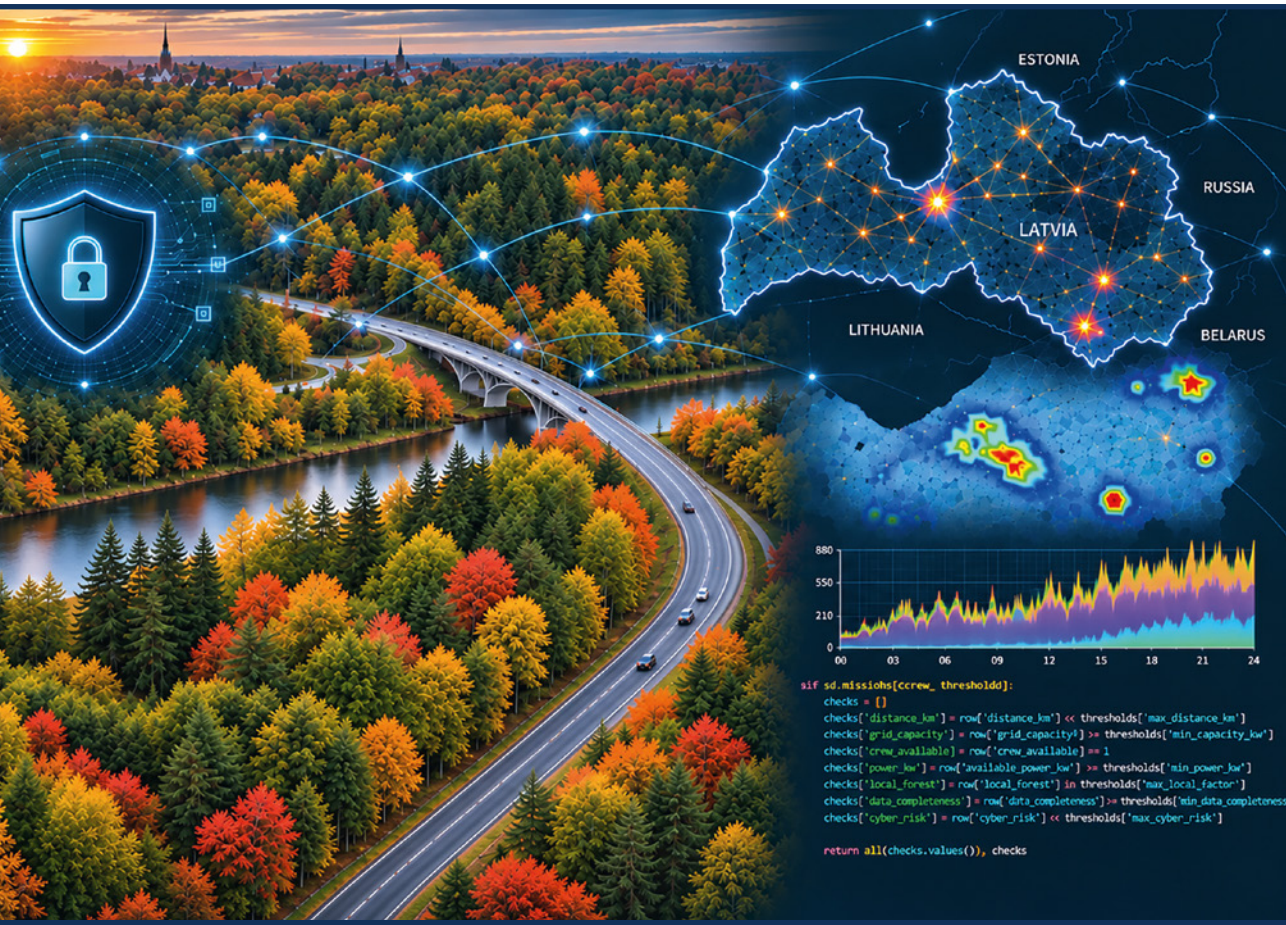
Roberts Grants

DINAMISKU ELEKTRISKO TRANSPORTLĪDZEKĻU UZLĀDES PUNKTU IZMANTOŠANAS LĒMUMU ATBALSTA SISTĒMAS IZSTRĀDE

Promocijas darba kopsavilkums



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 darba kopsavilkums

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 darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2026. – 60 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).

https://doi.org/10.7250/9789934373770
ISBN 978-9934-37-377-0 (pdf)

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.

PATEICĪBA

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

Īpaša pateicība manai 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 pētniecības 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!

Īpaša pateicība *WEC Latvia* par iespēju publicēt rakstu "Enerģētikas nākotne 2025: globālās tendences un Latvijas pielāgošanās" žurnālā "Enerģija"! Šī publikācija kā komunikācijas raksts ar pētniecības 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 pētniecības pieredzes paplašināšanā, īpaši atjaunīgo energoresursu integrācijas, prognozēšanas precizitātes, elektroenerģijas tirgus līdzsvarošanas un portfeļa efekta ietekmes izpētē.

Īpaša pateicība manai 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!

SATURS

PATEICĪBA 4
PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS 7
Pētījuma aktualitāte 7
Pētījuma problēma un pētniecības plaisa 7
Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas pieejas nepieciešamība 7
Pētījuma objekts un priekšmets 8
Promocijas darba mērķis un uzdevumi 8
Pētījuma hipotēze 9
Pētījuma metodes 9
Zinātniskā novitāte 9
Praktiskā nozīme 10
Datu un koda pieejamība 10
Pētījuma rezultātu aprobācija 10
Autora zinātniskās publikācijas un ar promocijas darbu saistītie iepriekšējie darbi 10
Promocijas darba struktūra 12
Mākslīgā intelekta rīku izmantošana promocijas darba sagatavošanā 12
1. ELEKTRISKO TRANSPORTLĪDZEKĻU UZLĀDES INFRASTRUKTŪRAS ATTĪSTĪBA UN PĒTNIECĪBAS KONTEKSTS 14
1.1. Elektrisko transportlīdzekļu attīstība un to ietekme uz elektroapgādes sistēmām 14
1.2. *EV* uzlādes infrastruktūras veidi un darbības principi 15
1.3. Uzlādes punkta izvēle kā daudzkritēriju lēmumu problēma 15
1.4. *MCDM* pieejas *EV* uzlādes infrastruktūras literatūrā 16
1.5. Lēmumu atbalsta sistēmas nepieciešamība dinamiskai *EV* uzlādes punkta piešķiršanai 17
2. UZTICAMĪBAS ORIENTĒTAS DINAMISKAS UZLĀDES PUNKTU PIEŠĶIRŠANAS TEORĒTISKAIS MODELIS 18
2.1. Dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas problēmas formulējums 18
2.2. Lēmumu vides elementi un alternatīvu kopa 19
2.3. Kritēriju sistēma uz uzticamību orientētai uzlādes punkta piešķiršanai 21
2.4. Uzticamības un kiberdrošības indikatoru integrācija *MCDM* modelī 22
2.5. *AHP* balstīta kritēriju hierarhija un svaru noteikšanas princips 23
2.6. Dinamiskās atjaunināšanas un filtrēšanas princips 24
3. *MCDM* METODOLOĢIJAS OPERACIONALIZĀCIJA UN ALGORITMISKĀ REALIZĀCIJA 26
3.1. Pētījuma metodoloģiskā loģika 26
3.2. Kritēriju operacionalizācija un *AHP* svaru izmantošana 27

3.3. *PROMETHEE* prioritizācijas aprēķinu procedūra 29
3.4. Dinamiskās filtrēšanas un piešķiršanas algoritms 29
3.5. Prototipa aprēķinu realizācijas un rezultātu interpretācijas loģika 31
4. DATU, SCENĀRIJU UN EKSPERIMENTĀLĀS VIDES IZVEIDE 34
4.1. Datu struktūra *MCDM* modeļa validācijai 34
4.2. Datu priekšapstrāde un eksperimentālās vides arhitektūra 36
4.3. Scenāriju sistēma 37
4.4. Novērtēšanas rādītāji 39
4.5. Datu un scenāriju ierobežojumi 40
5. MODEĻA VALIDĀCIJA UN REZULTĀTU ANALĪZE 41
5.1. Validācijas pieeja un salīdzināmās piešķiršanas stratēģijas 41
5.2. *AHP* svaru un *PROMETHEE* ranga aprēķina rezultāti 42
5.3. Bāzes scenārija validācijas rezultāti 44
5.4. Salīdzinošā analīze ar vienkāršotām piešķiršanas pieejām 45
5.5. Scenāriju un stresa apstākļu analīze 46
5.6. Jutīguma analīze 47
5.7. Uzticamības un kiberdrošības slāņa pienesuma novērtējums 48
5.8. Piektās nodaļas kopsavilkums 49
6. REZULTĀTU DISKUSIJA, IEVIEŠANAS IESPĒJAS UN PĒTĪJUMA IEROBEŽOJUMI 50
6.1. Rezultātu interpretācija un hipotēzes izvērtējums 50
6.2. Salīdzinājums ar literatūru un zinātniskais pienesums 51
6.3. Praktiskās ieviešanas iespējas 52
6.4. Pētījuma ierobežojumi 52
6.5. Turpmākās attīstības virzieni 53
6.6. Sestās nodaļas secinājumi 54
SECINĀJUMI UN PRIEKŠLIKUMI 55
Secinājumi 55
Priekšlikumi 56
ATSAUCES 57

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Pētījuma aktualitāte

Elektrisko transportlīdzekļu skaita pieaugums pasaulē un Eiropā būtiski maina transporta un enerģētikas sektoru savstarpējo mijiedarbību. Elektromobilitāte kļūst par nozīmīgu ilgtspējīgas mobilitātes, dekarbonizācijas, energoefektivitātes un elektroenerģijas sistēmu transformācijas elementu [1]–[5]. Pieaugot elektrisko transportlīdzekļu skaitam, palielinās arī prasības publiski pieejamai, tehniski drošai, lietotājiem ērtai un sadales tīklam pieļaujamai uzlādes infrastruktūrai [1], [2], [6].

Elektrisko transportlīdzekļu uzlādes pieprasījums ir telpiski un laikā nevienmērīgs. To ietekmē lietotāju pārvietošanās paradumi, akumulatora uzlādes līmenis, uzlādes jauda, uzlādes punktu pieejamība, vietējā sadales tīkla noslodze, atjaunojamo energoresursu pieejamība un digitālās pārvaldības sistēmu darbība [7]–[11]. Nekoordinēta vai vienlaikus uzlāde var palielināt lokālo sadales tīkla slodzi, radīt pārslodzes risku, sprieguma novirzes un elektroenerģijas zudumu pieaugumu [7], [10], [11]. Tādēļ elektriskais transportlīdzeklis (*Electric Vehicle*, EV) integrācija sadales tīklā nav tikai pieslēguma vai uzlādes infrastruktūras izbūves jautājums, bet kompleksa energosistēmas, transporta sistēmas, digitālās pārvaldības, lietotāja uzvedības, datu kvalitātes un kiberdrošības mijiedarbības problēma [7], [8], [12]–[14].

Praktiskā līmenī arvien būtiskāks kļūst jautājums ne tikai par to, kur uzlādes stacijas izvietot, bet arī par to, kā konkrētam elektriskajam transportlīdzeklim konkrētā laikā izvēlēties piemērotāko uzlādes punktu. Šo izvēli nevar reducēt uz vienu kritēriju – tuvāko staciju, īsāko gaidīšanas laiku, zemāko cenu vai lielāko nominālo uzlādes jaudu. Piemērotāko alternatīvu nosaka transportlīdzekļa stāvoklis, nepieciešamais enerģijas apjoms, faktiskā uzlādes punkta pieejamība, gaidīšanas laiks, sadales tīkla noslodze, jaudas rezerve, lietotāja prasības, datu kvalitāte, uzticamība un kiberdrošības risks [7]–[14]. Mūsdienu uzlādes infrastruktūra ir kiberfiziska sistēma, tāpēc uzlādes punkta izvēlei jābūt ne tikai lietotājam ērtai un tehniski iespējamai, bet arī uzticamai no datu, komunikācijas, sadales tīkla un kiberdrošības skatpunkta [9], [13]–[15].

Pētījuma problēma un pētniecības plaisa

Līdzšinējie pētījumi elektrisko transportlīdzekļu uzlādes jomā plaši aplūko uzlādes staciju izvietojuma plānošanu, kapacitātes izvēli, viedās uzlādes stratēģijas, lietotāju uzvedību, agregatoru vadību un uzlādes infrastruktūras integrāciju elektroenerģijas sistēmā [7], [8], [10], [11], [15]–[23]. Šie pētījumi ir būtiski infrastruktūras attīstībai, tomēr pārsvarā risina ilgtermiņa plānošanas, lokācijas izvēles vai uzlādes procesa vadības problēmas, nevis operatīvu uzlādes punkta piešķiršanu konkrētam *EV* konkrētā laikā.

Promocijas darba pētniecības plaisa ir saistīta ar operatīvas un dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas pieejas nepietiekamu attīstību. Praktiskos risinājumos bieži dominē tuvākās stacijas, brīvā uzlādes punkta, īsākā gaidīšanas laika vai lielākās pieejamās jaudas izvēles loģika, kas nav pietiekama, ja alternatīvu piemērotību nosaka vairāki savstarpēji konfliktējoši kritēriji [7], [10], [12]–[14]. Promocijas darbā šī problēma risināta, izstrādājot uz uzticamību orientētu dinamisku daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metodoloģiju, kas ļauj salīdzināt vairākas uzlādes alternatīvas, integrēt lietotāja, uzlādes infrastruktūras, sadales tīkla, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības kritērijus, kā arī iegūt interpretējamu uzlādes punktu rangu un rezerves alternatīvu secību.

Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas pieejas nepieciešamība

Dinamiska elektrisko transportlīdzekļu uzlādes punkta piešķiršana pēc būtības ir daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas problēma. Lietotājam piemērotākā alternatīva var būt tuvākā vai lētākā uzlādes vieta, savukārt sadales tīkla skatījumā piemērotāka var būt alternatīva

ar zemāku lokālo tīkla noslodzi vai lielāku jaudas rezervi. Līdzīgi, augstas uzlādes jaudas alternatīva ne vienmēr ir labākā, ja tai ir zema datu kvalitāte, augsts kiberdrošības risks vai nestabils ekspluatācijas statuss [7], [10], [12]–[14].

Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metodes ir piemērotas situācijām, kur nepieciešams strukturēt sarežģītu lēmumu telpu, apvienot kvantitatīvus un kvalitatīvus kritērijus, nodrošināt caurspīdīgu alternatīvu salīdzināšanu un pamatot kompromisa lēmumu starp atšķirīgām interesēm [24]–[26]. Promocijas darbā izmantota analītiskās hierarhijas metode (*AHP*) un *PROMETHEE* metode. *AHP* tiek izmantota kritēriju hierarhijas un relatīvās nozīmības noteikšanai, savukārt *PROMETHEE* – pieļaujamo uzlādes alternatīvu prioritizācijai un pilna ranga iegūšanai [25], [27], [28]. Šāds metožu sadalījums ļauj nodalīt kritēriju svaru strukturēšanu no konkrētā lēmuma brīdī pieejamo alternatīvu operatīvas ranžēšanas.

Būtiska promocijas darba īpatnība ir dinamiskais skatījums uz uzlādes punkta piemērotību. Uzlādes alternatīvu vērtējums nav statisks, jo laikā mainās uzlādes pieprasījums, staciju pieejamība, sadales tīkla noslodze, pieejamā jauda, lietotāja prioritātes, datu kvalitāte un drošības stāvoklis [29]. Tāpēc darbā izstrādāta dinamiskas filtrēšanas un pārrēķina loģika, kas ļauj aktualizēt alternatīvu kopu un rangu atbilstoši mainīgajiem ekspluatācijas apstākļiem.

Pētījuma objekts un priekšmets

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

Promocijas darba pētījuma priekšmets ir daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metodoloģija uz uzticamību orientētai dinamiskai elektrisko transportlīdzekļu uzlādes punkta piešķiršanai.

Promocijas darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt un validēt daudzkritēriju lēmumu pieņemšanā balstītu modeli uz uzticamību orientētai dinamiskai elektrisko transportlīdzekļu uzlādes punkta piešķiršanai, izmantojot operatīvos datus par elektriskā transportlīdzekļa stāvokli, uzlādes infrastruktūras pieejamību, sadales tīkla parametriem, atjaunojamo energoresursu pieejamību, datu kvalitāti un kiberdrošības risku.

Mērķa sasniegšanai definēti šādi uzdevumi:

1) analizēt elektrisko transportlīdzekļu uzlādes infrastruktūras attīstības tendences, tās ietekmi uz sadales tīkliem un uzlādes pārvaldības pētniecības kontekstu;
2) izvērtēt daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metožu, īpaši *AHP* un *PROMETHEE*, piemērotību dinamiskas elektrisko transportlīdzekļu uzlādes punkta piešķiršanas uzdevumam;
3) identificēt un strukturēt kritērijus, kas ietekmē uzlādes punkta piemērotību, ietverot transportlīdzekļa, 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 *AHP* pieejā;
5) izstrādāt *PROMETHEE* balstītu alternatīvu prioritizācijas modeli pieļaujamo uzlādes punktu ranžēšanai;
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 elektrisko transportlīdzekļu uzlādes infrastruktūras objektus, slodžu profilus, tīkla parametrus, datu kvalitātes indikatorus un kiberdrošības scenārijus;

8) validēt izstrādāto modeli, salīdzinot to ar vienkāršotām piešķiršanas stratēģijām;
9) novērtēt uzticamības, sadales tīkla, datu kvalitātes un kiberdrošības kritēriju pienesumu dinamiskas elektrisko transportlīdzekļu uzlādes punkta piešķiršanas rezultātā.

Pētījuma hipotēze

Promocijas darba hipotēze – uz uzticamību orientēta dinamiska daudzkritēriju piešķiršanas pieeja, kas vienotā modelī integrē elektriskā transportlīdzekļa 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.

Hipotēze tiek pārbaudīta metodoloģiskās un scenāriju validācijas robežās. Darbā tiek vērtēts, vai izstrādātais *AHP-PROMETHEE* modelis spēj strukturēti, reproducējami un interpretējami integrēt lietotāja, infrastruktūras, sadales tīkla, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības kritērijus uzlādes punkta izvēlē.

Pētījuma metodes

Promocijas darbā izmantotas šādas pētījuma metodes:

- zinātniskās literatūras, normatīvo aktu un nozares avotu analīze;
- daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metodes, īpaši *AHP* un *PROMETHEE*;
- kritēriju operacionalizācija;
- datu priekšapstrāde un normalizācija;
- scenāriju modelēšana;
- algoritmiskā prototipēšana *Python* vidē;
- salīdzinošā analīze ar vienkāršotām uzlādes punkta piešķiršanas pieejām;
- jutīguma analīze attiecībā pret kritēriju svaru, sadales tīkla un kiberdrošības kritēriju izmaiņām.

Zinātniskā novitāte

Promocijas darba zinātniskā novitāte izpaužas vairākos aspektos.

1. Dinamiska elektrisko transportlīdzekļu uzlādes punkta piešķiršana formalizēta kā operatīva daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas problēma, atšķirot to no klasiskās uzlādes staciju izvietojuma un kapacitātes plānošanas.
2. Izstrādāta uz uzticamību orientēta kritēriju sistēma, kas vienotā modelī apvieno elektriskā transportlīdzekļa, 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 uzlādes punktu ranga iegūšanai.
4. Uzticamība un kiberdrošība integrētas uzlādes punkta piešķiršanas modelī kā pilnvērtīgi lēmuma kritēriji, filtrēšanas nosacījumi vai galaprioritātes korekcijas faktori.
5. Izstrādāta dinamiskas filtrēšanas un pārrēķina loģika, kas ļauj aktualizēt alternatīvu kopu, kritēriju vērtības un rangu atbilstoši mainīgiem ekspluatācijas apstākļiem.
6. Izveidota metodoloģiska validācijas vide ar anonimizētiem elektrisko transportlīdzekļu uzlādes infrastruktūras objektiem, slodžu profiliem, tehniskajiem parametriem, datu kvalitātes indikatoriem un kiberdrošības scenārijiem.

Praktiskā nozīme

Promocijas darba praktiskā nozīme ir saistīta ar iespēju izmantot izstrādāto metodoloģiju kā lēmumu atbalsta sistēmas aprēķinu kodolu elektrisko transportlīdzekļu uzlādes infrastruktūras pārvaldībā. Uzlādes infrastruktūras operatoriem šī pieeja var palīdzēt lietotājiem piešķirt piemērotākus uzlādes punktus, ņemot vērā ne tikai attālumu vai brīvo pieslēgumu pieejamību, bet arī uzlādes jaudu, gaidīšanas laiku, sadales tīkla noslodzi, datu kvalitāti, uzticamību un drošības kritērijus. Sadales sistēmas operatoriem modelis piedāvā lēmumu pieņemšanas slāni, kurā uzlādes punkta izvēlē tiek ņemts vērā sadales tīkla darbības režīms, lokālā slodze, pieejamā jaudas rezerve un potenciālais pārslodzes risks.

Kiberdrošības pārvaldības kontekstā izstrādātā pieeja ļauj uzlādes alternatīvu izvēlē iekļaut datu kvalitātes, komunikācijas uzticamības, autentifikācijas, datu integritātes un kiberriska indikatorus. Izstrādātais modelis nav komerciāls programmatūras produkts, bet metodoloģiski validēts lēmuma atbalsta sistēmas prototipa aprēķinu kodols, ko iespējams tālāk attīstīt uzlādes infrastruktūras operatoru, sadales sistēmas operatoru, pašvaldību, kiberdrošības pārvaldības, viedās uzlādes un uzlādes infrastruktūras digitālā dvīņa vajadzībām.

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 ietver tikai anonimizētus un metodoloģiskai pārbaudei nepieciešamus ievaddatus, aprēķinu rezultātus un scenāriju parametrus.

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

Pētījuma rezultātu aprobācija

Promocijas darba rezultāti aprobēti autora un līdzautoru zinātniskajās publikācijās, starptautisku konferenču rakstu krājumos un recenzētos zinātniskajos žurnālos. Publikācijas aptver *EV* uzlādes infrastruktūru, sadales tīklu integrāciju, lēmumu atbalsta sistēmas, kiberdrošību, digitalizāciju, datu kvalitāti un kiberfizisko sistēmu uzticamību.

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 darbā ir ievads, sešas nodaļas, secinājumi, priekšlikumi, izmantotās literatūras saraksts un pielikumi.

Pirmajā nodaļā analizēta elektrisko transportlīdzekļu uzlādes infrastruktūras attīstība un pētniecības konteksts. Otrajā nodaļā aprakstīts izstrādātais teorētiskais modelis uz uzticamību orientētai dinamiskai elektrisko transportlīdzekļu uzlādes punkta piešķiršanai. Trešajā nodaļā dota veiktā *MCDM* metodoloģijas operacionalizācija un algoritmiskā realizācija. Ceturtajā nodaļā publicēta izveidotā datu, scenāriju un eksperimentālās validācijas vide. Piektajā nodaļā aprakstīta izstrādātā modeļa validācija un rezultātu analīze. 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, pētniecības 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 galaredakciju.

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 KONTEKSTS

Pirmajā nodaļā analizēta elektrisko transportlīdzekļu uzlādes infrastruktūras attīstība un tās pētniecības konteksts. Nodaļas mērķis ir pamatot, kāpēc elektrisko transportlīdzekļu uzlādes punkta izvēle jāskata nevis kā vienkārša tuvākās, lētākās vai jaudīgākās stacijas izvēle, bet kā operatīva, laikā mainīga un daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas problēma. Nodaļā aplūkotas elektromobilitātes attīstības tendences, *EV* uzlādes ietekme uz sadales tīklu, uzlādes infrastruktūras kiberfiziskais raksturs, uzlādes infrastruktūras veidi un *MCDM* pieeju izmantošana *EV* infrastruktūras literatūrā.

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 transporta sektora dekarbonizācijas mērķi, fosilā kurināmā patēriņa samazināšana, energoefektivitātes paaugstināšana, tehnoloģiju attīstība akumulatoru un uzlādes infrastruktūras jomā, kā arī politikas instrumenti, kas veicina bezemisiju transportlīdzekļu izmantošanu [1]–[5].

Globālā elektromobilitātes attīstība pēdējā desmitgadē ir ievērojami paātrinājusies. 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]. Eiropas Savienībā elektromobilitātes attīstība ir cieši saistīta ar klimata politiku, transporta emisiju samazināšanu un alternatīvo degvielu infrastruktūras attīstību [3]–[6].

Vienlaikus elektromobilitāte maina elektroapgādes sistēmu darbības raksturu. Elektriskais transportlīdzeklis nav tikai jauns transportlīdzekļa 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 [7], [10], [11].

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, savukārt 2026. gada 1. aprīlī – jau 15 309 elektromobiļi [30]. Vienlaikus 2025. gadā Latvijā tika reģistrēti 1606 jauni elektroauto, kas ir par 27,7 % vairāk nekā 2024. gadā [31].

Latvijas publiskās uzlādes infrastruktūra pakāpeniski pāriet no sākotnēji dominējoša valsts ātrās uzlādes tīkla uz daudzoperatoru vidi, kur lietotājam konkrētā teritorijā var būt pieejamas vairākas alternatīvas ar atšķirīgu jaudu, cenu, pieejamību, norēķinu modeli un datu kvalitāti. Elektromobilitātes attīstība notiek paralēli elektroenerģijas sistēmas pārmaiņām. Saskaņā ar oficiālās statistikas portāla *ENB010m* datiem 2025. gadā Latvijā bruto elektroenerģijas ražošana bija 5959 GWh, bet piegādes iekšējam tirgum sasniedza 7200 GWh. Saules elektrostacijās saražotās elektroenerģijas apjoms pieauga no 403 GWh 2024. gadā līdz 683 GWh 2025. gadā [32].

Šādos apstākļos *EV* uzlādes infrastruktūra kļūst par būtisku elektroapgādes sistēmas elastības, slodzes pārvaldības un uzticamības jautājumu. *EV* uzlādes slodze ir telpiski koncentrēta, laikā mainīga un atkarīga no lietotāju uzvedības, tādēļ tā var palielināt

transformatoru un līniju noslodzi, slodzes maksimumus, sprieguma novirzes, fāžu nesimetriju un elektroenerģijas zudumus [10], [11], [33]. Vienlaikus mūsdienu uzlādes infrastruktūra ir kiberfiziska sistēma, kurā elektroenerģijas padeve ir saistīta ar datu apmaiņu, autentifikāciju, maksājumu sistēmām, operatoru platformām, attālinātu uzraudzību un kiberdrošības riskiem [9], [13]–[15], [34].

1.2. *EV* uzlādes infrastruktūras veidi un darbības principi

Elektrisko transportlīdzekļu uzlādes infrastruktūra ir heterogēna tehniska un digitāla sistēma, ko iespējams klasificēt pēc enerģijas padeves veida, uzlādes jaudas, piekļuves 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], [10], [11], [35].

Pēc enerģijas padeves veida 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 šādi risinājumi parasti ir saistīti ar zemākām vai vidējām uzlādes jaudām. *DC* uzlādes gadījumā jaudas pārveide notiek pašā uzlādes stacijā, ļaujot nodrošināt augstāku uzlādes jaudu un īsāku uzlādes laiku [2], [35].

Pēc jaudas un uzlādes ilguma uzlādes infrastruktūru var iedalīt lēnajā, ātrajā un ultraātrajā uzlādē. *IEA* analīzēs publiskie lēnie lādētāji tiek definēti kā iekārtas ar jaudu līdz 22 kW, ātrie lādētāji pārsniedz 22 kW, savukārt ultraātrie lādētāji sasniedz 150 kW un vairāk [2]. Lielāka uzlādes jauda samazina uzlādes ilgumu, bet vienlaikus palielina momentāno slodzi tīklam, tādēļ uzlādes punkta piemērotība jāvērtē ne tikai pēc nominālās jaudas, bet arī pēc pieslēguma jaudas, lokālās tīkla noslodzes, jaudas rezerves un uzlādes sesiju intensitātes [10], [11].

Pēc piekļuves režīma uzlādes infrastruktūru var iedalīt privātajā, daļēji publiskajā un publiskajā infrastruktūrā. Šis dalījums ir nozīmīgs dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas kontekstā, jo lietotājam konkrētā laikā pieejamās alternatīvas var atšķirties pēc tehniskajiem parametriem, piekļuves nosacījumiem, cenas, rezervācijas iespējām, operatora datu kvalitātes un faktiskās noslodzes [10], [35].

Mūsdienu uzlādes punkts 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. Tādēļ dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas modelī uzlādes punkts jāapraksta ar plašāku raksturlielumu kopu – attālumu, jaudu, cenu, gaidīšanas laiku, pieejamību, datu aktualitāti, komunikācijas uzticamību, savietojamību, tīkla noslodzes profilu un kiberdrošības riska līmeni.

1.3. Uzlādes punkta izvēle kā daudzkritēriju lēmumu problēma

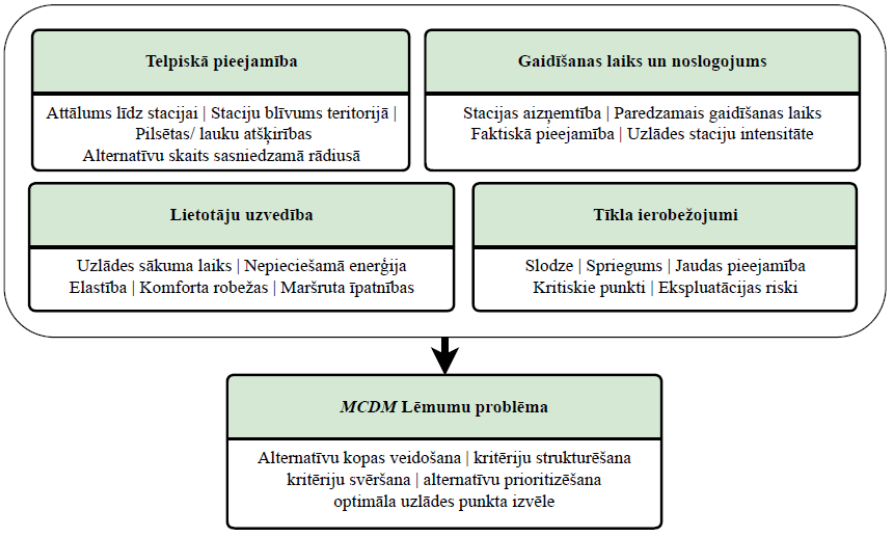
Elektrisko transportlīdzekļu uzlādes punkta izvēle praksē nav reducējama uz vienu kritēriju, piemēram, ģeogrāfiski tuvākās, lētākās vai nomināli jaudīgākās stacijas izvēli. Reālā ekspluatācijas situācijā piemērotāko uzlādes alternatīvu vienlaikus ietekmē telpiskā sasniedzamība, faktiskā stacijas pieejamība, gaidīšanas laiks, stacijas noslogojums, transportlīdzekļa uzlādes vajadzība, lietotāja elastība, sadales tīkla tehniskais stāvoklis, datu kvalitāte, pakalpojuma uzticamība un kiberdrošības risks [7], [10], [12]–[14].

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 izvēlē jānošķir kartē redzamā infrastruktūras pieejamība no reālās pakalpojuma pieejamības konkrētajā laikā. Uzlādes punkts var atrasties lietotājam izdevīgā vietā, bet būt aizņemts, nedarbspējīgs, rezervēts, tehniski nesavietojams vai ar paaugstinātu tīkla, datu kvalitātes vai kiberdrošības risku. Tādēļ uzlādes punkta piemērotība nav nosakāma tikai pēc nominālās jaudas vai lietotāja ērtības, bet arī pēc tā, vai attiecīgajā brīdī vietējais tīkls spēj pieļaut papildu slodzi.

Līdz ar uzlādes infrastruktūras digitalizāciju uzlādes punkta izvēli ietekmē ne tikai fiziski un ekspluatācijas parametri, bet arī uzticamības, datu kvalitātes un kiberdrošības faktori. Uzticamības dimensija ietver uzlādes punkta darbspēju, pakalpojuma nepārtrauktību, datu aktualitāti, komunikācijas stabilitāti un lēmuma izpildāmību. Kiberdrošības dimensija ietver autentifikācijas drošību, piekļuves kontroli, datu integritāti, komunikācijas drošību, incidentu atklāšanas spēju un pakalpojuma pieejamības risku [13], [14].

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, bet kļūst par vienu no novērtēšanas dimensijām pašā uzlādes punkta izvēles procesā.



1.1. att. *EV* uzlādes punkta izvēli ietekmējošo faktoru karte.
Avots – autora veidots, balstoties literatūras analīzē [7], [10], [12]–[14], [25], [27].

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 galaprioritāte 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.

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

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 [8], [10], [16]–[22]. Tomēr šie virzieni ne vienmēr tieši risina operatīvu uzdevumu – konkrēta EV uzlādes punkta dinamisku piešķiršanu noteiktā laikā.

Viena no plašāk attīstītajām pētniecības līnijām *EV* uzlādes infrastruktūras literatūrā ir uzlādes staciju izvietošanas, vietas izvēles un kapacitātes noteikšanas uzdevumi. Šo problēmu risināšanā plaši izmantotas *GIS-MCDM* pieejas, kas ļauj telpisko analīzi apvienot ar daudzkritēriju novērtēšanu, vērtējot kandidātlokācijas pēc transporta, enerģētikas, ekonomiskajiem, sociālajiem un vides kritērijiem [10], [16]–[19]. Šie pētījumi ir būtiski infrastruktūras attīstībai, tomēr to galvenais fokuss ir ilgtermiņa plānošana, nevis konkrēta transportlīdzekļa operatīva novirzīšana uz piemērotāko uzlādes punktu konkrētā ekspluatācijas situācijā.

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 [8], [10], [16], [18], [19]. *AHP* ir piemērota kritēriju hierarhijas un relatīvās nozīmības noteikšanai [27], [28], savukārt *PROMETHEE* ļauj veikt alternatīvu prioritizāciju, izmantojot pārākuma attiecību loģiku un salīdzinot alternatīvas pēc vairākiem kritērijiem [25].

Svarīgs metodoloģisks nošķirums šajā darbā ir atšķirība starp uzlādes infrastruktūras plānošanu, viedo uzlādi un dinamisku uzlādes punkta piešķiršanu. Infrastruktūras plānošanas uzdevumos galvenais jautājums ir par to, kur stacijas jāizvieto, kāda kapacitāte nepieciešama un kā nodrošināt teritorijas pārklājumu [10], [16], [17]. Viedās uzlādes literatūrā uzmanība parasti tiek pievērsta jautājumam, kad un ar kādu jaudu transportlīdzekli uzlādēt, lai samazinātu tīkla noslodzi, izmantotu cenu signālus vai palielinātu elastību [7], [20], [21]. Savukārt dinamiska uzlādes punkta piešķiršana atbild uz atšķirīgu jautājumu, kuru konkrētu uzlādes punktu konkrētam *EV* konkrētajā laikā izvēlēties.

Promocijas darba pieeja literatūrā identificēto 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 [13], [14].

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

Šajā promocijas darbā lēmumu atbalsta sistēma netiek traktēta kā pašmērķis vai galvenais zinātniskais rezultāts. Tā tiek interpretēta kā praktiskās realizācijas vide, kurā īstenota izstrādātā *MCDM* pieeja – kritēriju strukturēšana, *AHP* balstīta svaru noteikšana, *PROMETHEE* balstīta alternatīvu prioritizācija, dinamiska datu aktualizācija un lēmuma rezultātu interpretācija.

Dinamiskai *EV* uzlādes punkta piešķiršanai nepieciešami vairāki datu slāņi: *EV* dati; uzlādes stacijas dati; sadales tīkla dati; lietotāja dati; kā arī drošības un uzticamības dati. Šie dati raksturo transportlīdzekļa uzlādes vajadzību, uzlādes punkta pieejamību un tehniskos parametrus, lokālo tīkla slodzi, pieejamo jaudas rezervi, komunikācijas stabilitāti, datu aktualitāti, autentifikācijas drošību un kiberriska līmeni [7], [10], [12]–[15]. Šādu datu izmantošana ļauj modelim darboties nevis kā vienreizējam statiskam aprēķinam, bet kā atkārtojami izpildāmam lēmumu procesam, kurā alternatīvu prioritātes tiek pārrēķinātas, ja mainās uzlādes punktu pieejamība, tīkla noslodze, datu kvalitāte vai kiberdrošības risks.

2. UZTICAMĪBAS ORIENTĒTAS DINAMISKAS UZLĀDES PUNKTU PIEŠĶIRŠANAS TEORĒTISKAIS MODELIS

Otrajā nodaļā aprakstīts izstrādātais teorētiskais modelis uz uzticamību orientētai dinamiskai elektrisko transportlīdzekļu uzlādes punkta piešķiršanai. Dinamiska uzlādes punkta piešķiršana tiek formalizēta kā daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas problēma, kur konkrētam *EV* noteiktā laika momentā jāizvēlas piemērotākais uzlādes punkts no pieļaujamo alternatīvu kopas. Šī izvēle nav statiska, jo uzlādes punkta piemērotība mainās atkarībā no transportlīdzekļa stāvokļa, nepieciešamā enerģijas daudzuma, uzlādes punkta pieejamības, gaidīšanas laika, sadales tīkla režīma, lietotāja ierobežojumiem, datu kvalitātes, pakalpojuma uzticamības un kiberdrošības riska [7], [10], [12]–[14].

2.1. Dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas problēmas formulējums

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.

Dinamiska uzlādes punkta piešķiršana 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 [10], [16]–[19]. Savukārt šajā promocijas darbā uzmanības centrā ir operatīvs lēmums, kuru no jau pieejamajiem vai konkrētajā brīdī sasniedzamajiem uzlādes punktiem izvēlēties konkrētam *EV* noteiktā ekspluatācijas situācijā.

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 [10], [12], [16]–[19].

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 – konkrētajā laikā sasniedzamo vai sākotnēji apsveramo uzlādes punktu kopa; m – 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 $c_j(a,t)$ – alternatīvas a vērtējums pēc j-tā kritērija laikā t; n – kritēriju skaits [13], [14].

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 ar ekspertu pāru salīdzinājumiem [27]–[29]. Savukārt alternatīvu galaprioritizācijai tiek izmantota *PROMETHEE* pieeja, jo tā ļauj veikt alternatīvu pāru salīdzināšanu pēc vairākiem kritērijiem un iegūt interpretējamu alternatīvu rangu [25].

Pirms alternatīvu prioritizācijas tiek nošķirta sākotnējā alternatīvu kopa A_t:

$$A_t^{adm} \subseteq A_t. \tag{2.4}$$

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

$$a_t^* = arg \max_{a \in A_t^{adm}} \phi(a,t). \tag{2.5}$$

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 [7], [10], [12], [14], [25], [27], [29].

2.2. Lēmumu vides elementi un alternatīvu kopa

Dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas *MCDM* modelī lēmums netiek pieņemts 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 [7], [10], [12]–[15].

Elektriskais transportlīdzeklis darbojas kā lēmuma iniciators, jo tā stāvoklis, akumulatora uzlādes līmenis, nepieciešamais enerģijas apjoms un lietotāja mobilitātes uzdevums nosaka, kad un kāpēc jāizvēlas uzlādes punkts [7], [12]. *EV* stāvokli laikā t var konceptuāli aprakstīt ar vektoru:

$$x_{EV}(t) = [SOC(t), E_{req}(t), R_{rem}(t), P_{acc}(t), u_{pref}(t)]. \tag{2.6}$$

Uzlādes punkts modelī ir *MCDM* alternatīva $a \in A_t$, ko raksturo pieejamā jauda, gaidīšanas laiks, atrašanās vieta, savienotāja savietojamība, ekspluatācijas statuss un cena:

$$x_{CP}(a,t) = [P_{ch}^{avail}(a,t), W(a,t), L(a), C_{conn}(a), S_{op}(a,t), p(a,t)]. \tag{2.7}$$

Sadales tīkls šajā 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, ja lokālajā tīklā pastāv sprieguma novirzes vai ja

papildu uzlādes slodze palielina maksimumslodzes risku [7], [10], [33]. Sadales tīkla stāvokli var aprakstīt ar vektoru:

$$x_G(a,t) = [P_{load}(a,t), Q(a,t), U(a,t), I_{\Phi}(a,t), P_{avail}(a,t), e_G(a,t)]. \quad (2.8)$$

Dinamiska *MCDM* modeļa darbība ir atkarīga arī no datu pieejamības, aktualitātes un ticamības. Datu un operatora vidi var raksturot ar vektoru:

$$x_D(a,t) = [D_{qual}(a,t), D_{age}(a,t), Com(a,t), Sec(a,t), O_{stat}(a,t)\,]. \quad (2.9)$$

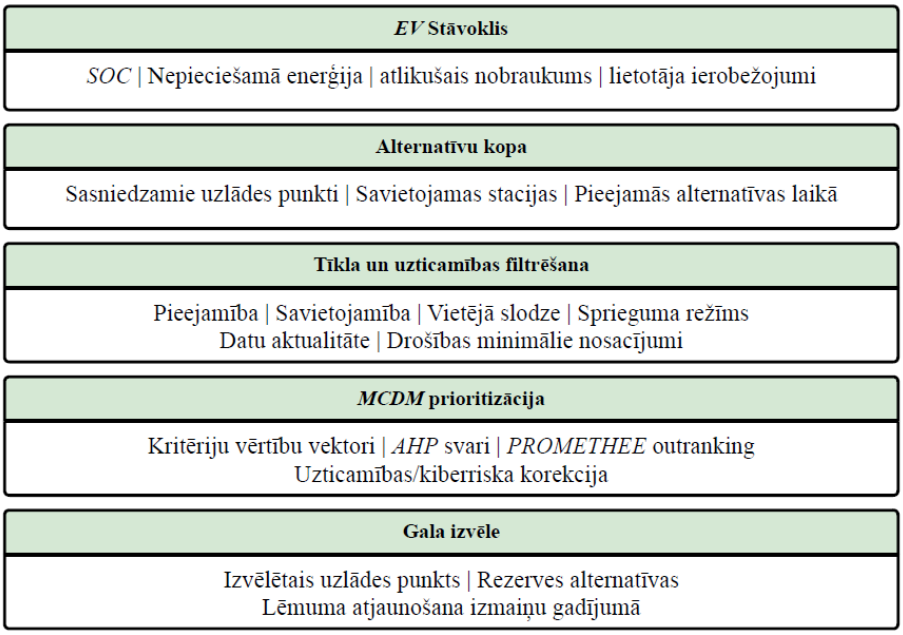
Apvienojot šos elementus, katras alternatīvas piemērotību laikā t var interpretēt kā funkciju no četriem galvenajiem stāvokļa blokiem:

$$s(a,t) = [x_{EV}(t), x_{CP}(a,t), x_G(a,t), x_D(a,t)\,]. \quad (2.10)$$

No šī stāvokļa vektora tiek iegūtas kritēriju vērtības:

$$c(a,t) = g(s(a,t)), \quad (2.11)$$

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



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

Šāda formalizācija nodala trīs līmeņus – fiziskos un digitālos datus, no tiem aprēķinātos kritērijus un *MCDM* prioritizāciju. Pirmajā līmenī atrodas *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 [14], [25], [27], [29].

2.3. Kritēriju sistēma uz uzticamību orientētai uzlādes punkta piešķiršanai

Dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas modelī kritēriju sistēma ir centrālais elements, kas ļauj heterogēnus tehniskos, lietotāja, tīkla, ekonomiskos, vides, uzticamības un kiberdrošības datus pārvērst salīdzināmā daudzkritēriju novērtēšanas struktūrā [7], [10], [12]–[14], [25].

Kopējā kritēriju kopa tiek definēta kā vairāku kritēriju grupu apvienojums:

$$C = C_{EV} \cup C_{CP} \cup C_G \cup C_U \cup C_E \cup C_{ENV} \cup C_{SEC} \cup C_{REL}, \tag{2.12}$$

kur C_{EV} – 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.

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:

$$d_j = \begin{cases} +1, & \text{ja lielākā kritērija vērtība ir vēlamāka,} \\ -1, & \text{ja mazākā kritērija vērtība ir vēlamāka.} \end{cases} \tag{2.13}$$

2.2. 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	[7], [12], [34], [35]
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	[11], [12], [15], [35]
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	[7], [10], [11], [33]
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	[7], [10], [12]
Ekonomiskie kritēriji	Uzlādes cena, tarifu struktūra, rezervācijas izmaksas, izmaksu prognozējamība	Parasti minimizējami	Diferencē alternatīvas pēc izmaksu pieņemamības	[7], [10], [12]
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	[11], [37]–[39]

2.2. tabulas turpinājums

Drošības/ kiberdrošības kritēriji	Autentifikācija, piekļuves kontrole, datu integritāte, komunikācijas drošība, incidentu risks	Drošības līmenis maksimizējams; risks minimizējams	Nodrošina digitālās uzticamības un kiberfiziskās noturības novērtēšanu	[9], [13], [14]
Uzticamības kritēriji	Pieejamība, darbspēja, *service uptime*, datu aktualitāte, lēmuma stabilitāte	Uzticamība maksimizējama; atteikumu risks minimizējams	Kalpo kā šķērsgriezuma kvalitātes dimensija un var ietekmēt galaprioritāti	[9], [13]–[15]

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*, alternatīvu prioritizācija – ar *PROMETHEE* [25], [27], [29].

2.4. Uzticamības un kiberdrošības indikatoru integrācija *MCDM* modelī

Dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas modelī uzticamība un kiberdrošība tiek interpretētas kā lēmumu vidi ietekmējoši faktori, nevis kā ārēji papildinājumi pēc galaizvēles. Tie var noteikt, vai konkrēts uzlādes punkts ir pieļaujams, kā tas tiek salīdzināts ar citām alternatīvām un kā interpretējama tā galaprioritāte [9], [13], [14], [40], [41].

Uzticamība ietver uzlādes punkta pieejamību, pakalpojuma nepārtrauktību, datu aktualitāti, komunikācijas stabilitāti un tīkla režīma pieļaujamību. Kiberdrošības indikatori raksturo *EV* uzlādes infrastruktūras kiberfiziskās vides riskus, kas saistīti ar *EV*, *EVSE*, operatora platformām, maksājumu sistēmām, komunikācijas protokoliem un elektroapgādes sistēmu [9], [13], [14]. *MCDM* modelī šie indikatori tiek izmantoti kā filtrēšanas nosacījumi, vērtēšanas kritēriji un galaprioritātes korekcijas faktori.

Uzticamības kopējo rādītāju alternatīvai a laikā t var konceptuāli definēt kā svērtu uzticamības apakšindikatoru summu:

$$R_{rel}(a,t) = \sum_{r=1}^{q} a_r \tilde{r}_r(a,t), \qquad \sum_{r=1}^{q} a_r = 1,\ a_r \geq 0. \tag{2.14}$$

Savukārt kiberdrošības risku var formulēt kā svērtu risku apakšindikatoru summu:

$$\rho_{cyb}(a,t) = \sum_{l=1}^{p} \beta_l \tilde{\rho}_l(a,t), \qquad \sum_{l=1}^{p} \beta_l = 1, \beta_l \geq 0, \tag{2.15}$$

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

Atšķirībā no uzticamības rādītāja kiberriska rādītājam zemāka vērtība ir vēlamāka.

Uzticamības un kiberdrošības indikatori var būt izteikti dažādās mērvienībās un skalās, tāpēc pirms to izmantošanas *MCDM* modelī nepieciešama normalizācija.

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

$$\tilde{x}_j(a,t) = \frac{x_j(a,t) - x_j^{\min}}{x_j^{\max}(t) - x_j^{\min}}. \tag{2.16}$$

Cost tipa indikatoriem, kuros mazāka vērtība ir vēlamāka, normalizāciju var formulēt šādi:

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

Uzticamības un kiberdrošības indikatorus *MCDM* modelī iespējams integrēt trīs līmeņos – kā filtrēšanas nosacījumus, kā atsevišķus *MCDM* kritērijus un kā galaprioritātes korekcijas faktorus. Filtrēšanas līmenī alternatīva tiek izslēgta no tālākas vērtēšanas, ja tā neatbilst minimālajiem tehniskajiem, uzticamības vai drošības nosacījumiem:

$$A_t^{adm} = \left\{ a \in A_t \middle| \begin{matrix} h_{tech}(a,t) = 1, h_G(a,t) = 1, \\ h_{rel}(a,t) = 1, h_{sec}(a,t) = 1 \end{matrix} \right\}. \quad (2.18)$$

Ja sākotnējais *PROMETHEE* neto plūsmas rezultāts tiek apzīmēts ar $(\phi(a,t))$, tad kiberriska korekciju var pierakstīt šādi:

$$\Phi_{adj}(a,t) = \phi(a,t) - \lambda \rho_{cyb}(a,t). \quad (2.19)$$

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

$$\Phi_{adj}(a,t) = \phi(a,t) + \mu R_{rel}(a,t) - \lambda \rho_{cyb}(a,t). \quad (2.20)$$

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

2.3. 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
Galaprioritātes korekcija	Samazina vai palielina galaprioritāti pēc riska/uzticamības rādītājiem	Kiberriska penalizācija, uzticamības bonuss	Maina riskam pielāgoto rangu

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 galaalternatīvu izvēles metode, bet nodrošina svaru vektoru, kas tālāk tiek izmantots *PROMETHEE* alternatīvu prioritizācijā. Šāds metožu sadalījums ļauj nodalīt ekspertu preferenču strukturēšanu no konkrētā laika momentā pieejamo alternatīvu operatīvas ranžēšanas [25], [27]–[29].

AHP hierarhija šajā darbā ietver četrus līmeņus: galvenais mērķis – uz uzticamību orientēta piemērotākā *EV* uzlādes punkta izvēle laikā t; kritēriju grupas; apakškritēriji; alternatīvas jeb konkrētajā laikā pieļaujamie uzlādes punkti. *AHP* rezultāts ir kritēriju svaru vektors w, kas tālāk tiek izmantots *PROMETHEE* aprēķinā.

PROMETHEE metode tiek izmantota kā galvenais pieļaujamo uzlādes alternatīvu prioritizācijas mehānisms. Tā ir piemērota dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas uzdevumam, jo balstās alternatīvu pāru salīdzināšanā un ļauj vienlaikus ņemt vērā vairākus savstarpēji konfliktējošus kritērijus [25].

Ja kritērijs ir maksimizējams, kritērija starpību starp alternatīvām a un b definē kā:

$$d_j(a,b,t) = c_j(a,t) - c_j(b,t). \quad (2.21)$$

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

$$d_j(a,b,t) = c_j(b,t) - c_j(a,t). \quad (2.22)$$

Kritērija starpība tiek pārveidota preferenču vērtībā $P_j(a,b,t) \in [0;1]$. Pēc tam tiek aprēķināts kopējais preferences indekss starp alternatīvām:

$$\pi(a,b,t) = \sum_{j=1}^{n} w_j P_j(a,b,t). \quad (2.23)$$

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

$$\phi^+(a,t) = \frac{1}{m-1} \sum_{\substack{b \in A^{adm} \\ b \neq a}} \pi(a,b,t), \quad (2.24)$$

$$\phi^-(a,t) = \frac{1}{m-1} \sum_{\substack{b \in A^{adm} \\ b \neq a}} \pi(b,a,t), \quad (2.25)$$

$$\phi(a,t) = \phi^+(a,t) - \phi^-(a,t). \quad (2.26)$$

PROMETHEE II rezultātā alternatīvas tiek sakārtotas pēc neto plūsmas vērtības:

$$R_t = (a_{(1)}, a_{(2)}, \dots, a_{(m)}), \qquad \phi(a_{(1)},t) \geq \phi(a_{(2)},t) \geq \cdots \geq \phi(a_{(m)},t). \quad (2.27)$$

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.

2.4.tabula

AHP-PROMETHEE secība dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas modelī

Posms	Saturs	Rezultāts
Kritēriju hierarhijas izveide	Mērķis, kritēriju grupas un apakškritēriji	Strukturēta kritēriju sistēma
AHP svaru noteikšana	Ekspertu pāru salīdzinājumi un svaru aprēķins	Kritēriju svaru vektors
Pieļaujamo alternatīvu kopas izveide	Filtrē tehniski, tīkla, datu un drošības ziņā nepieļaujamas alternatīvas	A_t^{adm}
PROMETHEE preferences indekss	Izmanto kritēriju vērtības, *AHP* svarus un preferenču funkcijas	$\pi(a,b,t)$
Plūsmu aprēķins	Aprēķina ϕ, ϕ^+, ϕ^-	Alternatīvu prioritātes
Ranga veidošana	Sakārto alternatīvas pēc neto plūsmas	Galarangs un rezerves secība

2.6. 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.

Sākotnēji tiek veidota kandidātu alternatīvu kopa:

$$A_t^0 = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}, \quad (2.28)$$

kur A_t^0 – sasniedzamo vai sākotnēji apsveramo uzlādes punktu kopa laikā t.

Pēc filtrēšanas tiek iegūta pieļaujamo alternatīvu kopa:

$$A_t^{adm} \subseteq A_t^0. \quad (2.29)$$

Tieši A_t^{adm} tiek izmantota *PROMETHEE* prioritizācijā. Filtrēšanas process ietver sasniedzamības, tehniskās savietojamības, *EVSE* statusa, minimālās pieejamās jaudas, sadales tīkla pieļaujamības, lietotāja robežu, datu kvalitātes un kiberdrošības minimālo nosacījumu pārbaudi [9], [13]–[15].

Filtrēšanas nosacījumus var pierakstīt ar indikatorfunkcijām:

$$h_i(a,t) = \begin{cases} 1, \text{ja nosacījums ir izpildīts,} \\ 0, \text{ja nosacījums nav izpildīts.} \end{cases} \tag{2.30}$$

Dinamiskais pārrēķins var tikt aktivizēts periodiski vai notikumu balstīti. Notikumu balstīta pārrēķina gadījumā modelis tiek izpildīts, ja izvēlētais uzlādes punkts kļūst aizņemts, pasliktinās tīkla režīms, mainās lietotāja *SOC*, samazinās datu kvalitāte vai tiek konstatēts drošības risks [42], [43].

Lēmuma stabilitāti var raksturot ar pirmās un otrās alternatīvas neto plūsmas starpību:

$$\Delta\phi_{12}(t) = \phi(a_{(1)}, t) - \phi(a_{(2)}, t). \tag{2.31}$$

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.

2.5.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
Galaizvēle	Nosaka pirmo un rezerves alternatīvas	a_t^*, rezerves secība
Stabilitātes pārbaude	Vērtē $\Delta\phi_{12}(t)$	Lēmuma pārliecinošuma indikators

Otrajā nodaļā dinamiska *EV* uzlādes punkta piešķiršana formalizēta kā daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas problēma. 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, *RES/BESS*, kiberdrošības un uzticamības kritērijus. *AHP* metode izmantota kritēriju hierarhijas un svaru noteikšanai, savukārt *PROMETHEE* – pieļaujamo uzlādes alternatīvu ranžēšanai un rezerves secības noteikšanai. Dinamiskās filtrēšanas un atjaunināšanas princips nodrošina to, ka prioritizācijā tiek izmantotas tikai konkrētajā laikā pieļaujamās alternatīvas un aktuālās kritēriju vērtības.

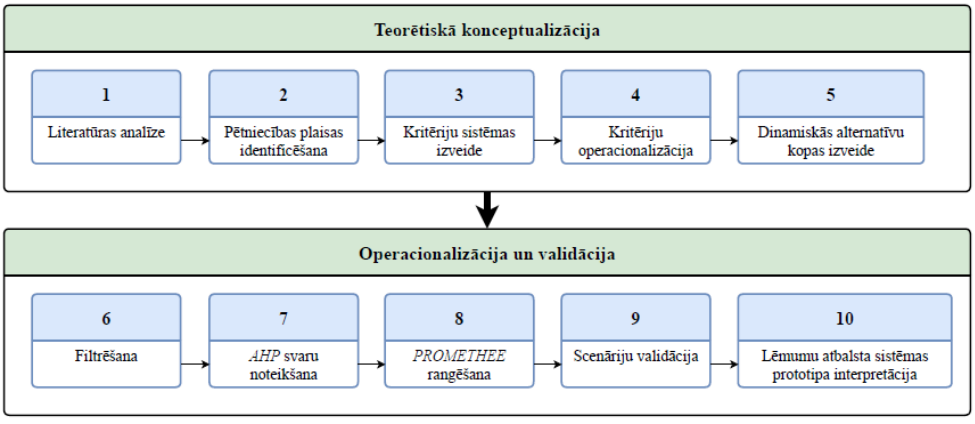
3. *MCDM* METODOLOĢIJAS OPERACIONALIZĀCIJA UN ALGORITMISKĀ REALIZĀCIJA

Trešajā nodaļā izstrādātais uz uzticamību orientētais dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas *MCDM* modelis, kas aprakstīts otrajā nodaļā, tiek pārnests praktiski izpildāmā aprēķinu metodoloģijā. 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 *PROMETHEE* aprēķinam, savukārt *PROMETHEE* rangs tiek izmantots uzlādes punkta izvēlei un rezerves alternatīvu secības noteikšanai. Aprēķinu prototips un rezultātu vizualizācijas vide šajā nodaļā tiek izmantota kā metodoloģijas pārbaudes, reproducējamības un interpretācijas instruments.

3.1. Pētījuma metodoloģiskā loģika

Promocijas darba pirmajā nodaļā pamatots *EV* uzlādes infrastruktūras pētniecības konteksts un uzlādes punkta izvēles daudzkritēriju raksturs, otrajā nodaļā problēma formalizēta kā uz uzticamību orientēts *MCDM* modelis. Trešās nodaļas uzdevums ir šo teorētisko modeli pārveidot aprēķinu procedūrā – kritēriju sistēma tiek operacionalizēta kā aprēķināmi indikatori, no pieejamajiem uzlādes punktiem tiek izveidota kandidātu alternatīvu kopa, nepieļaujamās alternatīvas tiek izslēgtas ar filtrēšanas nosacījumiem, kritēriju svari tiek noteikti ar *AHP*, bet pieļaujamās alternatīvas tiek ranžētas ar *PROMETHEE*.

Šāda secība balstās *AHP* hierarhiskās strukturēšanas un pāru salīdzinājumu principos [27], *AHP* mērījumu teorijas apsvērumos [28], dinamisko prioritāšu pieejā [29], *PROMETHEE* metodoloģijā [25], kā arī lēmuma atbalsta sistēmā un enerģijas pārvaldības sistēmu izstrādes pieejās [36], [44].



3.1. att. Pētījuma metodoloģiskā plūsma.
Avots – autora veidots, balstoties *AHP*, *PROMETHEE*, dinamisku prioritāšu un lēmuma atbalsta sistēmas metodoloģijas literatūrā [25], [27]–[29], [36], [44].

Izstrādātā metodoloģija balstās pieņēmumā, ka lēmuma pieņemšanai nepieciešamie dati par *EV* stāvokli, uzlādes punkta statusu, sadales tīkla režīmu, lietotāja ierobežojumiem, datu kvalitāti un kiberdrošības indikatoriem ir pieejami operatīvi vai arī tiek definēti scenāriju veidā. Vienlaikus metodoloģijai ir noteiktas robežas – darbā netiek modelēta pilna transporta plūsma, elektroenerģijas tirgus dinamika vai *EVSE* kiberdrošības incidentu tehniskā norise.

Kiberdrošības komponente tiek iekļauta kā lēmumu ietekmējošs riska un uzticamības slānis [13], [14].

3.2. Kritēriju operacionalizācija un *AHP* svaru izmantošana

Trešajā nodaļā kritēriju sistēma, kas definēta otrajā nodaļā, tiek pārnesta aprēķinu modelī. Katram kritērijam tiek noteikta praktiska interpretācija – aprēķināmais indikators, iespējamais datu avots, virziens *MCDM* modelī un loma algoritmiskajā procedūrā.

Aprēķinu modelī katrai pieļaujamajai alternatīvai a_i laikā t tiek veidots kritēriju vērtību vektors. Ja pieļaujamo alternatīvu kopā ir m alternatīvas un tiek izmantoti n kritēriji, aprēķinu pamatstruktūra ir kritēriju matrica:

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

Šī matrica apkopo visas pieļaujamās alternatīvas un to vērtības pēc operacionalizētajiem kritērijiem. Kritēriju vērtības var iegūt 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 – tie var darboties kā filtrēšanas nosacījumi, kā *PROMETHEE* ranžēšanas kritēriji vai kā galaprioritātes korekcijas un penalizācijas faktori. Šis dalījums ir būtisks, jo ne visas alternatīvas drīkst nonākt ranžēšanas posmā – tehniski, tīkla, datu kvalitātes vai kiberdrošības ziņā nepieļaujamas alternatīvas vispirms ir jāizslēdz.

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 ranžēšanas kritērijs
Uzlādes punkta pieejamība	Pieejamības statuss, aizņemtība, rezervācijas iespēja, darbspēja	*CPO/CSO* dati, *EVSE* monitorings	Pieejamība maksimizējama; aizņemtība minimizējama	Filtrs un ranžēšanas kritērijs
Gaidīšanas laiks	Paredzamais gaidīšanas laiks, rindas garums	Operatora dati, sesiju vēsture, scenāriju dati	Minimizējams	Ranžēšanas 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 ranžēšanas kritērijs
Sadales tīkla noslodze	Noslodzes koeficients, pieslēguma vai transformatora noslodze	Kontrolskaitītāji, *DSO* dati, lokālie mērījumi	Minimizējams	Filtrs un ranžēšanas kritērijs
Jaudas rezerve	Pieejamā jaudas rezerve	Kontrolskaitītāji, pieslēguma dati	Maksimizējams	Filtrs un ranžēšanas kritērijs

3.1. tabulas turpinājums

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

Piezīme. Tabula pārnes otrajā nodaļā definēto kritēriju sistēmu aprēķinu modelī. Kritēriju loma var mainīties atkarībā no validācijas scenārija, piemēram, sprieguma novirze normālā režīmā var būt ranžēšanas kritērijs, bet kritiskas novirzes gadījumā – filtrēšanas nosacījums.

Pēc kritēriju operacionalizācijas nepieciešams noteikt to relatīvo svarīgumu. Šim nolūkam tiek izmantota *AHP* metode, kas ļauj sarežģītu lēmumu problēmu sadalīt hierarhijā un noteikt kritēriju prioritātes ar pāru salīdzinājumiem [27]. Šajā promocijas darbā *AHP* netiek izmantota kā galaalternatīvu izvēles metode, bet gan kā svaru noteikšanas instruments, kura rezultāti tālāk tiek izmantoti *PROMETHEE* prioritizācijā.

AHP tiek izmantota trīs līmeņos – kritēriju grupu svari, apakškritēriju lokālie svari un globālie svari, kas tiek izmantoti *PROMETHEE* aprēķinā. Globālais apakškritērija svars tiek aprēķināts šādi:

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

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

Dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas kontekstā *AHP* svarus var izmantot kā bāzes svaru vektoru vai kā scenāriju atkarīgus svarus. Scenārijā koriģēto svaru var aprakstīt šādi:

$$w_j^{(s)} = \frac{\gamma_j^{(s)} w_j}{\sum_{k=1}^{n} \gamma_k^{(s)} w_k}, \tag{3.3}$$

kur w_j – sākotnējais AHP svars; $\gamma_j^{(s)}$ – scenārija s reizinātājs j-tajam kritērijam; $w_j^{(s)}$ – koriģētais un normalizētais kritērija svars scenārijā s. Šī pieeja vēlāk tiek izmantota jutīguma analīzei, pārbaudot, kā mainās rangs, ja pieaug uzticamības, kiberdrošības vai tīkla kritēriju nozīme.

3.3. *PROMETHEE* prioritizācijas aprēķinu procedūra

Pēc kritēriju operacionalizācijas un *AHP* svaru sagatavošanas tiek veikta pieļaujamo uzlādes punktu prioritizācija ar *PROMETHEE* metodi. *PROMETHEE* aprēķins izmanto trīs ievades – pieļaujamo alternatīvu kopu A_t^{adm}, kritēriju matricu C_t un *AHP* noteikto svaru vektoru w. Šāda pieeja ļauj vērtēt alternatīvas pēc vairākiem savstarpēji konfliktējošiem kritērijiem un iegūt interpretējamu alternatīvu secību [25].

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:

$$d_j(a,b,t) = \begin{cases} c_j(a,t) - c_j(b,t), & \text{ja } c_j \text{ ir maksimizējams kritērijs,} \\ c_j(b,t) - c_j(a,t), & \text{ja } c_j \text{ ir minimizējams kritērijs.} \end{cases} \quad (3.4)$$

Tālāk tiek piemērota preferenču funkcija $Pj(dj)$, kopējais preferences indekss, pozitīvā, negatīvā un neto plūsma. Šīs formulas teorētiski definētas otrajā nodaļā, tāpēc šajā nodaļā *PROMETHEE* tiek interpretēta kā praktiska aprēķinu procedūra. Neto plūsma $\phi(a,t)$ ir galaprioritātes rādītājs – jo lielāka ir neto plūsma, jo augstāka ir alternatīvas prioritāte kopējā daudzkritēriju novērtējumā.

PROMETHEE rezultātā pieļaujamās alternatīvas tiek sakārtotas pilnā rangā:

$$R_t = (a_{(1)}, a_{(2)}, \dots, a_{(m)}), \quad (3.5)$$

kur $a_{(1)}$ – augstāk novērtētā alternatīva, bet nākamās alternatīvas veido rezerves secību. Rezerves alternatīvu secība ir būtiska uz uzticamību orientētā dinamiskā uzlādes punkta piešķiršanā, jo sākotnēji izvēlētais punkts var kļūt aizņemts, tehniski nepieejams, tīkla ziņā mazāk piemērots vai drošības ziņā riskants.

Papildus galaizvēlei tiek analizēta pirmās un otrās alternatīvas neto plūsmas starpība $\Delta\phi_{12}(t)$. Ja šī starpība ir liela, pirmā alternatīva ir skaidri pārāka par otro. Ja tā ir maza, lēmums ir jutīgāks pret datu, svaru vai scenārija izmaiņām, un rezerves alternatīvu secības saglabāšana kļūst īpaši nozīmīga.

3.4. Dinamiskās filtrēšanas un piešķiršanas algoritms

Dinamiskās piešķiršanas algoritms balstās pieņēmumā, 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 tiek uztverts kā atkārtojams un atjauninams process.

Pirms *PROMETHEE* prioritizācijas tiek izveidota sākotnējā kandidātu kopa A_t^0. Pēc filtrēšanas tiek iegūta pieļaujamo alternatīvu kopa A_t^{adm}. Tajā iekļauj tikai tās alternatīvas, kas izpilda obligātos filtrēšanas nosacījumus:

$$A_t^{adm} = \left\{ \begin{matrix} a \in A_t^0 | h_{reach}(a,t) = 1, h_{comp}(a,t) = 1, \\ h_{EVSE}(a,t) = 1, h_P(a,t) = 1, h_G(a,t) = 1, \\ h_U(a,t) = 1, h_D(a,t) = 1, h_{SEC}(a,t) = 1, \end{matrix} \right\}. \quad (3.6)$$

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:

$$h_k(a,t) = \begin{cases} 1, ja\ alternatīva\ izpilda\ nosacījumu, \\ 0, ja\ alternatīva\ nosacījumu\ neizpilda \end{cases} \quad (3.7)$$

3.2. 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 penalizēta	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 penalizēta	Kiberdrošības/ uzticamības kritēriji

Piezīme. Filtrēšanas nosacījumi nodrošina to, ka *PROMETHEE* ranžēšanā nonāk tikai tās alternatīvas, kas konkrētajā laika momentā ir izmantojamas. Daļa nosacījumu var būt stingri filtri, daļa – scenārija atkarīgi kritēriji vai penalizācijas faktori [10]–[12], [14], [15], [36].

Dinamisko atjaunināšanu var īstenot periodiski vai notikumbalstīti. Periodiska atjaunināšana nozīmē, ka modelis tiek pārrēķināts pēc noteikta laika intervāla. Notikumbalstīta atjaunināšana nozīmē, ka pārrēķins tiek aktivizēts tad, ja izvēlētais uzlādes punkts kļūst aizņemts, pasliktinās tīkla režīms, samazinās datu kvalitāte, palielinās kiberrisks vai mainās lietotāja pieprasījuma parametri.

Dinamisko atjaunināšanu var aprakstīt kā atkārtotu aprēķinu ciklu:

$$D_t \longrightarrow A_t^0 \longrightarrow A_t^{adm} \longrightarrow C_t \longrightarrow R_t \longrightarrow a_t^*, \quad (3.8)$$

kur D_t – 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.

3.1. algoritms. 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 algoritms nodrošina skaidru pāreju no datiem uz lēmumu. Tas ļauj validēt ne tikai galaizvēles rezultātu, bet visu piešķiršanas procesa loģiku – cik alternatīvu tiek izslēgtas filtrēšanā, kā mainās *PROMETHEE* rangs, cik bieži ir pieejamas rezerves alternatīvas un kā dinamiskā atjaunināšana ietekmē lēmuma stabilitāti.

3.5. Prototipa aprēķinu realizācijas un rezultātu interpretācijas loģika

Izstrādātā *AHP-PROMETHEE* metodoloģija tiek sasaistīta ar aprēķinu prototipa realizācijas loģiku. Prototips netiek interpretēts kā komerciāli gatava lēmumu atbalsta sistēma vai operatora platforma. Tā uzdevums ir nodrošināt to, ka teorētiskais modelis un aprēķinu metodoloģija ir reproducējami pārbaudāma ar datiem, scenārijiem, *KPI* un vizuāli interpretējamiem rezultātiem.

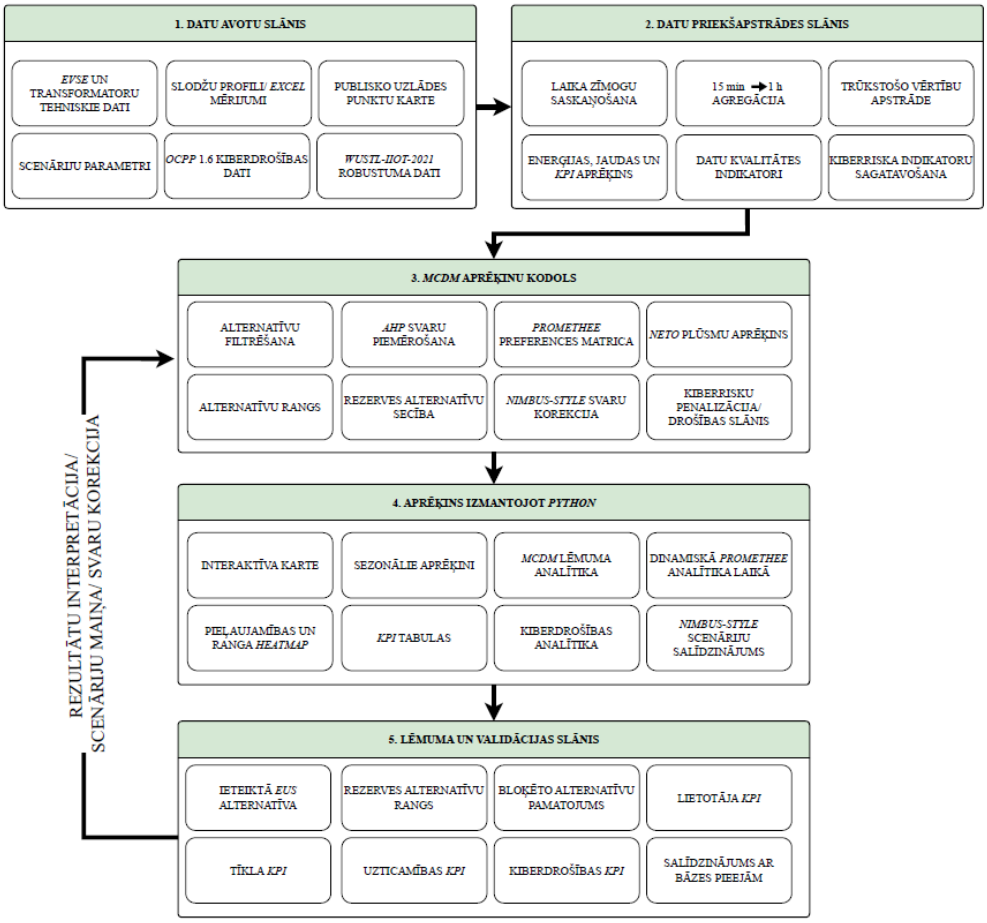
Prototipa validācijas ciklu var aprakstīt šādi:

$$\text{Ievaddati} \rightarrow \text{Priekšapstrāde} \rightarrow \text{Filtrēšana} \rightarrow AHP \text{ svari} \rightarrow PROMETHEE \text{ rangs}$$

$$\rightarrow \text{Piešķiršana} \rightarrow KPI \text{ un interpretācija}$$

Prototips ietver datu sagatavošanas, ģeotelpisko, scenāriju, *MCDM* aprēķinu, kiberdrošības un rezultātu interpretācijas slāni. Šāda struktūra ļauj sasaistīt uzlādes

infrastruktūras fiziskos datus ar dinamisku lēmumu pieņemšanas modeli un nodrošina aprēķinu caurspīdīgumu.



3.2. att. Prototipa un rezultātu vizualizācijas vides vieta lēmuma atbalsta sistēmas arhitektūrā.

Avots – autora veidots, balstoties lēmuma atbalsta sistēmas attīstības, *IoT* enerģijas pārvaldības, *EV* lēmumu pieņemšanas sistēmas un kiberdrošības riska novērtēšanas literatūrā [12]–[14], [36], [44].

3.3. 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 piešķiršana	Realizē promocijas darba metodoloģisko kodolu
Kiberdrošības un uzticamības slānis	Datu kvalitāte, komunikācijas statuss, kiberriska indikatori, drošības penalizācija	Nodrošina uz uzticamību orientētu piešķiršanas loģiku

3.3. tabulas turpinājums

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.

Viens no būtiskākajiem prototipa elementiem ir *MCDM* 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.

$$S_t^{MCDM} = \{x_{EV}(t), A_t^0, A_t^{adm}, C_t, w, \phi^+(t), \phi^-(t), \phi(t), R_t, a_t^*\}. \quad (3.9)$$

Šajā kopā $x_{EV}(t)$ ir *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.

Šī struktūra ļauj analizēt ne tikai galarezultātu, bet arī lēmuma veidošanās procesu, jo dinamiskā uzlādes punkta piešķiršanā galaizvēle var mainīties atkarībā no slodzes, pieejamības, datu kvalitātes vai drošības riska.

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

$$\phi_{risk}(a,t) = \phi(a,t) - \lambda \rho_{cyb}(a,t), \quad (3.10)$$

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.

Trešajā nodaļā teorētiskais *MCDM* modelis pārnests praktiski izpildāmā aprēķinu metodoloģijā. Definēta kritēriju operacionalizācija, *AHP* svaru izmantošana, *PROMETHEE* prioritizācijas procedūra, dinamiskās filtrēšanas algoritms un prototipa aprēķinu realizācijas loģika. Šī nodaļa sagatavo pāreju uz ceturto nodaļu, kur tiek izveidota datu, scenāriju un eksperimentālās validācijas vide, un piekto nodaļu, kur modelis tiek validēts ar aprēķinu rezultātiem.

4. DATU, SCENĀRIJU UN EKSPERIMENTĀLĀS VIDES IZVEIDE

Ceturtajā nodaļā aprakstīta izveidotā datu, scenāriju un eksperimentālās validācijas vide, kas nepieciešama otrajā nodaļā izstrādātā teorētiskā modeļa un trešajā nodaļā definētās algoritmiskās realizācijas pārbaudei. Nodaļas uzdevums ir sasaistīt *AHP-PROMETHEE* balstīto dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas modeli ar praktiski izmantojamiem validācijas datiem, scenārijiem, filtrēšanas nosacījumiem un novērtēšanas rādītājiem. Validācija tiek veikta kā metodoloģiska un scenāriju balstīta eksperimentālā pārbaude, nevis kā pilna mēroga lauka eksperiments ar tiešu pieslēgumu reāllaika *CPO*, *CSO*, *DSO* un *EV* lietotāju sistēmām.

4.1. Datu struktūra *MCDM* modeļa validācijai

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

$$V = \{RIGA1, RIGA2, PIERIGA1, PIERIGA2\}. \quad (4.1)$$

RIGA1 un *RIGA2* reprezentē pilsētas tipa uzlādes infrastruktūras objektus, savukārt *PIERIGA1* un *PIERIGA2* – Pierīgas jeb piepilsētas tipa objektus. Katrs validācijas objekts tiek interpretēts kā lokāla kiberfiziska uzlādes infrastruktūras vienība, kurā apvienoti teritorijas, transformatoru, barošanas avotu, EUS, slodžu profilu, datu kvalitātes un kiberdrošības slāņi. Kopumā validācijas modelī iekļautas septiņas EUS alternatīvas ar 25 uzlādes vietām, no kurām 20 ir *AC* un piecas ir *DC* uzlādes vietas.

4.1. tabula

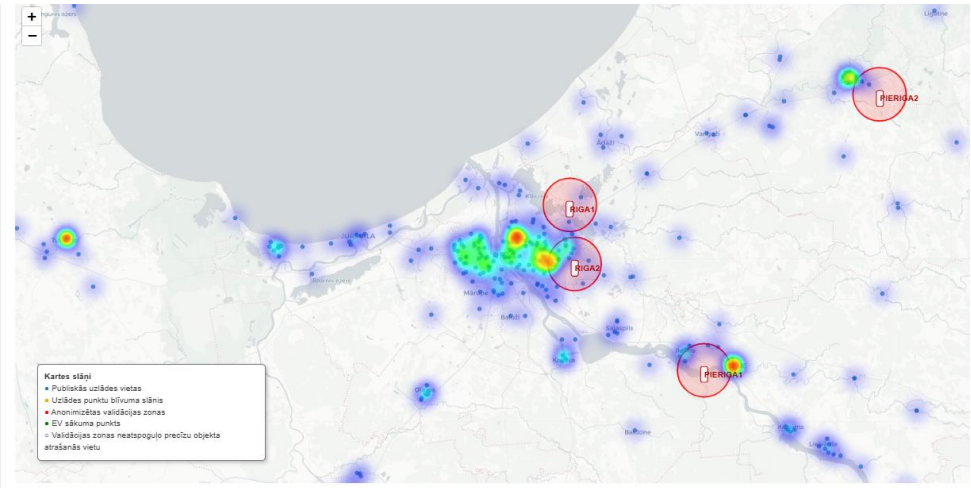
Validācijas objektu kopējā struktūra

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*	$RIGA1_{BAR1TR1}$, $RIGA1_{BAR1TR2}$, $RIGA1_{EUS1}$, $RIGA1_{EUS2}$, $RIGA1_{EUS3}$	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	$RIGA2_{BAR1TR1}$, $RIGA2_{BAR1TR2}$, $RIGA2_{EUS1}$, $RIGA2_{EUS2}$	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.

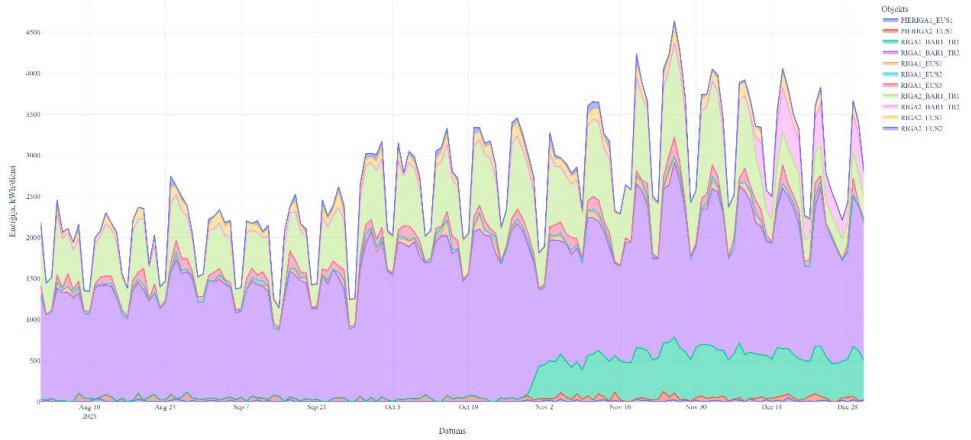
Kopējā EUS uzstādītā jauda ir 598,00 kW, kopējā atļautā/aprēķina jauda — 463,32 kW. Dinamisko datu slāni veido 11 slodžu profilu objekti – septiņi EUS profili un četri barošanas avotu profili.

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



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

Lai saglabātu infrastruktūras objektu konfidencialitāti, validācijas objektu precīzās koordinātas netiek publiskotas. Attēlos tās tiek aizstātas ar anonimizētām validācijas zonām. Papildus ģeotelpiskajam slānim validācijas vidē tiek izmantoti dinamiskie slodžu profili, kas parāda barošanas avotu un ar tiem saistīto EUS slodzes izmaiņas laikā.



4.2. att. Barošanas avotu un EUS slodžu profilu piemērs validācijas periodā.
Avots – autora veidots, izmantojot validācijas objektu barošanas avotu un EUS slodžu profilu datus.

Dinamiskas uzlādes punkta piešķiršanas modelī lēmuma iniciators ir *EV* un tā uzlādes nepieciešamība. Uzlādes pieprasījuma notikumu validācijas modelī var aprakstīt šādi:

$$q_r = [t_r, SOC_r, E_{req,r}, P_{acc,r}, L_{EV,r}, u_{pref,r}], \tag{4.2}$$

kur q_r – 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 faktiskie *BMS* dati nav pieejami, *SOC*, nepieciešamā enerģija, akumulatora kapacitāte un *EV* pieņemamā uzlādes jauda tiek definēti scenāriju veidā. Tas ļauj kontrolēt eksperimenta nosacījumus un pārbaudīt *MCDM* modeļa reakciju dažādās uzlādes vajadzību situācijās [7], [12], [34], [35].

Sadales tīkla datu slānis nodrošina, ka modelis neaprobežojas ar lietotāja ērtības un uzlādes punkta tehnisko parametru salīdzināšanu. *EV* uzlādes slodze var ietekmēt transformatoru un līniju noslodzi, sprieguma režīmu, jaudas rezervi un lokālo tīkla darbības pieļaujamību [10], [11], [33], [37]. Tādēļ validācijas modelī katra uzlādes alternatīva tiek sasaistīta ar attiecīgo elektroapgādes objektu, transformatoru vai barošanas avota slodzes profilu.

No pieejamajiem slodžu profiliem var aprēķināt vairākus tīkla kritērijus. Pieslēguma noslodzes koeficientu var definēt kā:

$$k_{load}(a,t) = \frac{P_{feed}(a,t)}{P_{allow}(a)}. \tag{4.3}$$

Brīvo jaudas rezervi aprēķina šādi:

$$P_{res}(a,t) = P_{allow}(a) - P_{feed}(a,t). \tag{4.4}$$

Ja tiek analizēta potenciāla jaunas uzlādes sesijas ietekme, pārslodzes riska indikatoru var definēt šādi:

$$r_{over}(a,t) = \max(0, \frac{P_{feed}(a,t)+P_{req}(a,t)-P_{allow}(a)}{P_{allow}(a)}). \tag{4.5}$$

Ja $r_{over}(a,t) > 0$, 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.

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 šie rādītāji saglabāti kā metodoloģiski paredzēti tīkla kritēriji, bet praktiskajā validācijā galvenā tīkla analīze balstās slodzē, atļautajā jaudā, jaudas rezervē un pārslodzes riska indikatoros.

Uzticamības un kiberdrošības slānis atspoguļo *EV* uzlādes infrastruktūras kiberfizisko raksturu, kur elektroenerģijas nodošana ir saistīta ar digitālo komunikāciju, operatora platformām, autentifikāciju, maksājumu sistēmām, datu integritāti un pakalpojuma pieejamību [9], [13], [14], [40], [41]. Kiberriska indikatori ietver autentifikāciju, datu integritāti, komunikācijas drošību, pakalpojuma pieejamības risku, incidentu atklāšanas spēju un trešo pušu vai mākoņpakalpojumu atkarības.

4.2. Datu priekšapstrāde un eksperimentālās vides arhitektūra

Pēc validācijas datu struktūras definēšanas heterogēnie *EV*, EUS, barošanas avotu, sadales tīkla, datu kvalitātes un kiberdrošības dati tiek sagatavoti izmantošanai *MCDM* aprēķinu modelī [45]. Datu priekšapstrāde ietver datu tīrīšanu un sinhronizāciju, kritēriju

normalizāciju, kā arī sliekšņu un robežvērtību noteikšanu. Katrs slodzes profils tiek pārveidots standartizētā formā:

$$D_{raw} \rightarrow D_{clean} \rightarrow D_{\Delta t}, \tag{4.6}$$

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, kas ir pietiekams EUS un barošanas avotu slodzes dinamikas raksturošanai, vienlaikus saglabājot pārskatāmu aprēķinu apjomu. Kopsavilkumiem un rezultātu vizualizācijai dati var tikt agregēti vienas stundas solī.

Normalizācija pārveido dažādu mērvienību kritērijus vienotā interpretācijas skalā un nodrošina to, ka *benefit* un *cost* tipa kritēriji tiek salīdzināti pareizā virzienā. Eksperimentālā vide tiek veidota kā slāņota aprēķinu vide – datu slānis importē un sagatavo ievaddatus, kritēriju slānis tos pārveido aprēķināmos indikatoros, *MCDM* slānis piemēro *AHP* svarus un *PROMETHEE* ranžēšanu, savukārt rezultātu slānis saglabā izvēlēto alternatīvu, rezerves alternatīvas, neto plūsmas, *KPI* un scenāriju salīdzinājumus.

Modeļa izpildes ķēdi var pierakstīt šādi:

$$D_{exp} \rightarrow D_{prep} \rightarrow C_t \rightarrow A_t^0 \rightarrow A_t^{adm} \rightarrow w \rightarrow \phi(a,t) \rightarrow R_t \rightarrow a_t^* \rightarrow KPI. \tag{4.7}$$

Šī secība nodala filtrēšanu no prioritizācijas – filtrēšana izslēdz nepieļaujamas alternatīvas, savukārt *PROMETHEE* salīdzina tikai tās alternatīvas, kas konkrētajā laika momentā atbilst minimālajām prasībām. Katram scenārijam tiek saglabāti gan starprezultāti, gan galarezultāti, kas piektajā nodaļā ļauj analizēt ne tikai izvēlēto uzlādes punktu, bet arī visu lēmuma veidošanās procesu.

4.3. Scenāriju sistēma

Scenāriju sistēma ir nepieciešama, lai izstrādāto *MCDM* modeli varētu pārbaudīt dažādos ekspluatācijas apstākļos. Vienas statiskas validācijas epizodes nepietiek, jo dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas problēma ir atkarīga no laikā mainīgiem datiem. Tāpēc tiek analizēts, kā modelis reaģē uz sezonālām slodzes izmaiņām, pilsētas un piepilsētas infrastruktūras atšķirībām, tīkla noslodzes pieaugumu, datu kvalitātes pasliktināšanos un kiberdrošības riska scenārijiem.

Katru scenāriju var raksturot šādi:

$$S_s = [T_s, Q_s, W_s, G_s, D_s, SEC_s, \Theta_s], \tag{4.8}$$

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.

Sākotnējā datu kvalitātes slānī katram no 11 profiliem ir 10 300 ieraksti, kopā 113 300 mērījumu rindas. Priekšapstrādes posmā galaaprēķinu kopā saglabātas 113 289 rindas jeb 10 299 ieraksti katram datu objektam. Datu periods galaaprēķinos ir no 2025. gada 1. augusta plkst. 01.00 līdz 2025. gada 31. decembra plkst. 23.45 ar 15 minūšu soli. Apstrādātajā validācijas kopā kopējais elektroenerģijas apjoms ir 403 104,55 kWh.

4.2. tabula

Scenāriju validācijas datu tvērums

Rādītājs	Vērtība	Nozīme validācijā
Validācijas vietas	4	Pilsētas un piepilsētas objektu salīdzināšana
EUS alternatīvas	7	*PROMETHEE* ranžēšanas 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 galapriekšapstrādes
Apstrādātās mērījumu rindas	113 289	Galaaprēķinu datu kopa dinamiskai validācijai
Raw validācijas periods	01.08.2025. plkst. 01.00–01.01.2026. plkst. 00.00	Sākotnējo failu laika robežas
Apstrādātais validācijas periods	01.08.2025. plkst. 01.00–31.12.2025. plkst. 23.45	Galaaprēķinos 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*

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.

Sezonālie scenāriji ļauj analizēt, kā *MCDM* modelis darbojas dažādos gada periodos. Validācijas datu periods no augusta līdz decembrim ļauj definēt vasaras, rudens un ziemas režīmu:

$$S_{season} = \{S_{summer}, S_{autumn}, S_{winter}\}. \quad (4.9)$$

4.3.tabula

Sezonālo scenāriju struktūra

Scenārijs	Lēmuma moments / atslēga	Mainīgais faktors	Ietekme uz pieļaujamo kopu	Validācijas jautājums
Vasaras scenārijs	15.08.2025 plkst. 10.00	Vasaras slodzes un pieprasījuma režīms	72 h logs, 288 soļi	Pārbauda modeli vasaras režīmā
Rudens scenārijs	15.10.2025 plkst. 16.00	Pārejas perioda slodzes režīms	72 h logs, 288 soļi	Pārbauda modeli rudens režīmā
Ziemas scenārijs	15.12.2025 plkst. 13.00	Ziemas slodzes režīms	72 h logs, 288 soļi	Pārbauda modeli ziemas režīmā
Normāls režīms	*normal*	Faktiskie dati bez papildu degradācijas	7/7 alternatīvas	Bāzes salīdzināšanas režīms

4.3. tabulas turpinājums

Datu kvalitātes degradācija	*Data degradation*	Stingrs datu kvalitātes filtrs	0/7 alternatīvas	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

Pilsētas un piepilsētas scenāriju nošķiršana ir metodoloģiski svarīga, jo uzlādes infrastruktūras piemērotība ir atkarīga no lokālajiem tehniskajiem un ekspluatācijas apstākļiem. Pilsētas objektos nozīmīgāka ir infrastruktūras koncentrācija un potenciāli lielāka vienlaikus ietekme, savukārt piepilsētas objektos būtiskāki var būt tīkla jaudas ierobežojumi, mazāks rezerves alternatīvu skaits un komunikācijas vai datu pieejamības nenoteiktība [45], [46].

Datu kvalitātes un kiberdrošības scenāriji nepieciešami, lai pārbaudītu, vai uzticamības, datu kvalitātes un digitālās drošības kritēriju integrācija 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 [13], [14], [40], [41].

Papildus tiek definēts arī uz uzticamības kritērijiem orientēts svaru jutīguma scenārijs. Tā mērķis ir pārbaudīt, kā mainās *PROMETHEE* rangs, ja lielāka nozīme tiek piešķirta uzticamībai, datu kvalitātei, sadales tīkla pieļaujamībai un kiberdrošībai.

4.4. Novērtēšanas rādītāji

Lai piektajā 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 tiek strukturēti piecās grupās:

$$KPI = [KPI_U, KPI_I, KPI_G, KPI_R, KPI_{SEC}], \tag{4.10}$$

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.

4.4. tabula

KPI struktūra

***KPI* grupa**	**Galvenie rādītāji**	**Vēlamais virziens**	**Validācijas nozīme**
Lietotāja *KPI*	Vidējais gaidīšanas laiks, vidējais attālums, uzdevuma izdošanās koeficients, nepieciešamā uzlādes apmierinātība	Gaidīšana un attālums minimāli; *ASR* un *RCS* maksimāli	Parāda lietotāja vajadzību apmierināšanu
Infrastruktūras *KPI*	Izmantošana pret uzstādīto jaudu, izmantošana pret atļauto jaudu, izvēļu sadalījums, rezerves alternatīvu izmantošana	Nepārsniegt robežas; saglabāt rezerves iespējas	Parāda infrastruktūras noslodzes un izvēļu sadalījumu

4.4. tabulas turpinājums

Sadales tīkla *KPI*	Tīkla pārkāpumu koeficients, vidējā jaudas rezerve, slodzes novirze, pārslodzes riski	Pārkāpumi minimāli; rezerve maksimāla	Parāda tīkla kritēriju ietekmi
Uzticamības *KPI*	Ranga stabilitāte, pārdales biežums, pieļaujamo alternatīvu zudums, rezervju pieejamība	Stabilitāte un rezerves pieejamība augsta; pāradresēšana pamatota	Parāda dinamiskā lēmuma noturību
Kiberdrošības un datu kvalitātes *KPI*	*Security penalty impact, data quality impact*, kiberriska ietekme, komunikācijas riska ietekme	Atkarīgs no scenārija	Parāda drošības un datu kvalitātes slāņa pienesumu

Piešķiršanas sekmīguma rādītājs raksturo, cik bieži modelis spēj atrast vismaz vienu pieļaujamu alternatīvu:

$$ASR = \frac{N_{success}}{N} \times 100\ \%. \tag{4.11}$$

Tīkla pārkāpumu īpatsvaru var definēt šādi:

$$GVR = \frac{N_{viol}}{N} \times 100\ \%. \tag{4.12}$$

Ranga stabilitāti var definēt kā gadījumu īpatsvaru, kuros pirmā alternatīva nemainās starp diviem secīgiem aprēķinu soļiem.

$$RS = \frac{N_{stable}}{N-1} \times 100\ \%. \tag{4.13}$$

Pieļaujamo alternatīvu zudumu var aprēķināt šādi:

$$AAL = \frac{|A_t^0| - |A_t^{adm}|}{|A_t^0|}. \tag{4.14}$$

Rezerves alternatīvu pieejamību var definēt kā gadījumu īpatsvaru, kuros pēc filtrēšanas ir pieejamas vismaz divas alternatīvas:

$$RA = \frac{N_{|A_t^{adm}|\geq 2}}{N} \times 100\ \%. \tag{4.15}$$

Šie *KPI* piektajā nodaļā tiek izmantoti, lai parādītu, ka kiberdrošības un datu kvalitātes slānis nav dekoratīvs pielikums, bet tieši ietekmē alternatīvu pieļaujamību, rangu, neto plūsmu un rezerves izvēles noturību [43], [47].

4.5. Datu un scenāriju ierobežojumi

Validācijas pieejai ir vairāki ierobežojumi. Pirmkārt, izmantotie dati ietver *EV* uzlādes infrastruktūras tehniskos parametrus un slodžu profilus, bet neietver pilnu reāllaika informāciju par *EV SOC*, lietotāju maršrutiem, uzlādes sesiju ilgumiem, rezervācijām un faktiskajām rindām. Tādēļ *EV* pieprasījuma dati, lietotāja preferences un gaidīšanas laika rādītāji daļēji tiek definēti scenāriju veidā. Otrkārt, konkrētajā validācijas datu kopā nav pilnvērtīgu sprieguma un fāžu strāvu datu visiem objektiem, tāpēc praktiskā tīkla analīze balstās slodzē, atļautajā jaudā, jaudas rezervē un pārslodzes riska indikatoros. Treškārt, 15 minūšu laika solis ir piemērots slodžu profilu analīzei, bet nav paredzēts sekundes vai minūtes līmeņa *EVSE* kļūdu, komunikācijas aizturu vai pārejas procesu modelēšanai. Ceturtkārt, kiberdrošības scenāriji tiek balstīti literatūrā un autora līdzautoru pētījumā definētajos kiberriska indikatoros, jo validācijas objektiem nav pieejami pilni *SOC/SIEM*, *OCPP* vai autentifikācijas notikumu žurnāli [13], [14], [40], [41]. Piektkārt, ģeotelpiskajā slānī tiek izmantotas anonimizētas validācijas zonas, nevis precīzas objektu koordinātas.

5. MODEĻA VALIDĀCIJA UN REZULTĀTU ANALĪZE

Piektajā nodaļā sniegta izstrādātā *AHP-PROMETHEE* balstītā dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas modeļa, kas aprakstīts otrajā un trešajā nodaļā, validācija. Ja ceturtajā nodaļā tika definēta datu, scenāriju un eksperimentālās vides struktūra, tad šīs 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 balstīta eksperimentālās vides aprēķinu rezultātos, kuros izmantotas četras anonimizētas validācijas vietas, septiņas EUS alternatīvas, 11 slodžu profilu datu objekti un 113 289 apstrādātas mērījumu rindas. Pilnā slodzes *KPI* datu slānī analizētais kopējais elektroenerģijas apjoms ir 403 104,55 kWh. Papildus kopējam datu periodam analizēti sezonālie validācijas periodi un reprezentatīvi lēmuma momenti.

Validācijas mērķis nav noteikt vienu universāli optimālu uzlādes staciju, bet novērtēt modeļa spēju atkārtoti un interpretējami ranžēt alternatīvas mainīgos apstākļos, ņemot vērā *EV* pieprasījumu, pieejamo jaudu, gaidīšanas laiku, sadales tīkla noslodzi, jaudas rezervi, datu kvalitāti, uzticamību un kiberdrošības risku.

5.1. Validācijas pieeja un salīdzināmās piešķiršanas stratēģijas

Validācijā tiek pārbaudīti trīs galvenie aspekti. Pirmkārt, tiek vērtēts, 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, sadales tīkla noslodzes, datu kvalitātes un kiberdrošības scenārijiem. Treškārt, tiek salīdzināts, vai pilnais uz uzticamību orientētais modelis dod pamatotāku rezultātu nekā vienkāršotas izvēles stratēģijas.

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	$a_t^P = \arg\max_{a \in A_t^{adm}} P_{ch}^{avail}(a,t)$	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

Pilnais modelis tiek interpretēts kā uz uzticamību orientēta *AHP-PROMETHEE* pieeja. *AHP* tiek izmantota kritēriju svaru noteikšanai, savukārt *PROMETHEE* – alternatīvu pāru salīdzināšanai un galaranga aprēķināšanai [25], [27]. Pilnā modeļa validācijā izmantotā kritēriju sistēma ietver deviņus kritērijus: uzticamību, jaudas rezervi, kiberrisku, datu kvalitāti, tīkla noslodzi, pieejamo uzlādes jaudu, attālumu, gaidīšanas laiku un cenu.

Galaizvēle tiek noteikta pēc *PROMETHEE* neto plūsmas.

5.2. *AHP* svaru un *PROMETHEE* ranga aprēķina rezultāti

Validācijas vidē tiek izmantotas septiņas EUS alternatīvas:

$$A = \begin{Bmatrix} RIGA1_{EUS1}, RIGA1_{EUS2}, RIGA1_{EUS3}, \\ RIGA2_{EUS1}, RIGA2_{EUS2}, \\ PIERIGA1_{EUS1}, PIERIGA2_{EUS1}. \end{Bmatrix}. \quad (5.1)$$

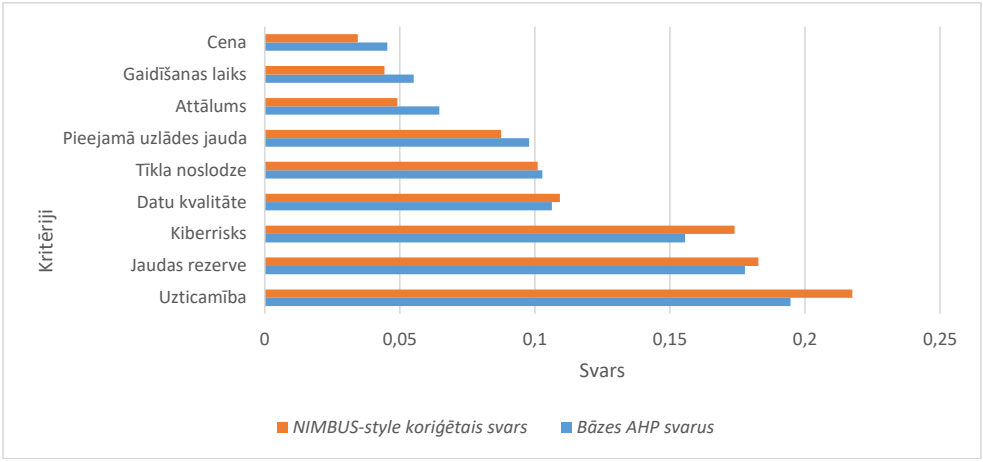
AHP svaru rezultāti tiek izmantoti kā kritēriju relatīvās nozīmības struktūra, savukārt *PROMETHEE* aprēķins parāda, kā šie svari kopā ar aktuālajām kritēriju vērtībām tiek pārvērsti alternatīvu rangā.

5.2. tabula

Bāzes un uz uzticamību orientēto kritēriju svaru salīdzinājums

Kritērijs	Apzīmējums	Tips	Bāzes svars	Uz uzticamību orientētais svars	Izmaiņa, %
Uzticamība	R_{rel}	Maksimizējams	0,19466	0,21755	11,76 %
Jaudas rezerve	P_{res}	Maksimizējams	0,17775	0,18277	2,82 %
Kiberrisks	ρ_{cyb}	Minimizējams	0,15564	0,17395	11,76 %
Datu kvalitāte	D_{qual}	Maksimizējams	0,10629	0,10929	2,82 %
Tīkla noslodze	k_{load}	Minimizējams	0,10276	0,10107	–1,65 %
Pieejamā uzlādes jauda	P_{ch}^{avail}	Maksimizējams	0,09784	0,08748	–10,59 %
Attālums	d	Minimizējams	0,06461	0,0491	–24,00 %
Gaidīšanas laiks	W	Minimizējams	0,05511	0,04435	–19,53 %
Cena	p	Minimizējams	0,04534	0,03446	–24,00 %
Kopā			**1**	**1**	

Bāzes modelī lielākais svars piešķirts uzticamībai, jaudas rezervei un kiberriskam. Kopā šie trīs kritēriji veido 52,805 % no kopējā svara. Ja šai grupai pieskaita arī datu kvalitāti un tīkla noslodzi, uz uzticamību orientētais kritēriju bloks veido 73,710 % no kopējā svara. Uz uzticamību orientētajā konfigurācijā šis bloks palielinās līdz 78,463 %, savukārt attāluma, gaidīšanas laika un cenas kopējais svars samazinās līdz 12,791 %. Tas parāda, ka modelis nav tikai lietotāja ērtības modelis, bet prioritizē infrastruktūras darbspēju, datu ticamību, tīkla pieļaujamību un kiberdrošības riska kontroli.



5.1. att. Bāzes un uz uzticamību orientēto koriģēto kritēriju svaru salīdzinājums.
Avots – autora veidots, balstoties bāzes un koriģēto svaru konfigurācijā.

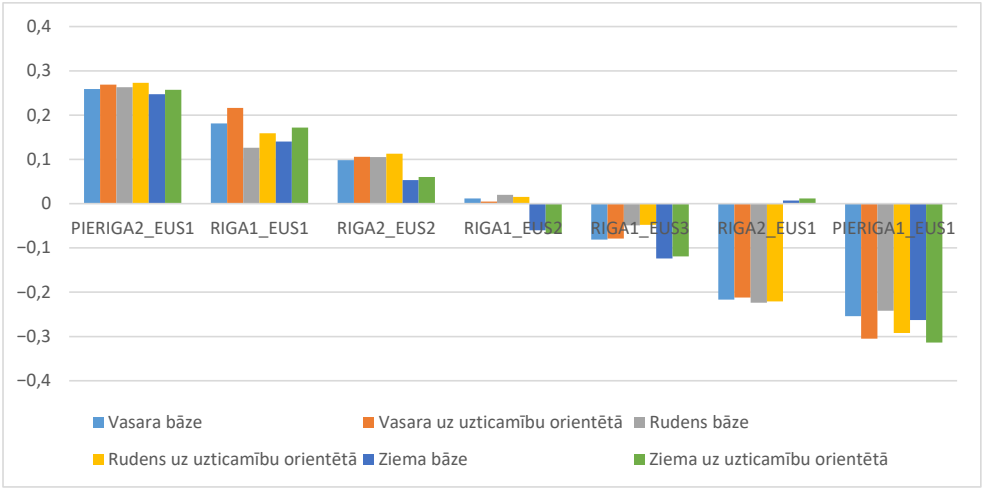
Lai novērtētu modeļa darbību dažādos ekspluatācijas apstākļos, *PROMETHEE* aprēķini veikti trīs reprezentatīvos sezonālajos lēmuma momentos – vasarā, rudenī un ziemā.

5.3. 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

PROMETHEE II rezultāti parāda, ka $PIERIGA2_{EUS1}$ iegūst pirmo vietu visos trīs sezonālajos lēmuma momentos gan bāzes, gan uz uzticamību orientētajā konfigurācijā. Otrajā vietā visos analizētajos gadījumos ir $RIGA1_{EUS1}$, kas interpretējama kā galvenā rezerves alternatīva. Uz uzticamību orientētajā konfigurācijā $PIERIGA2_{EUS1}$ neto plūsma nedaudz palielinās, bet vienlaikus samazinās pirmās un otrās alternatīvas neto plūsmas starpība. Tas nozīmē, ka uzticamības un drošības kritēriju pastiprināšana neizmaina galveno rekomendāciju, bet palielina rezerves alternatīvas relatīvo konkurētspēju.



5.2. att. *PROMETHEE II* neto plūsmas lēmuma momentā gan bāzes konfigurācija, gan uz uzticamību orientētā konfigurācija.

Avots – autora veidots, balstoties *PROMETHEE II* lēmuma momenta aprēķinos.

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. Bāzes scenārijā netiek piemērota papildu tīkla pīķa slodzes, datu kvalitātes degradācijas vai paaugstināta kiberdrošības riska korekcija.

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, kopā trīs sezonās – 864 lēmuma momenti.

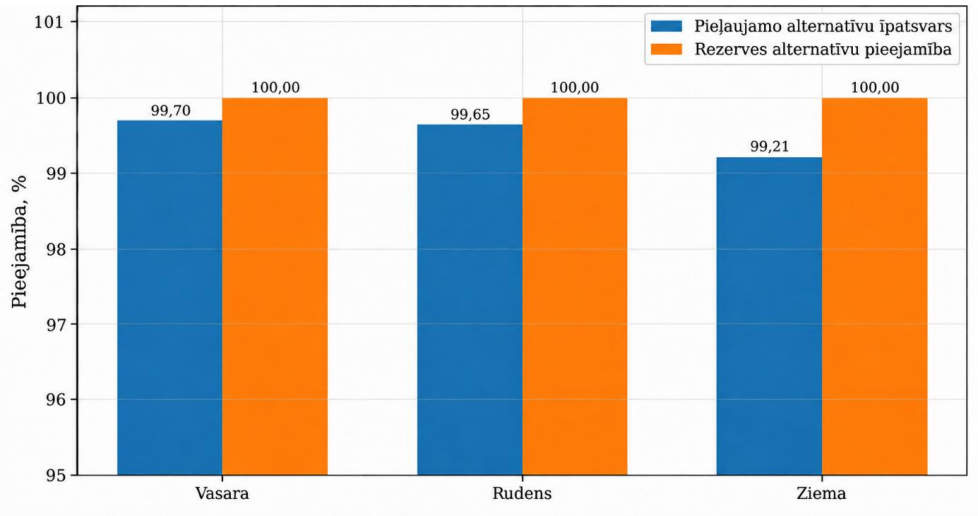
5.4. tabula

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

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. Vidējais pieļaujamo EUS skaits saglabājas tuvu septiņām alternatīvām, bet rezerves alternatīvu pieejamība visās sezonās ir 100 %. Tas ir būtiski dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas kontekstā, jo izvēlētā alternatīva var kļūt aizņemta, tehniski nepieejama, tīkla ziņā nevēlama vai drošības ziņā riskanta.

Ranga stabilitāte bāzes scenārijā 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. Šie rezultāti parāda, ka modelis ir dinamisks, bet neveic haotiskas rekomendāciju maiņas.



5.3. att. Pieļaujamo alternatīvu skaita izmaiņas laikā bāzes scenārija sezonālajos validācijas periodā.

Avots – autora veidots, balstoties bāzes scenārija sezonālās validācijas rezultātos.

5.4. Salīdzinošā analīze ar vienkāršotām piešķiršanas pieejām

Salīdzinošās analīzes mērķis ir pārbaudīt promocijas darba hipotēzes praktisko aspektu – vai daudzkritēriju, uz uzticamību orientēta dinamiska piešķiršanas pieeja nodrošina pamatotāku izvēli nekā pieejas, kas balstās vienā dominējošā kritērijā.

Salīdzinājumā tiek izmantotas četras piešķiršanas pieejas – pilnais *AHP-PROMETHEE* modelis, tuvākās alternatīvas izvēle, īsākā gaidīšanas laika izvēle un lielākās efektīvās uzlādes jaudas izvēle.

5.5. tabula

Piešķiršanas metožu izvēlēto alternatīvu un riska profila salīdzinājums

Piešķiršanas metode	**Pilnais *AHP-PROMETHEE* modelis**	**Tuvākā alternatīva**	**Īsākais gaidīšanas laiks**	**Lielākā efektīvā uzlādes jauda**
Izvēle sezonālajos momentos	$PIERIGA2_{EUS1}$	$PIERIGA1_{EUS1}$	$RIGA2_{EUS2}$	$PIERIGA2_{EUS1}$
Vid. tīkla noslodze	0,000272	0,000159	0,010918	0,000272
Vid. kiberrisks	0,16	0,39	0,22	0,16
Vid. datu kvalitāte	0,9	0,6	0,8	0,9
Vid. uzticamība	0,94279	0,83985	0,90829	0,94279
Vid. Efek. jauda, kW	50	22	22	50
Vid. attālums, km	23,14	17,49	25,72	23,14

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 šīs pieejas nav metodoloģiski līdzvērtīgas, jo vienkritērija pieeja

neskaidro alternatīvas piemērotību pēc uzticamības, datu kvalitātes, tīkla un kiberdrošības kritērijiem.

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. Īsākā gaidīšanas laika pieeja izvēlas $RIGA2_{EUS2}$, taču pilnais modelis tai nepiešķir pirmo vietu, jo tās kopējais daudzkritēriju profils ir vājāks nekā $PIERIGA2_{EUS1}$.

Salīdzinošā analīze 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.

5.5. Scenāriju un stresa apstākļu analīze

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. Katrs scenārijs maina vienu vai vairākus lēmumu vidi ietekmējošus faktorus – tīkla noslodzi, datu kvalitāti, kiberriska līmeni vai šo faktoru kombināciju.

5.6. tabula

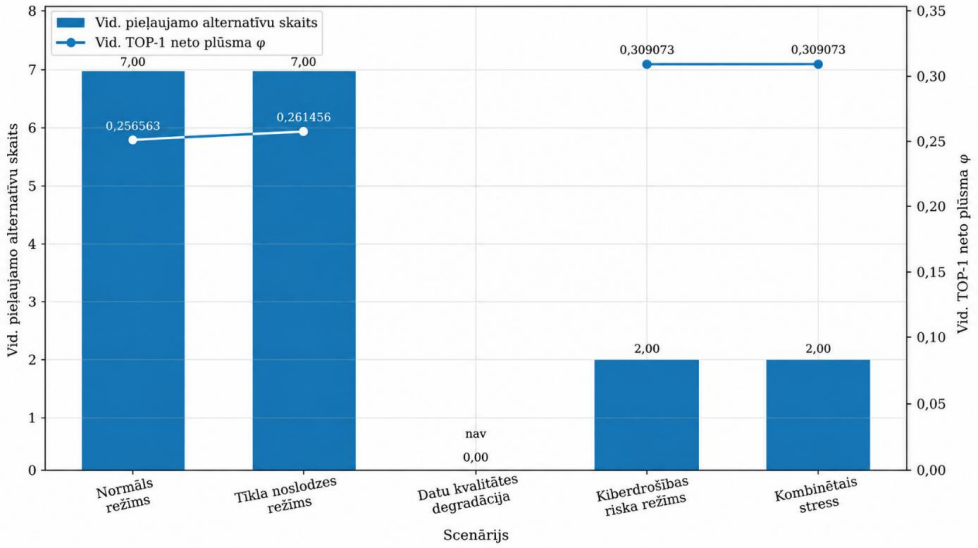
Stresa scenāriju vidējo *KPI* salīdzinājums

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 lēmuma 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

Tīkla noslodzes režīmā piešķiršanas panākumu īpatsvars saglabājas 100 %, un visas septiņas alternatīvas paliek pieļaujamas. Tomēr vidējā TOP-1 neto plūsma palielinās līdz 0,261456, kas norāda, ka tīkla kritēriju korekcija ietekmē alternatīvu prioritizāciju.

Datu kvalitātes degradācijas scenārijā stingra datu kvalitātes filtra ietekmē pieļaujamo alternatīvu skaits samazinās līdz 0 no 7, un piešķiršanas panākumu īpatsvars ir 0 %. Šajā gadījumā *PROMETHEE* rangs netiek aprēķināts, jo nav nevienas pieļaujamas alternatīvas. Tas ir interpretējams kā uzticamības orientētas pieejas pazīme – ja dati nav pietiekami ticami, modelim nav jāizdod automātiska rekomendācija.

Kiberdrošības riska un kombinētā stresa scenārijos pieļaujamas ir tikai 2 no 7 alternatīvām jeb 28,57 %. Tomēr modelis joprojām saglabā 100 % piešķiršanas panākumu īpatsvaru un spēj izvēlēties $PIERIGA2_{EUS1}$ kā labāko pieļaujamo alternatīvu.



5.4. att. Stresa scenāriju *KPI* salīdzinājums.
Avots – autora veidots, balstoties eksperimentālās validācijas vides aprēķinu rezultātos.

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. Pilnā augusta–decembra periodā analizēti 3672 lēmuma momenti.

5.7. tabula

Izvēlēto alternatīvu skaits pilnā augusts–decembris periodā

Svaru konfigurācija	Bāzes	Uz uzticamību orientētā
Galvenā izvēlētā alternatīva	$PIERIGA2_{EUS1}$	$PIERIGA2_{EUS1}$
Izvēļu īpatsvars	77,12 %	60,92 %
Otrā alternatīva	$RIGA1_{EUS1}$	$RIGA1_{EUS1}$
Izvēļu īpatsvars	22,79 %	39,03 %
Piešķiršanas sekmīgums	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

Bāzes konfigurācijā visbiežāk izvēlētā alternatīva ir $PIERIGA2_{EUS1}$, kas izvēlēta 2832 laika soļos jeb 77,12 % gadījumu. $RIGA1_{EUS1}$ izvēlēta 837 laika soļos jeb 22,79 % gadījumu. Uz uzticamību orientētajā konfigurācijā $PIERIGA2_{EUS1}$ saglabā lielāko īpatsvaru, tomēr tās izvēļu skaits samazinās līdz 60,92 %, savukārt $RIGA1_{EUS1}$ īpatsvars pieaug līdz 39,03 %.

Abās svaru konfigurācijās piešķiršanas sekmīgums ir 100 %. Tas nozīmē, ka svaru konfigurācijas maiņa nesamazina modeļa spēju nodrošināt derīgu piešķiršanas rezultātu. Vienlaikus uz uzticamību orientētajā konfigurācijā ranga stabilitāte samazinās no 85,81 % līdz 80,53 %, bet piešķiršanas maiņas biežums pieaug no 14,19 % līdz 19,47 %. Tas norāda, ka modelis kļūst jutīgāks pret uzticamības, tīkla un kiberdrošības profila izmaiņām, bet nezaudē spēju piešķirt pieļaujamu uzlādes alternatīvu.

Papildus tika analizēta kiberriska kritērija svara un tiešas kiberriska penalizācijas ietekme. Palielinot kiberriska nozīmi, pieaug tādu alternatīvu konkurētspēja, kurām ir labāks uzticamības, datu kvalitātes un kiberdrošības profils. Tīkla kritēriju jutīguma analīze parāda, ka tīkla noslodzes un jaudas rezerves kritēriju pastiprināšana noteiktos gadījumos spēj pārkārtot pirmo vietu par labu alternatīvām ar labāku tīkla profilu. Tas nozīmē, ka modelis nav mehāniski piesaistīts vienai alternatīvai, bet spēj pielāgoties situācijām, kurās sadales tīkla stāvoklis kļūst par dominējošu ierobežojumu.

5.7. Uzticamības un kiberdrošības slāņa pienesuma novērtējums

Uzticamības, datu kvalitātes un kiberdrošības slāņa pienesums tiek vērtēts pēc tā, kā šie indikatori ietekmē alternatīvu filtrēšanu, *PROMETHEE* rangu, neto plūsmu, rezerves secību un lēmuma stabilitāti. Promocijas darba kontekstā uzticamība netiek interpretēta tikai kā uzlādes iekārtas fiziska darbspēja.

Datu kvalitātes un kiberdrošības stresa scenāriji parāda, ka šie slāņi ietekmē ne tikai alternatīvu neto plūsmu, bet arī pašu pieļaujamo alternatīvu kopu. Datu kvalitātes degradācijas scenārijā stingrs datu kvalitātes filtrs izslēdz visas alternatīvas, tādēļ piešķiršanas sekmīgums samazinās līdz 0 %. Kiberdrošības riska režīmā un kombinētajā stresa scenārijā pieļaujamas ir tikai 2 no 7 alternatīvām, tomēr modelis joprojām saglabā spēju izvēlēties pieļaujamu alternatīvu.

Kiberdrošības slānis modelī tiek izmantots trīs veidos – kā filtrs, kā *PROMETHEE* kritērijs un kā neto plūsmas penalizācijas mehānisms. Šāda trīslīmeņu integrācija nodrošina to, ka kiberdrošības risks var ietekmēt gan alternatīvas pieļaujamību, gan tās relatīvo prioritāti starp citām alternatīvām.

Papildus *MCDM* scenāriju analīzei eksperimentālajā vidē tika izmantots kiberdrošības datu slānis, kas balstīts *OCPP* lietotnes līmeņa, *OCPP TCP/IP* līmeņa un *WUSTL-IIoT* datu kopu apstrādē. Šī slāņa mērķis nav aizstāt *EVSE* tehnisko drošības auditu, bet pamatot kiberriska indikatora izmantošanu kā lēmumu ietekmējošu *MCDM* kritēriju [48], [49].

5.8. tabula

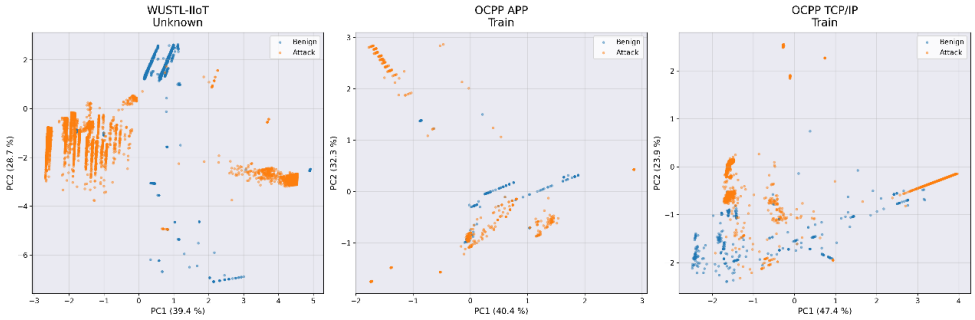
Kiberdrošības datu slāņu kopsavilkums

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 *OCPP APP, OCPP TCP/IP* un *WUSTL-IIoT* datu slāņu apstrādē; *OCPP* datu slāņi balstīti *Federated OCPP 1.6 Intrusion Detection Dataset* [59], *WUSTL-IIoT 2021* izmantota kā papildu *IIoT* kiberdrošības datu kopa [60].

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 liecina par labu atdalāmību starp normālu un anomālu komunikācijas uzvedību. *OCPP* lietotnes līmeņa datu slānī *AUC* ir 0,723, kas liecina par 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.



5.5. att. Kiberdrošības datu slāņu *PCA* projekcija. Normālas (*Benign*) un uzbrukuma (*Attack*) datplūsmas salīdzinājums.
Avots – autora veidots, balstoties *OCPP APP, OCPP TCP/IP* un *WUSTL-IIoT* datu slāņu aprēķinu rezultātos.

Uzticamības un kiberdrošības slāņa praktiskais pienesums izpaužas vairākos līmeņos. Pirmkārt, tas uzlabo lēmuma interpretējamību. Otrkārt, tas samazina risku rekomendēt alternatīvu, par kuru nav pietiekami ticamu datu. Treškārt, kiberdrošības slānis ļauj izvairīties no augsta riska alternatīvu rekomendēšanas. Ceturtkārt, pilna ranga izmantošana nodrošina rezerves alternatīvu pieejamību. Piektkārt, šis slānis sasaista *EV* uzlādes punkta piešķiršanu ar kiberfiziskās infrastruktūras realitāti.

5.8. Piektās nodaļas kopsavilkums

Piektajā nodaļā veikta izstrādātā *AHP-PROMETHEE* balstītā dinamiskās *EV* uzlādes punkta piešķiršanas modeļa validācija. Rezultāti apstiprina, ka modelis spēj aprēķināt pilnu un interpretējamu uzlādes punktu rangu, noteikt piemērotāko alternatīvu un saglabāt rezerves alternatīvu secību.

AHP svaru analīze parāda, ka modelis ir uz uzticamību orientēts, jo uzticamības, jaudas rezerves, kiberriska, datu kvalitātes un tīkla noslodzes kritēriji bāzes konfigurācijā veido 73,710 % no kopējā svara, bet uz uzticamību orientētajā konfigurācijā – 78,463 %. Sezonālo *PROMETHEE II* aprēķinu rezultāti rāda, ka $PIERIGA2_{EUS1}$ saglabā pirmo vietu visos analizētajos sezonālajos scenārijos, savukārt $RIGA1_{EUS1}$ veido galveno rezerves alternatīvu.

Bāzes scenārijā piešķiršanas panākumu īpatsvars visās sezonās sasniedz 100 %, bet ranga stabilitāte saglabājas 85,42–90,28 % robežās. Salīdzinājums ar vienkāršotām piešķiršanas pieejām apliecina, ka tuvākā, ātrāk pieejamā vai jaudīgākā alternatīva ne vienmēr ir piemērotākā, ja vienlaikus tiek vērtēta uzticamība, datu kvalitāte, sadales tīkla pieļaujamība un kiberdrošība.

Stresa scenāriji parāda, ka datu kvalitātes degradācija var pilnībā izslēgt piešķiršanu, savukārt kiberdrošības riska un kombinētā stresa gadījumā pieļaujamo alternatīvu skaits samazinās līdz 2 no 7, tomēr modelis saglabā spēju izvēlēties pieļaujamu alternatīvu. Jutīguma analīze apliecina, ka modelis saglabā piešķiršanas spēju arī svaru konfigurācijas izmaiņu gadījumā un spēj mainīt alternatīvu prioritāti, ja pieaug uzticamības, kiberdrošības vai tīkla kritēriju nozīme.

6. REZULTĀTU DISKUSIJA, IEVIEŠANAS IESPĒJAS UN PĒTĪJUMA IEROBEŽOJUMI

Sestajā nodaļā interpretēti promocijas darba validācijas rezultāti, izvērtēta hipotēze, raksturots zinātniskais un praktiskais pienesums, kā arī noteiktas ieviešanas iespējas, pētījuma ierobežojumi un turpmākās attīstības virzieni. Nodaļā apkopots, kā izstrādātais *AHP-PROMETHEE* modelis nodrošina uzticamības orientētu dinamisku *EV* uzlādes punkta piešķiršanu, integrējot lietotāja, uzlādes infrastruktūras, sadales tīkla, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības kritērijus vienotā lēmumu modelī.

6.1. Rezultātu interpretācija un hipotēzes izvērtējums

Promocijas darbā pamatots, ka elektrisko transportlīdzekļu uzlādes punkta izvēli nevar reducēt tikai uz tuvākās, ātrākās vai jaudīgākās stacijas izvēli. Šādas vienkāršotas pieejas var būt noderīgas kā sākotnēji orientieri, tomēr tās neņem vērā uzlādes punkta faktisko pieejamību, sadales tīkla noslodzi, jaudas rezervi, datu aktualitāti, komunikācijas uzticamību un kiberdrošības riskus. Tādēļ darbā uzlādes punkta piešķiršana interpretēta kā dinamiska daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas problēma.

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 pozitīvās, negatīvās un neto plūsmas [25], [27], [29]. Šāda pieeja nodrošina ne tikai galarekomendāciju, bet arī tās skaidrojumu.

Būtisks darba rezultāts ir pilna uzlādes punktu ranga iegūšana, nevis tikai vienas izvēlētās alternatīvas noteikšana. *PROMETHEE II* neto plūsma kalpo kā galaprioritātes 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.

Validācijas rezultāti parāda, ka sezonālajos *PROMETHEE II* lēmuma momentos $PIERIGA2_{EUS1}$ saglabā pirmo vietu vasaras, rudens un ziemas scenārijos gan bāzes, gan uz uzticamību orientētajā svaru konfigurācijā. $RIGA1_{EUS1}$ visos sezonālajos lēmuma momentos saglabā otro vietu un ir interpretējama kā galvenā rezerves alternatīva.

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 tikai lietotāja komforta modelis, bet gan pieeja, kurā lietotāja vajadzības tiek līdzsvarotas ar infrastruktūras darbspēju, sadales tīkla pieļaujamību, datu ticamību un kiberdrošības risku.

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. Kiberdrošības riska un kombinētajā stresa scenārijā pieļaujamo alternatīvu kopa sašaurinās līdz 2 no 7 alternatīvām jeb 28,57 %, tomēr piešķiršanas panākumu īpatsvars saglabājas 100 %.

6.1. tabula

Hipotēzes elementu izvērtējums, balstoties piektajā nodaļā atspoguļotajos validācijas rezultātos

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. Pilna praktiskā efektivitāte reālā ekspluatācijas vidē vēl jāapstiprina ar plašāku datu integrāciju, reāllaika *CPO/CSO* un *DSO* datiem, kā arī pilnvērtīgāku kiberdrošības monitoringa slāni.

6.2. Salīdzinājums ar literatūru un zinātniskais pienesums

Promocijas darba rezultāti jāinterpretē *EV* uzlādes infrastruktūras, *MCDM*, viedās uzlādes, sadales tīklu un kiberdrošības literatūras kontekstā. Darba pienesums nav saistīts tikai ar *AHP* vai *PROMETHEE* metožu lietošanu, jo abas metodes ir plaši pazīstamas daudzkritēriju lēmumu pieņemšanā [25], [27], [28]. Darba specifika ir šo metožu pielāgošana uzticamības orientētai dinamiskai *EV* uzlādes punkta piešķiršanai konkrētam transportlīdzeklim konkrētā laikā.

Esošā literatūra *EV* uzlādes infrastruktūras jomā lielā mērā koncentrējas uz staciju izvietojuma, kapacitātes, infrastruktūras pārklājuma un ilgtspējīgas plānošanas jautājumiem [10], [16]–[19]. Šie pētījumi ir būtiski ilgtermiņa infrastruktūras attīstībai, tomēr tie neatbild uz operatīvu jautājumu, kuru no jau pieejamajiem uzlādes punktiem konkrētajā brīdī piešķirt konkrētam *EV*.

Šajā promocijas darbā uzsvars tiek pārvietots no infrastruktūras plānošanas uz dinamisku ekspluatācijas līmeņa lēmumu. Uzlādes punkts tiek interpretēts kā laikā mainīga *MCDM* alternatīva, kuras piemērotība ir atkarīga no *EV* pieprasījuma, gaidīšanas laika, pieejamās jaudas, tīkla noslodzes, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības stāvokļa.

MCDM literatūrā *AHP*, *PROMETHEE*, *TOPSIS*, *ELECTRE* un citas metodes plaši izmantotas infrastruktūras izvērtēšanai, ilgtspējas analīzei, enerģētikas sistēmu lēmumiem un uzlādes staciju lokācijas izvēlei [16], [19], [24]–[28]. Tomēr daudzos *EV* uzlādes infrastruktūras pētījumos *MCDM* tiek izmantota stratēģiskai vai taktiskai plānošanai, nevis operatīvai dinamiskai alternatīvu prioritizācijai. Šajā darbā *AHP* kalpo kritēriju nozīmīguma strukturēšanai, bet *PROMETHEE* – pieļaujamo alternatīvu ranžēšanai konkrētā laika momentā.

Atsevišķi jāizceļ kiberdrošības literatūras konteksts. *EV* uzlādes infrastruktūras kiberdrošības pētījumi uzsver autentifikācijas, komunikācijas, datu integritātes, pakalpojuma pieejamības un trešo pušu riska nozīmi [9], [13], [14], [40], [41]. Tomēr šie riski bieži tiek analizēti kā atsevišķs kiberdrošības vai risku novērtēšanas uzdevums, nevis kā tieša daļa no uzlādes punkta izvēles mehānisma. Šajā darbā kiberdrošības risks tiek integrēts pašā *MCDM*

modelī – kā filtrēšanas nosacījums, kā *PROMETHEE* procedūrā minimizējams kritērijs un kā neto galaplūsmas korekcijas faktors.

Promocijas darba zinātnisko pienesumu iespējams strukturēt trīs līmeņos. Teorētiskais pienesums ir dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas formalizēšana kā *MCDM* problēma un uzlādes punkta interpretācija kā kiberfiziska alternatīva. Metodoloģiskais pienesums ir *AHP-PROMETHEE* secīgas izmantošanas modelis dinamiskai pieļaujamo uzlādes punktu ranžēšanai, integrējot filtrēšanu, uzticamības kritērijus un kiberriska penalizāciju. Praktiskais pienesums ir reproducējams lēmuma atbalsta sistēmas aprēķinu kodols *EV* uzlādes infrastruktūras pārvaldībai.

6.3. Praktiskās ieviešanas iespējas

Izstrādātais modelis ir metodoloģiski validēts aprēķinu kodols, ko 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* 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.

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 izmantot lokālus noslodzes, jaudas rezerves vai tīkla pieļaujamības indikatorus.

Pašvaldībām un reģionālās mobilitātes plānotājiem modelis varētu palīdzēt analizēt, kā esošā uzlādes infrastruktūra darbojas dažādos scenārijos. Modelis ietver ģeotelpisko slāni, uzlādes punktu pieejamību un tīkla kritērijus, tāpēc to iespējams izmantot arī infrastruktūras attīstības prioritāšu analīzei.

Kiberdrošības pārvaldības kontekstā modelis piedāvā veidu, kā drošības indikatorus sasaistīt ar praktisku lēmumu. 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.

Modeli iespējams ieviest pakāpeniski. Pirmajā posmā tas var darboties kā analītisks rekomendāciju rīks, izmantojot pieejamos operatora un slodžu datus. Otrajā posmā to iespējams papildināt ar *DSO* tīkla 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.

6.4. Pētījuma ierobežojumi

Promocijas darba rezultāti jāinterpretē, ņemot vērā vairākus ierobežojumus. Pirmkārt, validācija veikta kā metodoloģiska un scenāriju balstīta pārbaude, nevis kā 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.

Otrkārt, validācijas datu kopā nav pilnu reāllaika *EV SOC*, maršruta, lietotāja uzvedības, rezervāciju, faktisko rindu un uzlādes sesiju datu. Šie parametri tika definēti scenāriju veidā vai atvasināti no pieejamajiem datiem. Tāpat pieejamajā datu kopā nav pilnvērtīgu sprieguma un fāžu nesimetrijas datu visiem objektiem, tādēļ praktiskā tīkla analīze balstīta slodzē, atļautajā jaudā, jaudas rezervē un pārslodzes riska indikatoros.

Treškārt, kiberdrošības slānis nav konkrēto validācijas objektu pilns kiberdrošības audits. *OCPP APP, OCPP TCP/IP* un *WUSTL-IIoT* datu kopas izmantotas kiberriska indikatora operacionalizācijas pamatošanai, bet tās neaizstāj ievainojamību analīzi, ielaušanās testēšanu, drošības arhitektūras pārbaudi vai operatora drošības kontroļu novērtējumu.

Ceturtkārt, ierobežojumi saistīti arī ar izvēlēto *MCDM* metodoloģiju. *AHP* svari atspoguļo ekspertu vai scenārijā definētu prioritāšu struktūru, tādēļ tie nav absolūti un universāli visām valstīm, operatoriem vai lietotāju grupām. Šī pieeja ir caurspīdīga un auditējama, tomēr saglabā subjektivitāti. Praktiskā ieviešanā *AHP* svarus būtu iespējams pārskatīt ar plašāku ekspertu aptauju, lietotāju segmentāciju vai vēsturisko datu analīzi.

Piektkārt, *PROMETHEE* metode balstās alternatīvu pāru salīdzinājumos pēc katra kritērija, tādēļ, palielinoties uzlādes punktu skaitam, aprēķinu apjoms būtiski pieaug. Nelielā vai vidējā alternatīvu kopā tas ir pieņemami, taču lielā publiskā uzlādes tīklā ar simtiem vai tūkstošiem punktu praktiskai ieviešanai būtu nepieciešama kandidātu priekšfiltrēšana, ģeogrāfiska sašaurināšana, klasterizācija, paralelizācija vai ātrāku *MCDA* metožu izmantošana.

Sestkārt, *AHP-PROMETHEE* kombinācija nav vienīgā iespējamā pieeja. Tā izvēlēta interpretējamības, strukturētas kritēriju svēršanas un pilna ranga iegūšanas dēļ. Lielākām alternatīvu kopām varētu izvērtēt *TOPSIS* metodi, kas balstās attālumā līdz ideālajam un negatīvi ideālajam risinājumam un parasti ir aprēķinu ziņā vienkāršāka. Vienlaikus *TOPSIS* nesniedz tādu pašu pāru salīdzinājumu un pozitīvo/negatīvo plūsmu interpretāciju kā *PROMETHEE*, tādēļ metodes izvēle ir kompromiss starp aprēķinu ātrumu, interpretējamību un lēmuma skaidrojamību.

Septītkārt, darbā izmantotā svaru sistēma nav datu vadīts vai mašīnmācīšanās modelis. *AHP* svari balstās ekspertu vērtējumā, nevis vēsturiski apmācītā modelī. Alternatīva pieeja būtu mašīnmācīšanās modelis, kas, izmantojot vēsturiskus uzlādes sesiju datus, lietotāju izvēles, tīkla stāvokļus, atteices, drošības notikumus un operatora lēmumus, apgūtu kritēriju nozīmīgumu vai tieši prognozētu piemērotāko uzlādes punktu. Šāda pieeja varētu papildināt *AHP* svaru noteikšanu, tomēr tai nepieciešama plaša, kvalitatīva un reprezentatīva apmācības datu kopa, kā arī izskaidrojamības, modeļa dreifa un auditējamības kontrole.

Astotkārt, darbs nemodelē pilnu transporta plūsmu pilsētas vai valsts mērogā, elektroenerģijas tirgus dinamiku vai pilnu *EV-CPO-DSO*-lietotāja sistēmas digitālo dvīni ar reāllaika divvirzienu datu plūsmām un vadības komandām. Izstrādātais modelis ir lēmumu atbalsta aprēķinu kodols, ko iespējams tālāk paplašināt praktiskai izmantošanai.

6.5. Turpmākās attīstības virzieni

Promocijas darbā izstrādātais modelis veido pamatu vairākiem turpmākās attīstības virzieniem.

Pirmais 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 un lokālā tīkla mērījumus.

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 [51]. Šādā gadījumā izstrādātais *AHP-PROMETHEE* modelis varētu darboties kā digitālā dvīņa lēmumu pieņemšanas slānis.

Trešais virziens ir prognozējošas piešķiršanas modeļa attīstība. Turpmāk modeli varētu papildināt ar prognozēm par gaidīšanas laiku, uzlādes punktu noslodzi, *EV* pieprasījumu, tīkla noslodzi un datu kvalitātes pasliktināšanos.

Ceturtais virziens ir *MCDM* metožu salīdzinoša attīstība. Turpmāk iespējams pārbaudīt, kā izstrādātā *AHP-PROMETHEE* pieeja salīdzināma ar *TOPSIS*, *ELECTRE*, *VIKOR*, *fuzzy*

AHP, *ANP* vai citām *MCDA* metodēm. Īpaši nozīmīgs būtu *TOPSIS* salīdzinājums lielākās alternatīvu kopās, jo *TOPSIS* varētu nodrošināt ātrāku aprēķinu gadījumos, kad jāvērtē ļoti liels uzlādes punktu skaits.

Piektais virziens ir *AHP* svaru noteikšanas automatizācija vai papildināšana ar mašīnmācīšanās pieejām. Praktiskā vidē, kur uzkrājas plaši vēsturiskie dati par *EV* lietotāju izvēlēm, uzlādes sesijām, tīkla stāvokli, atteicēm, drošības notikumiem un operatora lēmumiem, varētu izstrādāt mašīnmācīšanās modeli, kas apgūst kritēriju nozīmīgumu no datiem. *AHP* ekspertu vērtējums varētu kalpot kā sākotnējā svaru struktūra, savukārt mašīnmācīšanās modelis – kā adaptīvs svaru korekcijas vai rekomendācijas slānis.

Sestais virziens ir kiberdrošības slāņa padziļināšana. Turpmāk būtu nepieciešams veidot ciešāku sasaisti ar *OCPP*, *ISO 15118*, *Plug & Charge*, sertifikātu pārvaldības, autentifikācijas, autorizācijas un drošas datu apmaiņas mehānismiem.

Septītais virziens ir *RES*, *BESS* un *V2G* integrācija. Modeli varētu papildināt 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 un atjaunojamo energoresursu izmantošanu.

6.6. Sestās nodaļas secinājumi

Sestajā nodaļā interpretēti validācijas rezultāti, izvērtēta promocijas darba hipotēze, raksturots zinātniskais pienesums, 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.

Hipotēze tiek atbalstīta metodoloģiskās un scenāriju validācijas robežās. Darbā 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.

Pētījuma ierobežojumi ir saistīti ar validācijas scenāriju raksturu, datu pieejamību, sadales tīkla datu detalizāciju, kiberdrošības slāņa interpretāciju, *AHP* ekspertu vērtējuma subjektivitāti un *PROMETHEE* aprēķinu mērogojamību. Lielākās alternatīvu kopās būtu jāvērtē arī ātrākas *MCDA* metodes, piemēram, *TOPSIS*, kā arī hibrīdas pieejas, kur *AHP* ekspertu svarus papildina vai daļēji aizstāj mašīnmācīšanās modelis.

Kopumā sestā nodaļa nostiprina promocijas darba galveno secinājumu – *EV* uzlādes punkta piešķiršana kiberfiziskā un sadales tīkla ierobežotā vidē jāskata kā dinamiska, daudzkritēriju un uz uzticamību orientēta lēmumu pieņemšanas problēma.

SECINĀJUMI UN PRIEKŠLIKUMI

Secinājumi

1. Promocijas darbā izstrādāts un validēts uz uzticamību orientēts daudzkritēriju modelis dinamiskai elektrisko transportlīdzekļu uzlādes punkta piešķiršanai, vienotā lēmumu pieņemšanas procesā integrējot tehniskos, lietotāja, sadales tīkla, datu kvalitātes, uzticamības un kiberdrošības kritērijus.
2. Darbā pamatots, ka *EV* uzlādes punkta piešķiršana ir dinamiska daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas problēma, ko nav iespējams pamatoti risināt tikai ar vienu kritēriju, piemēram, attālumu, cenu, gaidīšanas laiku vai pieejamo uzlādes jaudu.
3. Izstrādātā *AHP-PROMETHEE* metodoloģija nodrošina strukturētu, skaidrojamu un praktiski lietojamu lēmumu pieņemšanas procesu. *AHP* ļauj noteikt kritēriju relatīvo nozīmīgumu, savukārt *PROMETHEE* nodrošina pieļaujamo alternatīvu ranžēšanu un rezerves alternatīvu secības noteikšanu.
4. Izstrādātais dinamiskās filtrēšanas mehānisms nodrošina to, ka pirms ranžēšanas tiek izslēgtas tehniski, ekspluatācijas, tīkla, datu kvalitātes vai kiberdrošības ziņā nepieļaujamas alternatīvas. Tas paaugstina galarekomendācijas uzticamību un samazina tehniski vai operacionāli neatbilstošu piešķīrumu risku.
5. Validācijas rezultāti apstiprina, ka modelis galvenokārt ir orientēts uz uzticamību, sadales tīkla pieļaujamību, datu kvalitāti un kiberdrošību. Bāzes konfigurācijā šo kritēriju kopējais svars pārsniedz 73 % no kopējā kritēriju svara, apliecinot, ka modelis nav ierobežots tikai ar lietotāja ērtību, bet līdzsvaro lietotāja vajadzības ar infrastruktūras un tīkla ierobežojumiem.
6. Sezonālās validācijas rezultāti parāda, ka modelis spēj saglabāt stabilu uzlādes alternatīvu rangu dažādos sezonālos apstākļos. Rezultāti arī apstiprina pilna ranga un rezerves alternatīvu secības nozīmi, jo alternatīvu piemērotība laikā var mainīties.
7. Stresa scenāriju analīze apstiprina datu kvalitātes un kiberdrošības kritēriju būtisko ietekmi uz alternatīvu pieļaujamību un galalēmumu. Īpaši datu kvalitātes degradācija var nepieļaut automātisku piešķiršanu, kas interpretējama nevis kā modeļa kļūme, bet kā uz uzticamību orientētas pieejas pazīme.
8. Salīdzinājums ar vienkāršotām piešķiršanas stratēģijām parāda, ka tuvākais, ātrāk pieejamais vai jaudīgākais uzlādes punkts ne vienmēr ir piemērotākā alternatīva, ja vienlaikus tiek ņemta vērā sadales tīkla noslodze, jaudas rezerve, uzticamība, datu kvalitāte un kiberdrošības risks.
9. Promocijas darba hipotēze tiek atbalstīta metodoloģiskās un scenāriju validācijas robežās. Izstrādātais modelis nodrošina pamatotāku un interpretējamāku uzlādes punkta piešķiršanu nekā statiskas vai ierobežota kritēriju skaita pieejas, tomēr pilna mēroga praktiskai apstiprināšanai nepieciešama turpmāka validācija ar reāllaika *CPO/CSO, DSO, EV* un lietotāju datiem.
10. Promocijas darba zinātniskais pienesums ir dinamiskas *EV* uzlādes punkta piešķiršanas formalizēšana kā uz uzticamību orientēta daudzkritēriju kiberfiziska lēmumu pieņemšanas problēma. Metodoloģiskais pienesums ir secīga *AHP-PROMETHEE* pieeja ar dinamisku filtrēšanu, ranžēšanu un rezerves alternatīvu noteikšanu. Praktiskais pienesums ir reproducējams lēmumu atbalsta sistēmas prototipa aprēķinu kodols *EV* uzlādes infrastruktūras pārvaldībai.

Priekšlikumi

1. *EV* uzlādes infrastruktūras operatoriem uzlādes punktu rekomendēšanas sistēmās būtu jāizmanto daudzkritēriju pieeja, nevis jābalstās tikai uz attālumu, cenu, gaidīšanas laiku vai nominālo uzlādes jaudu.
2. Pirms uzlādes punkta rekomendācijas sniegšanas būtu jāveic dinamiska alternatīvu filtrēšana, izslēdzot tehniski, ekspluatācijas, tīkla, datu kvalitātes vai kiberdrošības ziņā nepieļaujamas alternatīvas.
3. Uzlādes infrastruktūras operatoriem un sadales sistēmas operatoriem būtu jāattīsta datu apmaiņas mehānismi, kas ļautu uzlādes punkta piešķiršanā ņemt vērā lokālo tīkla noslodzi, pieejamo jaudas rezervi un tīkla režīma pieļaujamību.
4. Datu kvalitāte jāuzskata par obligātu uzlādes punkta piešķiršanas elementu. Ja dati ir novecojuši, nepilnīgi vai neuzticami, attiecīgā alternatīva būtu jāpazemina rangā vai jāizslēdz no automātiskas rekomendācijas.
5. Kiberdrošības indikatori jāintegrē *EV* uzlādes infrastruktūras lēmumu atbalsta sistēmās. Autentifikācijai, komunikācijas drošībai, datu integritātei, pakalpojuma pieejamībai un trešo pušu riskam jāietekmē uzlādes alternatīvu rangs.
6. Izstrādātais *AHP-PROMETHEE* modelis turpmāk jāvalidē ar plašākām reāllaika datu kopām, ietverot uzlādes sesiju statusu, faktiskās rindas, rezervācijas, *EV SOC*, lietotāju maršrutus, lokālā tīkla mērījumus un operatoru notikumu žurnālus.
7. Lielos publiskajos uzlādes tīklos ar simtiem vai tūkstošiem uzlādes punktu līdztekus *PROMETHEE* būtu jāizvērtē ātrākas *MCDA* metodes, piemēram, *TOPSIS*. Praktiskā ieviešanā būtu jāizmanto arī kandidātu priekšfiltrēšana, ģeogrāfiska sašaurināšana, klasterizācija vai paralēli aprēķini.
8. Turpmākajā attīstībā *AHP* balstītos ekspertu svarus būtu lietderīgi papildināt ar datu vadītu vai mašīnmācīšanās balstītu svaru korekciju, izmantojot vēsturiskos uzlādes sesiju datus, lietotāju izvēles, tīkla stāvokļus, atteices, kiberdrošības notikumus un operatora lēmumus.
9. Izstrādāto modeli būtu lietderīgi tālāk attīstīt *EV* uzlādes infrastruktūras digitālā dvīņa virzienā, kur vienotā modelēšanas vidē tiek sasaistīta fiziskā infrastruktūra, ģeotelpiskie dati, slodžu profili, *EVSE* statusi, sadales tīkla notikumi un lēmumu algoritmi.
10. Turpmākajos pētījumos uzlādes punkta piešķiršanas modelī būtu jāintegrē *RES*, *BESS* un *V2G* indikatori, lai uzlādes punkta izvēlē ņemtu vērā ne tikai pašreizējos tīkla ierobežojumus, bet arī lokālo enerģijas elastību, atjaunojamo energoresursu pieejamību un elektrisko transportlīdzekļu potenciālo pienesumu sadales tīkla pārvaldībā.

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] 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]: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1804/oj.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] ElaadNL, Smart Charging Testing: M2M Communication Between Electric Vehicles and Charging Stations. Arnhem, The Netherlands: ElaadNL, 2025.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 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.

[21] 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.

[22] 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.

[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] 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.

[25] 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.

[26] 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.
[27] 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.
[28] 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.
[29] 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.2007.03.031.
[30] 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.
[31] 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.
[32] Oficiālās statistikas portāls, “ENB010m. Elektroenerģijas ražošana, imports, eksports un patēriņš”, 2026. Skatīts: 25.05.2026. [Tiešsaiste]: https://data.stat.gov.lv/pxweb/lv/OSP_PUB/START__NOZ__EN__ENB/ENB010m.
[33] R. Grants, Elektromobiļu uzlādes staciju integrācijas iespējas zemsprieguma elektroapgādes tīklu izbūves projektos. Rīga, Latvia: Riga Technical University, 2020.
[34] 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.
[35] 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.
[36] 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.
[37] 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.
[38] 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.
[39] 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.

[40] 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.
[41] 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.
[42] J. Delsing, Ed., IoT Automation: Arrowhead Framework. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2017.
[43] L. Ribickis and N. Kunicina, Eds., Control Methods for Critical Infrastructure and Internet of Things (IoT). Riga, Latvia: Riga Technical University, 2022.
[44] 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.
[45] 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.
[46] R. Joumard and H. Gudmundsson, Eds., Indicators of Environmental Sustainability in Transport: An Interdisciplinary Approach to Methods. Bron, France: INRETS, 2010.
[47] J. Rak and D. Hutchison, Eds., Guide to Disaster-Resilient Communication Networks. Cham, Switzerland: Springer, 2020.
[48] 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.
[49] 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]: https://www.cse.wustl.edu/~jain/iiot2/index.html.
[50] L. Ribickis, N. Kunicina, A. Hnatov, and K. Danylenko, Eds., Cyber-Physical Systems for Clean Transportation. Riga, Latvia: RTU Press, 2021.
[51] 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.



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.