēlēta, bet arī to, cik stabils, noturīgs un drošs ir pats piešķiršanas process.

5.22.tabula

Uzticamības un kiberdrošības slāņa KPI interpretācija 5. nodaļas validācijā

KPI	Interpretācija	Ko tas parāda validācijā
Ranga stabilitāte	Izvēlētās pirmās alternatīvas stabilitāte laikā	Vai modelis nerada pārmērīgi biežas rekomendāciju svārstības
Pāradresēšanas biežums	Izvēlētās alternatīvas maiņas biežums	Cik bieži nepieciešams mainīt izvēlēto uzlādes punktu
Kiberriska penalizācijas ietekme	Kiberriska ietekme uz neto plūsmu	Vai kiberdrošības risks ietekmē alternatīvu prioritāti
Datu kvalitātes ietekme	Datu kvalitātes degradācijas ietekme uz alternatīvu kopu vai neto plūsmu	Vai zemas kvalitātes dati pazemina lēmuma uzticamību
Pieļaujamo alternatīvu zudums	Alternatīvu zudums pēc filtrēšanas	Cik būtiski datu, tīkla vai drošības slānis sašaurina izvēles telpu
Rezerves alternatīvu pieejamība	Otrās un nākamo alternatīvu pieejamība	Vai sistēma saglabā rezerves izvēli, ja pirmā alternatīva kļūst nepieejama

Šo *KPI* izmantošana ir būtiska, jo tikai ar gala izvēlētās alternatīvas nosaukumu nav iespējams novērtēt modeļa uzticamību. Divi modeļi var izvēlēties vienu un to pašu uzlādes punktu, bet būtiski atšķirties pēc tā, cik plaša ir rezerves alternatīvu kopa, cik stabils ir rangs, cik jutīgi modelis reaģē uz datu degradāciju un vai tiek ņemta vērā kiberriska ietekme.

5.7.2. Uzticamības *KPI* rezultāti bāzes un stresa scenārijos

Bāzes scenārijā modelis saglabā salīdzinoši augstu ranga stabilitāti visās sezonās: vasarā 85,42 %, rudenī 90,28 % un ziemā 86,46 %. Tas nozīmē, ka dinamiskā piešķiršana nav haotiska, bet vienlaikus tā nav arī statiska. Modelis saglabā spēju pārrēķināt izvēli, ja mainās pirmās alternatīvas priekšrocība vai citas alternatīvas kļūst konkurētspējīgākas.

Pāradresēšanas biežums bāzes scenārijā ir no 9,72 % līdz 14,58 %. Tas parāda, ka modelis reaģē uz mainīgiem ekspluatācijas apstākļiem, bet nerada pārmērīgi biežas rekomendāciju maiņas. Šāds rezultāts ir būtisks praktiskai lēmuma atbalsta sistēmas ieviešanai, jo pārāk bieža alternatīvu maiņa var samazināt lietotāja uzticību sistēmai, savukārt pilnīgi statisks modelis nespētu reaģēt uz tīkla, uzlādes punkta vai drošības stāvokļa izmaiņām.

5.23.tabula

Uzticamības *KPI* bāzes scenārijā

Rādītājs	Vasara	Rudens	Ziema	Interpretācija
Ranga stabilitāte	85,42%	90,28%	86,46%	Ranga stabilitāte saglabājas augsta, bet modelis saglabā dinamisku reakciju
Pāradresēšanas biežums	14,58%	9,72%	13,54%	Pāradresēšana notiek 9,72–14,58 % laika soļu robežās
Vidējais pieļaujamo *EUS* skaits	6,98	6,98	6,94	Saglabājas plaša rezerves alternatīvu kopa
Pieļaujamo alternatīvu zudums	0,30%	0,35%	0,79%	Bāzes režīmā filtrēšanas zudums ir ļoti mazs
Rezerves alternatīvu pieejamība	100,00%	100,00%	100,00%	Rezerves alternatīvas ir pieejamas visās sezonās
Vidējā $\Delta\phi_{12}$	0,06211	0,08461	0,0844	Raksturo *TOP-1* alternatīvas pārsvaru pār *TOP-2*

No rezultātiem redzams, ka bāzes scenārijā modelis vienlaikus nodrošina augstu piešķiršanas sekmīgumu un plašu rezerves alternatīvu pieejamību. Vidējais pieļaujamo alternatīvu skaits visās sezonās saglabājas tuvu septiņām alternatīvām, un rezerves alternatīvu pieejamība ir 100 %. Tas ir būtiski, jo uzticamības orientēts modelis nedrīkst optimizēt tikai

pirmo izvēli. Tam jāspēj saglabāt alternatīvu secību, kas izmantojama, ja sākotnēji izvēlētais punkts kļūst nepieejams, tiek konstatēts datu traucējums vai paaugstinās kiberrisks.

5.7.3. Datu kvalitātes ietekme uz lēmuma uzticamību

Stresa scenārijos uzticamības *KPI* mainās būtiski. Tie parāda, ka datu kvalitātes un kiberdrošības slāņi ietekmē ne tikai alternatīvu neto plūsmu, bet arī pašu pieļaujamo alternatīvu kopu. Tas ir būtiski, jo lēmuma kvalitāti nosaka ne tikai izvēlētā *TOP-1* alternatīva, bet arī tas, vai sistēmai saglabājas pietiekama rezerves alternatīvu telpa.

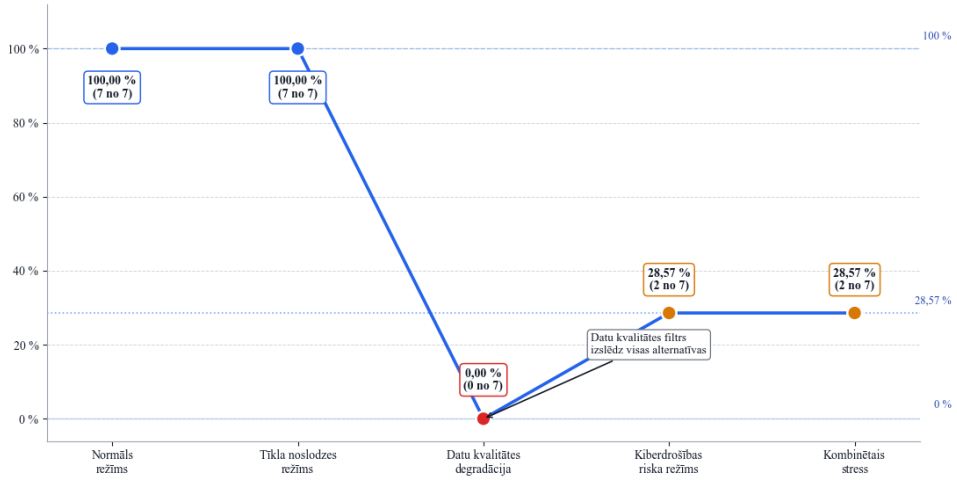
5.24.tabula

Uzticamības *KPI* bāzes scenārijā

Scenārijs	Piešķiršanas sekmīgums	Pieļaujamo alternatīvu īpatsvars	Pieļaujamo alternatīvu skaits	Rezultāts
Normāls režīms	100,00%	100,00%	7,00 no 7	$PIERIGA2_{EUS1}$
Datu kvalitātes degradācija	0,00%	0,00%	0,00 no 7	Nav pieļaujamas alternatīvas
Kiberdrošības riska režīms	100,00%	28,57%	2,00 no 7	$PIERIGA2_{EUS1}$
Kombinētais stress	100,00%	28,57%	2,00 no 7	$PIERIGA2_{EUS1}$

Šie rezultāti parāda būtisku atšķirību starp piešķiršanas sekmīgumu un lēmuma noturību. Normālā režīmā visas septiņas alternatīvas ir pieļaujamas. Savukārt datu kvalitātes degradācijas scenārijā stingrs datu kvalitātes filtrs izslēdz visas alternatīvas, tādēļ piešķiršanas sekmīgums samazinās līdz 0 %. Tas nozīmē, ka datu kvalitātes slānis nav tikai aprēķina papildinājums, tas var kļūt par kritisku pieļaujamības nosacījumu.

Kiberdrošības riska režīmā un kombinētajā stresa scenārijā pieļaujamas ir tikai 2 no 7 alternatīvām jeb 28,57 %. Tomēr modelis joprojām saglabā spēju izvēlēties pieļaujamu alternatīvu. Tas parāda, ka kiberdrošības filtrs būtiski sašaurina izvēles telpu, bet pilnībā neaptur piešķiršanas procesu, ja vismaz daļa alternatīvu saglabā pietiekamu drošības profilu.



5.16. att. Pieļaujamo alternatīvu īpatsvara izmaiņas bāzes un stresa scenārijos

Avots: autora veidots, balstoties uz eksperimentālās validācijas vides aprēķinu rezultātiem

5.7.4. Kiberdrošības riska ietekme uz alternatīvu prioritāti

Datu kvalitātes slānis ietekmē lēmumu divos līmeņos. Pirmkārt, tas var darboties kā filtrēšanas nosacījums, ja datu pilnīgums vai aktualitāte ir zem pieļaujamās robežas. Otrkārt, tas var darboties kā *PROMETHEE* kritērijs, kas pazemina alternatīvas prioritāti, ja dati par tās statusu, slodzi vai drošības stāvokli nav pietiekami ticami.

Gala konfigurācijā datu kvalitātes degradācijas scenārijs parāda stingru filtra ietekmi: pieļaujamo alternatīvu īpatsvars samazinās līdz 0 %. Šis rezultāts nozīmē, ka sistēma nedrīkst rekomendēt uzlādes punktu, ja dati par tā stāvokli nav pietiekami ticami. Šāda pieeja ir pamatota uzticamības orientētā lēmumu modelī, jo lēmums, kas balstīts uz nepilnīgiem vai novecojušiem datiem, nav auditējams un ekspluatācijas ziņā drošs.

EV uzlādes infrastruktūras kontekstā datu kvalitātes problēmas var izpausties kā novecojis uzlādes punkta statuss, nepilnīgi noslodzes dati, neatjaunināta informācija par pieejamo jaudu vai nepietiekami ticams kiberdrošības indikators. Šādos gadījumos modelim ir jāierobežo vai jāaptur rekomendācija, nevis jāpieņem, ka trūkstošie dati ir līdzvērtīgi kvalitatīviem datiem.

Kiberdrošības slānis modelī tiek izmantots trīs veidos: kā filtrs, kā *PROMETHEE* kritērijs un kā *neto* plūsmas penalizācijas mehānisms. Šāda trīslīmeņu integrācija nodrošina, ka kiberdrošības risks var ietekmēt gan alternatīvas pieļaujamību, gan tās relatīvo prioritāti starp citām alternatīvām.

Jutīguma analīze 5.6. sadaļā parādīja, ka kiberriska penalizācija samazina koriģēto *neto* plūsmu, bet analizētajā diapazonā ne vienmēr maina dominējošo alternatīvu. Tas nozīmē, ka kiberriska penalizācija darbojas kā drošības korekcija, nevis mehāniska alternatīvu izslēgšana visos gadījumos. Savukārt kiberdrošības stresa scenārijā, kur drošības slieksnis tiek pastiprināts, pieļaujamo alternatīvu īpatsvars samazinās līdz 28,57 %. Tas nozīmē, ka kiberrisks var kļūt par kritisku pieļaujamības faktoru.

5.25.tabula

Kiberdrošības slāņa ietekmes kopsavilkums

Novērtējuma elements	Gala rezultāts	Interpretācija
Kiberdrošības stresa scenārijs	Pieļaujamo alternatīvu īpatsvars 28,57 %; pieļaujamas 2 no 7 alternatīvām	Drošības filtrs būtiski sašaurina izvēles telpu, bet modelis saglabā piešķiršanas spēju
Kombinētais stress	Pieļaujamo alternatīvu īpatsvars 28,57 %; izvēle $PIERIGA2_{EUS1}$	Kombinētā scenārija rezultātu nosaka kiberdrošības filtrs
Datu kvalitātes degradācija	Piešķiršanas sekmīgums 0 %; pieļaujamas 0 no 7 alternatīvām	Datu kvalitātes filtrs gala konfigurācijā ir stingrs un var pilnībā apturēt piešķiršanu
Uz uzticamību orientētā svaru konfigurācija	Uzticamības, jaudas rezerves, kiberriska, datu kvalitātes un tīkla noslodzes kopējais svars 78,46 %	Uzticamības un drošības dimensija tiek pastiprināta, neizslēdzot pārējos kritērijus

Šie rezultāti apstiprina promocijas darba pamatideju: *EV* uzlādes punkta izvēle kiberfiziskā vidē nav tikai enerģētikas vai transporta lēmums. Tā ietver arī digitālās uzticamības, datu kvalitātes un drošības dimensiju. Uzlādes punkts, kas ir tehniski pieejams un lietotājam ērts, var kļūt nepiemērots, ja tā datu integritātes, autentifikācijas vai komunikācijas drošības profils nav pietiekams.

5.7.5. *OCPP/WUSTL* kiberdrošības validācijas slāņa kopsavilkums

Papildus *MCDM* scenāriju analīzei promocijas darba eksperimentālajā vidē tika izmantots kiberdrošības datu slānis, kas balstīts uz *OCPP* lietotnes līmeņa, *OCPP TCP/IP* līmeņa un *WUSTL-IIoT* datu kopu apstrādi. *OCPP* lietotnes līmeņa un *OCPP TCP/IP* līmeņa datu slāņi iegūti no *Federated OCPP 1.6 Intrusion Detection Dataset*, savukārt *WUSTL-IIoT*

2021 izmantota kā papildu industriālā *IoT* kiberdrošības datu kopa [59], [60]. Šī slāņa mērķis nav aizstāt *EVSE* tehnisko drošības auditu, bet pamatot kiberriska indikatora izmantošanu kā lēmumu ietekmējošu *MCDM* kritēriju.

Kiberdrošības datu slāņa rezultāti rāda, ka uzbrukuma un normālas datplūsmas atšķiršana ir atkarīga no datu domēna un pazīmju struktūras. *OCPP TCP/IP* datu slānī iegūtais *AUC* ir 0,911, kas norāda uz labu atdalāmību starp normālu un anomālu komunikācijas uzvedību. *OCPP* lietotnes līmeņa datu slānī *AUC* ir 0,723, kas norāda uz mērenu klasifikācijas spēju. Savukārt *WUSTL-IIoT* datu slānis jāinterpretē piesardzīgi, jo tas atspoguļo plašāku industriālā *IoT* domēnu un nav tieši identisks *EV* uzlādes infrastruktūras komunikācijas videi.

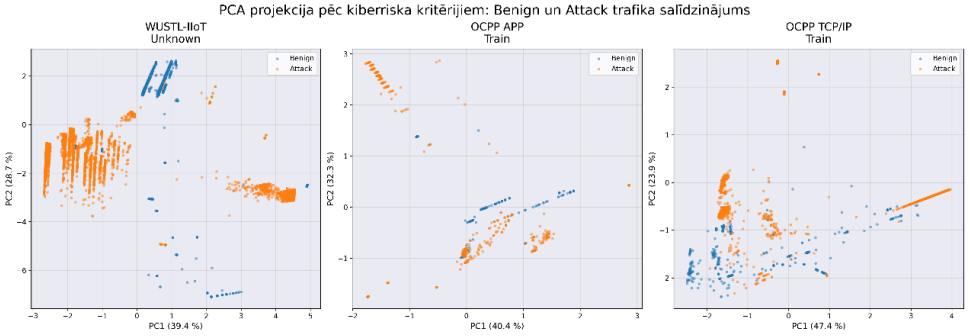
5.26.tabula

Kiberdrošības datu slāņu kopsavilkums

Datu slānis	*OCPP* lietotnes līmenis, apmācības dati	*OCPP TCP/IP* līmenis, apmācības dati	*WUSTL-IIoT 2021*
Rindas	3020	3090	1 194 464
Uzbrukumu īpatsvars	80,00%	80,00%	7,28%
Vid. riska rādītājs	0,234	0,456	0,582
P95 riska rādītājs	0,339	0,645	0,614
AUC	0,723	0,911	0,034
Recall	0,532	0,528	0,009
F1	0,688	0,685	0,01
Interpretācija	Vidēja lietotnes līmeņa anomāliju atdalāmība; izmantojams protokola līmeņa indikācijai	Labāka komunikācijas līmeņa anomāliju atdalāmība; piemērots komunikācijas riska indikatoram	Papildu industriālā IIoT domēna slānis; rezultāti jāinterpretē ar domēna pārnesamības ierobežojumu

Avots: autora aprēķini, balstoties uz OCPP APP, OCPP TCP/IP un WUSTL-IIoT datu slāņu apstrādi; OCPP datu slāņi balstīti uz Federated OCPP 1.6 Intrusion Detection Dataset [59], bet WUSTL-IIoT 2021 izmantota kā papildu IIoT kiberdrošības datu kopa [60]

Šo rezultātu nozīme promocijas darbā ir metodoloģiska. Tie parāda, ka kiberdrošības risku iespējams kvantitatīvi reprezentēt kā indikatoru, ko pēc tam var izmantot *MCDM* modelī. Vienlaikus šie rezultāti neļauj apgalvot, ka konkrētajiem validācijas objektiem ir veikts pilns kiberdrošības audits. Tādēļ kiberdrošības datu slānis tiek izmantots kā scenāriju un riska indikatora pamatojums, nevis kā tiešs objektu drošības sertifikācijas rezultāts.



5.17.att. Kiberdrošības datu slāņu *PCA* projekcija: normālas un uzbrukuma datplūsmas salīdzinājums.

Avots: autora veidots, balstoties uz OCPP APP, OCPP TCP/IP un WUSTL-IIoT datu slāņu aprēķinu rezultātiem.

5.27.tabula

PCA datu slāņu kopsavilkums

Datu slānis	Izmantotās rindas	Normālas datplūsmas punkti	Uzbrukuma datplūsmas punkti	Kritēriju skaits	PC1, %	PC2, %	PC1 + PC2, %
WUSTL-IIoT 2021	16 000	8000	8000	10	39,39	28,71	68,09
OCPP lietotnes līmenis, apmācības dati	3020	604	2416	7	40,4	32,31	72,71
OCPP TCP/IP līmenis, apmācības dati	3090	618	2472	8	47,35	23,89	71,24

PCA projekcija parāda, ka *OCPP* datu slāņos pirmās divas galvenās komponentes izskaidro vairāk nekā 70 % no pazīmju kopējās dispersijas. *OCPP TCP/IP* līmenī *PC1* un *PC2* kopā izskaidro 71,24 %, savukārt *OCPP* lietotnes līmenī 72,71 %. Tas nozīmē, ka izvēlētās pazīmes satur pietiekamu struktūru, lai tās izmantotu kiberriska indikatora konstruēšanā.

WUSTL-IIoT slānī *PC1* un *PC2* kopā izskaidro 68,09 % no dispersijas. Šis slānis promocijas darbā saglabājams kā papildu kiberfiziska*/IIoT* domēna validācijas piemērs, nevis kā tiešs *OCPP* vai *EVSE* drošības veiktspējas pierādījums. Tas ir svarīgs ierobežojums, jo industriālā *IoT* datu domēns un *EV* uzlādes infrastruktūras komunikācijas domēns nav pilnībā identiski.

5.7.6. Uzticamības un kiberdrošības slāņa praktiskais pienesums

Uzticamības un kiberdrošības slāņa praktiskais pienesums izpaužas vairākos līmeņos.

Pirmkārt, tas uzlabo lēmuma interpretējamību. Modelis var izskaidrot, kāpēc netiek izvēlēta alternatīva, kas ir tuvāka vai ar īsāku gaidīšanas laiku, ja tai ir sliktāka datu kvalitāte, augstāks kiberrisks vai zemāka uzticamība.

Otrkārt, tas samazina risku rekomendēt alternatīvu, par kuru nav pietiekami ticamu datu. Datu kvalitātes degradācijas scenārijā stingrais filtrs pilnībā aptur piešķiršanu, ja dati nav pietiekami ticami. Tas ir būtisks rezultāts, jo uzticamības orientētā modelī nav pieļaujama rekomendācija, kas balstīta uz nekvalitatīviem vai novecojušiem datiem.

Treškārt, kiberdrošības slānis ļauj izvairīties no augsta riska alternatīvu rekomendēšanas. Kiberdrošības scenārijā pieļaujamo alternatīvu īpatsvars samazinās līdz 28,57 %, parādot, ka drošības slieksnis var būt būtisks lēmuma ierobežojums.

Ceturtkārt, pilna ranga izmantošana nodrošina rezerves alternatīvu pieejamību. Tas ir būtiski, jo uzlādes infrastruktūras stāvoklis var mainīties īsā laikā. Ja primārā alternatīva kļūst nepieejama vai riskanta, sistēma var izmantot nākamo alternatīvu rangā vai veikt dinamisku pārrēķinu.

Piektkārt, šis slānis sasaista *EV* uzlādes punkta piešķiršanu ar kiberfiziskās infrastruktūras realitāti. Mūsdienu *EVSE* nav tikai elektrības pieslēguma punkts. Tas ir digitāli savienots mezgls ar komunikācijas, autentifikācijas, datu integritātes un pakalpojuma pieejamības prasībām.

5.7.7. Sadaļas kopsavilkums

5.7. sadaļā tika novērtēts uzticamības, datu kvalitātes un kiberdrošības slāņa pienesums izstrādātajā dinamiskās *EV* uzlādes punkta piešķiršanas modelī. Rezultāti parāda, ka šis slānis

būtiski ietekmē ne tikai gala rangu, bet arī alternatīvu pieļaujamību, rezerves secību, ranga stabilitāti un lēmuma interpretējamību.

Bāzes scenārijā modelis saglabā augstu ranga stabilitāti, mērenu pāradresēšanas biežumu un plašu rezerves alternatīvu kopu. Datu kvalitātes degradācijas scenārijā gala konfigurācijā pieļaujamo alternatīvu īpatsvars samazinās līdz 0 %, kas nozīmē, ka sistēma neizdod rekomendāciju, ja dati nav pietiekami ticami. Kiberdrošības scenārijā pieļaujamo alternatīvu īpatsvars samazinās līdz 28,57 %, bet piešķiršanas sekmīgums saglabājas 100 %, jo modelis spēj atrast drošības ziņā pieļaujamu alternatīvu.

Kiberdrošības datu slāņu kopsavilkums parāda, ka *OCPP TCP/IP, OCPP* lietotnes līmeņa un *WUSTL-IIoT* dati var tikt izmantoti kiberriska indikatora metodoloģiskai pamatošanai, vienlaikus atzīstot domēna pārnesamības ierobežojumus. *OCPP TCP/IP* līmeņa *AUC* vērtība 0,911 norāda uz labu komunikācijas līmeņa pazīmju atdalāmību, savukārt *OCPP* lietotnes līmeņa *AUC* vērtība 0,723 norāda uz mērenu, bet metodoloģiski izmantojamu atdalāmību.

Tādējādi 5.7. sadaļas rezultāti apstiprina, ka uzticamības un kiberdrošības slānis nav dekoratīvs papildinājums modelim. Tas ir viens no galvenajiem promocijas darba pienesumiem, jo ļauj dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanu skatīt kā kiberfizisku, datu kvalitātes un drošības ziņā atkarīgu lēmumu problēmu.

5.8. Piektās nodaļas secinājumi

Piektajā nodaļā tika veikta izstrādātā *AHP–PROMETHEE* balstītā dinamiskās *EV* uzlādes punkta piešķiršanas modeļa validācija. Validācijā tika izmantota 4. nodaļā definētā eksperimentālā vide, sezonālie validācijas periodi, uzlādes infrastruktūras alternatīvas, filtrēšanas nosacījumi, kritēriju sistēma un *KPI* rādītāji. Nodaļas rezultāti ļauj novērtēt, vai izstrādātais modelis spēj nodrošināt interpretējamu, dinamisku un uz uzticamību orientētu *EV* uzlādes punkta izvēli.

Validācijas rezultāti apstiprina, ka izstrādātais *AHP–PROMETHEE* modelis spēj aprēķināt pilnu un interpretējamu uzlādes punktu rangu. Katram lēmuma momentam iespējams noteikt pozitīvo plūsmu, negatīvo plūsmu, *neto* plūsmu, pirmo alternatīvu un rezerves alternatīvu secību. Tas apliecina, ka modelis nav tikai vienas alternatīvas izvēles mehānisms, bet pilnvērtīga lēmumu atbalsta metode dinamiskai uzlādes punktu prioritizācijai.

Bāzes *AHP* svaru konfigurācijā uzticamības, jaudas rezerves, kiberriska, datu kvalitātes un tīkla noslodzes kritēriji kopā veido 73,710 % no kopējā svara, tādēļ modelis ir uz uzticamību orientēts, nevis tikai uz lietotāja ērtību balstīts.

Uz uzticamību orientētajā svaru konfigurācijā šo kritēriju kopējais svars palielinās līdz 78,463 %, savukārt attāluma, gaidīšanas laika un cenas kopējais svars samazinās līdz 12,791 %.

Sezonālo *PROMETHEE II* lēmuma momentu rezultāti parāda, ka $PIERIGA2_{EUS1}$ saglabā pirmo vietu visos trīs analizētajos scenārijos vasarā, rudenī un ziemā gan bāzes, gan uz uzticamību orientētajā konfigurācijā.

$RIGA1_{EUS1}$ visos sezonālajos lēmuma momentos saglabā otro vietu, tādēļ tā interpretējama kā galvenā rezerves alternatīva, ja pirmā izvēle kļūst nepieejama vai riskanta.

Uz uzticamību orientētā svaru konfigurācija nemaina pirmo alternatīvu, bet samazina starpību starp pirmo un otro vietu, palielinot $RIGA1_{EUS1}$ relatīvo konkurētspēju.

Bāzes scenārija dinamiskajā validācijā piešķiršanas panākumu īpatsvars visās sezonās sasniedz 100 %, kas apliecina modeļa spēju katrā lēmuma momentā identificēt vismaz vienu pieļaujamu alternatīvu.

Bāzes scenārijā pieļaujamo alternatīvu īpatsvars saglabājas ļoti augsts: 99,70 % vasarā, 99,65 % rudenī un 99,21 % ziemā, tādēļ filtrēšanas mehānisms nav pārmērīgi ierobežojošs.

Ranga stabilitāte bāzes scenārijā ir 85,42 % vasarā, 90,28 % rudenī un 86,46 % ziemā, kas parāda, ka modelis ir dinamisks, bet neveic haotiskas rekomendāciju maiņas.

Salīdzinājums ar vienkāršotām piešķiršanas pieejām parāda, ka tuvākā vai ātrāk pieejamā alternatīva ne vienmēr ir piemērotākā, ja vienlaikus tiek vērtēta uzticamība, datu kvalitāte, tīkla pieļaujamība un kiberdrošība.

Stresa scenāriju analīze parāda, ka datu kvalitātes degradācijas gadījumā pieļaujamo alternatīvu īpatsvars samazinās līdz 0 %, tādēļ modelis pamatoti neizdod rekomendāciju, ja dati nav pietiekami ticami.

Kiberdrošības riska un kombinētā stresa scenārijos pieļaujamo alternatīvu skaits samazinās līdz 2 no 7 jeb 28,57 %, tomēr piešķiršanas panākumu īpatsvars saglabājas 100 %.

Jutīguma analīze parāda, ka modelis saglabā piešķiršanas spēju arī pie svaru konfigurācijas izmaiņām, bet spēj mainīt alternatīvu prioritāti, ja pieaug uzticamības, kiberdrošības vai tīkla kritēriju nozīme.

Kopumā 5. nodaļas rezultāti apstiprina promocijas darba hipotēzi metodoloģiskās un scenāriju validācijas līmenī: izstrādātais *AHP–PROMETHEE* modelis nodrošina interpretējamu, dinamisku un riskam pielāgotu *EV* uzlādes punkta piešķiršanu, kas ir pamatotāka nekā vienkāršotas vienkritērija izvēles pieejas.

6. REZULTĀTU DISKUSIJA, IEVIEŠANAS IESPĒJAS UN PĒTĪJUMA IEROBEŽOJUMI

6.1. Rezultātu interpretācija un hipotēzes izvērtējums

Promocijas darba mērķis bija izstrādāt un validēt daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas modeli uzticamības orientētai dinamiskai elektrisko transportlīdzekļu uzlādes punkta piešķiršanai. Šī mērķa sasniegšanai darbā tika izveidota metodoloģija, kas apvieno *AHP* kritēriju svaru noteikšanai, *PROMETHEE* alternatīvu prioritizācijai, dinamisku alternatīvu filtrēšanu, pilna ranga un rezerves alternatīvu secības noteikšanu, kā arī sadales tīkla, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības kritēriju integrāciju vienotā lēmumu modelī.

Iepriekšējās nodaļās tika parādīts, ka elektrisko transportlīdzekļu uzlādes punkta izvēli nevar reducēt tikai uz tuvākās, ātrākās vai jaudīgākās stacijas izvēli. Šādas vienkāršotas pieejas var būt lietderīgas kā sākotnēji orientieri, taču tās neņem vērā uzlādes punkta faktisko pieejamību, sadales tīkla noslodzi, jaudas rezervi, datu aktualitāti, komunikācijas uzticamību un kiberdrošības riskus. Tādēļ šajā darbā uzlādes punkta piešķiršana tika interpretēta kā dinamiska daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas problēma, kur gala izvēle veidojas no vairāku savstarpēji konfliktējošu kritēriju līdzsvara.

Izstrādātais *AHP–PROMETHEE* modelis sasniedz promocijas darba mērķi metodoloģiskās un scenāriju validācijas līmenī. *AHP* metode nodrošina kritēriju hierarhisku strukturēšanu un relatīvās nozīmības noteikšanu, savukārt *PROMETHEE* metode ļauj aprēķināt alternatīvu prioritātes, izmantojot pārākuma attiecību plūsmas. Šāda pieeja nodrošina ne tikai gala rekomendāciju, bet arī tās skaidrojumu: katrai alternatīvai var aprēķināt pozitīvo, negatīvo un *neto* plūsmu, kas ļauj interpretēt tās priekšrocības un trūkumus attiecībā pret citām pieļaujamām alternatīvām [27], [29], [31].

Būtisks darba rezultāts ir tas, ka modelis nodrošina pilnu uzlādes punktu rangu, nevis tikai vienu izvēlēto alternatīvu. *PROMETHEE II neto* plūsma šajā darbā kalpo kā gala prioritātes indikators, savukārt pilnais rangs ļauj noteikt galveno un rezerves alternatīvas. Tas ir nozīmīgi dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas kontekstā, jo reālā ekspluatācijā izvēlētais uzlādes punkts var kļūt aizņemts, nedarbspējīgs, tīkla ziņā mazāk pieļaujams vai kiberdrošības ziņā riskantāks. Tādēļ lēmuma noturība nav atkarīga tikai no pirmās alternatīvas, bet arī no tā, vai sistēma spēj saglabāt strukturētu rezerves izvēļu secību.

Sezonālo *PROMETHEE II* lēmuma momentu rezultāti parāda, ka $PIERIGA2_{EUS1}$ saglabā pirmo vietu visos trīs analizētajos sezonālajos scenārijos vasarā, rudenī un ziemā gan bāzes, gan uz uzticamību orientētajā svaru konfigurācijā. $RIGA1_{EUS1}$ visos sezonālajos lēmuma momentos saglabā otro vietu, tādēļ šī alternatīva interpretējama kā galvenā rezerves izvēle gadījumā, ja primārā alternatīva kļūst nepieejama, tīkla ziņā mazāk piemērota vai drošības ziņā riskantāka.

Šis rezultāts ir būtisks nevis tāpēc, ka viena konkrēta alternatīva vienmēr būtu universāli labākā, bet tāpēc, ka modelis spēj konsekventi aprēķināt alternatīvu rangu un saglabāt interpretējamu rezerves secību. Dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas uzdevumā piemērotākā alternatīva ir atkarīga no konkrētā laika momenta, *EV* pieprasījuma, pieejamās jaudas, gaidīšanas laika, tīkla noslodzes, jaudas rezerves, datu kvalitātes un kiberdrošības riska. Tādēļ validācijas rezultātu galvenā nozīme ir modeļa spējā atkārtoti un skaidrojami rangēt alternatīvas, nevis vienreizēji identificēt vienu nemainīgu uzlādes punktu.

Salīdzinājumā ar viena kritērija pieejām pilnais modelis sniedz pamatotāku lēmumu. Tuvākās stacijas izvēle var samazināt maršruta novirzi, bet tā ne vienmēr nodrošina labāko uzticamības, datu kvalitātes vai kiberdrošības profilu. Īsākā gaidīšanas laika pieeja var būt lietotājam pievilcīga, tomēr tā pati par sevi neņem vērā sadales tīkla noslodzi, jaudas rezervi un alternatīvas risku. Lielākās pieejamās jaudas pieeja var dot labu rezultātu konkrētos lēmuma

momentos, taču tā nav pietiekama kā vispārīgs lēmumu mehānisms, jo neietver drošības, uzticamības un datu kvalitātes aspektus. Līdz ar to izstrādātais *AHP–PROMETHEE* modelis nav viena kritērija maksimizācijas vai minimizācijas modelis, bet kompromisa noteikšanas mehānisms starp lietotāja, infrastruktūras, tīkla un drošības kritērijiem.

AHP svaru analīze parāda, ka modelis pēc būtības ir uz uzticamību orientēts. Bāzes konfigurācijā uzticamības, jaudas rezerves, kiberriska, datu kvalitātes un tīkla noslodzes kritēriju kopējais svars ir 73,710 % no kopējā svara. Uz uzticamību orientētajā konfigurācijā šis kritēriju bloks palielinās līdz 78,463 %, savukārt attāluma, gaidīšanas laika un cenas kopējais svars samazinās līdz 12,791 %. Tas nozīmē, ka modelis nav lietotāja komforta modelis šaurā nozīmē, bet gan lēmumu pieņemšanas pieeja, kurā lietotāja vajadzības tiek līdzsvarotas ar infrastruktūras darbspēju, sadales tīkla pieļaujamību, datu ticamību un kiberdrošības risku.

Dinamiskās pārrēķina loģikas rezultāti parāda, ka modelis nav statisks vienreizējs aprēķins. Tas spēj reaģēt uz sezonāliem apstākļiem, tīkla noslodzes izmaiņām, kritēriju svaru maiņu un kiberdrošības riska pieaugumu. Sezonālajos validācijas scenārijos galvenā rekomendācija saglabājas stabila, tomēr *neto* plūsmas starpība starp pirmo un otro alternatīvu mainās atkarībā no svaru konfigurācijas un ekspluatācijas apstākļiem. Tas nozīmē, ka modelis saglabā stabilu izvēli, ja dominējošā alternatīva ir pietiekami pārliecinoša, bet vienlaikus ļauj interpretēt ranga jutīgumu, ja mainās kritēriju prioritātes vai sistēmas stāvoklis.

Šis aspekts ir būtisks uz uzticamību orientētas piešķiršanas pieejas kontekstā. Uzticamības principos balstīta dinamiska uzlādes punkta piešķiršana nenozīmē, ka izvēlei vienmēr jāpaliek nemainīgai. Nemainīgs rangs var liecināt ne tikai par stabilitāti, bet arī par nepietiekamu modeļa spēju pielāgoties mainīgiem ekspluatācijas, datu kvalitātes vai kiberdrošības apstākļiem. Šajā darbā uzticamība tiek interpretēta kā spēja nodrošināt stabilu un pamatotu lēmumu normālos apstākļos, vienlaikus saglabājot spēju pārrēķināt prioritātes, ja mainās tīkla, infrastruktūras, datu kvalitātes vai drošības situācija. Tādēļ pāradresēšana vai rezerves alternatīvu secības maiņa nav automātiski negatīvs rezultāts. Tā ir nepieciešama dinamiskas lēmumu atbalsta sistēmas darbības īpašība, ja tā notiek strukturēti un izskaidrojami.

Sadales tīkla kritēriju iekļaušana modelī nodrošina lēmuma pieņemšanas slāni, kurā tiek ņemts vērā sadales tīkla darbības režīms. Tas nozīmē, ka uzlādes punkta izvēle tiek vērtēta ne tikai no lietotāja un uzlādes infrastruktūras perspektīvas, bet arī no sadales tīkla ekspluatācijas viedokļa. Tīkla noslodze, pieejamā jaudas rezerve un tehniskās pieļaujamības kritēriji ļauj identificēt alternatīvas, kas konkrētajā brīdī lietotājam var būt ērtas, bet no tīkla ekspluatācijas viedokļa mazāk vēlamas. Šāds modelis ir īpaši nozīmīgs situācijās, kad EV uzlādes slodze koncentrējas noteiktās vietās vai laikos un var ietekmēt transformatoru, līniju vai lokālo pieslēgumu noslodzi.

Vienlaikus sadales tīkla darbības režīmu ievērojošs slānis nav interpretējams kā mehāniska visu tīkla ziņā jutīgo alternatīvu izslēgšana. Modelis ļauj šīs alternatīvas pazemināt prioritāšu rangā vai izslēgt tikai tad, ja to tehniskie rādītāji pārsniedz pieļaujamos sliekšņus. Tādējādi tīkla darbības režīma integrācija nepārvērš modeli par tīkla ierobežojumu optimizācijas algoritmu, bet papildina daudzkritēriju piešķiršanas loģiku ar sadales tīkla ekspluatācijas nosacījumiem. Promocijas darba mērķis nav izstrādāt pilnvērtīgu jaudas plūsmu aprēķinu rīku, bet gan integrēt tīkla pieļaujamības informāciju operatīvā uzlādes punkta izvēles modelī.

Kiberdrošības un datu kvalitātes slānis nostiprina modeļa uzticamības orientāciju. *EV* uzlādes infrastruktūra ir kiberfiziska sistēma, kurā uzlādes punkta darbspēju ietekmē ne tikai elektroenerģijas piegāde un uzlādes jauda, bet arī komunikācijas kanāli, autentifikācija, autorizācija, mērījumu datu integritāte, operatora sistēmas un datu aktualitāte. Tādēļ modelī kiberrisks un datu kvalitāte netiek interpretēti kā ārēji komentāri pēc lēmuma pieņemšanas, bet kā pilnvērtīgi lēmuma kritēriji. Tie var ietekmēt filtrēšanu, *PROMETHEE* rangu un gala *neto* plūsmas korekciju [12], [13], [24], [25].

Validācijas rezultāti parāda, ka kiberriska un datu kvalitātes kritēriji var pazemināt riskantāku vai mazāk uzticamu alternatīvu prioritāti. Šis rezultāts ir būtisks, jo tas apliecina, ka uz uzticamību orientēta piešķiršanas pieeja netiek īstenota tikai kā teorētisks kritēriju kopums, bet faktiski ietekmē lēmuma rezultātu. Ja alternatīva ir tehniski pieejama, bet tai ir sliktāks datu kvalitātes vai kiberdrošības profils, modelis spēj samazināt tās prioritāti. Šāda pieeja ir atbilstoša mūsdienu *EV* uzlādes infrastruktūras pārvaldības vajadzībām, kur lēmuma ticamība ir atkarīga ne tikai no fiziskās infrastruktūras, bet arī no datu un komunikācijas slāņa uzticamības.

Bāzes scenārijā pieļaujamo alternatīvu īpatsvars saglabājas augsts: 99,70 % vasarā, 99,65 % rudenī un 99,21 % ziemā. Tas parāda, ka normālos ekspluatācijas apstākļos modelis saglabā augstu piešķiršanas spēju un neizslēdz alternatīvas nepamatoti. Savukārt stresa scenāriji demonstrē filtrēšanas slāņa nozīmi. Datu kvalitātes degradācijas scenārijā pieļaujamo alternatīvu skaits samazinās līdz 0 no 7, un piešķiršanas panākumu īpatsvars ir 0 %. Šis rezultāts nav interpretējams kā modeļa kļūme, bet gan kā uzticamības orientētas pieejas pazīme: ja datu kvalitāte neatbilst minimālajām prasībām, modelim nav jāizdod automātiska rekomendācija. Šādā gadījumā nepieciešama datu aktualizācija, atkāpšanās procedūra vai operatora iesaiste.

Kiberdrošības riska un kombinētajā stresa scenārijā pieļaujamo alternatīvu kopa sašaurinās līdz 2 no 7 alternatīvām jeb 28,57 %, tomēr piešķiršanas panākumu īpatsvars saglabājas 100 %. Tas nozīmē, ka drošības un uzticamības filtri būtiski sašaurina izvēles telpu, bet pilnībā neaptur lēmuma pieņemšanu, ja saglabājas vismaz viena vai vairākas pieļaujamas alternatīvas. Šis rezultāts parāda rezerves alternatīvu secības nozīmi dinamiskā uzlādes punkta piešķiršanā.

Kiberdrošības validācijas rezultāti vienlaikus parāda arī modeļa piemērošanas robežas. *OCPP APP* un *OCPP TCP/IP* datu kopas ir tieši saistāmas ar *EV* uzlādes infrastruktūras komunikācijas loģiku, tādēļ tās ir piemērotas kiberriska indikatora pamatošanai. *OCPP TCP/IP* datu slānī iegūtais *AUC* rādītājs 0,911 norāda uz labu normālas un anomālas komunikācijas uzvedības atdalāmību, savukārt *OCPP* lietotnes līmeņa *AUC* 0,723 norāda uz mērenu atdalāmību. *WUSTL-IIoT* datu kopas rezultāti jāinterpretē piesardzīgi, jo tie atspoguļo plašāku industriālā *IoT* domēnu un nav tieši identiski *EV* uzlādes infrastruktūras komunikācijas videi [60], [61]. Tādēļ kiberdrošības slānis ir metodoloģiski integrējams, bet tā praktiskai ieviešanai nepieciešama konkrētās infrastruktūras un datu avotu kalibrācija.

Hipotēzes izvērtējumā jānošķir divi līmeņi: metodoloģiskais un empīriskais. Metodoloģiskajā līmenī hipotēze tiek atbalstīta, jo darbā izstrādātais modelis apvieno *EV, EUS*, sadales tīkla, lietotāja, datu kvalitātes un kiberdrošības kritērijus vienotā lēmumu pieņemšanas struktūrā. Scenāriju validācijas līmenī hipotēze arī tiek atbalstīta, jo modelis parāda spēju aprēķināt interpretējamu rangu, saglabāt rezerves alternatīvas, reaģēt uz svaru un scenāriju izmaiņām, kā arī pazemināt riskantākas vai mazāk uzticamas alternatīvas. Tomēr hipotēzi nevar interpretēt kā pilnībā pierādītu pilna mēroga lauka ekspluatācijas nozīmē, jo validācija tika veikta ar anonimizētiem objektiem, scenāriju vidi un prototipa aprēķinu loģiku.

6.1.tabula

Hipotēzes elementu izvērtējums, balstoties uz 5. nodaļas validācijas rezultātiem

Hipotēzes elements	Validācijas interpretācija	Izvērtējums
Daudzkritēriju pieeja sniedz pamatotāku izvēli nekā viena kritērija pieejas	Pilnais modelis līdzsvaro attālumu, gaidīšanas laiku, pieejamo jaudu, tīkla kritērijus, uzticamību, datu kvalitāti un kiberdrošību.	Atbalstīts
Dinamiska piešķiršana uzlabo pielāgošanos situācijai	Sezonālie scenāriji un svaru jutīguma analīze parāda, ka rangs un neto plūsmas starpības var mainīties atbilstoši ekspluatācijas apstākļiem.	Atbalstīts
Tīkla kritēriju iekļaušana samazina tehniski riskantu izvēļu iespējamību	Tīkla kritēriji ļauj pazemināt vai izslēgt alternatīvas ar nelabvēlīgu tīkla profilu.	Atbalstīts metodoloģiski un scenāriju līmenī

Uzticamības, kiberdrošības un datu kvalitātes slānis ietekmē lēmuma kvalitāti	Riskantākas vai datu ziņā mazāk uzticamas alternatīvas tiek penalizētas, pazeminātas rangā vai izslēgtas.	Atbalstīts
Modelis ir pierādīts pilnā reālā lauka ekspluatācijā	Validācija veikta ar anonimizētiem objektiem, scenāriju un prototipa aprēķinu vidi, nevis pilna mēroga *CPO–DSO–EV* lauka eksperimentā.	Nav pilnībā pierādīts šajā pētījuma posmā

No tabulas izriet, ka hipotēze tiek atbalstīta metodoloģiskās un scenāriju validācijas robežās. Šāds formulējums ir precīzāks nekā vienkāršs apgalvojums, ka hipotēze ir pilnībā apstiprināta. Promocijas darbā ir parādīts, ka izstrādātā *AHP–PROMETHEE* pieeja spēj nodrošināt pamatotāku, interpretējamāku un uzticamības ziņā pilnvērtīgāku uzlādes punkta izvēli nekā statiskas vai ierobežota kritēriju skaita pieejas. Vienlaikus pilna praktiskā efektivitāte reālā ekspluatācijas vidē vēl jāapstiprina ar plašāku datu integrāciju, reāllaika *CPO/CSO* un *DSO* datiem, kā arī pilnvērtīgāku kiberdrošības monitoringa slāni.

Kopumā rezultātu interpretācija ļauj secināt, ka izstrādātais modelis atbilst promocijas darba mērķim un atbalsta hipotēzi noteiktajās validācijas robežās. Tā galvenā priekšrocība ir nevis viena konkrēta uzlādes punkta izvēle atsevišķā scenārijā, bet vispārīga un reproducējama lēmumu pieņemšanas loģika, kas ļauj dinamiskā režīmā līdzsvarot lietotāja, infrastruktūras, sadales tīkla, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības kritērijus. Tas nostiprina promocijas darba galveno ideju: uzticamības orientēta *EV* uzlādes punkta piešķiršana ir jāskata kā kiberfiziska, daudzkritēriju un dinamiski atjaunināma lēmumu problēma, nevis kā statiska tuvākās vai jaudīgākās stacijas izvēle.

6.2. Salīdzinājums ar literatūru un zinātniskais pienesums

Promocijas darba rezultāti jāinterpretē plašākā *EV* uzlādes infrastruktūras, *MCDM*, gudrās uzlādes, sadales tīklu un kiberdrošības literatūras kontekstā. Šī darba galvenais pienesums nav saistīts tikai ar *AHP* vai *PROMETHEE* metožu pielietošanu, jo abas metodes ir plaši pazīstamas un izmantotas daudzkritēriju lēmumu pieņemšanā [27], [29], [30]. Darba specifika ir šo metožu pielāgošana konkrētai, literatūrā mazāk attīstītai problēmai: uzticamības orientētai dinamiskai *EV* uzlādes punkta piešķiršanai konkrētam transportlīdzeklim konkrētā laikā.

Salīdzinot ar literatūru, šī promocijas darba atšķirība ir tā, ka tas nepiedāvā tikai uzlādes staciju izvietojuma, kapacitātes plānošanas vai viedās uzlādes vadības risinājumu. Izstrādātais modelis fokusējas uz operatīvu konkrēta uzlādes punkta piešķiršanu konkrētā lēmuma brīdī. Tas nozīmē, ka literatūrā plaši aplūkotie elektrotransportlīdzekļu uzlādes infrastruktūras plānošanas, viedās uzlādes vadības, integrācijas sadales tīklā, kiberdrošības un lēmumu atbalsta sistēmu virzieni šajā darbā tiek apvienoti vienā dinamiskā daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas uzdevumā [9]–[11], [13], [44], [62].

Esošā literatūra *EV* uzlādes infrastruktūras jomā lielā mērā koncentrējas uz staciju izvietojuma, kapacitātes, infrastruktūras pārklājuma un ilgtspējīgas plānošanas jautājumiem. Šajos pētījumos būtiska uzmanība tiek pievērsta tam, kur izvietot uzlādes stacijas, kā noteikt to skaitu, kā izvēlēties piemērotākās lokācijas un kā salāgot uzlādes infrastruktūras attīstību ar transporta un elektroenerģijas sadales tīkla vajadzībām [9], [15]–[18]. Šādi pētījumi ir būtiski ilgtermiņa infrastruktūras attīstībai, tomēr tie neatbild uz operatīvu jautājumu: kuru no jau pieejamajiem uzlādes punktiem konkrētajā brīdī piešķirt konkrētam *EV*.

Šajā darbā uzsvars tiek pārvietots no infrastruktūras plānošanas uz dinamisku ekspluatācijas līmeņa lēmumu. Uzlādes punkts netiek interpretēts tikai kā stacijas atrašanās vieta vai pieslēguma jauda, bet kā laikā mainīga alternatīva, kuras piemērotība ir atkarīga no aktuālā *EV* pieprasījuma, gaidīšanas laika, pieejamās jaudas, tīkla noslodzes, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības stāvokļa. Tādējādi šis darbs papildina staciju plānošanas literatūru ar operatīvas piešķiršanas perspektīvu.

Līdzīga atšķirība redzama arī attiecībā pret gudrās uzlādes un agregatoru literatūru. Gudrās uzlādes pētījumi parasti analizē uzlādes procesa vadību laikā, slodzes izlīdzināšanu, pieprasījuma elastību, decentralizētu vadību, agregatoru stratēģijas vai *V2G* iespējas [6], [19]–[23]. Šajos pētījumos *EV* uzlāde tiek skatīta kā elastīga slodze, kuru iespējams koordinēt, lai samazinātu izmaksas, izlīdzinātu tīkla noslodzi vai labāk izmantotu elektroenerģijas sistēmas resursus. Šāda pieeja ir ļoti nozīmīga uzlādes procesa optimizācijai, tomēr tā bieži fokusējas uz to, kad un ar kādu jaudu uzlādēt, nevis uz to, kuru konkrētu uzlādes punktu izvēlēties noteiktā ekspluatācijas situācijā.

Promocijas darba modelis neaizstāj gudrās uzlādes pieejas, bet papildina tās. Ja gudrās uzlādes risina uzlādes procesa vadību pēc tam, kad uzlādes punkts ir izvēlēts vai uzlādes sesija ir sākusies, tad šajā darbā izstrādātais modelis risina agrāku lēmuma posmu: konkrētas uzlādes alternatīvas izvēli no pieejamo un pieļaujamo punktu kopas. Šis posms ir būtisks, jo nepareiza sākotnējā uzlādes punkta izvēle var radīt gan lietotāja laika zudumu, gan tīkla noslodzes pieaugumu, gan drošības un datu uzticamības riskus.

MCDM literatūrā *AHP, PROMETHEE, TOPSIS, ELECTRE* un citas metodes ir plaši izmantotas infrastruktūras izvērtēšanai, ilgtspējas analīzei, enerģētikas sistēmu lēmumiem un uzlādes staciju lokācijas izvēlei [15], [18], [26]–[30]. Šo metožu priekšrocība ir spēja strukturēt sarežģītu lēmumu telpu, apvienot dažāda rakstura kritērijus un padarīt lēmuma pamatojumu caurspīdīgāku. Tomēr daudzos *EV* uzlādes infrastruktūras pētījumos *MCDM* tiek izmantota stratēģiskai vai taktiskai plānošanai, nevis operatīvai dinamiskai alternatīvu prioritizācijai.

Šajā promocijas darbā *AHP* un *PROMETHEE* tiek izmantotas citā funkcijā. *AHP* kalpo kritēriju nozīmīguma strukturēšanai, bet *PROMETHEE* tiek izmantota pieļaujamo alternatīvu rangēšanai konkrētā laika momentā. Šāda kombinācija ļauj nodalīt divas metodoloģiski atšķirīgas darbības: kritēriju prioritāšu noteikšanu un dinamisku alternatīvu salīdzināšanu. Turklāt *PROMETHEE* rezultāts nav tikai viena alternatīva, bet pilns rangs ar pozitīvo, negatīvo un *neto* plūsmu, kas ļauj izmantot arī rezerves alternatīvu secību. Tas ir būtiski uzticamības orientētā lēmumu modelī, kur pirmā izvēle var kļūt nepieejama vai riskanta.

Atsevišķi jāizceļ kiberdrošības literatūras konteksts. *EV* uzlādes infrastruktūras kiberdrošības pētījumi uzsver autentifikācijas, komunikācijas, datu integritātes, pakalpojuma pieejamības un trešo pušu riska nozīmi [8], [12], [13], [24], [25]. Tomēr šie riski bieži tiek analizēti kā atsevišķs kiberdrošības vai risku novērtēšanas uzdevums, nevis kā tieša daļa no uzlādes punkta izvēles mehānisma. Šāda pieeja ir pamatota kiberdrošības novērtēšanai, bet tā ne vienmēr parāda, kā drošības risks ietekmē konkrētu operatīvu izvēli starp vairākām uzlādes alternatīvām.

Šajā darbā kiberdrošības risks tiek integrēts pašā *MCDM* modelī. Šis rādītājs modelī var darboties vairākos līmeņos: kā filtrēšanas nosacījums pirms alternatīvu rangēšanas, kā *PROMETHEE* procedūrā minimizējams kritērijs un kā gala *neto* plūsmas korekcijas faktors, kas samazina riskantāku alternatīvu prioritāti. Tādējādi kiberdrošība netiek aplūkota kā ārējs papildinājums pēc lēmuma pieņemšanas, bet tieši piedalās alternatīvu prioritizācijā. Šis aspekts ir būtisks, jo *EV* uzlādes punkts mūsdienās ir kiberfiziska alternatīva: tā piemērotību nosaka ne tikai fiziskā jauda un atrašanās vieta, bet arī datu ticamība, komunikācijas stabilitāte, autentifikācijas drošība un pakalpojuma nepārtrauktība.

Literatūras kontekstā šī darba pozīciju var raksturot kā pāreju no fragmentētas pieejas uz integrētu lēmumu modeli. Staciju plānošanas literatūra analizē, kur un kā attīstīt infrastruktūru; gudrās uzlādes literatūra analizē, kā vadīt uzlādes procesu; kiberdrošības literatūra analizē, kā identificēt un prioritizēt riskus; lēmuma atbalsta sistēmas literatūra analizē, kā strukturēt datus, modeļus un lēmuma interpretāciju [48], [49]. Šajā promocijas darbā šie virzieni tiek sasaistīti vienā operatīvā *MCDM* piešķiršanas modelī.

6.2.tabula

Promocijas darba pozicionējums salīdzinājumā ar literatūras virzieniem

Literatūras virziens	Tipiskais fokuss	Ierobežojums šī darba kontekstā	Promocijas darba pienesums
Uzlādes staciju plānošana un lokācijas izvēle	Staciju izvietojums, kapacitāte, pārklājums, investīcijas	Fokusējas uz ilgtermiņa infrastruktūras attīstību, nevis konkrētu operatīvu piešķiršanu	Dinamiska konkrēta uzlādes punkta izvēle konkrētam *EV* konkrētā laikā
GIS-MCDM un staciju site selection	Teritoriāla piemērotība un ilgtspējīga lokāciju izvēle	Alternatīvas parasti ir lokācijas, nevis reāllaika uzlādes punkti	Uzlādes punkts tiek vērtēts kā laikā mainīga *MCDM* alternatīva
Gudrās uzlādes un agregatori	Uzlādes procesa vadība, slodzes izlīdzināšana, lietotāja elastība	Biežāk risina uzlādes jaudas/laika vadību, nevis uzlādes punkta izvēli	Piešķiršanas modelis pirms uzlādes sesijas sākuma
Sadales tīkla integrācijas pētījumi	*EV* slodzes ietekme uz tīklu, pārslodze, spriegums, jaudas rezerve	Tīkla analīze bieži nav tieši sasaistīta ar konkrētu lietotāja alternatīvu rangu	Tīkla kritēriji tiek integrēti *PROMETHEE* rangā
Kiberdrošības un risku novērtēšana	Autentifikācija, komunikācija, datu integritāte, incidentu risks	Kiberrisks bieži tiek vērtēts atsevišķi no uzlādes punkta piešķiršanas	Kiberrisks kļūst par filtru, kritēriju un penalizācijas slāni
Lēmuma atbalsta sistēmas un enerģijas pārvaldības sistēmas	Datu, modeļu un lēmumu atbalsta integrācija	Bieži paliek vispārīgas arhitektūras līmenī	Izveidots konkrēts lēmuma atbalsta sistēmas aprēķinu kodols dinamiskai *EV* uzlādes punkta piešķiršanai

No šī salīdzinājuma izriet, ka promocijas darba pienesums veidojas nevis vienā izolētā komponentē, bet vairāku komponentu integrācijā. Darba novitāte nav apgalvojums, ka *AHP* vai *PROMETHEE* ir jaunas metodes, bet gan šo metožu izmantošana uzticamības orientētā, dinamiskā un kiberfiziskā *EV* uzlādes punkta piešķiršanas uzdevumā.

6.3. Zinātniskais pienesums

Promocijas darba zinātnisko pienesumu iespējams strukturēt trīs savstarpēji saistītos līmeņos: teorētiskajā, metodoloģiskajā un praktiskajā. Šāds dalījums ļauj precīzāk parādīt, kurā līmenī darbs paplašina esošo literatūru un kādā veidā izstrādātais modelis var tikt izmantots turpmākos pētījumos vai praktiskās ieviešanas procesos.

Teorētiskais pienesums ir saistīts ar paša lēmuma uzdevuma formulējumu. Šajā darbā dinamiska EV uzlādes punkta piešķiršana tiek formalizēta kā *MCDM* problēma, nevis kā statiska navigācijas vai infrastruktūras plānošanas problēma. Tas nozīmē, ka alternatīvas ir konkrēti, laikā mainīgi uzlādes punkti, bet izvēli nosaka vairāku kritēriju konflikts. Šāda formalizācija ļauj vienā lēmuma telpā apvienot lietotāja ērtību, uzlādes punkta tehnisko piemērotību, sadales tīkla nosacījumus, datu kvalitāti, uzticamību un kiberdrošības risku.

Otrs teorētiskā pienesuma elements ir uzlādes punkta interpretācija kā kiberfiziska alternatīva. Tradicionāli uzlādes punkts var tikt skatīts kā fiziska infrastruktūras vienība ar noteiktu jaudu, savienotāju un atrašanās vietu. Šajā darbā tas tiek interpretēts plašāk: kā fiziski un digitāli savienota alternatīva, kuras piemērotību ietekmē komunikācijas uzticamība, datu aktualitāte, autentifikācija, operatora statuss un kiberdrošības risks. Šāda interpretācija ir būtiska mūsdienu *EV* uzlādes infrastruktūrā, kur uzlādes pakalpojums ir atkarīgs ne tikai no elektroenerģijas piegādes, bet arī no digitālās informācijas un sakaru slāņa darbspējas.

Metodoloģiskais pienesums ir *AHP–PROMETHEE* secīgas izmantošanas modelis dinamiskai uzlādes punkta piešķiršanai. *AHP* tiek izmantota kritēriju hierarhijas un svaru noteikšanai, savukārt *PROMETHEE* tiek izmantota pieļaujamo alternatīvu prioritizācijai konkrētā laika momentā. Šāda secība ļauj nodalīt ekspertu prioritāšu strukturēšanu no operatīvas alternatīvu rangēšanas. Turklāt modelī tiek integrēta alternatīvu filtrēšana pirms *PROMETHEE* aprēķina, kas nodrošina, ka rangēšanā netiek iekļautas alternatīvas, kuras konkrētajā brīdī nav sasniedzamas, savietojamas, darbspējīgas, tīkla ziņā pieļaujamas vai drošības ziņā uzticamas.

Metodoloģiski nozīmīga ir arī uzticamības un kiberdrošības indikatoru integrācija trīs līmeņos: kā filtrēšanas nosacījumi, kā *PROMETHEE* kritēriji un kā gala prioritātes korekcijas vai penalizācijas slānis. Šāda pieeja ļauj elastīgi pielāgot modeli dažādiem ekspluatācijas scenārijiem. Normālos apstākļos uzticamības un drošības rādītāji var ietekmēt rangu, savukārt kritiskos apstākļos tie var izslēgt alternatīvu no pieļaujamo alternatīvu kopas.

Praktiskais pienesums ir lēmuma atbalsta sistēmas aprēķinu kodola izveide *EV* uzlādes infrastruktūras pārvaldībai. Šis kodols nav komerciāla *CPO, CSO* vai *DSO* platforma, bet tas parāda, kā heterogēnus datus: EV pieprasījumu, uzlādes punkta parametrus, slodžu profilus, ģeotelpiskos datus, datu kvalitātes indikatorus un kiberdrošības risku, kurus iespējams pārveidot strukturētā lēmuma rezultātā. Rezultāts ir ne tikai izvēlētais uzlādes punkts, bet arī pilns rangs, rezerves alternatīvas, filtrēšanas pamatojums un KPI interpretācija.

6.3.tabula

Promocijas darba zinātniskais un praktiskais pienesums

Pienesuma veids	Galvenais saturs	Nozīme promocijas darba kontekstā
Teorētiskais pienesums	Dinamiska *EV* uzlādes punkta piešķiršana formalizēta kā *MCDM* problēma	Paplašina *EV* uzlādes infrastruktūras izpēti no plānošanas uz operatīvu piešķiršanu
Teorētiskais pienesums	Uzlādes punkts interpretēts kā kiberfiziska alternatīva	Integrē fizisko infrastruktūru, datus, komunikāciju un drošību vienā izvēles telpā
Metodoloģiskais pienesums	*AHP* izmantota svaru noteikšanai, *PROMETHEE* — dinamiskai alternatīvu rangēšanai	Nodala kritēriju prioritāšu strukturēšanu no operatīvas alternatīvu prioritizācijas
Metodoloģiskais pienesums	Integrēta filtrēšana, uzticamības kritēriji un kiberriska penalizācija	Samazina risku rekomendēt tehniski vai drošības ziņā nepieļaujamu alternatīvu
Praktiskais pienesums	Izveidots reproducējams aprēķinu un validācijas kodols	Nodrošina pamatu *CPO/CSO, DSO*, pašvaldību un kiberdrošības pārvaldības pielietojumiem
Praktiskais pienesums	Definēti *KPI* un scenāriji modeļa novērtēšanai	Ļauj salīdzināt pilno modeli ar vienkāršotām izvēles pieejām
Teorētiskais pienesums	Dinamiska *EV* uzlādes punkta piešķiršana formalizēta kā *MCDM* problēma	Paplašina *EV* uzlādes infrastruktūras izpēti no plānošanas uz operatīvu piešķiršanu
Teorētiskais pienesums	Uzlādes punkts interpretēts kā kiberfiziska alternatīva	Integrē fizisko infrastruktūru, datus, komunikāciju un drošību vienā izvēles telpā
Metodoloģiskais pienesums	*AHP* izmantota svaru noteikšanai, *PROMETHEE* — dinamiskai alternatīvu rangēšanai	Nodala kritēriju prioritāšu strukturēšanu no operatīvas alternatīvu prioritizācijas

Kopumā darba zinātniskais pienesums ir integrēts un starpdisciplinārs. Tas apvieno elektrotransporta, sadales tīklu, *MCDM*, lēmuma atbalsta sistēmu un kiberdrošības aspektus vienā dinamiskā piešķiršanas modelī. Šāda integrācija ir būtiska, jo *EV* uzlādes infrastruktūra praksē darbojas kā transporta, elektroenerģijas un digitālās pārvaldības sistēmu saskarne.

6.4. Praktiskās ieviešanas iespējas

Izstrādātais modelis ir metodoloģiski validēts aprēķinu kodols, kuru iespējams tālāk attīstīt praktiskai izmantošanai vairākos līmeņos. Galvenās potenciālās lietotāju grupas ir

uzlādes infrastruktūras operatori, sadales sistēmas operatori, pašvaldības un reģionālās mobilitātes plānotāji, kā arī kiberdrošības un datu pārvaldības speciālisti.

Uzlādes infrastruktūras operatoriem jeb *CPO/CSO* izstrādātais modelis var kalpot kā lēmuma atbalsta instruments uzlādes punktu rekomendēšanai. Praktiskā ieviešanā tas varētu tikt integrēts operatora platformā vai lietotāja lietotnē, kur lietotājam tiek piedāvāta nevis tikai tuvākā vai brīvā stacija, bet piemērotākā alternatīva, ņemot vērā pieejamo jaudu, gaidīšanas laiku, cenu, datu kvalitāti, uzticamību un kiberdrošības risku. Šāda pieeja varētu uzlabot lietotāja pieredzi un samazināt neefektīvu uzlādes punktu izmantošanu.

Sadales sistēmas operatoriem modelis piedāvā iespēju operatīvajā uzlādes punkta izvēlē iekļaut tīkla stāvokļa informāciju. Tas nenozīmē, ka *CPO/CSO* sistēma aizstātu *DSO* tīkla vadības sistēmu, bet gan to, ka lēmuma atbalsta slānī varētu tikt izmantoti lokāli noslodzes, jaudas rezerves vai tīkla pieļaujamības indikatori. Šāda integrācija būtu īpaši nozīmīga vietās ar ierobežotu pieslēguma jaudu, augstu *EV* uzlādes intensitāti vai sezonāli mainīgu slodzi.

Pašvaldībām un reģionālās mobilitātes plānotājiem modelis varētu palīdzēt analizēt, kā esošā uzlādes infrastruktūra darbojas dažādos scenārijos. Tā kā modelis ietver ģeotelpisko slāni, uzlādes punktu pieejamību un tīkla kritērijus, to iespējams izmantot ne tikai operatīvai piešķiršanai, bet arī infrastruktūras attīstības prioritāšu analīzei. Piemēram, ja noteiktā teritorijā regulāri samazinās pieļaujamo alternatīvu skaits, tas var norādīt uz nepieciešamību pēc jauna uzlādes punkta, pieslēguma jaudas palielināšanas vai datu kvalitātes uzlabošanas.

Kiberdrošības pārvaldības kontekstā modelis piedāvā veidu, kā drošības indikatorus sasaistīt ar praktisku lēmumu. Tradicionāli kiberdrošības riski tiek analizēti kā atsevišķs drošības novērtējums, bet šajā darbā tie tiek izmantoti kā lēmumu ietekmējoši kritēriji. Praktiskā ieviešanā tas ļautu alternatīvas ar paaugstinātu autentifikācijas, komunikācijas vai datu integritātes risku pazemināt rangā, nevis rekomendēt tās tikai tāpēc, ka tās ir tuvu lietotājam vai nodrošina augstu uzlādes jaudu.

Praktiskai ieviešanai nepieciešama datu apmaiņa starp vairākiem sistēmas dalībniekiem. *CPO/CSO* nodrošinātu uzlādes punktu statusu, pieejamo jaudu, cenu, gaidīšanas laiku un operatora statusu. *DSO* nodrošinātu tīkla pieļaujamības vai noslodzes indikatorus, vēlams neizpaužot komerciāli vai drošības ziņā sensitīvus tīkla datus. Kiberdrošības pārvaldības slānis nodrošinātu komunikācijas, autentifikācijas, incidentu un datu integritātes indikatorus. Lietotāja lietotne vai *EV/BMS* datu slānis nodrošinātu *SOC*, nepieciešamo enerģiju, uzlādes jaudas pieņemamību un lietotāja preferences.

Šāda ieviešana nav tikai tehnisks *API* integrācijas jautājums. Tā prasa arī datu pārvaldības, atbildības, privātuma un drošības noteikumus. Praktiskā vidē jānosaka, kādi dati tiek apmainīti starp *CPO/CSO* un *DSO*, kā tiek nodrošināta lietotāja datu aizsardzība, kā tiek auditēti lēmumi un kā sistēma rīkojas gadījumos, kad dati ir nepilnīgi vai pretrunīgi. Datu kvalitātes degradācijas scenārija rezultāti šajā darbā parāda, ka datu ticamība ir kritisks priekšnosacījums automātiskai rekomendācijai.

Modeli iespējams ieviest pakāpeniski. Pirmajā posmā tas var darboties kā analītisks rekomendāciju rīks, kurš izmanto pieejamos operatora un slodžu datus. Otrajā posmā to iespējams papildināt ar *DSO* tīkla pieļaujamības indikatoriem un datu kvalitātes slāni. Trešajā posmā iespējama kiberdrošības monitoringa integrācija un notikumbalstīta pārrēķina loģika. Pilnīgākā ieviešanas stadijā modelis var kļūt par *EV* uzlādes infrastruktūras digitālā dvīņa vai viedās mobilitātes platformas analītisko moduli.

6.5. Pētījuma ierobežojumi

Lai gan promocijas darbā izstrādātais modelis sasniedz mērķi metodoloģiskās un scenāriju validācijas līmenī, tā rezultāti jāinterpretē, ņemot vērā vairākus ierobežojumus. Šie ierobežojumi nemazina izstrādātā modeļa zinātnisko pienesumu, bet precizē robežas, kurās iegūtie rezultāti ir pamatoti, reproducējami un korekti interpretējami.

Pirmais ierobežojums ir validācijas raksturs. Darbā veikta metodoloģiska un scenāriju balstīta validācija, nevis pilna mēroga lauka eksperiments ar tiešu pieslēgumu reāllaika *CPO/CSO, DSO, EV* un lietotāju sistēmām. Validācijā izmantoti anonimizēti objekti, slodžu profili, tehniskie dati, scenāriju pieņēmumi un prototipa aprēķinu loģika. Tas ļauj pārbaudīt modeļa darbības principu, kritēriju operacionalizāciju, filtrēšanas mehānismu, *AHP* svaru izmantošanu un *PROMETHEE* rangēšanas loģiku, bet vēl neļauj izdarīt galīgus secinājumus par modeļa veiktspēju pilnā ekspluatācijas vidē. Praktiskai ieviešanai būtu nepieciešama reāllaika datu plūsma no uzlādes infrastruktūras operatoriem, sadales sistēmas operatora, *EV* lietotāju lietotnēm, uzlādes sesiju pārvaldības sistēmām un kiberdrošības monitoringa rīkiem.

Otrais ierobežojums ir datu pieejamība. Validācijas datu kopā nav pilnu reāllaika *EV SOC*, maršruta, lietotāja uzvedības un uzlādes sesiju rindu datu. Šie parametri tika definēti scenāriju veidā vai atvasināti no pieejamajiem datiem. Tas ir pieņemami metodoloģiskai validācijai, jo promocijas darba mērķis ir pārbaudīt izstrādātās lēmumu pieņemšanas metodoloģijas darbību, nevis izveidot pilnībā komerciāli gatavu sistēmu. Tomēr praktiskā ieviešanā šiem datiem būtu jābūt pieejamiem no *EV*, lietotāja lietotnes, operatora platformas, rezervācijas sistēmas vai citiem uzticamiem datu avotiem. Bez šādiem datiem lēmuma precizitāte var samazināties, jo daļa lietotāja un transportlīdzekļa stāvokļa kritēriju tiek aizstāti ar pieņēmumiem.

Trešais ierobežojums ir sadales tīkla datu detalizācija. Pieejamajā validācijas datu kopā nav pilnvērtīgu sprieguma un fāžu nesimetrijas datu visiem validācijas objektiem. Tāpēc sprieguma novirzes un fāžu nesimetrijas kritēriji šajā darbā tiek saglabāti kā metodoloģiski paredzēti, bet konkrētajā validācijas aprēķinā ne vienmēr pilnā apjomā aprēķināmi rādītāji. Pilnai tīkla režīmu analīzei būtu nepieciešami detalizētāki *DSO* mērījumi, tīkla topoloģijas dati, transformatoru un līniju slodzes dati, spriegumu mērījumi, fāžu strāvas, īsslēguma jaudas, kā arī jaudas plūsmu aprēķinu modeļi. Tādēļ šajā darbā sadales tīkla slānis ir pietiekams metodoloģiskai *MCDM* validācijai, bet nav pilns tīkla režīmu simulācijas modelis.

Ceturtais ierobežojums ir tas, ka modelis nav pilnvērtīgs elektroenerģijas tirgus vai cenu optimizācijas modelis. Cena tiek iekļauta kā viens no *MCDM* kritērijiem, taču darba mērķis nav prognozēt elektroenerģijas cenu, balansēšanas izmaksas, dinamiskos tarifus vai tirgus dalībnieku stratēģijas. Praktiskā ieviešanā cenu kritēriju būtu iespējams paplašināt ar dinamiskajiem tarifiem, pieprasījuma reakcijas signāliem, agregatoru piedāvājumiem, balansēšanas izmaksām vai lokālās enerģijas pieejamības signāliem. Tomēr šajā pētījumā cena ir tikai viens no kompromisa kritērijiem, nevis galvenais optimizācijas mērķis.

Piektais ierobežojums ir kiberdrošības slāņa interpretācija. *OCPP APP, OCPP TCP/IP* un *WUSTL-IIoT* datu kopas tiek izmantotas, lai pamatotu kiberriska indikatora operacionalizāciju [60], [61]. Tomēr šis slānis nav pilns konkrēto validācijas objektu kiberdrošības audits. Tas neaizstāj ievainojamību analīzi, ielaušanās testēšanu, drošības arhitektūras pārbaudi, *SOC* monitoringa rezultātus vai operatora ieviesto drošības kontroļu novērtējumu. Kiberdrošības indikatori šajā darbā tiek izmantoti kā lēmumu ietekmējošs *MCDM* slānis, nevis kā drošības sertifikācijas rezultāts. Tāpēc kiberriska kritērija nozīme ir metodoloģiska: tas parāda, kā drošības risks var ietekmēt uzlādes punkta prioritāti, bet neapliecina konkrēta objekta faktisko drošības līmeni ekspluatācijā.

Sestais ierobežojums ir *AHP* svaru interpretācija. *AHP* balstītie svari atspoguļo ekspertu vai scenārijā definētu prioritāšu struktūru. Tie nav absolūti un universāli visām valstīm, operatoriem, reģioniem vai lietotāju grupām. Praktiskā ieviešanā svaru struktūra būtu jāpielāgo konkrētam lietošanas gadījumam, iesaistot *CPO/CSO, DSO*, pašvaldības, kiberdrošības speciālistus, transporta plānotājus un lietotāju pārstāvjus. Turklāt jāņem vērā, ka *AHP* pieņem hierarhisku kritēriju struktūru un balstās uz pāru salīdzinājumiem, kas var būt subjektīvi. Tādēļ būtu lietderīgi analizēt arī *fuzzy AHP, ANP*, dinamisku svaru noteikšanas pieeju vai datu vadītu svaru kalibrācijas iespējas.

Septītais ierobežojums ir modelēšanas mērogs. Darbā netiek modelēta pilna transporta plūsma pilsētas vai valsts mērogā. Transportlīdzekļa kustība tiek ņemta vērā tikai tādā apjomā, kādā tā ietekmē uzlādes punkta sasniedzamību, attālumu, maršruta novirzi un kandidātu kopas izveidi. Tāpat modelis nav pilns digitālais dvīnis. Tas ietver datu, scenāriju, ģeotelpisko un *MCDM* aprēķinu vidi, bet neveido pilnu *EV–CPO–DSO*–lietotāja sistēmas digitālo dvīni ar reāllaika divvirzienu datu plūsmām, vadības komandām, tīkla režīmu simulāciju un automatizētu atgriezenisko saiti.

Astotais ierobežojums ir saistīts ar izvēlētās *MCDM* metodes ietekmi uz rezultātu. Promocijas darbā gala alternatīvu rangēšanai izmantota *PROMETHEE* metode, jo tā ļauj aprēķināt pozitīvo, negatīvo un *neto* pārākuma plūsmu, iekļaut preferenču un indifferences sliekšņus, iegūt pilnu alternatīvu rangu un noteikt rezerves izvēļu secību. Šīs īpašības ir nozīmīgas dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas uzdevumā, jo lēmumu atbalsta sistēmai nav pietiekami identificēt tikai vienu labāko uzlādes punktu. Tai jāspēj noteikt arī nākamās piemērotākās alternatīvas gadījumā, ja primārais punkts kļūst aizņemts, nedarbspējīgs, tīkla ziņā nepieļaujams vai kiberdrošības ziņā riskants.

Tomēr *PROMETHEE* izmantošana nozīmē arī noteiktu metodisku ierobežojumu. Cita daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metode varētu dot atšķirīgu alternatīvu secību, īpaši gadījumos, kad alternatīvu kritēriju vērtības ir savstarpēji tuvas vai kad viena alternatīva ir ļoti laba pēc lietotāja kritērijiem, bet vājāka pēc tīkla, datu kvalitātes vai kiberdrošības kritērijiem. Tāpēc promocijas darba rezultāti nav interpretējami kā pierādījums tam, ka identisks rangs tiktu iegūts ar jebkuru citu *MCDM* metodi. Tie apliecina, ka izvēlētā *AHP–PROMETHEE* konfigurācija konkrētajā datu, kritēriju, svaru un scenāriju vidē nodrošina interpretējamu un uz uzticamību orientētu lēmumu pieņemšanas mehānismu.

Ja *PROMETHEE* vietā tiktu izmantota *TOPSIS* metode, uzlādes punktu rangs tiktu noteikts pēc alternatīvas attāluma līdz ideālajam un negatīvi ideālajam risinājumam. Šāda pieeja varētu būt vienkāršāka aprēķinu ziņā un piemērota kā salīdzinošs bāzes modelis, īpaši lielām alternatīvu kopām. Vienlaikus *TOPSIS* var būt jutīgāka pret normalizācijas veidu, ekstrēmām kritēriju vērtībām un kompensācijas efektu starp kritērijiem. Piemēram, alternatīva ar ļoti labu attālumu, cenu vai uzlādes jaudu varētu iegūt augstāku vietu, pat ja tai ir sliktāks kiberdrošības vai datu kvalitātes profils, ja vien šie riski netiek pietiekami stingri ierobežoti ar filtriem vai penalizācijas mehānismu. Tādēļ *TOPSIS* gadījumā būtu īpaši svarīgi saglabāt stingrus pieļaujamības filtrus un risku sliekšņus pirms gala rangēšanas.

Ja tiktu izmantota *ELECTRE* tipa metode, rezultāts varētu kļūt konservatīvāks, jo *ELECTRE* metodes balstās uz pārākuma, saskaņas, nesaskaņas un veto principiem. Šāda pieeja būtu piemērota drošības vai tīkla pieļaujamības kritisko sliekšņu izvērtēšanai, jo alternatīvu varētu noraidīt pat tad, ja tā ir laba pēc vairākiem citiem kritērijiem, bet pārsniedz nepieļaujamu risku pēc viena būtiska kritērija. Piemēram, augsts kiberrisks, zema datu kvalitāte vai nepietiekama tīkla jaudas rezerve varētu darboties kā veto nosacījums. Vienlaikus *ELECTRE* metode ne vienmēr nodrošina tik vienkārši interpretējamu pilnu lineāru rangu kā *PROMETHEE II*, tādēļ dinamiskas piešķiršanas gadījumā varētu būt nepieciešams papildu mehānisms rezerves alternatīvu secības noteikšanai.

Līdzīgi arī citas metodes, piemēram, *VIKOR*, vienkāršā svērtā summa, *MAUT, fuzzy AHP* vai *ANP*, varētu mainīt gala rangu, jo katra metode atšķirīgi interpretē kompromisu starp kritērijiem, kompensāciju starp labām un sliktām vērtībām, svaru ietekmi un alternatīvu savstarpējo salīdzināšanu. Tāpēc šajā promocijas darbā izstrādātais modelis nav uzskatāms par pierādījumu tam, ka *PROMETHEE* vienmēr ir pārāka par citām *MCDM* metodēm. Darba pienesums ir plašāks: tas parāda, kā dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas uzdevumā iespējams strukturēt datus, kritērijus, filtrus, svarus, uzticamības un kiberdrošības slāni, kā arī iegūt skaidrojamu lēmuma rezultātu. *PROMETHEE* šajā darbā ir izvēlēta kā galvenais

prioritizācijas mehānisms, bet modeļa arhitektūra nākotnē var tikt paplašināta ar citu *MCDM* metožu salīdzinošu pārbaudi.

Līdz ar to viens no būtiskiem pētījuma ierobežojumiem ir tas, ka promocijas darbā nav veikta pilna salīdzinoša *AHP–PROMETHEE*, *AHP–TOPSIS*, *AHP–ELECTRE*, *VIKOR* vai citu *MCDM* metožu *benchmarking* analīze vienā un tajā pašā validācijas datu kopā. Šāda analīze ļautu novērtēt, cik stabila ir pirmās alternatīvas izvēle dažādās metodēs, kā mainās pilnais rangs, cik bieži sakrīt *TOP-1* alternatīva, kā mainās rezerves alternatīvu secība, kāda ir metožu jutība pret svaru izmaiņām un cik būtiski atšķiras aprēķinu sarežģītība.

Apkopojot, promocijas darba validācijas pieeja ir piemērota izstrādātā *MCDM* modeļa metodoloģiskai pārbaudei. Tā ļauj analizēt, vai *AHP–PROMETHEE* modelis spēj integrēt lietotāja, infrastruktūras, tīkla, uzticamības, datu kvalitātes un kiberdrošības kritērijus dinamiskā uzlādes punkta piešķiršanā. Vienlaikus rezultāti jāinterpretē šīs metodoloģiskās un scenāriju validācijas robežās, ņemot vērā, ka pilna mēroga ekspluatācijas pārbaude, reāllaika datu integrācija un salīdzinoša vairāku MCDM metožu pārbaude ir turpmākas attīstības uzdevums.

6.6. Turpmākās attīstības virzieni

Promocijas darbā izstrādātais modelis veido pamatu vairākiem turpmākās attīstības virzieniem. Šie virzieni ir saistīti gan ar datu pieejamības paplašināšanu un praktiskās validācijas padziļināšanu, gan ar modeļa metodoloģisko attīstību, citu *MCDM* metožu salīdzinošu pārbaudi, digitālā dvīņa pieejas integrāciju, prognozējošās analītikas ieviešanu un kiberdrošības slāņa padziļināšanu.

Pirmais turpmākās attīstības virziens ir modeļa validācija ar plašāku un reāllaika datu kopu. Nākamajos pētījumos būtu nepieciešams integrēt reālus *CPO/CSO, DSO* un *EV* lietotāju datus, tostarp uzlādes sesiju statusu, rindas, rezervācijas, faktiskos gaidīšanas laikus, *EV SOC*, lietotāja maršrutu, lokālā tīkla mērījumus, uzlādes punktu ekspluatācijas statusu un komunikācijas pieejamības indikatorus. Tas ļautu pārbaudīt modeļa darbību ne tikai scenāriju vidē, bet arī reālā ekspluatācijas režīmā. Šāda validācija dotu iespēju novērtēt modeļa aprēķinu ātrumu, lēmumu stabilitāti, pārrēķinu biežumu, alternatīvu kopas izmaiņas un lietotāju uzvedības ietekmi uz gala izvēli.

Otrais virziens ir digitālā dvīņa pieejas integrācija. Sadales tīkla un uzlādes infrastruktūras digitālais dvīnis ļautu sasaistīt fizisko infrastruktūru, ģeotelpiskos datus, slodžu profilus, tīkla notikumus, *EVSE* statusus un lēmumu algoritmus vienotā modelēšanas vidē [54]. Šādā gadījumā izstrādātais *AHP–PROMETHEE* modelis varētu darboties kā digitālā dvīņa lēmumu pieņemšanas slānis, kas, izmantojot reāllaika vai periodiski atjauninātus operatīvos datus, izvērtē uzlādes alternatīvas. Digitālā dvīņa integrācija ļautu pārbaudīt ne tikai to, kura alternatīva ir piemērotākā konkrētajā brīdī, bet arī to, kā lēmums ietekmē tīkla režīmu, slodzes sadalījumu, infrastruktūras noslodzi un nākamos lēmuma momentus.

Trešais virziens ir prognozējošas piešķiršanas modeļa attīstība. Šajā darbā modelis galvenokārt balstās uz aktuālo vai scenārijā definēto lēmuma brīdi. Turpmāk to varētu papildināt ar prognozēm par gaidīšanas laiku, uzlādes punktu noslodzi, EV pieprasījumu, tīkla noslodzi, datu kvalitātes pasliktināšanos un potenciāliem uzlādes iekārtu darbības traucējumiem. Prognozējošās uzturēšanas un anomāliju noteikšanas metodes varētu palīdzēt savlaicīgi identificēt uzlādes iekārtu darbspējas, komunikācijas vai datu kvalitātes pasliktināšanos, pirms tā būtiski ietekmē gala lēmumu [57]. Šāds papildinājums pārvērstu modeli no reaktīvas prioritizācijas rīka par prognozējošu lēmumu atbalsta mehānismu.

Ceturtais virziens ir *AHP* svaru un *MCDM* struktūras paplašināšana. Turpmāk iespējams analizēt *fuzzy AHP, ANP*, dinamiskus svarus vai hibrīdas *MCDA* metodes, kas labāk atspoguļotu ekspertu nenoteiktību, kritēriju savstarpējo atkarību un scenāriju dinamiku. Šāds paplašinājums būtu īpaši nozīmīgs gadījumos, kur kritēriju nozīme būtiski mainās atkarībā no

lietotāja profila, tīkla stāvokļa, sezonas, uzlādes pieprasījuma vai kiberdrošības riska līmeņa. Dinamiski svari ļautu modelim pielāgoties situācijām, kur, piemēram, normālos apstākļos lielāka nozīme ir lietotāja ērtībai, bet tīkla noslodzes, datu kvalitātes vai kiberdrošības riska pieauguma apstākļos prioritāte pāriet uz drošumu, uzticamību un tīkla pieļaujamību.

Piektais virziens ir izstrādātā *AHP–PROMETHEE* modeļa salīdzināšana ar citām *MCDM* metodēm. Turpmākajos pētījumos būtu lietderīgi izmantot vienu un to pašu validācijas datu kopu, kritēriju sistēmu un scenārijus, lai salīdzinātu *AHP–PROMETHEE*, *AHP–TOPSIS*, *AHP–ELECTRE*, *VIKOR*, *MAUT*, vienkāršās svērtās summas un hibrīdas *MCDA* pieejas. Šādā salīdzinājumā būtu jāvērtē *TOP-1* alternatīvas sakritība, pilnā ranga izmaiņas, rezerves alternatīvu secība, jutība pret kritēriju svaru izmaiņām, aprēķinu ātrums, interpretējamība un piemērotība dinamiskai pārrēķina videi. Šāds *benchmarking* pētījums ļautu novērtēt, vai *PROMETHEE* rangs ir stabils arī citu *MCDM* metožu kontekstā, vai arī ranga izmaiņas būtiski atkarīgas no izvēlētās metodes matemātiskās loģikas.

TOPSIS metodi šādā salīdzinājumā būtu lietderīgi izmantot kā aprēķinu ziņā vienkāršāku bāzes modeli, īpaši lielākām alternatīvu kopām. Tā ļautu pārbaudīt, vai alternatīvas, kas ir tuvas ideālajam risinājumam, sakrīt ar *PROMETHEE* plūsmās augstu vērtētajām alternatīvām. Savukārt *ELECTRE* tipa metodes būtu nozīmīgas gadījumos, kur lēmuma pieņemšanā būtiska ir veto loģika un nepieļaujamu risku izslēgšana. Tas īpaši attiecas uz kiberdrošības, datu kvalitātes un sadales tīkla pieļaujamības kritērijiem, kuros noteiktas robežvērtības var būt svarīgākas nekā kopējais kompromisa rezultāts.

Sestais virziens ir kiberdrošības slāņa padziļināšana. Šajā darbā kiberdrošības indikators tika izmantots kā *MCDM* kritērijs un riska penalizācijas elements. Turpmāk būtu nepieciešams veidot ciešāku sasaisti ar *OCPP, ISO 15118, Plug & Charge*, sertifikātu pārvaldības, autentifikācijas, autorizācijas un drošas datu apmaiņas mehānismiem. Īpaši nozīmīga būtu *EVSE* un *CPO/CSO* datu reāllaika drošības monitoringa integrācija, lai kiberriska indikators atspoguļotu nevis tikai scenāriju pieņēmumu, bet aktuālu drošības stāvokli. Praktiskā līmenī tas varētu nozīmēt sasaisti ar *SOC*, *SIEM*, *IDS/IPS*, drošības notikumu žurnāliem un komunikācijas protokolu anomāliju noteikšanas rīkiem.

Septītais virziens ir *RES*, *BESS* un *V2G* integrācija. Darbā *RES/BESS* kritēriji tika iekļauti metodoloģiskajā kritēriju sistēmā, bet praktiskajā validācijā tie tika izmantoti ierobežotā apjomā. Turpmāk modelis būtu papildināms ar lokālās *PV* ģenerācijas, *BESS SOC*, uzlādes/izlādes jaudas, tīkla elastības un *V2G* potenciāla indikatoriem. Tas ļautu uzlādes punkta izvēli sasaistīt ne tikai ar pašreizējo tīkla noslodzi, bet arī ar lokālo enerģijas elastību, atjaunojamo energoresursu izmantošanu un potenciālu slodzes pārdali laikā. Šāds paplašinājums būtu īpaši nozīmīgs uzlādes infrastruktūrā, kur uzlādes punkti darbojas kopā ar *PV* ģenerāciju, akumulatoru enerģijas uzkrāšanas sistēmām vai agregatoru vadības risinājumiem.

Astotais virziens ir sarežģītāku tīkla procesu modelēšana. Nākotnē *SciML/PINN* pieejas varētu tikt izmantotas digitālā dvīņa aprēķinu slāņa paplašināšanai, piemēram, lai modelētu tīkla dinamiku, slodzes izplatību, sprieguma režīmu vai citu fizisku procesu aproksimāciju gadījumos, kur klasiskie aprēķinu modeļi ir datu vai skaitļošanas ziņā ierobežoti [63]. Šajā promocijas darbā šie risinājumi netiek īstenoti, tomēr tie iezīmē iespējamu turpmāku pētniecības virzienu, kur *MCDM* lēmumu slānis tiktu sasaistīts ar progresīvākiem fizisko procesu aproksimācijas un prognozēšanas modeļiem.

Devītais virziens ir praktiskās ieviešanas arhitektūras izstrāde. Lai izstrādāto modeli varētu izmantot reālā lēmumu atbalsta sistēmā, nepieciešams definēt datu apmaiņas arhitektūru starp *EV* lietotāju, *CPO/CSO, DSO*, kiberdrošības monitoringu un lēmuma aprēķinu kodolu. Šādā arhitektūrā būtiska nozīme būtu datu kvalitātes kontrolei, piekļuves tiesībām, datu anonimizācijai, lietotāja privātuma aizsardzībai, lēmuma auditējamībai un atbildības sadalījumam starp iesaistītajām pusēm. Praktiskā ieviešana prasītu ne tikai algoritmisku

risinājumu, bet arī datu pārvaldības, normatīvo, kiberdrošības un organizatorisko jautājumu risināšanu.

Apkopojot, turpmākā attīstība būtu virzāma trīs savstarpēji saistītos līmeņos. Pirmais ir datu un validācijas līmenis, kur nepieciešama plašāka reāllaika datu integrācija un praktiska pārbaude. Otrais ir metodoloģiskais līmenis, kur jāveic *MCDM* metožu salīdzināšana, svaru noteikšanas pieeju paplašināšana un prognozējošās analītikas ieviešana. Trešais ir sistēmu integrācijas līmenis, kur izstrādātais modelis jāsaista ar digitālā dvīņa, *CPO/CSO, DSO*, kiberdrošības monitoringa, *RES/BESS/V2G* un lietotāja lietotnes datu vidi.

6.7. Sestās nodaļas secinājumi

Sestajā nodaļā tika interpretēti 5. nodaļā iegūtie validācijas rezultāti, izvērtēta promocijas darba hipotēze, salīdzināts izstrādātais modelis ar literatūras virzieniem, formulēts zinātniskais pienesums, kā arī noteiktas praktiskās ieviešanas iespējas, pētījuma ierobežojumi un turpmākās attīstības virzieni.

Izstrādātais *AHP–PROMETHEE* modelis sasniedz promocijas darba mērķi metodoloģiskās un scenāriju validācijas līmenī. Modelis nodrošina iespēju strukturēti integrēt *EV*, uzlādes punkta, sadales tīkla, lietotāja, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības kritērijus vienotā dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas procesā.

Validācijas rezultāti parāda, ka modelis aprēķina pilnu un interpretējamu uzlādes punktu rangu. Katram lēmuma momentam iespējams noteikt pozitīvo, negatīvo un *neto* plūsmu, galveno alternatīvu un rezerves alternatīvu secību. Tas ir nozīmīgi dinamiskas piešķiršanas kontekstā, jo reālā ekspluatācijā primārā alternatīva var kļūt aizņemta, nedarbspējīga, tīkla ziņā nepieļaujama vai kiberdrošības ziņā riskanta.

Sezonālo *PROMETHEE II* lēmuma momentu rezultāti parāda, ka $PIERIGA2_{EUS1}$ saglabā pirmo vietu visos analizētajos sezonālajos scenārijos gan bāzes, gan uz uzticamību orientētajā konfigurācijā. $RIGA1_{EUS1}$ visos sezonālajos lēmuma momentos saglabā otro vietu un ir interpretējama kā galvenā rezerves alternatīva gadījumā, ja pirmā izvēle kļūst nepieejama vai riskanta.

Bāzes *AHP* svaru konfigurācijā uzticamības, jaudas rezerves, kiberriska, datu kvalitātes un tīkla noslodzes kritēriju kopējais svars ir 73,710 %. Uz uzticamību orientētajā konfigurācijā šis kritēriju bloks palielinās līdz 78,463 %, savukārt attāluma, gaidīšanas laika un cenas kopējais svars samazinās līdz 12,791 %. Tas apstiprina, ka modelis prioritizē ne tikai lietotāja ērtību, bet arī lēmuma uzticamību, tīkla pieļaujamību, datu kvalitāti un kiberdrošību.

Bāzes scenārijā pieļaujamo alternatīvu īpatsvars saglabājas augsts: 99,70 % vasarā, 99,65 % rudenī un 99,21 % ziemā. Tas parāda, ka normālos ekspluatācijas apstākļos modelis saglabā augstu piešķiršanas spēju un nepamatoti nesašaurina alternatīvu kopu.

Datu kvalitātes degradācijas scenārijā pieļaujamo alternatīvu skaits samazinās līdz 0 no 7, un piešķiršanas panākumu īpatsvars ir 0 %. Šis rezultāts parāda, ka modelis pamatoti neizdod automātisku rekomendāciju, ja datu kvalitāte neatbilst minimālajām prasībām. Šādā situācijā nepieciešama datu aktualizācija, atkāpšanās procedūra vai operatora iesaiste.

Kiberdrošības riska un kombinētajā stresa scenārijā pieļaujamo alternatīvu kopa sašaurinās līdz 2 no 7 alternatīvām jeb 28,57 %, tomēr piešķiršanas panākumu īpatsvars saglabājas 100 %. Tas parāda, ka drošības un uzticamības filtri būtiski sašaurina izvēles telpu, bet pilnībā neaptur lēmuma pieņemšanu, ja saglabājas pieļaujamas alternatīvas.

Kiberdrošības datu slāņa rezultāti apstiprina, ka kiberriska indikatoru iespējams metodoloģiski pamatot ar *OCPP* un *IIoT* datu kopu analīzi. *OCPP TCP/IP* slānī iegūtais *AUC* 0,911 norāda uz labu anomāliju atdalāmību, savukārt *OCPP* lietotnes līmeņa *AUC* 0,723 norāda uz mērenu atdalāmību. *WUSTL-IIoT* dati jāinterpretē kā papildu industriālā *IoT* domēna piemērs, nevis kā tiešs *EVSE* drošības audita rezultāts.

Hipotēze tiek atbalstīta metodoloģiskās un scenāriju validācijas robežās. Darbā ir parādīts, ka uzticamības orientēta, dinamiska un daudzkritēriju pieeja nodrošina pamatotāku un interpretējamāku uzlādes punkta piešķiršanu nekā statiskas vai ierobežota kritēriju skaita pieejas. Vienlaikus hipotēzi nevar uzskatīt par pilnībā pierādītu pilna mēroga lauka ekspluatācijas nozīmē, jo validācija veikta ar anonimizētiem objektiem, scenāriju vidi un prototipa aprēķinu loģiku.

Promocijas darba zinātniskais pienesums ir dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas formalizācija kā *MCDM* problēma, uzlādes punkta interpretācija kā kiberfiziska alternatīva un *AHP–PROMETHEE* balstīta uzticamības orientēta prioritizācijas modeļa izstrāde. Praktiskais pienesums ir reproducējams lēmuma atbalsta sistēmas aprēķinu kodols, kas var tikt tālāk attīstīts *CPO/CSO, DSO*, pašvaldību, viedās uzlādes un kiberdrošības pārvaldības vajadzībām.

Būtisks sestās nodaļas secinājums ir arī tas, ka promocijas darba rezultāti ir interpretējami izvēlētās *AHP–PROMETHEE* metodoloģijas robežās. *PROMETHEE* metode šajā darbā ir pamatota ar tās spēju nodrošināt pilnu alternatīvu rangu, pārākuma plūsmu interpretāciju un rezerves alternatīvu secību. Tomēr ar citām *MCDM* metodēm, piemēram, *TOPSIS*, *ELECTRE*, *VIKOR* vai *MAUT*, gala alternatīvu secība varētu atšķirties, īpaši robežsituācijās, kad alternatīvas ir līdzīgas pēc kopējā vērtējuma vai kad pastāv izteikts konflikts starp lietotāja, tīkla, datu kvalitātes un kiberdrošības kritērijiem.

Tādēļ izstrādātais modelis nav uzskatāms par pierādījumu tam, ka *PROMETHEE* vienmēr ir pārāka par citām *MCDM* metodēm. Darba pienesums ir tas, ka tas parāda, kā dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas uzdevumā iespējams strukturēt kritērijus, ieviest filtrus, noteikt svarus, iekļaut uzticamības un kiberdrošības slāni, aprēķināt alternatīvu rangu un nodrošināt interpretējamu lēmuma rezultātu. Citu *MCDM* metožu salīdzinoša pārbaude ir uzskatāma par nozīmīgu turpmākās attīstības virzienu.

Turpmākā modeļa attīstība saistāma ar reāllaika *CPO/CSO* un *DSO* datu integrāciju, plašāku *EV* lietotāju un *SOC* datu izmantošanu, digitālā dvīņa pieejas attīstību, prognozējošās analītikas ieviešanu, *fuzzy/dynamic AHP* vai *ANP* metožu izmantošanu, salīdzinošu *MCDM* metožu pārbaudi, *RES/BESS/V2G* indikatoru paplašināšanu un kiberdrošības monitoringa ciešāku sasaisti ar *OCPP* un *ISO 15118* komunikācijas slāņiem.

Kopumā 6. nodaļa nostiprina promocijas darba galveno secinājumu: *EV* uzlādes punkta piešķiršana kiberfiziskā un tīkla ierobežotā vidē jāskata kā dinamiska, daudzkritēriju un uz uzticamību orientēta lēmumu pieņemšanas problēma. Izstrādātais *AHP–PROMETHEE* modelis šajā kontekstā nodrošina strukturētu, reproducējamu un interpretējamu metodoloģisko pamatu, kas ļauj līdzsvarot lietotāja vajadzības, uzlādes infrastruktūras darbspēju, sadales tīkla pieļaujamību, datu kvalitāti un kiberdrošības risku.

SECINĀJUMI

Promocijas darba mērķis ir sasniegts: darbā izstrādāts un pārbaudīts daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas modelis uz uzticamību orientētai dinamiskai elektrisko transportlīdzekļu uzlādes punkta piešķiršanai. Modelis vienotā lēmumu pieņemšanas struktūrā apvieno elektriskā transportlīdzekļa, uzlādes infrastruktūras, sadales tīkla, lietotāja, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības kritērijus.

1. Darbā pamatots, ka elektriskā transportlīdzekļa uzlādes punkta izvēli nevar balstīt tikai uz vienu kritēriju, piemēram, attālumu, gaidīšanas laiku, cenu vai pieejamo uzlādes jaudu. Uzlādes punkta piemērotību nosaka vairāki savstarpēji saistīti un reizēm konfliktējoši kritēriji, tādēļ šis uzdevums ir jāvērtē kā dinamiska daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas problēma.
2. Izstrādātais teorētiskais modelis nošķir ilgtermiņa uzlādes infrastruktūras plānošanu no operatīvas uzlādes punkta piešķiršanas. Infrastruktūras plānošana nosaka staciju izvietojumu, kapacitāti un teritorijas pārklājumu, savukārt dinamiska piešķiršana nosaka piemērotāko konkrētajam elektriskajam transportlīdzeklim konkrētajā laikā pieejamo uzlādes alternatīvu.
3. Promocijas darbā uzlādes punkts tiek interpretēts kā kiberfiziska alternatīva, nevis tikai fizisks elektroenerģijas nodošanas punkts. Tas nozīmē, ka alternatīvas vērtēšanā tiek iekļauta ne tikai jauda, atrašanās vieta un pieejamība, bet arī datu kvalitāte, sakaru uzticamība, pakalpojuma nepārtrauktība un kiberdrošības risks.
4. Izstrādātā *AHP–PROMETHEE* metodoloģija nodrošina strukturētu, izskaidrojamu un reproducējamu lēmuma pieņemšanas procesu. *AHP* metode tiek izmantota kritēriju hierarhijas un svaru noteikšanai, savukārt *PROMETHEE* metode nodrošina pieļaujamo alternatīvu salīdzināšanu, pozitīvās, negatīvās un *neto* plūsmas aprēķinu, pilna ranga iegūšanu un rezerves alternatīvu secības noteikšanu.
5. Modelī iekļautā dinamiskās filtrēšanas loģika ļauj pirms alternatīvu salīdzināšanas izslēgt tehniski, ekspluatācijas, sadales tīkla, datu kvalitātes vai kiberdrošības ziņā nepieļaujamas alternatīvas. Šāda pieeja samazina risku ieteikt uzlādes punktu, kas formāli varētu būt izdevīgs pēc viena kritērija, bet konkrētajā situācijā nav droši, uzticami vai pamatoti izmantojams.
6. Uzticamības un kiberdrošības slānis darbā integrēts trīs līmeņos: kā sākotnējās filtrēšanas nosacījumi, kā atsevišķi *PROMETHEE* kritēriji un kā gala prioritātes korekcijas vai riska samazināšanas mehānisms. Tādējādi uzticamība un kiberdrošība nav ārējs papildinājums pēc lēmuma pieņemšanas, bet pilnvērtīga lēmuma modeļa sastāvdaļa.
7. Modeļa pārbaudei izveidota anonimizēta eksperimentālā datu vide ar pilsētas un piepilsētas elektrisko transportlīdzekļu uzlādes objektiem, uzlādes punktu tehniskajiem parametriem, transformatoru un barošanas avotu datiem, slodžu profiliem, sezonālajiem scenārijiem, datu kvalitātes rādītājiem un kiberdrošības riska scenārijiem. Šī vide ļauj pārbaudīt modeļa darbību metodoloģiskā un scenāriju līmenī.
8. Pārbaudes rezultāti parāda, ka pamata *AHP* svaru konfigurācijā uzticamības, jaudas rezerves, kiberriska, datu kvalitātes un tīkla noslodzes kritēriji kopā veido 73,710 % no kopējā svara. Uz uzticamību orientētajā konfigurācijā šo kritēriju kopējais svars palielinās līdz 78,463 %, savukārt attāluma, gaidīšanas laika un cenas kopējais svars samazinās līdz 12,791 %. Tas apliecina, ka modelis pēc savas struktūras ir orientēts uz uzticamību, sadales tīkla pieļaujamību, datu kvalitāti un kiberdrošību, nevis tikai uz lietotāja īstermiņa ērtību.

9. *PROMETHEE* pārbaudes rezultāti sezonālajos lēmuma scenārijos parāda, ka $PIERIGA2_{EUS1}$ saglabā pirmo vietu visās analizētajās sezonās gan pamata, gan uz uzticamību orientētajā konfigurācijā. $RIGA1_{EUS1}$ visos sezonālajos lēmuma momentos saglabā otro vietu un ir interpretējama kā galvenā rezerves alternatīva gadījumā, ja primārā alternatīva kļūst nepieejama, tīkla ziņā mazāk piemērota vai drošības ziņā riskantāka.
10. Pamata scenārijā modelis nodrošina augstu piešķiršanas spēju visos analizētajos sezonālajos periodos. Pieļaujamo alternatīvu īpatsvars pamata režīmā saglabājas augsts: 99,70 % vasarā, 99,65 % rudenī un 99,21 % ziemā. Tas parāda, ka filtrēšanas mehānisms normālos apstākļos nav pārmērīgi ierobežojošs un saglabā pietiekamu rezerves alternatīvu kopu.
11. Stresa scenārijos datu kvalitātes un kiberdrošības slānis būtiski ietekmē alternatīvu pieļaujamību. Datu kvalitātes pasliktināšanās scenārijā pieļaujamo alternatīvu skaits samazinās līdz 0 no 7, un piešķiršanas panākumu īpatsvars ir 0 %. Šis rezultāts nav interpretējams kā modeļa kļūme, bet gan kā uz uzticamību orientētas pieejas pazīme: ja datu kvalitāte neatbilst minimālajām prasībām, modelim nav jāizdod automātisks uzlādes punkta ieteikums.
12. Kiberdrošības riska un kombinētajā stresa scenārijā pieļaujamo alternatīvu kopa sašaurinās līdz 2 no 7 alternatīvām jeb 28,57 %, tomēr piešķiršanas panākumu īpatsvars saglabājas 100 %. Tas parāda, ka drošības un uzticamības nosacījumi būtiski sašaurina izvēles iespējas, bet pilnībā neaptur lēmuma pieņemšanu, ja saglabājas vismaz viena vai vairākas pieļaujamas alternatīvas.
13. Salīdzinošā analīze ar vienkāršotām piešķiršanas pieejām parāda, ka tuvākās stacijas, īsākā gaidīšanas laika vai lielākās pieejamās jaudas stratēģijas ne vienmēr dod pamatotāko izvēli. Viena kritērija pieejas var neņemt vērā sadales tīkla noslodzi, datu kvalitāti, uzticamību vai kiberdrošības risku, savukārt pilnais *AHP–PROMETHEE* modelis nodrošina līdzsvarotāku un skaidrāk izskaidrojamu izvēli.
14. Jutīguma analīze parāda, ka modelis spēj saglabāt stabilu izvēli normālos apstākļos, vienlaikus reaģējot uz kritēriju svaru un scenāriju izmaiņām. Tas apliecina, ka sadales tīkla darbības režīma, uzticamības un kiberdrošības kritēriju iekļaušana nav formāls papildinājums, bet gan faktors, kas var būtiski ietekmēt alternatīvu secību situācijās, kad tīkla pieļaujamība, datu kvalitāte vai drošības risks kļūst par prioritāru lēmuma pieņemšanas nosacījumu.
15. Kiberdrošības datu slāņu analīze parāda, ka *OCPP TCP/IP, OCPP* lietotnes līmeņa un *WUSTL-IIoT* datu kopas var izmantot kiberriska rādītāja metodoloģiskai pamatošanai. *OCPP TCP/IP* datu slānī iegūtais *AUC* 0,911 norāda uz labu normālas un aizdomīgas sakaru uzvedības atdalāmību, savukārt *OCPP* lietotnes līmeņa *AUC* 0,723 norāda uz mērenu atdalāmību. *WUSTL-IIoT* dati jāinterpretē kā papildu industriālā lietu interneta domēna piemērs, nevis kā tiešs konkrēta uzlādes objekta kiberdrošības audita rezultāts.
16. Promocijas darba hipotēze tiek atbalstīta metodoloģiskās un scenāriju validācijas robežās. Izstrādātais uz uzticamību orientētais *AHP–PROMETHEE* modelis nodrošina pamatotāku un skaidrāk izskaidrojamu elektrisko transportlīdzekļu uzlādes punkta piešķiršanu nekā statiskas vai ierobežota kritēriju skaita pieejas, jo vienlaikus ņem vērā lietotāja, infrastruktūras, sadales tīkla, datu kvalitātes un kiberdrošības faktorus. Vienlaikus hipotēzi nevar uzskatīt par pilnībā pierādītu pilna mēroga lauka ekspluatācijas nozīmē.
17. Darba zinātniskais pienesums ir dinamiskas elektrisko transportlīdzekļu uzlādes punkta piešķiršanas formalizēšana kā daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas problēma, uzlādes punkta interpretācija kā kiberfiziska alternatīva, *AHP–PROMETHEE* balstītas

prioritizācijas metodoloģijas izstrāde un uzticamības/kiberdrošības slāņa iekļaušana operatīvā lēmumu modelī.

18. Darba praktiskais rezultāts ir lēmuma atbalsta sistēmas prototipa aprēķinu kodols, ko iespējams tālāk attīstīt uzlādes infrastruktūras operatoru, sadales sistēmas operatoru, pašvaldību, kiberdrošības pārvaldības un elektrisko transportlīdzekļu uzlādes infrastruktūras digitālā dvīņa vajadzībām. Modelis var kalpot kā pamats dinamiskai, izskaidrojamai un riskam pielāgotai uzlādes alternatīvu ieteikšanai.
19. Darba rezultāti ir interpretējami izvēlētās *AHP–PROMETHEE* metodoloģijas robežās. *PROMETHEE* metode šajā darbā ir pamatota ar spēju nodrošināt pilnu alternatīvu rangu, pārākuma plūsmu interpretāciju un rezerves alternatīvu secību. Tomēr ar citām *MCDM* metodēm, piemēram, *TOPSIS*, *ELECTRE*, *VIKOR* vai *MAUT*, gala alternatīvu secība varētu atšķirties, īpaši gadījumos, kad alternatīvas ir tuvas pēc kopējā vērtējuma vai pastāv konflikts starp lietotāja ērtību, sadales tīkla pieļaujamību, datu kvalitāti un kiberdrošības risku.
20. Promocijas darbā nav veikta pilna *AHP–PROMETHEE*, *AHP–TOPSIS*, *AHP–ELECTRE*, *VIKOR* un citu *MCDM* metožu salīdzinoša pārbaude vienā un tajā pašā validācijas datu kopā. Tādēļ iegūtais rangs nav interpretējams kā universāls visām *MCDM* metodēm, bet gan kā pamatots rezultāts izvēlētajā *AHP–PROMETHEE* metodoloģiskajā ietvarā. Citu metožu izmantošana varētu mainīt *TOP-1* alternatīvu, rezerves alternatīvu secību vai ranga jutīgumu pret svaru izmaiņām.
21. Darba rezultāti jāinterpretē, ievērojot validācijas robežas. Pārbaude veikta metodoloģiskā un scenāriju vidē, nevis pilna mēroga lauka eksperimentā ar reāllaika uzlādes infrastruktūras operatoru, sadales sistēmas operatoru, elektrisko transportlīdzekļu un kiberdrošības uzraudzības datiem. Tādēļ nākamais attīstības solis ir modeļa pārbaude plašākā datu vidē un reālos ekspluatācijas apstākļos.
22. Turpmākā modeļa attīstība saistāma ar reāllaika uzlādes infrastruktūras operatoru un sadales sistēmas operatoru datu integrāciju, plašāku elektrisko transportlīdzekļu lietotāju un akumulatora uzlādes līmeņa datu izmantošanu, digitālā dvīņa pieejas attīstību, prognozējošās analītikas ieviešanu, *fuzzy* vai dinamisko *AHP* un *ANP* metožu izmantošanu, alternatīvu *MCDM* metožu salīdzinošu pārbaudi, atjaunojamo energoresursu, elektroenerģijas uzkrāšanas sistēmu un transportlīdzekļa – tīkla mijiedarbības rādītāju paplašināšanu, kā arī kiberdrošības uzraudzības ciešāku sasaisti ar *OCPP* un *ISO 15118* sakaru slāņiem.
23. Kopumā promocijas darbs parāda, ka elektriskā transportlīdzekļa uzlādes punkta piešķiršana kiberfiziskā un sadales tīkla ierobežotā vidē jāskata kā dinamiska, daudzkritēriju un uz uzticamību orientēta lēmumu pieņemšanas problēma. Izstrādātais *AHP–PROMETHEE* modelis nodrošina šādas pieejas teorētisko, metodoloģisko un praktisko pamatu.

PRIEKŠLIKUMI

1. *EV* uzlādes infrastruktūras operatoriem ieteicams uzlādes punkta izvēlē nebalstīties tikai uz tuvākās stacijas, īsākā gaidīšanas laika vai lielākās uzlādes jaudas principu. Praktiskajā lēmumu atbalstā jāizmanto daudzkritēriju pieeja, kas vienlaikus ņem vērā lietotāja vajadzības, uzlādes punkta pieejamību, sadales tīkla stāvokli, datu kvalitāti, uzticamību un kiberdrošību.
2. Uzlādes infrastruktūras operatoriem ieteicams ieviest dinamisku uzlādes alternatīvu filtrēšanu pirms ieteikuma sniegšanas lietotājam. No sākotnējās kandidātu kopas jāizslēdz alternatīvas, kas konkrētajā brīdī nav sasniedzamas, nav tehniski savietojamas ar transportlīdzekli, nav pieejamas, neatbilst minimālajai datu kvalitātei, rada pārmērīgu sadales tīkla risku vai pārsniedz pieļaujamu kiberdrošības riska līmeni.
3. Sadales sistēmas operatoriem un uzlādes infrastruktūras operatoriem ieteicams attīstīt datu apmaiņu, kas ļauj uzlādes punkta izvēlē ņemt vērā sadales tīkla stāvokli. Lēmumu modelī būtu jāiekļauj vismaz tīkla noslodzes, pieejamās jaudas rezerves, kritisko tīkla mezglu, transformatoru noslodzes un sprieguma režīma rādītāji.
4. Uzlādes infrastruktūras pārvaldībā ieteicams saglabāt ne tikai vienu ieteikto uzlādes punktu, bet arī pilnu rezerves alternatīvu secību. Tas ļautu ātri izmantot nākamo piemērotāko uzlādes punktu gadījumos, kad sākotnēji izvēlētais punkts kļūst aizņemts, nedarbspējīgs, datu ziņā neuzticams vai kiberdrošības ziņā riskants.
5. Kiberdrošības un datu kvalitātes kritēriji jāiekļauj uzlādes punkta piešķiršanas modelī kā pilnvērtīgi lēmuma faktori. Tos nav pietiekami vērtēt tikai pēc incidenta vai tehniskās pārbaudes ietvaros, jo datu integritāte, sakaru stabilitāte un droša lietotāja identificēšana tieši ietekmē uzlādes pakalpojuma pieejamību un uzticamību.
6. *EV* uzlādes infrastruktūras lēmuma atbalsta sistēmās ieteicams izmantot dažādas kritēriju svaru konfigurācijas atkarībā no situācijas. Normālā režīmā var izmantot pamata svarus, bet pīķa slodzes, datu kvalitātes pasliktināšanās, kiberdrošības riska vai tīkla ierobežojumu gadījumā lielāka nozīme jāpiešķir uzticamībai, datu kvalitātei, sadales tīkla pieļaujamībai un kiberdrošībai.
7. Datu kvalitātes pārvaldībai jābūt atsevišķai *EV* uzlādes lēmuma atbalsta sistēmas funkcijai. Ieteicams uzraudzīt datu pilnīgumu, aktualitāti, laika zīmogus, datu avota uzticamību un sakaru stabilitāti, jo nepilnīgi vai novecojuši dati var radīt kļūdainu uzlādes punkta ieteikumu.
8. Ja datu kvalitāte neatbilst minimālajām prasībām, lēmuma atbalsta sistēmai nav automātiski jāizdod uzlādes punkta ieteikums. Šādā gadījumā jāparedz rīcība nepietiekamu datu gadījumā: atkārtota datu pieprasīšana, operatora iesaiste, meklēšanas zonas paplašināšana vai lietotāja informēšana par nepietiekamu datu ticamību.
9. Pašvaldībām un reģionālajiem mobilitātes plānotājiem ieteicams izmantot šāda veida daudzkritēriju modeli kā papildinājumu uzlādes infrastruktūras attīstības plānošanā. Modelis var palīdzēt noteikt atšķirības starp pilsētas un piepilsētas objektiem, novērtēt rezerves alternatīvu pieejamību un identificēt vietas, kur nepieciešama tīkla vai uzlādes infrastruktūras pastiprināšana.
10. Sadales sistēmas operatoriem ieteicams izmantot uzlādes punkta izvēles pieeju, kurā tiek ņemts vērā sadales tīkla darbības režīms. Šāda pieeja var palīdzēt mazināt lokālas pārslodzes un nevēlamus slodzes maksimumus, papildinot klasiskos tīkla attīstības un pieslēgumu plānošanas instrumentus ar operatīvu slodzes novirzīšanas iespēju.

11. Turpmākai modeļa attīstībai ieteicams iekļaut prognozēšanas funkcionalitāti, lai uzlādes punkta izvēle balstītos ne tikai uz aktuālo situāciju, bet arī uz tuvākā laika slodzes, gaidīšanas laika, *EV* pieprasījuma, atjaunojamo energoresursu ražošanas un elektroenerģijas uzkrāšanas sistēmu pieejamības prognozēm.
12. Nākamajos pētījumos ieteicams paplašināt pārbaudes datu kopu ar reāliem *EV* akumulatora uzlādes līmeņa, maršruta, lietotāju uzvedības, rindas, rezervāciju, sprieguma, fāžu nesimetrijas un reāllaika kiberdrošības uzraudzības datiem. Tas ļautu pāriet no metodoloģiskas un scenāriju pārbaudes uz pilna mēroga pārbaudi reālos ekspluatācijas apstākļos.
13. *EV* uzlādes infrastruktūras turpmākajā attīstībā ieteicams sasaistīt izstrādāto lēmuma atbalsta sistēmas aprēķinu kodolu ar digitālā dvīņa pieeju. Digitālais dvīnis varētu nodrošināt vienotu vidi uzlādes infrastruktūras, sadales tīkla, datu kvalitātes, lietotāju pieprasījuma, atjaunojamo energoresursu, elektroenerģijas uzkrāšanas sistēmu un kiberdrošības rādītāju modelēšanai un uzraudzībai.
14. Turpmākajos pētījumos ieteicams veikt izstrādātā *AHP–PROMETHEE* modeļa salīdzinājumu ar citām *MCDM* metodēm, piemēram, *TOPSIS*, *ELECTRE*, *VIKOR*, *MAUT* un vienkāršās svērtās summas pieeju. Salīdzinājumā jāvērtē *TOP-1* alternatīvas sakritība, pilnā ranga izmaiņas, rezerves alternatīvu secība, jutība pret kritēriju svaru izmaiņām, aprēķinu ātrums un lēmuma skaidrojamība.
15. *TOPSIS* metodi ieteicams izmantot kā vienkāršāku salīdzinošo bāzes modeli, īpaši lielākām alternatīvu kopām. Šāda pārbaude ļautu novērtēt, vai alternatīvas, kas atrodas tuvāk ideālajam risinājumam, sakrīt ar *PROMETHEE* plūsmās augsti novērtētajām alternatīvām, kā arī noteikt, cik būtiski metodes izvēle ietekmē gala rangu.
16. *ELECTRE* tipa metodes ieteicams izmantot kā papildu drošības, datu kvalitātes un tīkla pieļaujamības pārbaudes instrumentu. *ELECTRE* veto loģika var būt noderīga gadījumos, kad alternatīva jāizslēdz nepieļaujama kiberriska, nepietiekamas datu kvalitātes vai sadales tīkla pārslodzes riska dēļ, pat ja tā ir pievilcīga pēc lietotāja ērtības vai cenas kritērijiem.
17. Kritēriju svaru noteikšanā ieteicams pārbaudīt *fuzzy AHP*, dinamiskā *AHP* vai *ANP* piemērotību, jo šīs pieejas var labāk atspoguļot ekspertu nenoteiktību, kritēriju savstarpējo atkarību un situācijas izmaiņas laikā. Tas būtu īpaši nozīmīgi gadījumos, kad kritēriju nozīme mainās atkarībā no sezonas, lietotāja profila, tīkla stāvokļa vai kiberdrošības riska līmeņa.
18. Kiberdrošības pārbaudes turpināšanai ieteicams izmantot datu kopas un testēšanas gadījumus, kas tiešāk raksturo *OCPP, ISO 15118* un *EV* uzlādes iekārtu sakaru vidi. Tas ļautu precīzāk sasaistīt kiberriska rādītājus ar konkrētiem uzlādes infrastruktūras sakaru protokoliem un ekspluatācijas apstākļiem.
19. *OCPP TCP/IP, OCPP* lietotnes līmeņa un *WUSTL-IIoT* datu kopas ieteicams izmantot kā metodoloģisku pamatu kiberriska rādītāju izstrādei, bet ne kā pilnvērtīgu konkrēta uzlādes objekta kiberdrošības audita aizstājēju. Praktiskā ieviešanā kiberriska slānis jāpapildina ar konkrētās infrastruktūras drošības notikumiem, sakaru žurnāliem, autentifikācijas kļūdām un operatora drošības uzraudzības datiem.
20. Praktiskā ieviešanā ieteicams nodrošināt lēmuma skaidrojamību lietotājam un operatoram. Sistēmai jāspēj parādīt, kāpēc izvēlēta konkrētā alternatīva un kāpēc cita alternatīva netika ieteikta, piemēram, tīkla noslodzes, zemākas datu kvalitātes, augstāka kiberdrošības riska vai nepietiekamas jaudas rezerves dēļ.
21. Pirms pilna mēroga ieviešanas ieteicams veikt izmēģinājuma projektu ar ierobežotu uzlādes infrastruktūras operatora un sadales sistēmas operatora datu integrāciju.

Izmēģinājuma projekta mērķim jābūt ne tikai aprēķina metodes tehniskai pārbaudei, bet arī datu apmaiņas, atbildības sadalījuma, kiberdrošības prasību, rīcības nepietiekamu datu gadījumā un lēmuma skaidrošanas mehānisma pārbaudei reālos ekspluatācijas apstākļos.

22. Lēmumu atbalsta sistēmas praktiskā ieviešanā ieteicams definēt skaidru atbildības sadalījumu starp uzlādes infrastruktūras operatoru, sadales sistēmas operatoru, kiberdrošības pārvaldības funkciju un lietotāja saskarni. Tas ir nepieciešams, lai būtu skaidrs, kurš nodrošina datu kvalitāti, kurš validē tīkla ierobežojumus, kurš pārvalda kiberdrošības indikatorus un kurš ir atbildīgs par gala rekomendācijas sniegšanu lietotājam.
23. Izstrādāto modeli ieteicams izmantot nevis kā autonomu automātiskas vadības sistēmu, bet kā lēmumu atbalsta sistēmas aprēķinu kodolu. Gala ieviešanā jāparedz iespēja operatora kontrolei, lēmuma auditēšanai, datu kvalitātes pārbaudei un atkāpšanās procedūrai situācijās, kad nav pietiekami uzticamu datu vai kad visas alternatīvas kļūst nepieļaujamas.

ATSAUCES

[1] International Energy Agency, Global EV Outlook 2025: Expanding sales in diverse markets. Paris, France: IEA, 2025. Skatīts: 25.05.2026. [Tiešsaiste]. Pieejams: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025

[2] International Energy Agency, "Electric vehicle charging," in Global EV Outlook 2025. Paris, France: IEA, 2025. Skatīts: 25.05.2026. [Tiešsaiste]. Pieejams: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/electric-vehicle-charging

[3] European Environment Agency, "Greenhouse gas emissions from transport in Europe," 2025. Skatīts: 25.05.2026. [Tiešsaiste]. Pieejams: https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-transport

[4] European Environment Agency, "Electric vehicles," 2025. Skatīts: 25.05.2026. [Tiešsaiste]. Pieejams: https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/electric-vehicles

[5] European Commission, "Alternative fuels infrastructure," 2025. Skatīts: 25.05.2026. [Tiešsaiste]. Pieejams: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/clean-transport/alternative-fuels-sustainable-mobility-europe/alternative-fuels-infrastructure_en

[6] J.-M. Clairand, J. Rodríguez-García, and C. Álvarez-Bel, "Assessment of technical and economic impacts of EV user behavior on EV aggregator smart charging," Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 8, no. 2, pp. 356–366, Mar. 2020, doi: 10.35833/MPCE.2018.000840.

[7] N. Erdogan, D. Pamucar, S. Kucuksari, and M. Deveci, "An integrated multi-objective optimization and multi-criteria decision-making model for optimal planning of workplace charging stations," Applied Energy, vol. 304, p. 117866, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117866.

[8] A. Sanghvi and T. Markel, "Cybersecurity for electric vehicle fast-charging infrastructure," in 2021 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Chicago, IL, USA, Jun. 2021, pp. 573–576, doi: 10.1109/ITEC51675.2021.9490069.

[9] T. Unterluggauer, J. Rich, P. B. Andersen, and S. Hashemi, "Electric vehicle charging infrastructure planning for integrated transportation and power distribution networks: A review," eTransportation, vol. 12, p. 100163, May 2022, doi: 10.1016/j.etran.2022.100163.

[10] S. Rivera, S. M. Goetz, S. Kouro, P. W. Lehn, M. Pathmanathan, P. Bauer, and R. A. Mastromauro, "Charging infrastructure and grid integration for electromobility," Proceedings of the IEEE, vol. 111, no. 4, pp. 371–396, Apr. 2023, doi: 10.1109/JPROC.2022.3216362.

[11] N. Kunicina, V. Beliaev, R. Grants, J. Caiko, R. Amanova, R. Brūzgienė, and M. Mansurova, "Decision-making system for electric vehicle management by integrating smart technologies and local characteristics," Applied Sciences, vol. 14, no. 23, p. 11150, Nov. 2024, doi: 10.3390/app142311150.

[12] J. McCarthy, N. Grayson, J. Brule, T. Cottle, A. Dinerman, J. Dombrowski, J. Long, H. Tran, K. Quigg, M. Thompson, A. Townsend, and N. Urlaub, Cybersecurity Framework Profile for Electric Vehicle Extreme Fast Charging Infrastructure, NIST IR 8473. Gaithersburg, MD, USA: National Institute of Standards and Technology, 2023, doi: 10.6028/NIST.IR.8473.

[13] R. Grants, N. Kunicina, R. Brūzgienė, Š. Grigaliūnas, and A. Romanovs, "Decision-support framework for cybersecurity risk assessment in EV charging infrastructure," Energies, vol. 19, no. 8, p. 1814, Apr. 2026, doi: 10.3390/en19081814.

[14] European Parliament and Council of the European Union, Regulation (EU) 2023/1804 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the deployment of alternative fuels infrastructure, and repealing Directive 2014/94/EU. 2023. Skatīts: 25.05.2026. [Tiešsaiste]. Pieejams: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1804/oj
[15] H.-C. Liu, M. Yang, M. Zhou, and G. Tian, "An integrated multi-criteria decision making approach to location planning of electric vehicle charging stations," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 20, no. 1, pp. 362–373, Jan. 2019, doi: 10.1109/TITS.2018.2815680.
[16] A. Mohammed, O. Saif, M. Abo-Adma, A. Fahmy, and R. Elazab, "Strategies and sustainability in fast charging station deployment for electric vehicles," Scientific Reports, vol. 14, p. 283, Jan. 2024, doi: 10.1038/s41598-023-50825-7.
[17] Ö. Kaya, K. D. Alemdar, A. Atalay, M. Y. Çodur, and A. Tortum, "Electric car sharing stations site selection from the perspective of sustainability: A GIS-based multi-criteria decision making approach," Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 52, p. 102026, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102026.
[18] Y. Wu, M. Yang, H. Zhang, K. Chen, and Y. Wang, "Optimal site selection of electric vehicle charging stations based on a cloud model and the PROMETHEE method," Energies, vol. 9, no. 3, p. 157, Mar. 2016, doi: 10.3390/en9030157.
[19] Z. Ma, D. S. Callaway, and I. A. Hiskens, "Decentralized charging control of large populations of plug-in electric vehicles," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 21, no. 1, pp. 67–78, Jan. 2013, doi: 10.1109/TCST.2011.2174059.
[20] M. Latifi, A. Rastegarnia, A. Khalili, and S. Sanei, "Agent-based decentralized optimal charging strategy for plug-in electric vehicles," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 5, pp. 3668–3680, May 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2853609.
[21] C. Shao, X. Wang, X. Wang, C. Du, C. Dang, and S. Liu, "Cooperative dispatch of wind generation and electric vehicles with battery storage capacity constraints in SCUC," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 5, pp. 2219–2226, Sep. 2014, doi: 10.1109/TSG.2014.2316911.
[22] ElaadNL, Smart Charging Testing: M2M Communication Between Electric Vehicles and Charging Stations. Arnhem, The Netherlands: ElaadNL, 2025.
[23] M. Lai, Q. Hu, Y. Liu, and Z. Lang, "A rolling-horizon decision framework for integrating relocation and user flexibility in one-way electric carsharing systems," Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 144, p. 103867, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.trc.2022.103867.
[24] European Union Agency for Cybersecurity, ENISA Threat Landscape 2023. Athens, Greece: ENISA, 2023. 2025. Skatīts: 25.05.2026. [Tiešsaiste]. Pieejams: https://www.enisa.europa.eu/publications/enisa-threat-landscape-2023
[25] Y. Liu, X. Yang, M. Li, M. Wu, C. Sun, and S. Zhou, "On the criteria for cybersecurity and risk assessment based on ISO/SAE 21434 for the application of autonomous vehicle," in Proceedings of the 2022 International Conference on Computer Science, Information Engineering and Digital Economy (CSIEDE 2022), Advances in Computer Science Research, vol. 107, Atlantis Press, 2022, pp. 134–143, doi: 10.2991/978-94-6463-108-1_16.
[26] M. Cinelli, S. R. Coles, and K. Kirwan, "Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment," Ecological Indicators, vol. 46, pp. 138–148, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.ecolind.2014.06.011.

[27] J.-P. Brans and B. Mareschal, “PROMETHEE methods,” in Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys, J. Figueira, S. Greco, and M. Ehrgott, Eds. Boston, MA, USA: Springer, 2005, pp. 163–186, doi: 10.1007/0-387-23081-5_5.
[28] J. J. Cartelle Barros, A. Filgueira-Vizoso, L. Castro-Santos, and M. I. Lamas Galdo, “Sustainability evaluation of power systems using MCDM techniques,” in Energy Transition: Economic, Social and Environmental Dimensions, S. A. R. Khan, M. Panait, F. P. Guillen, and L. Raimi, Eds. Singapore: Springer, 2022, pp. 103–133, doi: 10.1007/978-981-19-3540-4_4.
[29] T. L. Saaty, “How to make a decision: The analytic hierarchy process,” European Journal of Operational Research, vol. 48, no. 1, pp. 9–26, Sep. 1990, doi: 10.1016/0377-2217(90)90057-I.
[30] M. Bernasconi, C. Choirat, and R. Seri, “The analytic hierarchy process and the theory of measurement,” Management Science, vol. 56, no. 4, pp. 699–711, Apr. 2010, doi: 10.1287/mnsc.1090.1123.
[31] T. L. Saaty, “Time dependent decision-making; dynamic priorities in the AHP/ANP: Generalizing from points to functions and from real to complex variables,” Mathematical and Computer Modelling, vol. 46, no. 7–8, pp. 860–891, Oct. 2007, doi: 10.1016/j.mcm.2007.03.028.
[32] CSDD/e-transports, “Statistika par ‘e-mobi’ elektromobiļu ātrās uzlādes tīklu 2026. gadā,” 2026. Skatīts: 25.05.2026. [Tiešsaiste]. Pieejams: https://www.e-transports.org/statistika/uzlades-staciju-tikls-e-mobi
[33] U.S. Department of Energy, Alternative Fuels Data Center, “Electric vehicle charging stations,” 2025. Skatīts: 25.05.2026. [Tiešsaiste]. Pieejams: https://afdc.energy.gov/fuels/electricity-locations
[34] CSDD/e-transports, “Par 2025. gada 4. ceturksnī reģistrētajiem elektrotransportlīdzekļiem; par 2026. gada 1. ceturksnī reģistrētajiem elektrotransportlīdzekļiem,” 2026. Skatīts: 25.05.2026. [Tiešsaiste]. Pieejams: https://www.e-transports.org/statistika/elektrotransportlidzekli
[35] LETA / Dienas Bizness, “Latvijā reģistrēto jauno elektroauto skaits pērn palielinājies par 27,7 %,” Jan. 15, 2026. Skatīts: 25.05.2026. [Tiešsaiste]. Pieejams: https://www.db.lv/zinas/latvija-registreto-jauno-elektroauto-skaits-pern-palielinajies-par-277-524768
[36] Oficiālās statistikas portāls, “ENB010m. Elektroenerģijas ražošana, imports, eksports un patēriņš,” 2026. Skatīts: 25.05.2026. [Tiešsaiste]. Pieejams: https://data.stat.gov.lv/pxweb/lv/OSP_PUB/START__NOZ__EN__ENB/ENB010m
[37] R. Grants, Elektromobiļu uzlādes staciju integrācijas iespējas zemsprieguma elektroapgādes tīklu izbūves projektos. Rīga, Latvia: Riga Technical University, 2020.
[38] M. Bisenieks, R. Grants, O. Krumins, and A. Zabasta, “Fast charging for electric vehicles station integration with renewable energy sources,” in 2022 IEEE 7th International Energy Conference (ENERGYCON), 2022, doi: 10.1109/ENERGYCON53164.2022.9830155.
[39] S. Teleke, M. E. Baran, S. Bhattacharya, and A. Q. Huang, “Rule-based control of battery energy storage for dispatching intermittent renewable sources,” IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 1, no. 3, pp. 117–124, Oct. 2010, doi: 10.1109/TSTE.2010.2061880.
[40] U. Datta, A. Kalam, and J. Shi, “A review of key functionalities of battery energy storage system in renewable energy integrated power systems,” Energy Storage, vol. 3, no. 5, p. e224, 2021, doi: 10.1002/est2.224.

[41] F. Mohammadi and R. Rashidzadeh, “An overview of IoT-enabled monitoring and control systems for electric vehicles,” IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, vol. 24, no. 3, pp. 91–97, May 2021, doi: 10.1109/MIM.2021.9436092.
[42] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2003.
[43] D. W. Novotny, T. A. Lipo, and T. A. Jahns, Ievads elektriskajās mašīnās un elektropiedziņā. Rīga, Latvia: RTU Izdevniecība, 2019.
[44] J. Delsing, Ed., IoT Automation: Arrowhead Framework. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2017.
[45] R. Joumard and H. Gudmundsson, Eds., Indicators of Environmental Sustainability in Transport: An Interdisciplinary Approach to Methods. Bron, France: INRETS, 2010.
[46] H. Fazlollahtabar, I. Mahdavi, M. T. Ashoori, S. Kaviani, and N. Mahdavi-Amiri, “A multi-objective decision-making process of supplier selection and order allocation for multi-period scheduling in an electronic market,” 2010.
[47] T. S. Liou and M. J. J. Wang, “Ranking fuzzy numbers with integral value,” Fuzzy Sets and Systems, vol. 50, no. 3, pp. 247–255, Sep. 1992, doi: 10.1016/0165-0114(92)90223-Q.
[48] J. Mysiak, C. Giupponi, and P. Rosato, “Towards the development of a decision support system for water resource management,” Environmental Modelling & Software, vol. 20, no. 2, pp. 203–214, Feb. 2005, doi: 10.1016/j.envsoft.2003.12.019.
[49] J. Li, J. Dai, A. Issakhov, S. F. Almojil, and A. Souri, “Towards decision support systems for energy management in the smart industry and Internet of Things,” Computers & Industrial Engineering, vol. 161, p. 107671, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.cie.2021.107671.
[50] L. Ribickis and N. Kunicina, Eds., Applied Informatics. Riga, Latvia: Riga Technical University, 2018.
[51] L. Ribickis and N. Kunicina, Eds., Control Methods for Critical Infrastructure and Internet of Things (IoT). Riga, Latvia: Riga Technical University, 2022.
[52] J. Rak and D. Hutchison, Eds., Guide to Disaster-Resilient Communication Networks. Cham, Switzerland: Springer, 2020.
[53] M. Bisenieks, O. Krumins, A. Shuvarina, R. Grants, J. Caiko, and A. Ziravecka, “Operational management for grid connections,” in 2023 IEEE 10th Jubilee Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), 2023, doi: 10.1109/AIEEE58915.2023.10134826.
[54] D. Gauce, A. Lektauers, I. Solovjova, R. Grants, D. Kolosovs, and A. Litvinenko, “Application of digital twin in medium-voltage overhead distribution network inspection,” Remote Sensing, vol. 15, no. 2, p. 489, Jan. 2023, doi: 10.3390/rs15020489.
[55] B. Tekinerdogan, D. Blouin, H. Vangheluwe, M. Goulão, P. Carreira, and V. Amaral, Eds., Multi-Paradigm Modelling Approaches for Cyber-Physical Systems. London, United Kingdom: Academic Press, 2021.
[56] V. Kazymyr, O. Palagin, A. Romanovs, N. Kunicina, and A. Zabasta, Model-Oriented Control in Intelligent Manufacturing Systems. Chernihiv–Kyiv–Riga, 2021.
[57] E. Lughofer and M. Sayed-Mouchaweh, Eds., Predictive Maintenance in Dynamic Systems: Advanced Methods, Decision Support Tools and Real-World Applications. Cham, Switzerland: Springer, 2019.
[58] M. Zhiyenbayev, N. Kunicina, M. Mansurova, A. Patlins, J. Caiko, V. Beliaev, R. Grants, M. Bisenieks, and G. Shyntore, “Development of aggregated sustainability indicators for

quality of life evaluations in urban areas of the Republic of Kazakhstan," Sustainability, vol. 16, no. 21, p. 9483, Oct. 2024, doi: 10.3390/su16219483.
[59] C. Dalamagkas, P. Radoglou-Grammatikis, P. Bouzinis, I. Papadopoulos, T. Lagkas, V. Argyriou, S. Goudos, D. Margounakis, E. Fountoukidis, and P. Sarigiannidis, "Federated detection of Open Charge Point Protocol 1.6 cyberattacks," arXiv:2502.01569, 2025, doi: 10.48550/arXiv.2502.01569.
[60] M. Zolanvari, M. A. Teixeira, L. Gupta, K. M. Khan, and R. Jain, "WUSTL-IIoT-2021 dataset for IIoT cybersecurity research," Washington University in St. Louis, 2021. Skatīts: 25.05.2026. [Tiešsaiste]. Pieejams: https://www.cse.wustl.edu/~jain/iiot2/index.html
[61] L. Ribickis, N. Kunicina, A. Hnatov, and K. Danylenko, Eds., Cyber-Physical Systems for Clean Transportation. Riga, Latvia: RTU Press, 2021.
[62] S. Lei, C. Yang, R. Grants, U. Grunde, and N. Kunicina, "PDGM-PINN: Partial Derivative Guided Multi-Branch Physics-Informed Neural Network," Mathematics, vol. 14, no. 8, p. 1349, Apr. 2026, doi: 10.3390/math14081349



Roberts Grants dzimis 1992. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā koledžā ieguvis pirmā līmeņa profesionālo augstāko izglītību un elektrisko iekārtu speciālista kvalifikāciju (2015). Par kvalifikācijas darbu saņēmis AS "Latvenergo" diplomu studiju noslēguma darbu konkursā. Rīgas Tehniskajā universitātē 2018. gadā ieguvis inženierzinātņu bakalaura grādu elektrotehnikā (2018) un maģistra grādu elektrotehnikā un elektroinženiera kvalifikāciju (2020).
Profesionālo darbību AS "Sadales tīkls" sācis 2014. gadā, ieņemot dažādus tehniskos un vadības amatus. Kopš 2026. gada ir AS "Sadales tīkls" Elektroapgādes procesa daļas vadītājs. 2026. gadā saņēmis Klimata un enerģētikas ministrijas atzinības rakstu par ieguldījumu elektroapgādes atjaunošanā sadales tīklā pēc 2026. gada vētras. Kopš 2024. gada darbojas Pasaules Enerģijas padomes Latvijas Nacionālās komitejas programmā "Nākotnes enerģētikas līderi Latvijā", vadot Enerģētikas trilemmas darba grupu. Zinātniskās intereses saistītas ar enerģētikas nozares attīstību, elektroenerģijas sistēmu drošumu un noturību, atjaunojamo energoresursu integrāciju, elektromobilitāti, daudzkritēriju lēmumu atbalsta sistēmām, enerģētikas digitalizāciju un kiberdrošību.