

Maksims Feofilovs

PILSĒTU IZTURĒTSPĒJAS DINAMIKA PRET DABAS DRAUDIEM

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte

Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Maksims Feofilovs

Doktora studiju programmas “Vides zinātne” doktorants

PILSĒTU IZTURĒTSPĒJAS DINAMIKA PRET DABAS DRAUDIEM

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs

profesors *Dr. sc. ing.*

FRANCESCO ROMAGNOLI

RTU Izdevniecība

Rīga 2020

Feofilovs, M. Pilsētu izturētspējas dinamika pret dabas draudiem. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2020. 40 lpp.

Iespiests saskaņā ar Promocijas padomes “RTU P-19” 2020. gada 31. augusta lēmumu, protokols Nr. 130.

Darbs izstrādāts saistībā ar šādiem projektiem:

- Eiropas Sociāla fonda projekta “Rīgas Tehniskās universitātes akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās” Nr. 8.2.2.0/18/A/017;



- Eiropas Savienības *Erasmus+* programmas atbalstīts projekts “*Capacity Building in Asia for Resilience EducaTion (CABARET)*”. Nr. 573816-EPP-1-2016-1-UK-EPPKA2-CBHE-JP



<https://doi.org/10.7250/9789934225604>

ISBN 978-9934-22-559-8 (print)

ISBN 978-9934-22-560-4 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2020. gada _____ Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 12 k-1, ____ auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Gatis Bažbauers,
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors *Dr. Richard Haigh*,
Hadersfildas Universitāte, Lielbritānija

Profesors *Dr. Fausto Marincioni*,
Markes Politehniskā 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.

Maksims Feofilovs (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir izstrādāts angļu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, diskusija, secinājumi un rekomendācijas, literatūras saraksts, pieliktas 7 publikācijas, 53 attēli, astoņas tabulas, kopā 179 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 160 nosaukumi.

SATURS

IEVADS	5
Promocijas darba hipotēze un aktualitāte	6
Promocijas darba mērķis un uzdevumi.....	7
Promocijas darba zinātniskā nozīme	8
Promocijas darba praktiskā nozīme	9
Pētījuma aprobācija	10
Citas zinātniskās publikācijas.....	10
Dalība zinātniskajās konferencēs	11
Zinātniskās monogrāfijas.....	12
Promocijas darba izklāsts	12
1. IZPĒTES METODIKA	13
1.1. Saliktā indikatora pieeja kopienų izturēspējas novērtēšanai	14
1.2. Varbūtību simulācijas pieeja infrastruktūras izturēspējas novērtēšanā.....	14
1.3. Sistēmdinamikas pieeja kompleksām sistēmām.....	16
1.4. Dinamisks pilsētu izturēspējas modelis.....	17
Dinamiskas pilsētu izturēspējas modeļa struktūra	17
Dinamiska pilsētu modeļa validācija	18
Pilsētu izturēspējas novērtēšana vietēja mēroga gadījuma izpētē.....	19
2. REZULTĀTI.....	20
2.1. Kvantitatīvā izturēspējas novērtējuma pieeja.....	20
Saliktā indikatora gadījuma izpēte.....	20
Varbūtību simulācijas gadījuma izpēte	21
Sistēmdinamikas pieejas gadījuma izpēte.....	21
2.2. Dinamisks pilsētu izturēspējas novērtēšanas rīks.....	21
Izvēlēta pilsētu izturēspējas definīcija	22
Pilsētu izturēspējas modeļa struktūra.....	23
Atgriezeniskās saites cilpu diagrammas	23
Bāzes scenārija definēšana pilsētu izturēspējas novērtējumam	24
Pilsētu izturēspējas sistēmdinamikas modeļa validācija.....	26
Varbūtību simulācijas integrēšana sistēmdinamikas modelī	27
Izvēlēto indikatoru saraksts.....	29
Pilsētu izturēspējas indeksa definīcija	29
Pilsētu izturēspējas indeksa integrēšana sistēmdinamikas modelī	30
Izvēlēto pilsētu izturēspējas scenāriju analīze	32
Montekarlo simulācija pilsētu izturēspējas scenārijiem	35
SECINĀJUMI.....	38
REKOMENDĀCIJAS.....	39
ATSAUCES	40

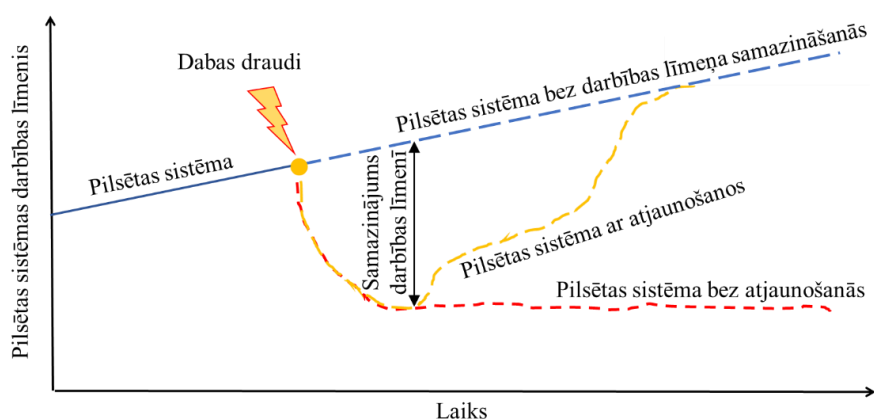
IEVADS

Ekstremālas parādības, piemēram, plūdi, vētras, meža ugunsgrēki un zemestrīces, ir pasaulē sastopamas dabas parādības, kas rada katastrofas draudus cilvēkiem un izpaužas kā materiālie bojājumi, finansiālie zaudējumi un dzīvības zaudējums [1]. Pēdējo 60 gadu laikā dabas katastrofu skaits ir pieaudzis, tādējādi zaudējumi un postījumi ir ievērojami palielinājušies [2]. Tas katastrofu riska mazināšanas politiku ir padarījis par neatņemamu sociālās labklājības, ekonomikas izaugsmes un vides aizsardzības daļu.

Tāpat kā ilgtspējīga attīstība tiek balstīta uz trim dažādām dimensijām - sociālā, ekonomiskā un vides, arī pētniecība, kas saistīta ar katastrofu riska mazināšanu, ir starpdisciplināra un ietver vides, tehnoloģiskos un sociāli ekonomiskos aspektus. Katastrofu riska novēršanas, sagatavotības, labākas reaģēšanas un atgūšanās pasākumi ir būtiski visiem šiem aspektiem. Saistībā ar šiem pasākumiem zinātniskajā izpētē un katastrofu riska pārvaldībā lielu uzmanību ir guvis termins “izturētspēja” [3]. Tas tiek lietots, lai aprakstītu saistītu sistēmas spēju izturēt dabas katastrofas.

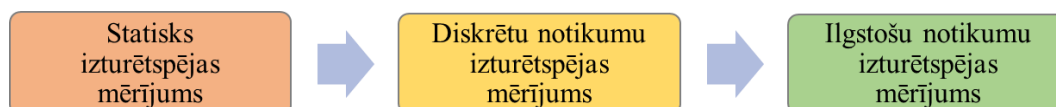
Pēdējās desmitgadēs ir palielinājies pētījumu skaits par pilsētu izturētspēju [4], tomēr joprojām nav vienotas pilsētu izturētspējas definīcijas un mērījumu metodes. Vairumā gadījumu izturētspējas mērījumu pamatā ir viena no trim pilsētu izturētspējas perspektīvām: ekoloģiskā, inženiertehniskā un socioekoloģiskā [5].

Ekoloģiskā perspektīva attiecas uz izturētspēju kā sistēmu līdzsvara stāvokli, kurā tā var saglabāt savu eksistenci, pārejot uz jaunu uzvedības režīmu, lai pielāgotos stresa apstākļiem. Inženiertehniskā perspektīva attiecas uz izturētspēju kā sistēmas spēju pēc ārējām ietekmes atgriezties tās sākotnējā stāvoklī. Socioekoloģiskā perspektīva kombinē inženiertehnisko un ekoloģisko perspektīvu un attiecas uz izturētspēju kā sistēmas spēju atgriezties tās sākotnējā stāvoklī un spēju ieņemt jaunus stāvokļus, tādā veidā adaptējoties jauniem apstākļiem. Socioekoloģiskai perspektīvai ir priekšrocības labāk aprakstīt pilsētu sistēmas sarežģītību, kas izpaužas kā daudzdimensionalitāte un pilsētu sistēmas dinamika. Socioekoloģiskai perspektīvas kontekstā pilsētu izturētspēju var uzskatīt kā sistēmas spēju atgūties no postoša notikuma, piemēram, dabas katastrofas, un, mainot savu darbības līmeni, pielāgoties jauniem apstākļiem, kā norādīts 1. attēlā.



1. att. Pilsētas darbības līmenis kā pilsētas izturētspējas indikators.

Pašreiz lietotās metodes nespēj rast pastāvīgu pieeju daudzdimensionām mērījumam, kas ietver pilsētas sistēmu dinamiku, tāpēc promocijas darba gaitā tika veikta izpēte, lai rastu risinājumu esošai izturētspējas mērīšanas problēmai. Mērķis ir nodrošināt labāku pieeju pilsētu izturētspējas mērīšanai, atvieglot veidus, kā pārvarēt zinātniskajā literatūrā uzrādītās zināšanu nepilnības, kā arī sniegt atbalstu politikas plānošanā. Šim nolūkam veikti vairāki gadījuma pētījumi, izmantojot dažādus modeļus statistiskās izturētspējas, diskrētu notikumu izturētspējas un ilgstošu notikumu izturētspējas mērījumiem, lai veicinātu pāreju no statistisku uz ilgstošu notikumu izturētspējas mērījumiem.



2. att. Pāreja no statistiskās uz ilgstošu izturētspējas mērīšanu.

Promocijas darbā statistiskās izturētspējas mērīšanai izmantota salikto indikatoru metode, diskrētu notikumu izturētspējas mērīšanai – varbūtību metode, ilgstošu notikumu izturētspējas mērīšanai – sistēmdinamikas pieeja.

Promocijas darba hipotēze un aktualitāte

Promocijas darba hipotēze: rīks, kas atbalsta dinamisku novērtējumu par pilsētu izturētspēju pret dabas katastrofām, ļaus labāk pieņemt lēmumus, lai cīnītos pret dabas katastrofām, nekā citas pieejas, kas aprakstītas literatūrā un ko pašlaik izmanto praksē.

Promocijas darba aktualitāti raksturo pašreizējais stāvoklis saistībā ar klimata pārmaiņu izraisītajām dabas katastrofām, kas apdraud ilgtspējīgu attīstību visā pasaulē. Tiek paredzēts, ka klimata pārmaiņas būtiski pieaugs. Līdz ar to palielināsies dabas katastrofu biežums, intensitāte, telpiskā izplatība un ilgums. Turklāt vides degradācija, iedzīvotāju skaita pieaugums, strauja urbanizācija, slikti plānota pilsētu attīstība apvienojumā ar pieaugošajiem dabas katastrofu draudiem rada augstu katastrofu risku.

Pieejamā literatūra par dabas apdraudējumiem un katastrofām liecina, ka izturētspējas koncepcija ir vadlīnijas virzībā uz apdraudējumu risku pārvaldību un mazināšanu. Pilsētu teritoriju izturētspējas novērtējums ir pieeja, kurā zinātnieki un politikas veidotāji stiprina savstarpējo sadarbību. Tomēr problēmas daudzdimensionālais raksturs apgrūtina konsekventas pilsētu izturētspējas novērtēšanas metodoloģijas izstrādi un veiksmīgāko politikas stratēģiju noteikšanu pilsētu izturētspējas veidošanā. Lai arī pētījumu par pilsētu izturētspēju ir aizvien vairāk, kvantitatīva pieeja pilsētu izturētspējas novērtēšanai joprojām ir atklāts jautājums.

Pastāv daudzas sistēmas un modeļi, lai novērtētu kopienu un infrastruktūras izturētspēju, tomēr lietojums attiecas tikai uz konkrētu gadījumu izpēti piemēriem, tādējādi apliecinot, ka trūkst saiknes ar pilsētu teritoriju politikas plānošanu.

Zinātniskās literatūras analīze par esošajām pilsētu izturēspējas novērtēšanas metodēm norāda, ka:

- ir ļoti grūti precīzi noteikt vai novērtēt pilsētu izturēspēju pilsētu teritoriju daudzdimensionalitātes dēļ, kas ietver kopienu sociālos aspektus un infrastruktūras sistēmas;
- esošajās pilsētu izturēspējas novērtēšanas sistēmās netiek ņemta vērā pilsētu teritoriju dinamika, ierobežojot pilsētu izturēspējas faktiskā stāvokļa interpretāciju;
- pilsētu izturēspējas novērtējumā pašlaik nav iekļauta saikne starp sociāli ekonomiskajiem un vides aspektiem (aplūkoti daudzās termina “izturēspēja” definīcijās);
- uz indikatoriem balstītas metodes nesniedz pietiekami daudz informācijas, lai izveidotu ilgtermiņa stratēģiju;
- saistībā ar termina “pilsētu izturēspēja” sarežģītību pastāv daudz neskaidrību, jo terminoloģiskā daudzveidība un dažādas izturēspējas perspektīvas ir apgrūtinājušas pilsētas politikas veidošanu un termins ir nepietiekami atzīts un atspoguļots.

Iepriekš minētie aspekti norāda uz nespēju sniegt zināšanas un nodrošināt atbalstu pilsētas politikas plānošanā. Tādējādi ir nepieciešama konsekventa pieeja pilsētu izturēspējas novērtēšanai, kurā tiek risinātas zinātniskajā literatūrā minētās zināšanu nepilnības.

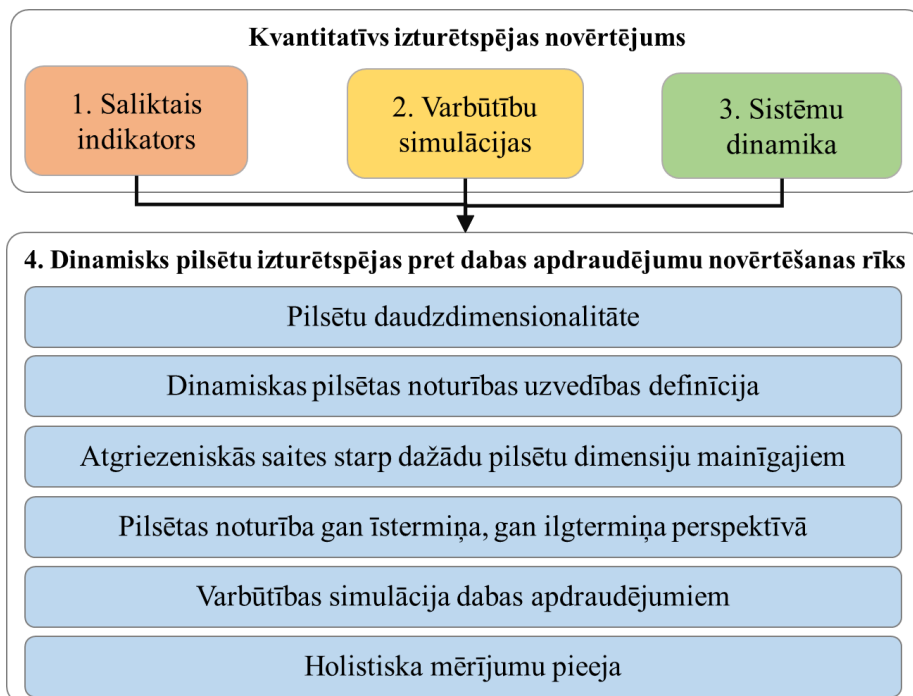
Promocijas darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt rīku pilsētu izturēspējas novērtēšanai (pret dabas katastrofām), kas var atbalstīt pilsētu izturēspējas veidošanas politikas plānošanu vietējā līmenī. Galvenie darba uzdevumi ir šādi:

- izpētīt pašlaik izmantotās kvantitatīvās metodes kopienu un infrastruktūras sistēmu izturēspējas mērīšanā dažādos gadījuma izpētes (*case study*) pētījumos;
- izvēlēties termina “pilsētu izturēspēja” atbilstošu definīciju, kas piemērota, lai izstrādātu jaunu pieeju pilsētu izturēspējas novērtēšanai;
- izstrādāt jaunu pieeju pilsētu izturēspējas novērtēšanai, kurā tiek risināti esošo metožu trūkumi, kas minēti analizētajā literatūrā un apskatītajos gadījuma izpētes pētījumos;
- pārbaudīt un testēt izstrādāto pieeju vietēja mēroga gadījuma izpētē;
- salīdzināt dažādas pilsētu izturēspējas stratēģijas (gadījuma izpēte) un sniegt ieteikumus politikas plānošanā, lai uzlabotu pilsētu izturēspēju;
- sniegt ieteikumus turpmākiem pētījumiem par pilsētu izturēspēju un izstrādātā instrumenta ieviešanu.

Promocijas darba zinātniskā nozīme

Darba zinātniskais nozīmīgums ir izstrādātajā rīkā, kas integrē trīs kvantitatīvas izturētspējas novērtēšanas pieejas, ļaujot atrisināt pašlaik izmantoto metožu nepilnības.



3. att. Metodoloģijas posmi un rīka novitāte.

1. tabula

Promocijas darbā izmantotās zinātniskās publikācijas atbilstoši izstrādātajai metodikai

Metodoloģijas posmi	Nr.	Zinātniskās publikācijas nosaukums
1. Salikto indikatoru pieeja	1	<i>Measuring Community Disaster Resilience in the Latvian Context: an Apply Case using a Composite Indicator Approach.</i>
2. Varbūtību parauga metode	2	<i>Resilience of Critical Infrastructures: Probabilistic Case Study of a District Heating Pipeline Network in Municipality of Latvia.</i>
3. Sistēmdinamikas pieeja	3	<i>System Dynamics Model for Natural Gas Infrastructure with Storage Facility in Latvia.</i>
	4	<i>Increasing Resilience of the Natural Gas System with Implementation of Renewable Methane in the Context of Latvia: A System Dynamics Model.</i>
4. Dinamiskas pilsētu izturētspējas pret dabas katastrofām novērtēšanas rīks	5	<i>Assessing Resilience Against Floods With A System Dynamics Approach: A Comparative Study Of Two Models.</i>
	6	<i>Assessment of Urban Resilience to Natural Disasters with a System Dynamics Tool: Case Study of Latvian Municipality.</i>
	7	<i>Dynamic assessment of urban resilience to natural hazards</i>

Metodoloģijas pirmais posms veltīts izpētei par salikto indikatoru pieeju (1. zinātniskā publikācija). Zinātniskā publikācija atspoguļo kopienu katastrofu izturētspējas indeksa (angļu val. *Community Disaster Resilience Index*) lietošanu Latvijas gadījumam.

Metodoloģijas otrais posms veltīts varbūtību parauga metodes izpētei (2. zinātniskā publikācija). Zinātniskā publikācijā parādīti centralizētās siltumapgādes sistēmas siltumtīklu

pārrāvumu varbūtības simulācijas rezultāti ļoti zemu temperatūru laikā un centralizētās siltumapgādes tīkla izturētspējas novērtējums Latvijas pašvaldībā, pamatojoties uz atjaunošanās laika, bojājumu attiecības un bojājumu izmaksu robežvērtībām.

Metodoloģijas trešais posms veltīts sistēmdinamikas pieejas izpētei (3. un 4. zinātniskā publikācija). 3. zinātniskajā publikācijā ir atspoguļota dabasgāzes pārvades un uzglabāšanas sistēmas sistēmdinamikas modeļa izstrāde. 4. zinātniskā publikācija apraksta modeļa lietošanu, lai noteiktu dinamiskas izmaiņas dabasgāzes piegādes izturētspējā, izmantojot atjaunojamo resursu atbalsta politiku.

Zināšanas, kas iegūtas, atsevišķi izmantojot definētās kvantitatīvās pieejas, tiek lietotas, lai izveidotu dinamisku pilsētu izturētspējas pret dabas katastrofām novērtēšanas rīku. Šāda rīka hipotēze un cēloņu cilpu diagramma pirmo reizi izklāstīta 5. zinātniskajā publikācijā. Izstrādātā rīka lietojums vietēja mēroga gadījuma izpētes piemēram aprakstīts 6. zinātniskajā publikācijā un dažādu pilsētu izturētspējas scenāriju salīdzināšanas rezultāti 7. zinātniskajā publikācijā.

Izstrādātais rīks aizpilda pašreizējās zināšanu nepilnības, kas identificētas zinātniskajā literatūrā par izturētspējas mērīšanu un nodrošina jaunu pieeju pilsētu izturētspējas novērtēšanai. Dažādu paņēmieni integrēšana vienā rīkā ļauj izmantot katra paņēmiena stipros aspektus un novērst nepilnības, kas varētu rasties, ja katru rīku izmantotu atsevišķi.

Sistēmdinamikas pieeja ļauj definēt dinamisku pilsētu izturētspējas uzvedību vairākās pilsētu teritoriju dimensijās, ietver atgriezeniskās saites starp dažādām dimensijām un pilsētu izturētspējas ilgtermiņa un īstermiņa perspektīvas. Varbūtības pieeja ļauj simulēt dažādas dabas katastrofas sistēmdinamikas modelī, tādējādi ļaujot skaidri attēlot katastrofu riska pārvaldības jomas nenoteiktību. Saliktā indikatora pieeja ļauj ietvert daudzdimensionalitāti un izteikt mērījumu holistiskā veidā kā vienu rezultātu.

Neviens no esošajiem rīkiem neietver šādu pilsētu izturētspējas mērīšanas mērogu un darbības jomu.

Promocijas darba praktiskā nozīme

Pētījuma rezultāts ir izveidotais rīks, kas ļauj dinamiski novērtēt pilsētu izturētspēju pret dabas katastrofām. Šo rīku var izmantot vietējās pašvaldības, lai izstrādātu savas izturētspējas stratēģijas, novērtējot turpmākās attīstības perspektīvas un novēršot esošās zināšanu nepilnības pilsētu izturētspējas politikas plānošanā.

Instrumenta struktūra ietver pilsētu teritoriju sociālos, ekonomiskos, vides un infrastruktūras aspektus. Tādējādi, izmantojot izstrādāto instrumentu, tiek atbalstīta arī saikne starp katastrofu riska samazināšanas jomu un citu nozaru politikas plānošanu.

Daudzdimensionālā konteksta dēļ šis rīks ļauj salīdzināt dažādu politikas stratēģiju ietekmi uz pilsētu izturētspēju pret dabas katastrofām, piemēram, katastrofu riska samazināšanas stratēģijas, vides snieguma uzlabošanās vai sociālās neaizsargātības samazināšanās. Pilsētvides izturētspējas novērtēšanas rīks, kas stimulēs progresu šajā jomā Baltijas reģionā, tostarp Latvijā, līdz šim vēl nav izveidots.

Pētījuma aprobācija

1. Feofilovs, M., Romagnoli, F. Dynamic Assessment of Urban Resilience to Natural Hazards. (2020) *International Journal of Disaster Risk Reduction* (iesniegts žurnālā).
2. Feofilovs, M., Romagnoli, F. Assessment of Urban Resilience to Natural Disasters with a System Dynamics Tool: Case Study of Latvian Municipality. (2020) *Environmental and Climate Technologies*, vol. 24, no. 3, pp 249–264.
3. Feofilovs, M., Romagnoli, F., Gotangco, C. K., Josol J. C., Jardeleza J. M., Campos J., Litam J., Abenojar K. Assessing Resilience Against Floods With A System Dynamics Approach: A Comparative Study Of Two Models. (2020) *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, vol. 11, no. 5, pp. 615-629.
4. Feofilovs, M., Gravelsins, A., Pagano, A., Romagnoli, F. Increasing Resilience of the Natural Gas System with Implementation of Renewable Methane in the Context of Latvia: A System Dynamics Model. (2019) *Energy Procedia*, 158, pp. 3944–3950.
5. Feofilovs, M., Romagnoli, F., Gravelsins, A. System Dynamics Model for Natural Gas Infrastructure with Storage Facility in Latvia. (2018) *Energy Procedia*, 147, pp. 549–557.
6. Feofilovs, M., Romagnoli, F. Resilience of Critical Infrastructures: Probabilistic Case Study of a District Heating Pipeline Network in Municipality of Latvia. (2017) *Energy Procedia*, 128, pp. 17–23.
7. Feofilovs, M., Romagnoli, F. Measuring Community Disaster Resilience in the Latvian Context: an Apply Case using a Composite Indicator Approach. (2017) *Energy Procedia*, 113, pp. 12–14.

Citas zinātniskās publikācijas

1. Feofilovs, M., Pakere, I., Romagnoli, F. Life Cycle Assessment of Different Low Temperature District Heating Development Scenarios: a Case Study of Municipality in Latvia, (2019) *Environmental and Climate Technologies*, 23 (2), 272–290.
2. Pogano, A. J., Feofilovs, M., Romagnoli, F. The relationship between insurance companies and natural disaster risk reduction: overview of the key characteristics and mechanisms dealing with climate change, (2018) *Energy Procedia*, 147, 566–572.
3. Mola, M., Feofilovs, M., Romagnoli, F. Energy resilience: research trends at urban, municipal and country levels, (2018) *Energy Procedia*, 147, 104–113.
4. Feofilovs M, Pogano, A. J., Romagnoli, F. Market development and support schemes for biomethane: SWOT analysis in context of Latvia, (2018) *Environmental and Climate Technologies* (pieņemts publicēšanai).

Dalība zinātniskajās konferencēs

1. Feofilovs, M., Romagnoli, F. "Assessment of Urban Resilience to Natural Disasters with a System Dynamics Tool: Case Study of Latvian Municipality." *International scientific conference of Environmental and Climate Technologies "CONNECT 2020"*, Riga, Latvia, May 13–15, 2020.
2. Feofilovs, M., Romagnoli, F., Gotangco, C. K., Josol J. C., Jardeleza J. M., Campos J., Litam J., Abenojar K. "Assessing Resilience Against Floods With A System Dynamics Approach: A Comparative Study Of Two Models." *The 9th International Conference on Building Resilience "09TH ICBR"*, Bali, Indonesia, January 13–15, 2020.
3. Feofilovs, M., Pakere, I., Romagnoli, F. "Life Cycle Assessment of Different Low Temperature District Heating Development Scenarios: a Case Study of Municipality in Latvia". *International scientific conference of Environmental and Climate Technologies "CONNECT 2019"*, Riga, Latvia, May 15–17, 2019.
4. Feofilovs, M., Gravelsins, A., Pagano, A., Romagnoli, F. "Increasing Resilience of the Natural Gas System with Implementation of Renewable Methane in the Context of Latvia: A System Dynamics Model". *10th International Conference on Applied Energy "ICAE2018"*, Hong Kong, China, August 22–25, 2018.
5. Feofilovs, M., Romagnoli, F., Gravelsins, A. "System Dynamics Model for Natural Gas Infrastructure with Storage Facility in Latvia". *International scientific conference of Environmental and Climate Technologies "CONNECT 2018"*, Riga, Latvia, May 16–18, 2018.
6. Pogano, A. J., Feofilovs, M., Romagnoli, F. "The relationship between insurance companies and natural disaster risk reduction: overview of the key characteristics and mechanisms dealing with climate change", *International scientific conference of Environmental and Climate Technologies "CONNECT 2018"*, Riga, Latvia, May 16–18, 2018.
7. Mola, M., Feofilovs, M., Romagnoli, F. "Energy resilience: research trends at urban, municipal and country levels", *International scientific conference of Environmental and Climate Technologies "CONNECT 2018"*, Riga, Latvia, May 16–18, 2018.
8. Feofilovs M., Pogano, A. J., Romagnoli, F. "Market development and support schemes for biomethane: SWOT analysis in context of Latvia", *International scientific conference of Environmental and Climate Technologies "CONNECT 2018"*, Riga, Latvia, May 16–18, 2018.
9. Feofilovs, M., Romagnoli, F. "Resilience of Critical Infrastructures: Probabilistic Case Study of a District Heating Pipeline Network in Municipality of Latvia". *International scientific conference of Environmental and Climate Technologies "CONNECT 2017"*, Riga, Latvia, May 10–12, 2017.

10. Feofilovs, M., Romagnoli, F. "Measuring Community Disaster Resilience in the Latvian Context: an Apply Case using a Composite Indicator Approach". *International scientific conference of Environmental and Climate Technologies "CONNECT 2016"*, Riga, Latvia, May 12–14, 2016.

Zinātniskās monogrāfijas

Āboltiņš, R., Bariss, U., Blumberga, A., Blumberga, D., Cilinskis, E., Feofilovs, M., Grāvelsiņš, A., Kuzņecova, T., Lupkina, L., Muižniece, I., Rochas, C., Romagnoli, F. *Climate engineering and policy*. Riga: RTU Press, 2020. 204 lpp. ISBN 978-9934-22-102-6.

Promocijas darba izklāsts

Promocijas darba pamatā ir septiņi tematiski vienoti zinātniskie raksti, kas prezentēti starptautiskās zinātniskajās konferencēs un publicēti starptautiskajos zinātniskajos žurnālos, kas ir citēti *Scopus* un *Web of Science* datubāzēs. Šajos zinātniskajos rakstos aprakstīti atsevišķi gadījumu pētījumi par dažādām metodēm, kas ir integrētas dinamiskā pilsētu izturētspējas pret dabas katastrofām novērtēšanas rīkā.

Promocijas darbs iekļauj ievadu un trīs nodaļas:

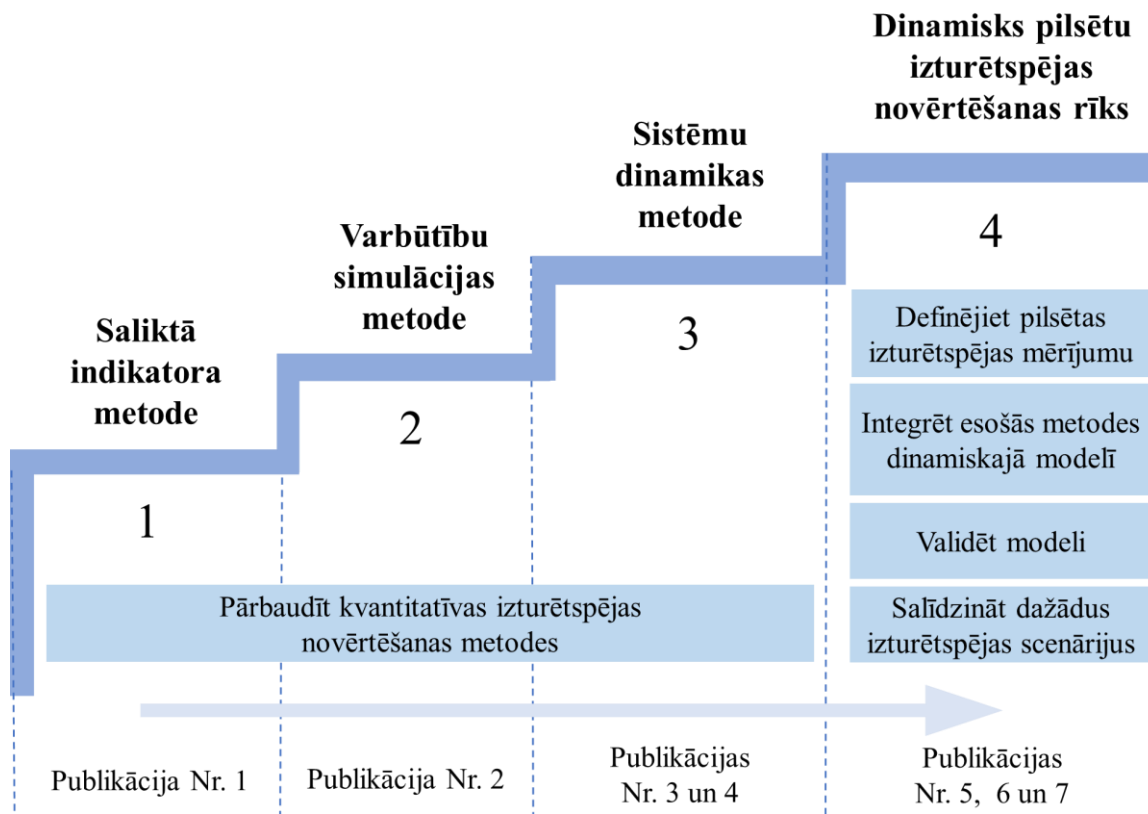
- literatūras analīze;
- izpētes metodika;
- rezultāti un secinājumi.

Ievadā iekļauts aprakstu par promocijas darba mērķis, izstrādātā rīka zinātniskā un praktiskā nozīme, kā arī zinātnisko publikāciju, kas publicētas par promocijas darba tēmu, saraksts. Ievadā iekļauts arī zinātnisko publikāciju, kas prezentētas starptautiskās zinātniskajās konferencēs, saraksts, kā arī citas zinātniskās publikācijas, kas nav saistītas ar promocijas darba tēmu.

Pirmā nodaļa ir literatūras analīze par pētījumu jomas pašreizējo aktualitāti, izturētspējas definīcijas dažādību un epistemoloģiskām disjunkcijām. Otrā nodaļa apraksta katru promocijas darba metodoloģijas posmu. Trešajā nodaļā izklāstīti sasniegtie rezultāti, galvenokārt koncentrējoties uz izstrādāto dinamiskās pilsētu izturētspējas pret dabas katastrofām novērtēšanas rīka izveidi un lietošanu. Promocijas darba nobeigumā aprakstīti secinājumi un ieteikumi praktiskai rīka lietošanai politikas plānošanā.

1. IZPĒTES METODIKA

Promocijas darba galvenais mērķis ir izveidot jaunu rīku, lai novērtētu pilsētu izturētspēju pret dabas katastrofām. Promocijas darba pārskats sniegts 1.1. attēlā četros posmos un atbilst iepriekš definētajiem promocijas darba mērķiem.



1.1. att. Promocijas darba struktūra.

Lai sasniegtu mērķi, tika veikti atsevišķi gadījumu pētījumi, lai pārbaudītu dažādo izturētspējas novērtēšanā izmantoto kvantitatīvo metožu stiprās un vājās puses (1.–3. posms). Šo pētījumu rezultāti aprakstīti četrās zinātniskās publikācijās, kas publicētas starptautiskos zinātniskajos žurnālos.

Novērst trūkumus, kas konstatēti esošajās kvantitatīvajās pieejās izturētspējas novērtēšanai, un integrēt tos vienā rīkā, kas spēj nodrošināt progresīvāku pilsētu izturētspējas novērtējumu nekā citi rīki, ko pašlaik izmanto pilsētu izturētspējas pret dabas katastrofām pētniecības jomā (4. posms).

Dinamiskās pilsētvides izturētspējas pret dabas katastrofām novērtēšanas rīka izstrādes process ir aprakstīts divās publikācijās (publicētas starptautiskajos zinātniskajos žurnālos). Publikācijās ir norādīts, kā tiek definēta pilsētas izturētspēja radītā rīka vajadzībām, algoritms esošo pieeju integrēšanai dinamiskajā modelī, kā arī veikta rīka validācija un testēšana. Dinamiska pilsētu izturētspējas modeļa izstrāde ļauj pāriet no statiskas izturētspējas mērīšanas un vienas infrastruktūras izturētspējas mērīšanas uz dinamisku pilsētas izturētspējas mērījumu.

1.1. Saliktā indikatora pieeja kopienu izturētspējas novērtēšanai

Pētījums, kas veltīts salikto indikatoru pieejai kopienu izturētspējas novērtēšanā, īsteno daudzkritēriju analīzes koncepciju, izmantojot salikto indikatoru, kura pamatā ir kopienu katastrofu izturētspējas indekss (angļu val. *Community Disaster Resilience Index*; *CDRI*). Pētījuma mērķis ir nodrošināt holistisku mērījumu pieeju sabiedrības izturētspējas nodrošināšanai Latvijas novados. Pilna pētījuma metodoloģija atrodama 1. zinātniskajā publikācijā.

CDRI metodika ļauj parādīt saikni starp kopienas kapitāliem (sociālo, ekonomisko, fizikālo, cilvēku un vides) un dažādām katastrofu riska pārvaldības (angļu val. *disaster risk management*; *DRM*) fāzēm. Šī saikne tiek īstenota, izmantojot matricu, kas sastāv no kopienas kapitāliem saistībā ar katastrofu pārvaldības fāzēm. Matricā kopienas kapitāliem ir indikatori, kas atbilst konkrētai *DRM* fāzei. Rādītāji iegūti kopīgā vērtējuma skalā, izmantojot ‘z-score’ metodi, ko dēvē arī par standarta rezultātu metodi. *CDRI* aprēķina kā svērto kapitāla rādītāju summu:

$$CDRI = \frac{\sum_{i=1}^n (\omega \cdot capital\ score)}{n}, \quad (1.1.)$$

kur *capital score* – z-score summa attiecīgajam kapitālam;

ω – kapitālu svars;

n – kapitālu skaits.

Iegūtās *CDRI* vērtības validācija tika veikta, izmantojot korelācijas un regresijas analīzi un ņemot vērā ārējos kritērijus.

1.2. Varbūtību simulācijas pieeja infrastruktūras izturētspējas novērtēšanā

Lai noteiktu infrastruktūras sistēmu izturētspēju, izmanto varbūtības simulāciju, jo holistiska pieeja neļauj precīzi noteikt infrastruktūras sistēmas izturētspēju pret konkrētiem dabas apdraudējuma gadījumiem.

Lai novērtētu izturētspēju, ir izstrādāts varbūtības simulācijas rīks statistikas datu iegūšanai par infrastruktūras tīkla kļūmēm. Šis rīks ir lietots Latvijas pašvaldības centralizētās siltumapgādes cauruļvadu tīklu gadījuma izpētē. Šis instruments ietver izturētspējas novērtējumu, nosakot trīs infrastruktūras sistēmas izturētspējas aspektus: bojājumu attiecību, atjaunošanās laiku un atjaunošanās izmaksas. Pilna pētījuma metodoloģija aprakstīta 2. zinātniskajā publikācijā.

Lai veiktu šo simulāciju, tiek izmantota stohastiska simulācijas funkcija, lai ģenerētu kļūmes, kas uzskaitītas kā nejaušu bojājumu scenāriji. Kopējais dažādu scenāriju skaits tīklā ar n aktīviem ir 2^n , tāpēc ir gandrīz neiespējami izvērtēt visus scenārijus. Tomēr ir iespējams simulēt daudzus scenārijus statistikas ticamības nodrošināšanai. Šim nolūkam tiek veidota matrica, lai novērtētu vairākus scenārijus ar noteiktu centralizētās siltumapgādes tīkla cauruļvadu skaitu.

$$M = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & S_{2n} \\ S_{k1} & S_{k2} & S_{kn} \end{pmatrix}, \quad (1.2.)$$

kur M – matrica;

S_k – scenārijs;

S_n – cauruļvads.

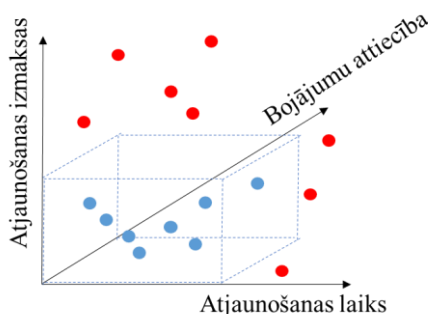
Nejauši bojājumi aktīviem (S_n) tiek radīti ar noteiktu bojājumu varbūtību, kas ir iepriekš noteikta saskaņā ar bojājumu varbūtības sadalījuma funkciju (1.2. att.) konkrētai katastrofai.



1.2. att. Bojājumu skaita sadalījums atbilstoši bojājumu varbūtībai.

Aktīvu bojājumi matricā simulācijas laikā piešķirti saskaņā ar neobjektīvu *Wallenius* varbūtības sadalījuma (angļu val. *Wallenius' probability distribution*) paraugu ņemšanas metodi, lai pārvarētu parauga atkarību no viena mainīgā paraugu ņemšanas procesā.

Izstrādāto rīku var izmantot ar dažādiem atkopšanās laika funkciju veidiem: lineāro, eksponenciālo un trigonometrisko. Piedāvātajā izturētspējas novērtēšanas metodē tiek ņemtas vērā atkopšanās izmaksas, maksimālā atkopšanās laika un kritisko bojājumu attiecības robežvērtības (1.3. att.).



1.3. att. Izturētspējas noteikšana ar robežvērtību palīdzību.

Tiek pieņemts, ka simulētie scenāriji, kas pārsniedz robežvērtības, ir ārpus sistēmas izturētspējas robežas, tāpēc centralizētās siltumapgādes tīkla sistēmas izturētspēju aprēķina kā attiecību starp scenārijiem, kas ir pieejamās atkopšanās izmaksu un atkopšanās laika diapazonā attiecībā pret kopējo simulēto scenāriju skaitu.

1.3. Sistēmdinamikas pieeja kompleksām sistēmām

Sistēmdinamika ir pazīstama kā progresīva pieeja [6], kas spēj atpazīt atgriezenisko saiti starp vairākiem sarežģītu sistēmu elementiem, lai parādītu nelineāru un dinamisku sistēmas uzvedību, to izmanto pētījumos par infrastruktūras sistēmām.

Sistēmdinamikas modelis dabasgāzes pārvades sistēmai ar uzglabāšanas iekārtu tiek izstrādāts kā viendabīga sistēma ar endogēniem mainīgajiem, kas ietekmē sistēmas darbību. Sistēmdinamikas modeļa galvenās sastāvdaļas ir gāzes imports un eksports, iekšzemes piegāde un ieejošās un izejošās plūsmas no uzglabāšanas iekārtas. Pilna pētījuma metodoloģija pieejama 3. publikācijā.

Sistēmdinamikas modelēšanas pieejas pamatā ir trīs komponentu izmantošana (krājumi, plūsmas un pārveidotāju) mainīgo lielumu definēšanai. Modeļi izmanto, lai simulētu komponentu izmaiņas laika gaitā.

Krājumi ir komponentes, kas laika gaitā uzkrāj vai zaudē vērtību. Šo procesu ietekmē ieejošās un izejošās plūsmas. Ieejošās plūsmas palielina krājuma vērtību, savukārt izejošās plūsmas samazina krājuma vērtību. Kopējā krājuma vērtība noteiktā simulācijas laikā tiek aprēķināta, izmantojot 1.3. vienādojumu, saskaitot sākotnējo krājuma vērtību ar ieejošo un izejošo plūsmu starpību [7]:

$$Stock\ X_t = Stock\ X_{(t-dt)} + Inflows_{(t-dt)} - Outflows_{(t-dt)}, \quad (1.3.)$$

kur $Stock\ X_t$ – krājuma X līmenis simulācijas laikā t ;

$Stock\ X_{(t-dt)}$ – krājuma X līmenis laikā $t - dt$;

dt – laika intervāls, kas izmantots modeļa simulācijā,

$Inflow_{(t-dt)}$ – ieejošo plūsmu summa krājumā X simulācijas laikā $t - dt$;

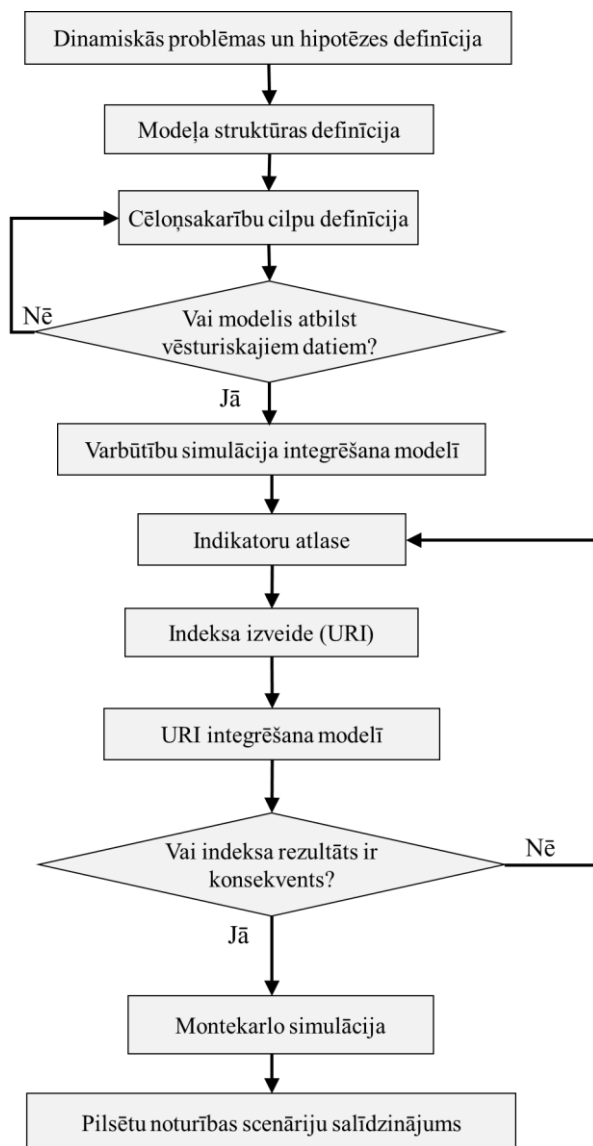
$Outflow_{(t-dt)}$ – izejošo plūsmu summa no krājuma X simulācijas laikā $t - dt$.

Saites var savienot krājumus ar plūsmām, krājumus ar pārveidotāju, lai radītu atgriezeniskās saites efektu. Sistēmdinamikas modeļos parasti ir daudz krājumu, plūsmu un citu komponentu, kas savstarpēji mijiedarbojas un rada daudz dažādas sarežģītas un dinamiskas izmaiņas krājumos. Pārveidotāji tiek izmantoti, lai modelī iekļautu tādas funkcijas kā laika cikla funkcijas, aizkavēšanās funkcijas, loģiskās funkcijas, matemātiskās funkcijas, simulācijas funkcijas, statistikas funkcijas, testa ievades funkcijas. Dabasgāzes infrastruktūras (ar uzglabāšanas iekārtu) sistēmdinamikas modelis ietver ‘fuzzy-logic’ funkcijas, kuras pamatā ir loģiska funkcija, kas ir iestatīta, lai salīdzinātu dažādus modeļa mainīgos lielumus un pārslēgtu gāzes plūsmas režīmus. Šādā veidā tiek imitēts balansēšanas process, ko veic pārvades sistēmas operators.

Dažādu aspektu, kas saistīti ar dabasgāzes pārvades sistēmas un uzglabāšanas iekārtu Latvijā, saistība ir attēlota, izmantojot cēloņu cilpu diagrammas. Pastiprinošā cilpa tiek apzīmēta ar R, balansējošā cilpa – ar B. Cilpu mijiedarbība rada dinamisku uzvedību modeļa vērtībās. Pilns cilpu apraksts pieejams 4. publikācijā.

1.4. Dinamisks pilsētu izturētspējas modelis

Trīs iepriekš minēto pieeju (saliktie indikatori, varbūtību simulācija, sistēmdinamika) integrēšana tiek izmantota, lai izveidotu rīku, kas ir piemērots dinamiskas pilsētu izturētspējas pret dabas apdraudējumiem aprakstīšanai un risinātu esošās zināšanu nepilnības par pilsētu izturētspēju. Rīka izveides un novērtējuma veikšanas process ir apkopots algoritmā (1.4. att.). Pilna modeļa uzbūve aprakstīta 5., 6. un 7. zinātniskajā publikācijā.



1.4. att. Algoritms dinamiska rīka izveidei.

Dinamiskas pilsētu izturētspējas modeļa struktūra

Pilsētu sistēmu uzvedību vislabāk raksturo nelineāra dinamika, kas ir daudzu dažādu pilsētu sistēmas elementu iedarbības rezultāts. Tāpēc izstrādātais pilsētu izturētspējas (pret dabas katastrofām) novērtēšanas modelis tiek veidots, izmantojot sistēmdinamikas pieeju. Tas ļauj dinamiski modelēt pilsētu teritorijas, izmantojot iekšējās atgriezeniskās saites starp dažādām pilsētu teritoriju komponentēm. Pētījumā tiek definētas dažādas pilsētu teritoriju dimensijas, lai noteiktu darbības jomas, kurās modelim piesaistīti pilsētas darbības rādītāji.

Varbūtību simulācija ir integrēta izstrādātajā pilsētu izturēspējas sistēmdinamikas modelī, izmantojot programmatūrā iebūvēto funkciju *RANDOM*. Šī funkcija rada nejaušu ietekmi no dotās varbūtību un ietekmes līknes (angļu val. *probability-impact curve*) un piešķir noteiktu ietekmi modeļa mainīgajiem lielumiem (mājoklis, elektrība, apkure, ūdensapgādes pakalpojumi u. c.).

Indekss, kas balstīts uz salikto indikatoru, ļauj iegūt sarežģītu modeļa struktūru viena skaitļa formā. Indeksa indikatorus, kas vislabāk atspoguļo dinamiskās izmaiņas pilsētu dimensijās, izvēlas atbilstoši pilsētu izturēspējas sistēmdinamikas modeļa komponentēm.

Lai indikatoru vērtības simulācijas laikā padarītu salīdzināmas, tiek veikta indikatoru normalizēšana, pamatojoties uz atsaucē datu kopu ārpus sistēmdinamikas modeļa. Šādas pieejas izmantošanas problēma ir tāda, ka rādītāji visbiežāk jāizvēlas no pieejamajām statistikas datu kopām. Tāpēc ir grūti definēt indikatorus, jo tiem ir jāatbilst gan pilsētu izturēspējas sistēmdinamikas modeļa struktūrai (lai tas būtu nozīmīgs pilsētu izturēspējas novērtēšanā), gan ir jābūt atsaucē datu kopai, lai veiktu jēgpilnu novērtējumu visos pilsētu izturēspējas sistēmdinamikas modeļa simulācijas posmos.

Dinamiska pilsētu modeļa validācija

Pilsētu izturēspējas modeļa validēšana tika veikta modeļa struktūrai un saturam. Modeļa struktūra tika pārbaudīta katrai dimensijai atsevišķi, iestatot modeli līdzsvara stāvoklī un pēc tam testējot ekstrēmas vērtības kā ievades datus turpmākai simulācijai. Paredzamais balansa stāvokļa simulācijas rezultāts ir lineāra uzvedība bez izmaiņām laika gaitā. Pēc līdzsvara stāvokļa atrašanās tiek pārbaudītas ekstrēmas vērtības līdz modeļa kritiskajam punktam, kurā simulācija nesniedz jēgpilnu rezultātu. Šāda pieeja ļauj pārbaudīt modeļa struktūras atbilstību definētajām cēloņsakarību cilpām un to stiprumam.

Modeļa satura validāciju veic vietēja mēroga gadījuma izpētei, salīdzinot modeļa rezultātus katrai dimensijai ar vēsturiskajiem statistikas datiem. Šim nolūkam izmanto determinācijas koeficienta R^2 aprēķina formulu, kā norādīts 1.4. vienādojumā [8]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (1.4.)$$

kur R^2 – determinācijas koeficients;

- n – mērījumu skaits izvēlētajās datu kopās;
- y_i – i -tā novērojuma vērtība validācijas datu kopā;
- $\bar{y}$ – validācijas datu kopas vidējā vērtība;
- $\hat{y}_i$ – i -tā novērojuma paredzētā vērtība.

Ja determinācijas koeficienta vērtība ir tuvu 1, tad modelis labi prognozē sistēmas uzvedību. Modeli uzskata par derīgu gadījumos, kad determinācijas koeficienta vērtība pārsniedz 0,9.

Pilsētas noturības indeksa (*URI*) konsekvences apstiprināšana ar dinamiskām izmaiņām Sistēmdinamikas modeļa struktūrā. Pilsētu izturēspējas indeksa derīgums tiek validēts, kad visi normalizētie indikatori ir: i) vienā un tajā pašā mēroga skalā, tādējādi tiem ir tāda pati ietekme uz galīgo *URI* rādītāju, ja tās indikatori vienādi svērti; ii) apkopojot apvienotajā *URI*, tiek parādītas dinamiskās izmaiņas, kas pilsētas Sistēmdinamikas modelī notiek īstermiņā un ilgtermiņā, ņemot vērā varbūtības simulāciju apdraudējumiem.

Pilsētu izturētspējas novērtēšana vietēja mēroga gadījuma izpētē

Pilsētvides noturības novērtējums tiek veikts Jelgavas pilsētai, kas ir pakļauta plūdu riskam, kas saistīts ar pavasara plūdiem sniega kušanas un lietus dēļ, ledus sastrēgumiem un daļēji arī vējuzplūdiem. Dabas bīstamības definīcijai ir izmantota informācija par pavasara plūdiem Jelgavā, ko sagatavojis VSIA “Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs” par nacionālo plūdu riska novērtējumu [9]. Varbūtību un ietekmes līkne tiek definēta saskaņā ar iepriekš noteiktu informāciju, kas balstīta uz vēsturiskajiem bīstamo notikumu datiem.

Pilsētu izturētspējas pret dabas katastrofām dinamiskais novērtējums, izmantojot pilsētu izturētspējas indeksu, veikts dažādiem scenārijiem, kas izstrādāti, pamatojoties uz iespējamo politikas stratēģiju, lai palielinātu atsevišķu pilsētu teritoriju izturētspēju. Scenāriju salīdzinājumu veic, salīdzinot pilsētu izturētspējas indeksa vērtību varbūtības un to sadalījumu Montekarlo simulāciju izvadē.

Klasiska sistēmdinamikas modeļa simulācija sniedz vienu rezultātu, kas balstīts uz fiksētu datu kopumu. Turpretim pilsētu izturētspējas modelis veic stohastisku simulāciju, pateicoties ievadei no *RANDOM* funkcijas atbilstoši varbūtībām, kas maina katras simulācijas rezultātu. Tādējādi Montekarlo metode tiek izmantota, lai atkārtotu lielu skaitu simulācijas testu ar mainīgu ievades numuru varbūtības un ietekmes līknē katrā vienas simulācijas posmā. Montekarlo simulāciju rezultāti parāda dažādu iznākumu iespējamību. Tas ļauj izprast sistēmu darbības statistisko raksturu un pieņemt lēmumus atbilstoši statistikas rezultātiem.

Mēģinājumu skaits Montekarlo simulācijām atbilstoši [10], kā norādīts 1.5. vienādojumā:

$$Z = \frac{N}{1 + N(E)^2}, \quad (1.5.)$$

kur Z – mēģinājumu skaits;

N – visas iespējamās modeļa izvades vērtības pilsētu izturētspējas indeksam vienā scenārijā;

E – maksimālā pieļaujamā kļūda, aprēķinot Z .

Šajā darbā maksimālā pieļaujamā kļūda ir pieņemta kā $\pm 5\%$ jeb $\pm 0,05$. Visas iespējamās modeļa izvades vērtības pilsētu izturētspējas indeksam vienā scenārijā ir atkarīgas no pilsētu izturētspējas indeksa vērtību skalas. Pilsētu izturētspējas indeksa parametri ir parādīti nodaļā “Pilsētu izturētspējas indeksa integrēšana sistēmdinamikas modelī”, un tie tiek ņemti vērā, nosakot Montekarlo simulāciju skaitu.

2. REZULTĀTI

2.1. Kvantitatīvā izturēspējas novērtējuma pieeja

Ņemot vērā pētījuma metodiku, kvantitatīvās pieejas, ko izmanto kopienu un infrastruktūras izturēspējas noteikšanai, tiek pētītas atsevišķos gadījuma pētījumos, lai noteiktu to priekšrocības un ierobežojumus. Pārskats par šo trīs kvantitatīvo pieeju (saliktais indikators, varbūtību simulācija un sistēmdinamika) rezultātiem sniegts šajā kopsavilkumā. Detalizēti katras pieejas rezultāti aprakstīti attiecīgajos zinātniskajos rakstos.

Saliktā indikatora gadījuma izpēte

Dažādi kopienu izturēspējas indikatori ir apkopoti holistiskā kopienu izturēspējas mērījumā ar vienotu rezultātu. Izveidotais kopienu katastrofu izturēspējas indekss, kas balstīts uz salikto indikatoru pieeju, ir novērtēts Latvijas novadiem. Pētījums parādīja, ka saskaņā ar *CDRI* urbanizēto teritoriju definīciju var iegūt lielākas vērtības kopienas galvaspilsētām un tādējādi uzrādīt augstāku katastrofu noturības līmeni. Urbanizētas teritorijas var iegūt augstākas vērtības definētajiem kapitāliem un tādējādi uzrādīt augstāku katastrofu izturēspējas līmeni.

Iegūto kopienu katastrofu izturēspējas indikatoru rādītāju validācija tika veikta, izmantojot korelācijas un regresijas analīzi, ņemot vērā ārējus kritērijus. Šim nolūkam tika izmantots sociālās ievainojamības indekss un plūdu dēļ izraisīto postījumu izmaksas. Kopienu katastrofu izturēspējas indeksa korelācija ar sociālās ievainojamības indeksu liecina par vāju korelāciju. Arī vairāku mainīgo regresijas analīze, kurā sociālās ievainojamības indekss un kopienu katastrofu izturēspējas indekss ir neatkarīgie mainīgie lielumi un kaitējuma radītās izmaksas ir atkarīgais mainīgais, neuzrādīja statistiski nozīmīgu saistību starp kopienu katastrofu izturēspējas indeksu un kaitējuma radītajām izmaksām.

Kopienu katastrofu izturēspējas indeksa pieeja ir piemērota pētījumiem, kas paredzēti, lai novērtētu pilsētu, valstu vai reģionu izturēspēju pret katastrofām. Tas ļauj salīdzināt starp kopienām izturēspējas līmeņus dažādām katastrofu riska pārvaldības fāzēm, izmantojot statistiku, bet salīdzināmu mēru. Tomēr tā nesniedz informāciju par izturēspēju pret konkrētu katastrofu, tāpēc to uzskata par holistisku metodi.

Lai risinātu kopienu katastrofu izturēspējas indeksa trūkumus, ir noteiktas vairākas iespējas turpmākai izpētei.

1. Būtu labāk jāizvērtē veiktie pieņēmumi un jāizmanto labākas kvalitātes dati. Daudzi statistikas dati nav atjaunināti, un ir novērots, ka nav specifisku indikatoru, ko varētu izmantot, lai aprakstītu raksturīgo izturēspēju.
2. Sistēmdinamikas ieviešana būtu lietderīga, lai lineāros modeļus aizstātu ar dinamiskiem nelineāriem modeļiem un tādējādi varētu analizēt sarežģītas sistēmas un ņemt vērā izturēspējas izmaiņas laika gaitā.

Atklājumi un problēmas indeksa izveidē turpmāk tiek apsvērtas dinamiskā pilsētu izturēspējas novērtēšanas instrumenta izstrādē. Pilni pētījuma rezultāti aprakstīti 1. zinātniskajā publikācijā.

Varbūtību simulācijas gadījuma izpēte

Varbūtību metode tiek izmantota, lai simulētu kļūmes kādā Latvijas pašvaldības centralizētās siltumapgādes infrastruktūrā. Pētījums izskaidro, kā centralizētās siltumapgādes sistēmas izturētspēju pret konkrētu apdraudējumu var novērtēt adaptīvās izturētspējas kontekstā. Ieguldījumu scenāriji, kuru mērķis ir uzlabot aktīvu drošību, tiek izmantoti, lai noteiktu izturētspēju centralizētās siltumapgādes tīkla sistēmā. Pētījums ir aprakstīts 2. zinātniskajā publikācijā.

Varbūtības simulācija veikta 1000 scenārijiem ar iespējamiem aktīvu bojājumiem saskaņā ar iepriekš noteiktu kļūmes varbūtību. Šādas simulācijas rezultāts palīdz izprast robustumu, atjaunošanās laiku un iespējamās bojājumu izmaksas dažādu cauruļvadu tīkla traucējumu gadījumā.

Varbūtības simulāciju rezultāti parāda modeli, kas atbilst varbūtības un seku (angļu val. *probability-consequence*) funkcijai, kur lielas varbūtības traucējumiem ir nelielas sekas, savukārt zemas varbūtības traucējumiem ir būtiskas sekas. Šī metode sniedz pilnīgāku pārskatu nekā holistisks izturētspējas mērīšana ar indikatoros balstītu pieeju. Pilni pētījuma rezultāti aprakstīti 2. publikācijā.

Pētījuma rezultātā tiek ierosināts turpmāk vairāku traucējumu veidus skatīt dažādu veidu infrastruktūras sistēmās, kā arī ņemt vērā dažādu sistēmu starpsavienojumus. Lai analizētu vairāku komponentu mijiedarbību kompleksā sistēmā, sistēmdinamikas ieviešana ir piemērotāka par lineāro modeli.

Sistēmdinamikas pieejas gadījuma izpēte

Pētījumā, kas aprakstīts 3. un 4. zinātniskajā publikācijā, dažādu aspektu saistība ar dabasgāzes pārvades sistēmu un krātuvi Latvijā tiek noteikta, balstoties uz korelācijas un regresijas analīzes rezultātiem. Ir definēta gāzes iesmidzināšana no pārvades sistēmas uzglabāšanas iekārtā un gāzes iesmidzināšana no uzglabāšanas iekārtas pārvades sistēmā. Atgriezenisko cilpu diagrammas tiek izmantotas, lai aprakstītu modeļi iekļautās atgriezeniskās saites.

Dabasgāzes pārvades sistēmu un krātuves modelis tiek izmantots, lai pētītu atjaunojamā metāna izmantošanas iespējamo ietekmi uz dabasgāzes sistēmu Latvijā, izmantojot atbalsta politiku gāzes piegādes dažādošanai. Gāzes avotu dažādošana palielinās dabasgāzes sistēmas izturētspēju Latvijā atbilstoši enerģētiskās izturētspējas definīcijai. Sistēmdinamikas pieejas pētījums liecina, ka politikas plānotāji un citi lēmumu pieņēmēji var izmantot sistēmdinamikas modeļus kā instrumentus, lai novērtētu dažādus politikas īstenošanas kvantitatīvos parametrus. Pilns sistēmdinamikas pieejas izklāsts ir pieejams attiecīgajās zinātniskajās publikācijās.

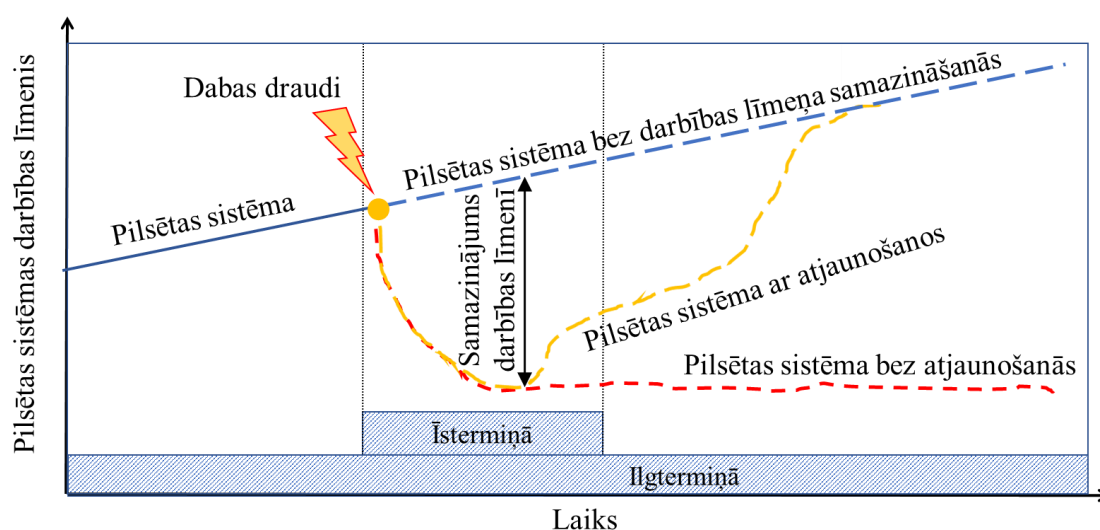
2.2. Dinamisks pilsētu izturētspējas novērtēšanas rīks

Sistēmdinamikas modelēšanas pieejai apvienojumā ar varbūtību simulāciju un salikto indikatoru ir potenciāls, lai izstrādātu jaunu integrētu pieeju pilsētu izturētspējas novērtēšanai. Dinamiskās pilsētu izturētspējas pret dabas katastrofām rīka veidošanas, validēšanas un

testēšanas rezultāti ir parādīti šajā apakšnodaļā, pamatojoties uz algoritmu, kas norādīts metodoloģijas nodaļā (1.4. att.).

Izvēlēta pilsētu izturētspējas definīcija

Pētījuma galvenais rezultāts ir modelis, kas var nodrošināt novērtējumu pilsētu izturētspējai pret dabas katastrofām, ņemot vērā dinamiskās izmaiņas pilsētu teritorijās. Tādējādi dinamiskas problēmas noteikšana attiecas uz pilsētu izturētspējas mērījumiem. Noteiktā dinamiskā problēma (2.1. att.) ir pilsētas sistēmas funkcionalitātes līmeņa samazināšanās laika gaitā (gan ilgtermiņā, gan īstermiņā) pēc dabas katastrofas ietekmes un veida, kā sistēma reaģē uz ārējiem stresa faktoriem: a) pilsētu sistēma bez atjaunošanās; b) pilsētu sistēma ar atjaunošanos; c) pilsētu sistēma bez darbības līmeņa samazināšanās. Dinamiskā problēma ir aprakstīta 5. zinātniskajā publikācijā.



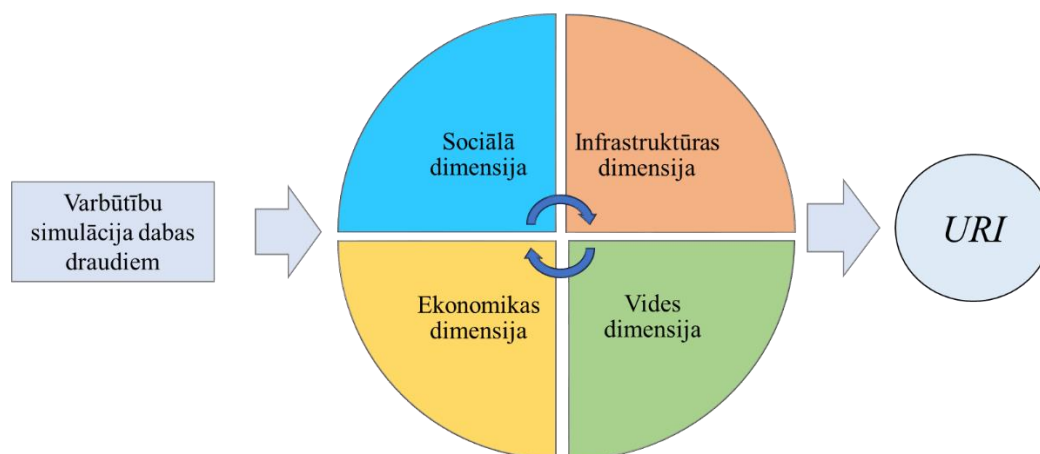
2.1. att. Dinamiskā problēma.

Problemātiskā uzvedība ir funkcionalitātes samazināšanās pilsētu sistēmās, pēc kuras sistēma var vai nu atgriezties ierastajā funkcionalitātes līmenī, tādējādi parādot zināmu izturētspēju, vai arī saglabāt zemāku funkcionalitātes līmeni, faktiski uzrādot zemāku izturētspēju. Svarīgi minēt, ka izturētspējīgai sistēmai var būt atšķirīgas funkcionalitātes līmeņa samazināšanās un atjaunošanās laika tendences. Dažas sistēmas var būt izturētspējīgas un pilnībā atjaunoties īstermiņā, citas var pilnībā (piemērs par pilsētu sistēmu ar atjaunošanos) atjaunoties tikai ilgtermiņā. Vēlamais sistēmas stāvoklis ir nesamazināt tās funkcionalitāti. Abu laika mērogu iekļaušana liek saprast, kādas ir galvenās atgriezeniskās saites starp pilsētu teritoriju dimensijām.

Dinamiskās hipotēzes mērķis ir izveidot īpašu modeļa struktūru, ņemot vērā to, ka vēlamākais sistēmas stāvoklis ir minimāls sistēmas funkcionalitātes samazinājums dabas katastrofas ietekmes dēļ. Pilsētu sistēmdinamikas modeļa dinamiskā hipotēze ir tāda, ka problemātisku sistēmas uzvedību var atrisināt gan ilgtermiņā, gan īstermiņā, palielinot vai samazinot atgriezeniskās saites stiprumu starp pilsētu dimensijām, kas iestrādātas pilsētu sistēmdinamikas modelī.

Pilsētu izturētspējas modeļa struktūra

Dinamiskā pilsētu izturētspējas modeļa struktūra atspoguļo pilsētu teritorijas, izmantojot sociālās, ekonomiskās, infrastruktūras un vides dimensijas, kas sistēmdinamikas modelī ir iekļautas kā atsevišķi sektori. Pilsētu izturētspējas modelis ņem vērā atgriezeniskās saites starp dimensijām, kas atspoguļo dinamiskās pārmaiņas pilsētās. Pilsētu izturētspējas sistēmdinamikas modeļa (struktūras ar integrētu varbūtības pieeju un saliktā indikatora indeksu) koncepts redzams 2.2. attēlā.



2.2. att. Pilsētas izturētspējas sistēmu dinamikas modeļa struktūra.

Modeļa struktūrā ir iekļauta dabas katastrofu ietekme uz pilsētas teritoriju, veicot stohastisku simulāciju. Dabas katastrofu ietekme tiek uzskatīta par šokējošu notikumu (dažādos mērogos), kas rodas ar iepriekš noteiktu varbūtību.

Indekss, kas balstīts uz saliktā indikatora pieeju, sistēmdinamikas modelī ļauj uzrādīt pilsētu izturētspējas pret dabas katastrofām daudzdimensiju un kompleksu dinamisko problēmu mērījumu kā vienotu vērtību sistēmdinamikas modeļa simulācijas izvadē. Šim mērķim pilsētu izturētspējas indeksu veido indikatori, kas attiecas uz pilsētu izturētspējas raksturlielumiem pilsētu dimensijās.

Atgriezeniskās saites cilpu diagrammas

Katrai dimensijai sistēmdinamikas modelī ir definētas konkrētas atgriezenisko saišu cilpas. 5. publikācijā aprakstītas sistēmdinamikas modeļa atgriezenisko saišu cilpas katrai definētajai dimensijai. Pilsētu izturētspējas sistēmdinamikas modeļa galveno atgriezenisko saišu cilpas ar četrām galvenajām atgriezeniskajām saitēm (R1, B1, R2 un B2) ir parādītas 2.3. attēlā.

Dzimumstība un iedzīvotāju skaits ir galvenās sociālās dimensijas komponentes sistēmdinamikas modelī. Dzimumstība un iedzīvotāju skaits ir saistīti ar pastiprinošo cilpu R1. Šī cilpa parāda iedzīvotāju skaita pieauguma pastiprinošo efektu, kas ir atkarīgs no pilsētu teritorijā dzīvojošo cilvēku skaita.



Ekonomikas dimensijā pastiprinošā cilpa R2 sistēmdinamikas modeļa ekonomikas sektorā iekļauj atgriezenisko saiti starp patēriņu un nodarbinātības līmeni. Pastiprinošā cilpa R2 paredz, ka patēriņa komponentes vērtības pieaugums palielinās vēlamo ražošanas apjomu un līdz ar to arī nodarbinātības līmeņa komponentes vērtību. Nodarbinātības līmenis ir atkarīgs arī no iedzīvotāju darbaspējīgā vecuma pilsētas teritorijā.

Atgriezeniskā saite starp sociālo un ekonomisko dimensiju ir veidota kā saite starp iedzīvotāju skaitu un nodarbinātību. Iedzīvotāju skaita pieaugums palielinās darbspējīgā vecuma iedzīvotāju skaitu, kas var tikt nodarbināti. Šī saite var palielināt ražošanas apjomus pilsētu teritorijā un tādējādi arī iekšzemes kopprodukta (IKP) vērtību. Balansējošā cilpa B2 ekonomikas sektorā iekļauj atgriezenisko saiti starp nodarbinātības līmeni un IKP.

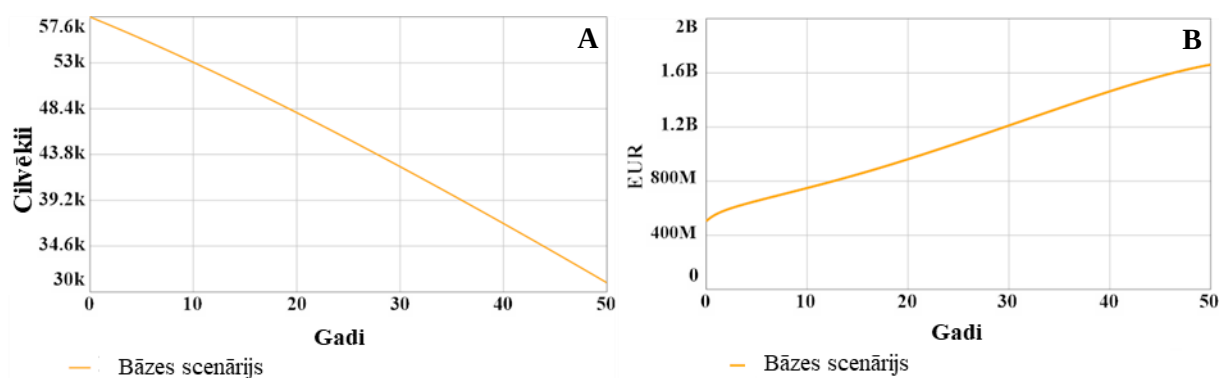
Gadījuma izpētei ir izvēlēta vietējo pilsētu teritorija, lai validētu un testētu izstrādāto pilsētu izturētspējas sistēmdinamikas modeli dažādiem pilsētu izturētspējas scenārijiem. Gadījuma izpēte aprakstīta 6. publikācijā.

24

intervāls ir viens gads, tādējādi izvēlētais simulācijas laika solis arī ir viens gads. Turpretim simulācijas laika starpsolis tiek definēts kā 1/12, tādējādi reālais simulācijas laiks ir viens mēnesis, un simulācijas uzrādītais rezultāts tiek uzrādīts kā vienmērīga tendences līkne.

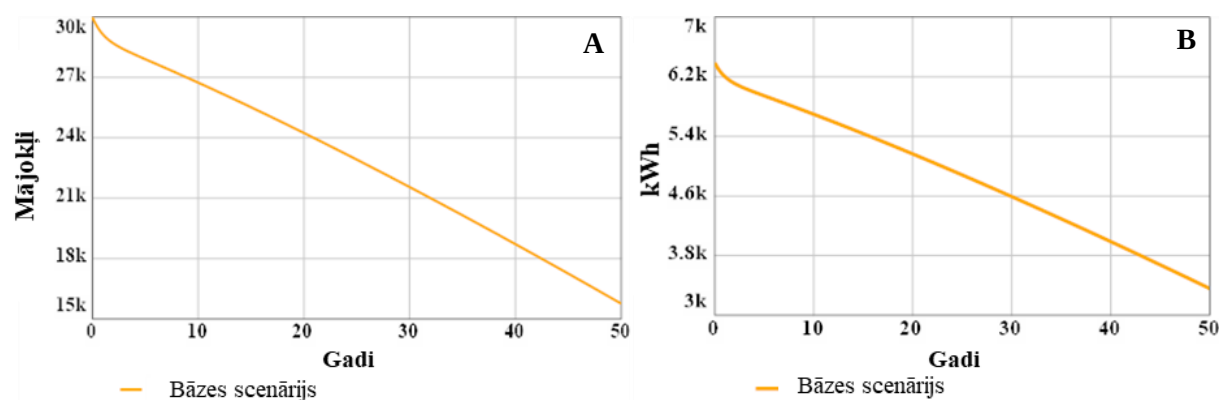
Apkopotie Centrālās statistikas pārvaldes dati tiek izmantoti kā modeļa mainīgo ievades dati simulācijas sākumā. Simulācijas laikā modeļa komponentu vērtības mainās, pateicoties sistēmdinamikas modeļa endogēnajai struktūrai, ko nosaka cēloņu cilpu diagrammas. Izvēlētais simulācijas laiks ir 50 gadu, kas tiek uzskatīts par pietiekamu laika periodu, lai aptvertu dažādu dabas katastrofu varbūtību, ja modeļa turpmākās izstrādes laikā tiek izmantota dabas katastrofu varbūtību simulācija.

Bāzes scenārija rezultāti atbilstošajām sociālās un ekonomiskās dimensijas komponentēm, proti, iedzīvotāju skaitam un IKP, ir parādīti 2.4. attēlā (A un B). Iedzīvotāju skaita komponente liecina par pilsētu teritorijā dzīvojošo iedzīvotāju skaita pakāpenisku samazināšanos un pakāpenisku IKP pieaugumu.



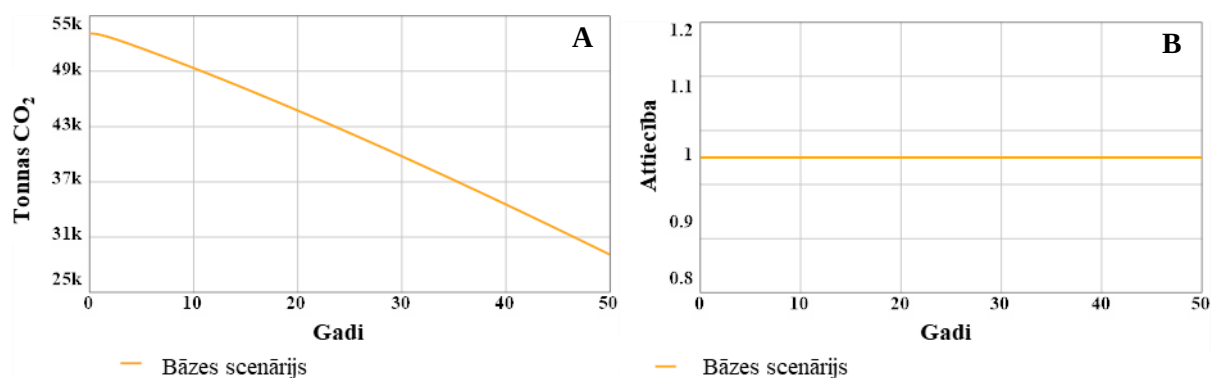
2.4. att. Bāzes scenārija rezultāts populācijas komponentei (A) un IKP komponentei (B).

Bāzes scenārija infrastruktūras dimensijas apdzīvoto mājokļu komponentes simulācijas rezultāti (2.5. A att.) parāda, kā samazinās aizņemto mājokļu skaits atkarībā no iedzīvotāju kopskaita. Līdz ar to samazinās arī elektroenerģijas piegādes, siltumapgādes, ūdens apgādes un ūdens attīrīšanas vērtības infrastruktūras dimensijā. Siltumapgādes komponentes piemērs parādīts 2.5. B attēlā.



2.5. att. Bāzes scenārija rezultāts mājokļu komponentei (A) un apkures komponentei (B).

Vides dimensijas komponentes CO₂ emisijas bāzes scenārija simulācijas rezultāti (2.6. A att.) parāda, kā, samazinoties elektroenerģijas un siltumenerģijas patēriņam, samazinās CO₂ emisiju līmenis.

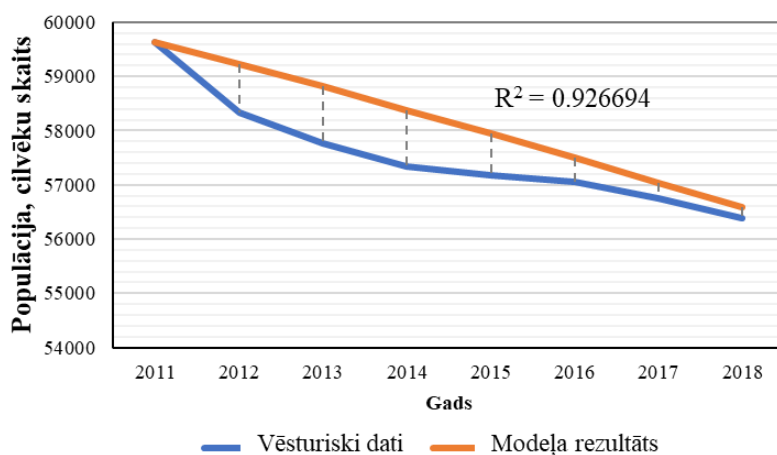


2.6. att. Bāzes scenārija rezultāts CO₂ komponentei (A) un saražoto atkritumu un pārstrādāto atkritumu attiecības komponentei (B).

Vides komponentes bāzes scenārija simulācijas radīto atkritumu un apstrādāto atkritumu attiecība neuzrāda nekādas izmaiņas (2.6. B att.). Šādi modeļa simulācijas rezultāti ir saistīti ar to, ka bāzes scenārijā, kad nav dabas katastrofu ietekmes, visi radītie atkritumi tiek arī apstrādāti.

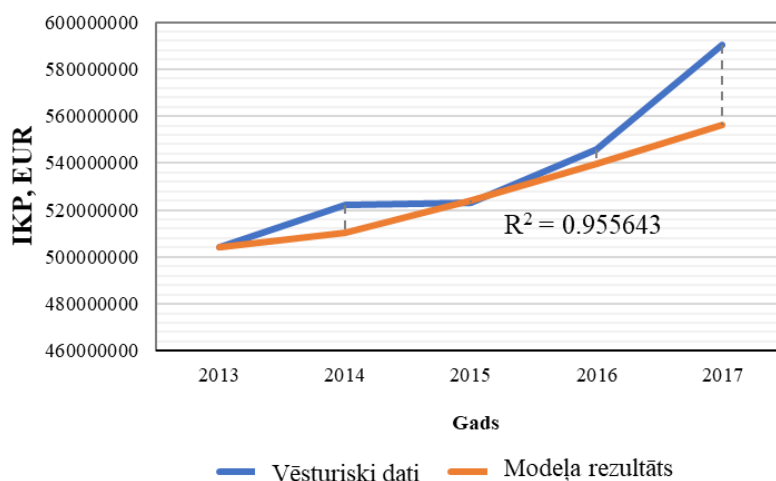
Pilsētu izturētspējas sistēmdinamikas modeļa validācija

Izveidotā sistēmdinamikas modeļa validācija tiek veikta, ņemot vērā gadījuma izpētei izvēlētās pilsētu teritorijas vēsturiskos datus šādām komponentēm: iedzīvotāju skaits; IKP. Modeļa validācijai izmantoti Centrālās statistikas pārvaldes dati par iedzīvotāju skaitu Jelgavā 2011.–2018. gadā (2.7. att.). Sistēmdinamikas modeļa iedzīvotāju skaita komponentes rezultāti atbilst iedzīvotāju skaita vēsturiskajiem datiem, jo determinācijas koeficienta R^2 vērtība ir 0.92669. To uzskata par ļoti augstu korelāciju, un modelis ir derīgs, lai nodrošinātu saskanīgus iedzīvotāju skaita komponentes rezultātus pilsētu izturētspējas novērtējumā.



2.7. att. Modeļa populācijas komponentes validēšanas rezultāts.

Modeļa validācija Jelgavas IKP datiem tiek veikta 2013.–2017. gadam. IKP validācijas mērķim ņemtas vērā iedzīvotāju skaita komponentes izmaiņas atbilstoši vēsturisko IKP datu kopas gadiem. Sistēmdinamikas modeļa IKP komponentes rezultāti atbilst IKP vēsturiskajiem datiem, jo determinācijas koeficienta vērtība ir 0.95564 (2.8. att.). To uzskata par ļoti augstu korelāciju starp reālajiem un modeļa datiem, tādējādi modelis ir derīgs, lai nodrošinātu konsekventu IKP komponentes rezultātus pilsētu izturētspējas novērtējumā.



2.8. att. Modeļa IKP komponentes validēšanas rezultāts.

Pārējām modeļa komponentēm nav vēsturisku datu kopas, kas uzrāda tendenci vairāku gadu garumā. Ieejas dati par pārējām komponentēm sistēmdinamikas modeļa validācijai tiek izmantoti, ņemot vērā atbilstošos statistikas datus par Latviju vai par Jelgavu.

Varbūtību simulācijas integrēšana sistēmdinamikas modelī

Dabas katastrofas sistēmdinamikas modelī tiek definētas kā notikums ar noteiktu ietekmi uz iedzīvotāju skaitu un pakalpojumu nodrošināšanu. Ietekme uz konkrētām komponentēm aprakstīta 2.1. vienādojumā.

$$Hazard\ impact_i = Hazard_j \cdot Exposure_i \cdot Vulnerability_i, \quad (2.1.)$$

kur $Hazard\ impact_i$ – apdraudējuma ietekme uz komponenti i ;

$Hazard_j$ – apdraudējuma lielums apdraudējuma varbūtībai j ;

$Exposure_i$ – komponentes i pakļaušana apdraudējuma ietekmei;

$Vulnerability_i$ – komponentes i ievainojamība.

Dabas katastrofas definēšanai izvēlētajam gadījuma pētījumam tiek izmantota VSIA “Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centra” sagatavotā informācija par nacionālo plūdu riska novērtējumu par pavasara plūdu varbūtību un apmēru Jelgavas pilsētā. Parametrs $Hazard_j$ tiek ģenerēts, izmantojot programmatūrā iebūvētu funkciju, ar iespējamību, ka apdraudējums notiks reizi 200 gados (0.5 % varbūtība), reizi 100 gados (1 % varbūtība) un ik pēc 10 gadiem (10 % varbūtība).

Dati par apdraudējumam pakļauto iedzīvotāju skaitu saskaņā ar pavasara plūdu laikā applūdušo teritoriju Jelgavas pilsētā ir balstīti uz nacionālo plūdu riska novērtējumu [11]. Lai noteiktu apdraudējuma ietekmi citām pilsētas komponentēm, mainīgo $Exposure_i$ un $Vulnerability_i$ definīcijai šajā pētījumā tiek izmantoti neīsti dati vēsturisko, kas balstīti uz pieņēmumiem par iespējamo bojājumu apjomu, datu trūkuma dēļ.

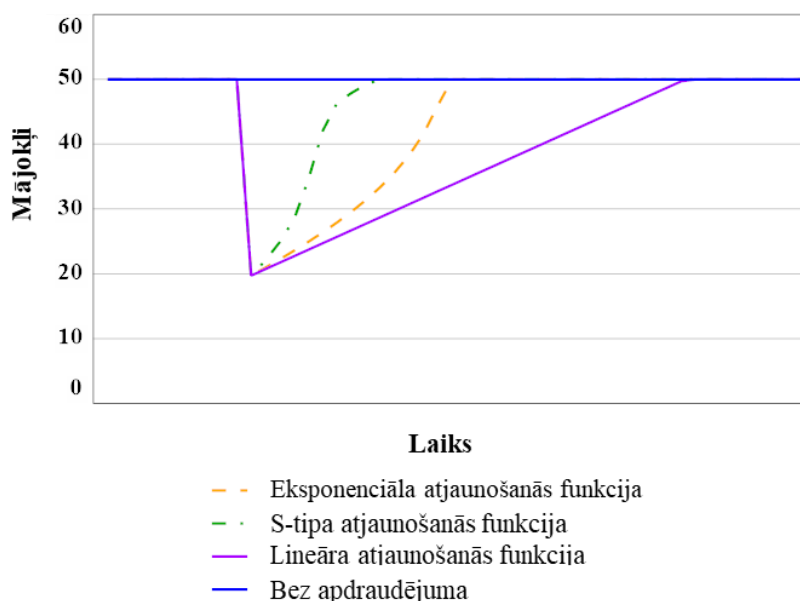
No apdraudējumam pakļauto iedzīvotāju skaita un citām pilsētas komponentēm mainīgajam $Exposure_i$ vērtības tiek piešķirtas, balstoties uz ietekmi uz vienu iedzīvotāju. Jo lielāks apdraudējumam pakļauto iedzīvotāju skaits, jo lielāka komponentes $Exposure_i$ vērtība.

Komponenti $Vulnerability_i$ definē ar ievainojamības koeficientu, kura vērtība ir no 1 līdz 0 (1 ir vienāds ar pilnu ietekmes apjomu, ko nosaka $Exposure_i$ uz vienu iedzīvotāju, 0 nozīmē, ka nav nekādas ietekmes un $Exposure_i$ vērtību nepiešķir). Pilsētu izturētspējas sistēmdinamikas modeļa konkrētās komponentes i apdraudējuma ietekmei ir redzamas 2.1. tabulā.

2.1. tabula

Modeļa komponentes ar apdraudējuma ietekmēm

Komponente	Apdraudējuma ietekme, mērvienība
<i>Sociālā dimensija</i>	
Iedzīvotāju skaits	Nāves gadījumi, cilvēku skaits
<i>Ekonomiskā dimensija</i>	
Darba stundas	Darba stundu samazināšanās, h
<i>Infrastruktūras dimensija</i>	
Mājokļi	Mājokļu bojājumi, mājokļu skaits
Elektroapgāde	Elektroenerģijas piegādes samazināšanās, kWh
Apkure	Apkures samazināšanās, kWh
Ūdensapgāde	Ūdens piegādes samazināšanās, m ³
<i>Vides dimensija</i>	
Notekūdeņu attīrīšana	Notekūdeņu attīrīšanas samazināšanās, m ³
Atkritumu apstrāde	Atkritumu apstrādes samazināšanās, kg



2.9. att. Dažādas atjaunošanās funkcijas mājokļu skaitam.

Pilsētu izturētspējas sistēmdinamikas modeļa struktūra ļauj iekļaut dažādas atjaunošanās funkcijas (lineāra, S veida, eksponenciāla) katrai komponentei pēc apdraudējuma radītās ietekmes (mājokļu piemērs 2.9. att.). Vēsturisku datu, kas raksturotu atjaunošanās procesu pēc apdraudējuma, nav, un Jelgavas gadījuma izpētē tiek izmantota tikai S veida atjaunošanās funkcija.

Varbūtības simulācijas integrēšana pilsētu izturētspējas sistēmdinamikas modelī ļauj radīt stohastiskus apdraudējuma notikumus. Tas nozīmē, ka katrai bāzes scenārija ar apdraudējumu simulācijai atbilst vairāki apdraudējumi un to lielumu. Šādas varbūtības – stohastiskas simulācijas sekas – ir grūti noteikt; tādējādi tiek izmantota Montekarlo simulācija, kā norādīts sadaļā “Montekarlo simulācija pilsētu izturētspējas scenārijiem”.

Izvēlēto indikatoru saraksts

Izvēlētie indikatori, kas atbilst modeļa struktūrai un kuriem ir atsaucē dati *EUROSTAT* datubāzē, norādīti 2.2. tabulā. Pozitīva ietekme “+” nozīmē, ka, palielinoties indikatora vērtībai, palielinās pilsētu izturētspēja. Negatīva ietekme “–” nozīmē, ka, palielinoties indikatora vērtībai, samazinās pilsētu izturētspēja. Šajā tabulā minētie indikatori tiek izmantoti, lai izveidotu indeksu. Ar šī indeksa palīdzību tiek parādītas pilsētu izturētspējas dinamiskās izmaiņas īstermiņā un ilgtermiņā.

2.2. tabula

Atlasīto indikatoru ietekme uz pilsētu izturētspēju

Izvēlētais indikators pilsētu dimensijai	Ietekme uz pilsētu izturētspējas
Sociālā dimensija	
Bezdarbnieku īpatsvars	–
Jauniešu atkarība no darba vesuma iedzīvotājiem	–
Gados vecu cilvēku atkarība no darba vesuma iedzīvotājiem	–
Migrantu īpatsvars	–
Ekonomiskā dimensija	
IKP uz iedzīvotāju	+
Infrastrukturā dimensija	
Tā iedzīvotāju daļa, kas dzīvo nepilnvērtīgos mājokļos	–
Iedzīvotāju īpatsvars ar piekļuvi elektroapgādei	+
Mājsaimniecību īpatsvars, kur nav iespējams uzturēt mājoklī siltu	–
Iedzīvotāju īpatsvars ar piekļuvi ūdensapgādei	+
Vides dimensija	
Iedzīvotāju īpatsvars, kam ir piekļuve notekūdeņu attīrīšanai	+
Atkritumu radīšanas un atkritumu apstrādes attiecība	+

Pilsētu izturētspējas indeksa definīcija

No izvēlēto indikatoru saraksta tika definēts bezdimensionāls indekss pilsētu izturētspējas mērīšanai, proti, pilsētu izturētspējas indekss. Indekss ļauj ņemt vērā pilsētu izturētspējas dinamiku pret dabas apdraudējumu kā novērtējumu, kas balstīts uz normalizētiem rādītājiem, un parāda dinamiskās izmaiņas vienā skaitļa vērtībā.

Pilsētu izturētspējas indekss (angļu val. *Urban Resilience Index*; *URI*) tiek aprēķināts kā svērtu indikatoru vidējais aritmētiskais:

$$URI\ score = \frac{\sum_{i=1}^n (\omega_i x_{i\ norm})}{n}, \quad (2.2.)$$

kur $x_{i\ norm}$ – normalizētais indikators;

ω – indikatora svars;

i – indikatora numurs;

n – indikatoru skaits.

Šajā metodoloģijā *URI* rādītājs ļauj noteikt dažādus svarus, pamatojoties uz nepieciešamību izcelt konkrēto rādītāju vai dimensijas nozīmīgumu pētījumā. Individuālo rādītāju svēršanai vienotas metodoloģijas nav. Šajā pētījumā aplūkotas divas prasības indikatora svēršanai. Pirmkārt, svērums nedrīkst izjaukt pilsētu izturētspējas indeksa rezultātu konsekvētumu. Otrkārt, indikatoru svaru summai jābūt vienādai ar indikatoru skaitu.

Indikatoru standartizācija tika veikta, standartizējot datus uz vienu iedzīvotāju vai uzrādot indikatoru attiecībā uz iedzīvotāju īpatsvaru. Tas ļauj salīdzināt indikatoru vērtības ar citu Eiropas valstu atsaucē datiem, kas iegūti no *EUROSTAT* datubāzes.

Indikatoru normalizācijai tiek izmantota *MinMax* metode, kas pārveido indikatoru vērtības kopējā skalā no 0 līdz 1. Indikatori ar pozitīvu ietekmi uz pilsētu izturētspēju tiek normalizēti saskaņā ar *MinMax* normalizēšanu:

$$x_{i\ norm}^+ = \frac{x_i - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)}, \quad (2.3.)$$

kur $x_{i\ norm}^+$ – normalizētais indikators ar pozitīvu ietekmi uz pilsētu izturētspējas vērtību;

x_i – indikatora vērtība pirms normalizācijas;

$\min(x_i)$ – minimālā indikatora vērtība *EUROSTAT* datu kopā;

$\max(x_i)$ – maksimālā indikatora vērtība *EUROSTAT* datu kopā.

Indikatori, kuriem ir negatīva ietekme uz pilsētu izturētspēju, tiek normalizēti, izmantojot *MaxMin* normalizāciju:

$$x_{i\ norm}^- = \frac{\max(x_i) - x_i}{\max(x_i) - \min(x_i)}, \quad (2.4.)$$

kur $x_{i\ norm}^-$ – normalizētais indikators ar negatīvu ietekmi uz pilsētu izturētspējas indeksa vērtību;

x_i – indikatora vērtība pirms normalizācijas;

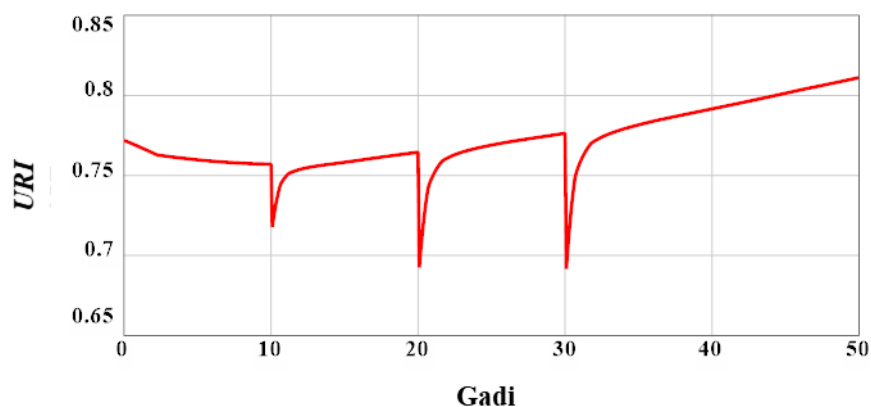
$\min(x_i)$ – minimālā indikatora vērtība *EUROSTAT* datu kopā;

$\max(x_i)$ – maksimālā indikatora vērtība *EUROSTAT* datu kopā.

Pilsētu izturētspējas indeksa integrēšana sistēmdinamikas modelī

Lai pilsētas izturētspējas sistēmdinamikas modelī iekļautu pilsētu izturētspējas indeksu, tiek izveidota pārveidotāja komponente pilsētu izturētspējas indeksa vērtības noteikšanai no indikatoru vērtībām katrā simulācijas posmā saskaņā ar 2.2. vienādojumu. Tas ļauj veikt pilsētu izturētspējas dinamisku mērījumu, kas mainās laika gaitā ilgtermiņa un īstermiņa izturētspējas izmaiņu dēļ.

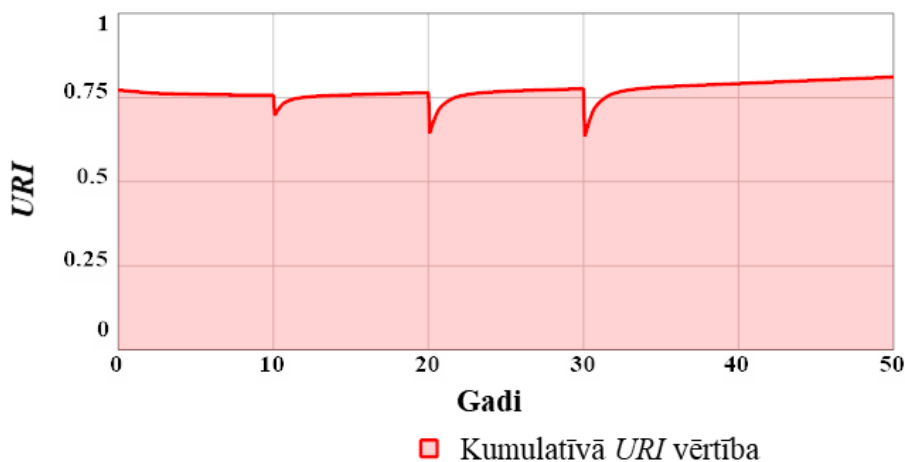
Lai pārbaudītu pilsētu izturētspējas indeksa vērtības uzvedību, dabas apdraudējuma notikums tika iepriekš definēts 10. gadā, 20. gadā un 30. gadā (2.10. att.) bez varbūtības simulācijas. Ilgtermiņa izmaiņas pilsētu izturētspējas indeksa vērtībā notiek saskaņā ar izmaiņām sociālās dimensijas un ekonomiskās dimensijas indikatoru vērtībā. Apdraudējuma notikuma postošā ietekme uz pilsētu ir norādīta kā pilsētu izturētspējas indeksa vērtību īslaicīgs samazinājums. Šī īslaicīgā pilsētu izturētspējas indeksa vērtības izmaiņa notiek infrastruktūras un vides dimensiju indikatoru izmaiņu dēļ.



2.10. att. Izmaiņas *URI* vērtībās simulācijas laikā.

Dažādu pilsētu izturētspējas scenāriju salīdzināšanai pilsētu izturētspējas indekss pārveidotā veidā nav piemērots, jo tiek sniegtas dažādas pilsētu izturētspējas indeksa vērtības katram simulācijas laika solim. Pilsētu izturētspējas indekss tiek konvertēts par vienu vērtību, kas iegūta simulācijas beigās, izmantojot krājuma komponenti sistēmdinamikas modelī.

Pilsētu izturētspējas indeksa vērtība, kas aprēķināta pārveidotajā komponentē simulācija laikā, tiek izmantota kā ieejošā plūsma pilsētu izturētspējas indeksa krājumā. Simulācijas beigās pilsētu izturētspējas indeksa krājuma vērtība ir indeksa vērtību kumulatīvā summa simulācijas laikā. Šī pilsētu izturētspējas indeksa kumulatīvā vērtība tiek attēlota kā laukums zem indeksa tendences līnijas visa simulācijas laika periodā (iekrāsotais laukums 2.11. att.).



2.11. att. Kumulatīvā *URI* vērtība simulācijas beigās.

Pilsētu izturētspējas indeksa kumulatīvā vērtība simulācijas laikā var tikt izmantota, lai salīdzinātu dažādus pilsētu izturētspējas scenārijus. Tomēr tas neatbilst iepriekš definētajai pilsētu izturētspējas indeksa skalai no 0 līdz 1. Šim nolūkam pilsētu izturētspējas indeksa kumulatīvo vērtību, kas ir izejas vērtība, dala ar simulācijas laiku. Tas ļauj saglabāt kumulatīvā pilsētu izturētspējas indeksa vērtību no 0 līdz 1, lai varētu vienkārši parādīt rezultātus.

Modeļa izveidei lietotā programma *Stella Architect* izvada kumulatīvā pilsētu izturētspējas indeksa vērtību no 0 līdz 1 pēc Montekarlo simulācijām ar precizitāti līdz trīs skaitļiem aiz komata. Tātad maksimālais dažādu pilsētas izturētspējas indeksa vērtību skaits ir 1000. Šis skaits tiek ņemts vērā, aprēķinot paraugu skaitu Montekarlo simulācijās.

Izvēlēto pilsētu izturētspējas scenāriju analīze

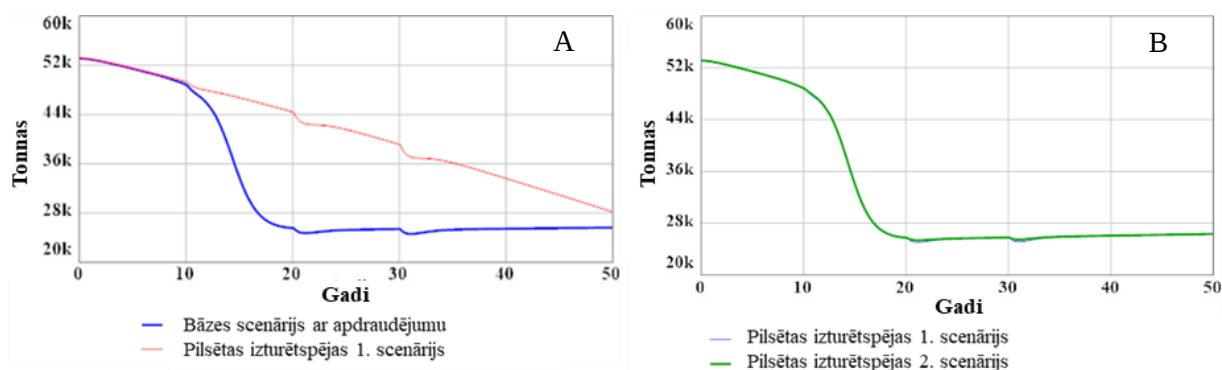
Veicot gadījuma izpēti Jelgavas pilsētā, tika izveidoti divi pilsētu izturētspējas scenāriji, kas atspoguļo dažādas politikas stratēģijas un tiek salīdzināti ar bāzes scenāriju. Izmaiņas ievades datu parametros, kas tiek izmantoti pilsētu izturētspējas sistēmdinamikas modelī, lai atspoguļotu politikas stratēģijas ietekmi, ir aprakstītas 2.3. tabulā.

2.3. tabula

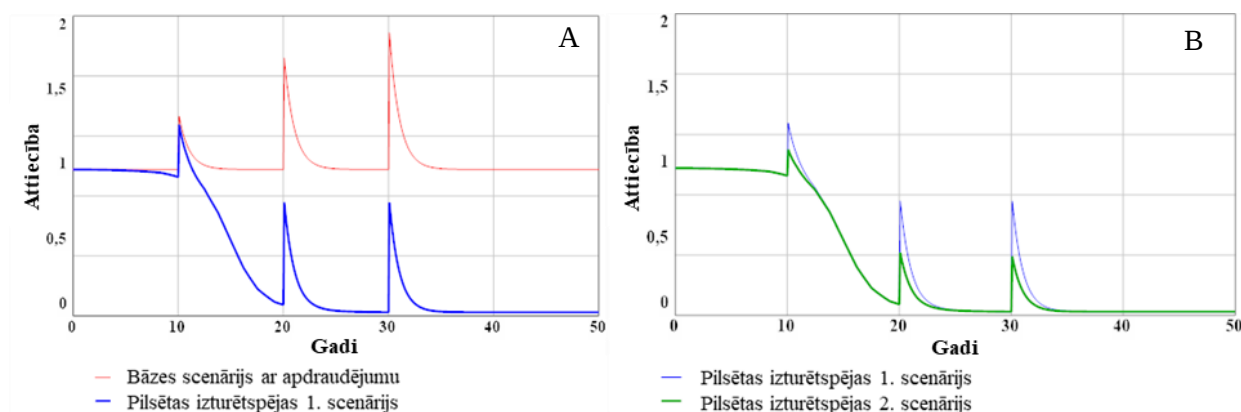
Izvēlētie parametri izturētspējas scenārijiem

Scenārijs	Parametri		
	CO ₂ emisijas	Atkritumu pārstrāde	Apdraudējuma ietekmes komponente
Bāzes scenārijs ar apdraudējumu	18 g/kWh siltumenerģijai un 400 g/kWh elektroenerģijai	0 – atkritumu pārstrādes faktors	1 – ievainojamības koeficienta vērtība
Pilsētu izturētspējas 1. scenārijs	S veida funkcijas samazinājums no 18 g/kWh līdz 9.6 g/kWh siltumenerģijai un samazinājums no 400 g/kWh līdz 215 g/kWh simulācijas laikā no 1. līdz 30. gadam	S veida funkcijas pieaugums no 0 līdz 1 atkritumu pārstrādes faktoram 15. līdz 30. simulācijas gadā	1 – ievainojamības koeficienta vērtība
Pilsētu izturētspējas 2. scenārijs	S veida funkcijas samazinājums no 18 g/kWh līdz 9.6 g/kWh siltumenerģijai un samazinājums no 400 g/kWh līdz 215 g/kWh simulācijas laikā no 0. līdz 30. gadam	S veida funkcijas pieaugums no 0 līdz 1 atkritumu pārstrādes faktoram 15. līdz 30. simulācijas gadā	0.5 – ievainojamības koeficienta vērtība

Pilsētu izturētspējas pirmā un otrā scenārija rezultāti parāda, kā izvēlēta S veida funkcija maina CO₂ emisijas simulācijas laikā (2.12. A att.) un kā palielinās atkritumu pārstrāde (2.13. A att.). Pilsētu izturētspējas otrais scenārijs (2.12. B un 2.13. B att.) papildus CO₂ emisiju samazināšanai un pārstrādāto atkritumu daudzuma palielināšanai paredz samazināt apdraudējuma ietekmi. Tas tiek ņemts vērā, izmainot apdraudējuma ietekmes koeficientu no 1 uz 0.5. Tā rezultātā visos infrastruktūras pakalpojumos samazinās radīto traucējumu apjoms.

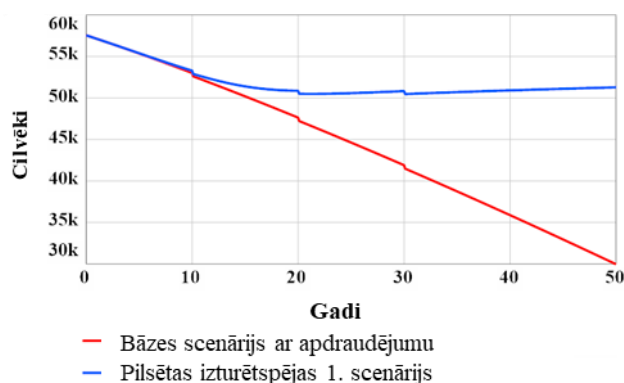


2.12. att. Pilsētas izturētspējas scenāriju rezultāti CO₂ emisiju komponentei.



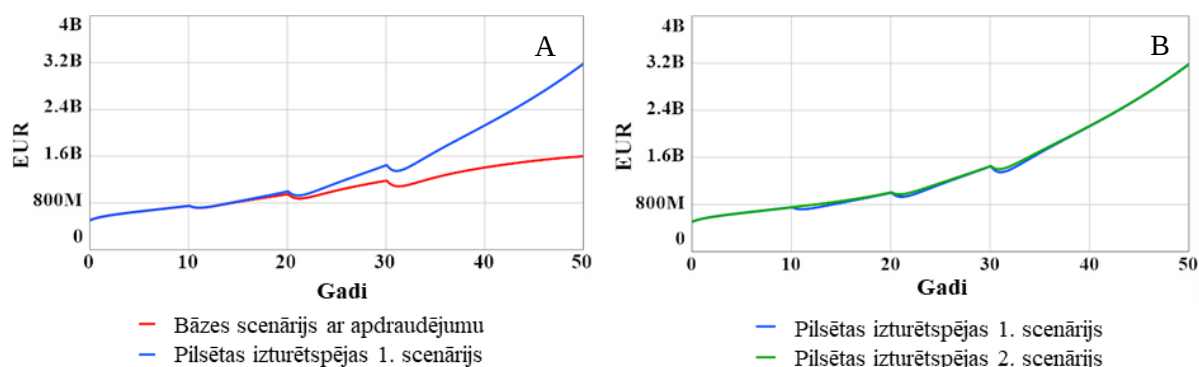
2.13. att. Pilsētas izturētspējas scenāriju rezultāti saražoto atkritumu un pārstrādāto atkritumu attiecības komponentei.

Saskaņā ar cēloņsakarību diagrammu, īstenojot politikas stratēģiju, kuras mērķis ir samazināt CO₂ emisijas un palielināt atkritumu pārstrādi, tiek aktivizēta atgriezeniskā saite ar pilsētu pievilcības komponenti. Tādējādi pilsētvides pievilcībai ir S veida pieaugums, kas attiecīgi rada pozitīvu ietekmi migrācijai uz pilsētu. Tā rezultātā ir novērojams iedzīvotāju skaita pieaugums pilsētas izturētspējas scenārijā 1 (2.14. att.). Pilsētu izturētspējas scenārijā 2 iedzīvotāju skaita pieaugums ir tāds pats kā pilsētas izturētspējas scenārijā 1.



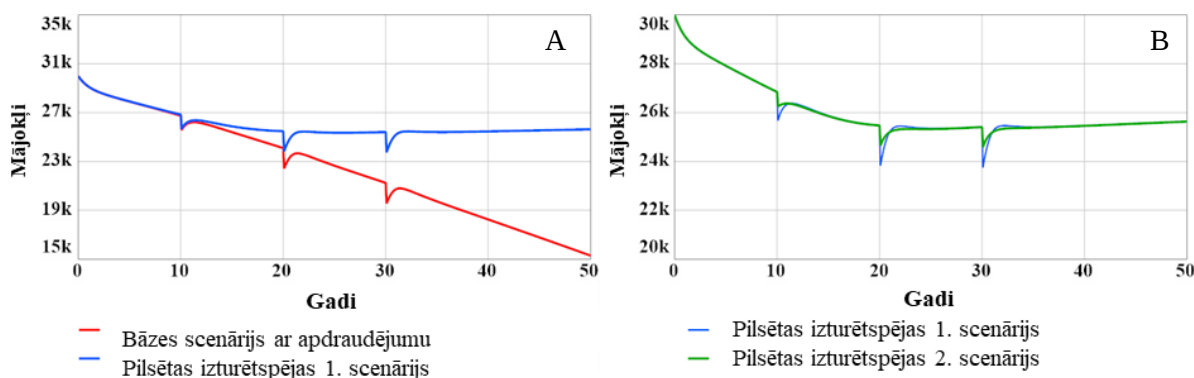
2.14. att. Pilsētas izturētspējas scenāriju rezultāti iedzīvotāju komponentei.

Iedzīvotāju skaita pieaugums ļauj palielināt nodarbinātības līmeni, kā arī ražošanas apjomu ekonomiskajā dimensijā, kas palielina IKP pilsētu teritorijā. IKP komponentes pieaugums iepriekš minētajiem scenārijiem parādīts 3.15. A un 3.15. B attēlā.

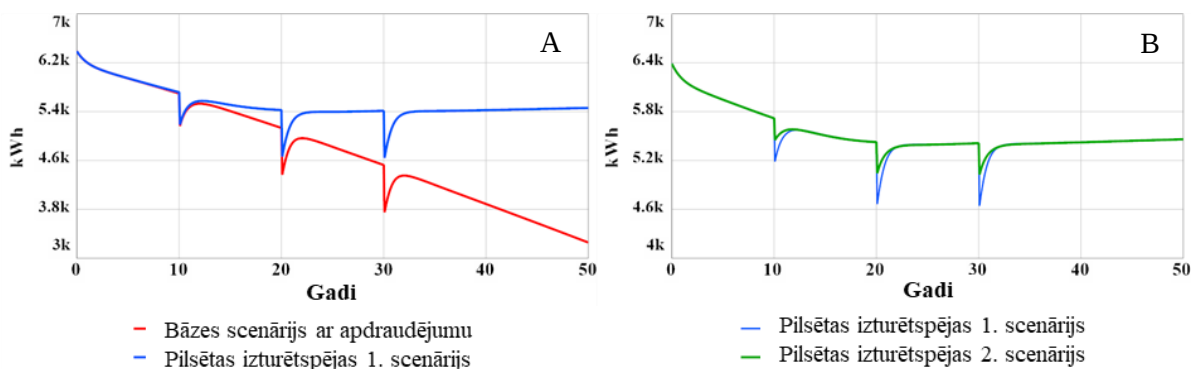


2.15. att. Pilsētas izturētspējas scenāriju rezultāti IKP komponentei.

Ņemot vērā pilsētu izturētspējas sistēmdinamikas modeļa infrastruktūras dimensiju, iedzīvotāju skaita pieaugums palielina arī pieprasījumu pēc infrastruktūras pakalpojumiem. Tādējādi palielinās arī pakalpojumu sniegšanas apjoms mājokļu, elektroenerģijas, siltumenerģijas, ūdens apgādes un notekūdeņu attīrīšanas pakalpojumu sniegšanas jomā. Infrastruktūras pakalpojumu skaita pieaugums mājokļu pakalpojumu jomā, ņemot vērā apdzīvoto mājokļu skaitu, parādīts 2.16. A un 2.16. B attēlā, siltumenerģijas komponentes dati – 2.17. A un 2.17. B attēlā.



2.16. att. Pilsētas izturētspējas scenāriju rezultāti mājokļu komponentei.



2.17. att. Pilsētas izturētspējas scenāriju rezultāti apkures komponentei.

Infrastruktūras dimensijas elektroenerģijas un siltumenerģijas komponentēm ir atgriezeniskā saite ar CO₂ emisiju komponenti, kas jau iepriekš ir parādīta 2.12. A un 2.12. B attēlā.

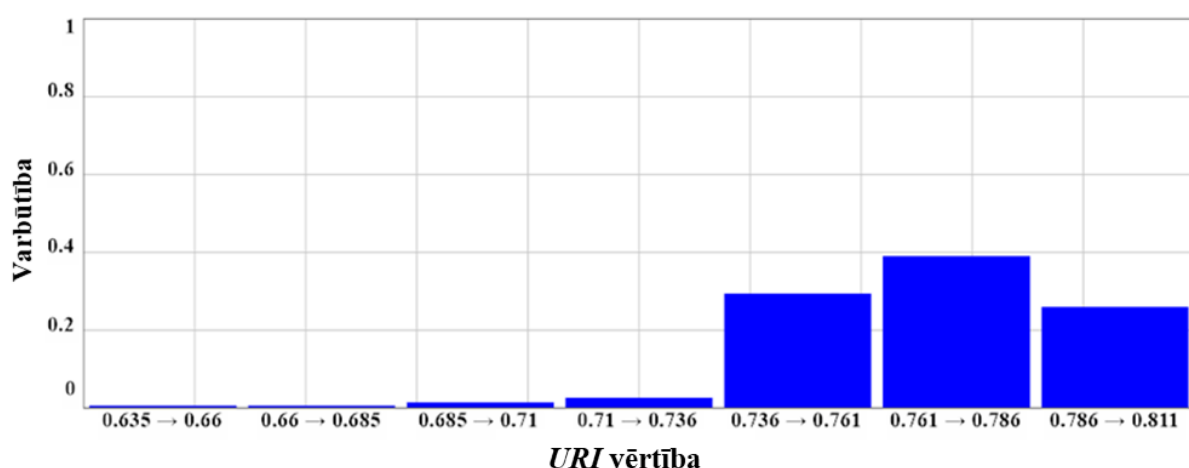
Novērotās tendences attiecībā uz dažādām pilsētu izturētspējas sistēmdinamikas modeļa daļām ir saskanīgas, ņemot vērā atgriezenisko saiti, pat ja izmaiņas tiek ieviestas iepriekš definētos parametros (2.3. tab.). Tādējādi sistēmdinamikas modelis ir piemērots turpmākam pilsētu izturētspējas novērtējumam ar pilsētu izturētspējas indeksu dažādiem izturētspējas scenārijiem.

Montekarlo simulācija pilsētu izturētspējas scenārijiem

Montekarlo simulācijas rezultāti tiek izmantoti, lai salīdzinātu dažādu pilsētu izturētspējas scenāriju iznākumus, kas veikti ar varbūtību simulāciju, ar pilsētu izturētspējas sistēmdinamikas modeļa rezultātiem. Rezultāti parāda varbūtību iegūt noteiktu kumulatīvu pilsētu izturētspējas indeksa rezultātu. Liela varbūtība, ka scenārijā tiks iegūts augsts pilsētu izturētspējas indeksa rezultāts, nozīmē, ka piemērotāks ir konkrētais pilsētu izturētspējas stratēģijas scenārijs.

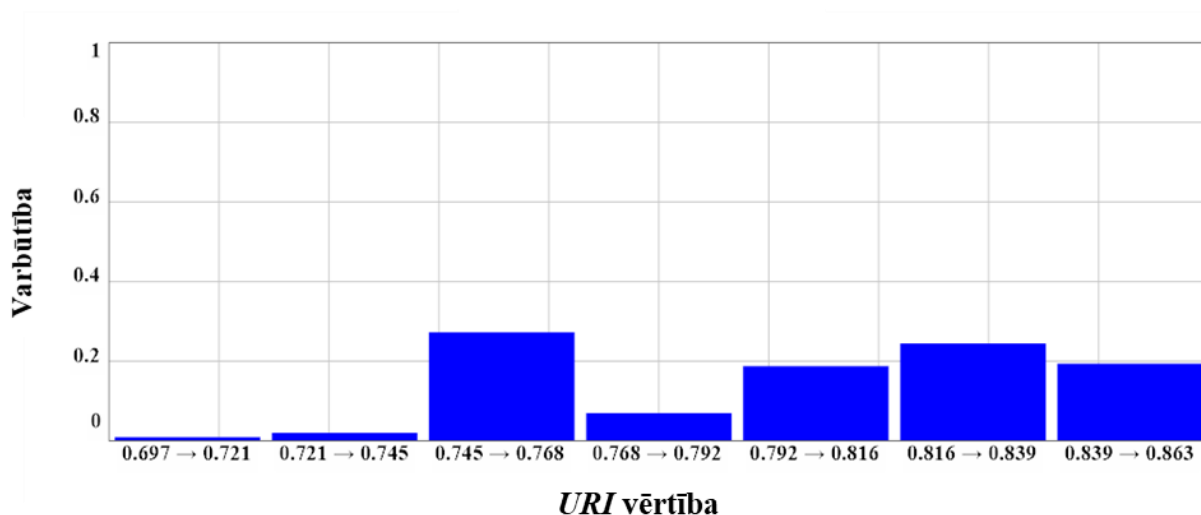
Novērtētais nepieciešamais mēģinājumu skaits Montekarlo simulācijas rezultātu 95 % ticamības līmenim katram scenārijam ir 286 atbilstoši 1.5. vienādojumam. Šī vērtība iegūta, ņemot vērā, ka maksimālais kumulatīvā *URI* vērtību skaits ir 1000, ar nosacījumu, ka *URI* vērtības ir no 0 līdz 1 ar trīs skaitļiem aiz komata.

Varbūtība iegūt noteiktu pilsētu izturētspējas indeksa rezultātu pamata scenārijā tiek aprēķināta pēc kumulatīvā pilsētu izturētspējas indeksa vērtību biežuma, izmantojot Montekarlo statistikas datus (vidējais aritmētiskais, mediāna, minimālās un maksimālās vērtības, standartnovirze un procentiļu diapazons) simulācijas (2.18. att.). Montekarlo simulācijas analīze parāda, ka kumulatīvā pilsētu izturētspējas indeksa vidējā aritmētiskā vērtība bāzes scenārijā ir 0.771.



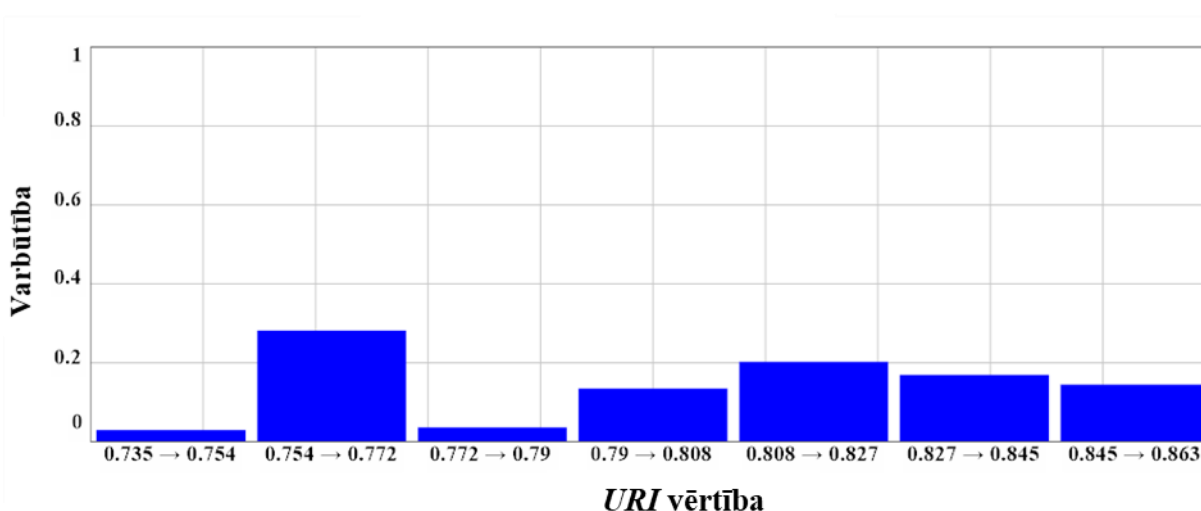
2.18. att. Varbūtības kumulatīvai *URI* vērtībai bāzes scenārijā ar apdraudējumu.

Kumulatīvā pilsētu izturētspējas indeksa rezultātiem pilsētu izturētspējas pirmajam scenārijam (2.19. att.), Montekarlo simulācijā vidējā aritmētiskā vērtība ir 0.802. Tādējādi saskaņā ar Montekarlo simulācijas statistikas datiem pilsētas izturētspējas pirmā scenārija kumulatīvā pilsētu izturētspējas indeksa vērtība ir ievērojami lielāka, salīdzinot ar bāzes scenārija (ar apdraudējumu) vērtību.



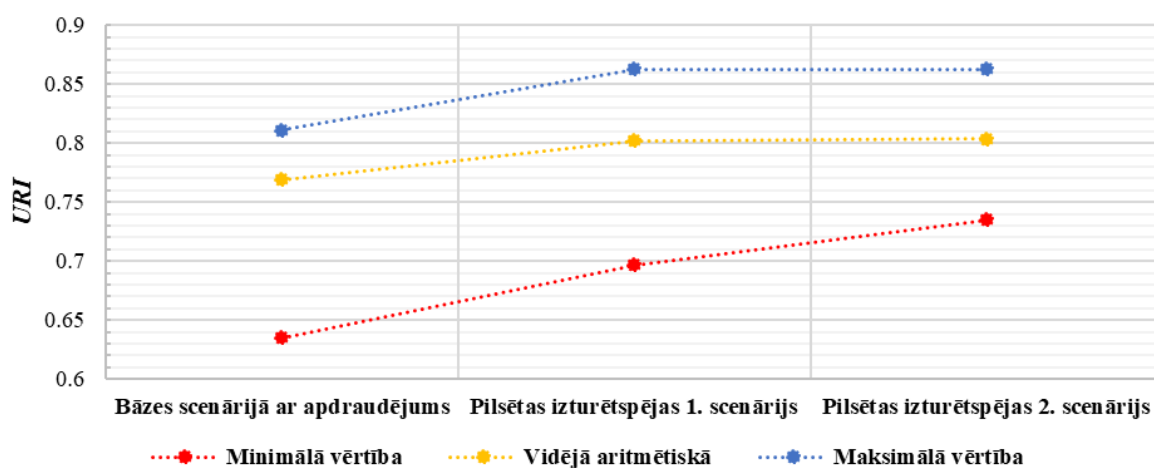
2.19. att. Varbūtības kumulatīvai *URI* vērtībai pilsētas izturētspējas pirmajā scenārijā.

Kumulatīvā pilsētu izturētspējas indeksa rezultātiem pilsētu izturētspējas otrajam scenārijam (2.20. att.), Montekarlo simulācijā vidējā aritmētiskā vērtība ir 0.803. Tādējādi saskaņā ar Montekarlo simulācijas statistikas datiem ir vērojams neliels kumulatīvā pilsētu izturētspējas indeksa vērtības pieaugums, salīdzinot ar pilsētas izturētspējas pirmo scenāriju.



2.20. att. Varbūtības kumulatīvai *URI* vērtībai pilsētas izturētspējas otrajā scenārijā.

Montekarlo simulācijas mēģinājumu kopsavilkums (95 % ticamības intervāls) dažādu scenāriju pilsētu izturētspējas indeksa minimālo, maksimālo un vidējo aritmētisko vērtību salīdzināšanai redzams 2.21. attēlā. Pilsētas izturētspējas pirmā un otrā scenārija kumulatīvo pilsētu izturētspējas indeksa minimālo un maksimālo vērtību pieaugums ir neliels, salīdzinot ar bāzes scenāriju (ar apdraudējumu). Tomēr pastāv ievērojama atšķirība starp kumulatīvo pilsētu izturētspējas indeksa vidējo aritmētisko vērtību starp pilsētas noturības scenārijiem un bāzes scenāriju.



2.21. att. Montekarlo simulāciju rezultātu kopsavilkums.

Montekarlo simulācijas rezultāti parāda, ka ir neliela atšķirība starp pilsētu izturētspējas pirmo un otro scenāriju. Nelielā atšķirība ir skaidrojama ar to, ka šajā gadījuma pētījumā apdraudējuma ietekmes komponentei tika izmantoti neīsti dati, kas balstīti uz apdraudēto iedzīvotāju daļu, nevis uz reāliem novērojumiem izvēlētajā pilsētā. Izturētspējas scenārijos aplūkoto politikas stratēģiju īstenošanas reālie ieguvumi var būt lielāki, nekā norādīts šajā pētījumā.

SECINĀJUMI

Promocijas darbā ir izstrādāts jauns rīks pilsētu izturētspējas pret dabas apdraudējumiem novērtēšanai. Rīks integrē trīs kvantitatīvās metodes: saliktais indikators, varbūtību simulācijas metode un sistēmdinamika. Lai metodes integrētu vienā rīkā, tās tiek pārbaudītas atsevišķās gadījumu izpētēs Latvijas kontekstā. Šo gadījumu pētījumu rezultāti ļauj izprast metožu trūkumus noturības novērtēšanā. Rīka saturs un struktūra ir apstiprināta, un dažādi pilsētu noturības scenāriji tiek pārbaudīti vietējā gadījuma izpētē Jelgavas pilsētā, izvēlētais dabas apdraudējums – pavasara plūdi.

Darba galvenie secinājumi

- Trīs metožu apvienotā indikatora, varbūtību simulācijas metodes un sistēmdinamikas integrēšana izstrādātajā rīkā ļauj pārvarēt katras metodes ierobežojumus, par kuriem ziņots literatūrā. Konkrēti, varbūtības simulācijas ieviešana sistēmdinamikas modelī ar rezultātu izvadi indeksa formā ļauj uztvert visus iespējamus pilsētas izturētspējas dažādu scenāriju iznākumus, ņemot vērā pilsētu dinamiskās izmaiņas. Tas ļauj veikt pilsētas izturētspējas dažādu scenāriju salīdzinājumu holistiskā veidā.
- Modeļa validācija un simulācijas rezultāti parāda, ka izstrādātais rīks ir piemērots dažādu pilsētu noturības scenāriju novērtēšanai gadījumu izpētē. Rīka daudzdimensionālitate un atgriezeniskās saites starp definētajām dimensijām ļauj uztvert kompromisus pilsētu izturētspējas stratēģijās, kas notiek starp dažādās pilsētas dimensijām.
- Izstrādātais pilsētas noturības rīks ir pietiekami jutīgs, lai uztvertu dažādu pilsētu izturētspējas stratēģiju ietekmi gan īstermiņā, gan ilgtermiņā, kā parādīts Jelgavas pilsētas gadījumu izpētes Montekarlo simulācijas rezultātu apkopojumā dažādiem pilsētu izturētspējas scenārijiem. Tādējādi rīku var izmantot pilsētas dažādu izturētspējas stiprināšanas stratēģiju salīdzināšanai, lai izprastu izvēlēto stratēģiju iespējamus kompromisus.
- Pilsētas izturētspējas dažādu scenāriju analīze rāda, ka ilgtermiņā ir ievērojams pilsētas izturētspējas pieaugums, ja izvēlētais pilsētas izturētspējas stratēģijas mērķis ir palielināt pilsētu pievilcību. Šāda stratēģija pozitīvi ietekmē sociālās neaizsargātības samazināšanos un tādējādi palielina pilsētu izturētspēju.
- Pilsētu izturētspējas dažādu scenāriju analīze parāda, ka ilgtermiņā ieguvumi, ko rada infrastruktūras neaizsargātības samazināšanās, nepārsniedz ieguvumu, ko dod sociālās neaizsargātības samazināšanās, drīzāk tā ir pievienotā vērtība ilgtermiņa sociālā labuma ieguvumiem. Samazinās neaizsargātība un līdz ar to arī pilsētu izturētspēja palielinās.

REKOMENDĀCIJAS

Izveidotais rīks ir piemērots definētajam mērķim. Turpmākajos pētījumos par dinamiskas pilsētu izturētspējas pret dabas apdraudējumu novērtēšanu jāņem vērā šī pētījuma rezultāti un vairāki ieteikumi.

- Izstrādāto rīku var izmantot plašākai politikas plānošanai, ņemot vērā, ka kompromiss starp īstermiņa un ilgtermiņa pilsētu noturības stratēģijām ir ierobežots līdz cēloņsakarībām, kas noteiktas modeļa dinamiskajā struktūrā.
- Veicot pilsētu izturētspējas scenāriju salīdzināšanu, lai novērtētu pilsētu izturētspējas stratēģijas, var tikt ieviesti papildu sistēmdinamikas apakšmodeļi. Piemēram, šādi apakšmodeļi var ietvert papildu infrastruktūru, piemēram, ceļus un telekomunikācijas, vai faktorus, kas ietekmē sociālo neaizsargātību, piemēram, izglītība, veselības aprūpes nozare un dažādas sociālās grupas.
- Pilsētas pievilcības ietekmes, kas aplūkotas izstrādātajā rīkā, ir jāpēta padziļināti citu pilsētu gadījuma izpētēs. Jāizpēta papildu faktori, kas ietekmē pilsētu pievilcību.
- Dabas apdraudējumu simulāciju veic ar varbūtības simulāciju, kurai ir noteikta neobjektivitāte paraugu ņemšanas procesā. Dabas apdraudējumi ir iepriekš definēti kā nejauši notikumi ar noteiktu varbūtību, kas nemainās pilsētas izturētspējas scenārijā. Dabisko apdraudējumu varbūtību dinamiskās izmaiņas var ieviest izstrādātā rīka modernākā versijā.
- Izstrādātais rīks ir ļoti atkarīgs no pieejamajiem datiem par pilsētu teritorijām. Datu pieejamība īstermiņa pilsētu izturētspējas novērtēšanai ir zema, lai precīzi salīdzinātu dažādus pilsētu izturētspēju scenārijus. Būtu jāuzlabo datu pieejamība par reaģēšanu uz katastrofām un atjaunošanas darbiem dažādās pilsētu infrastruktūrās, kā arī veicināt datu pieejamību *URI* rādītāju normalizēšanai. Tas ļautu plašāk izmantot rīku politikas plānošanā.

ATSAUCES

- [1] U. Ranke, *Natural disaster risk management: Geosciences and social responsibility*. 2016.
- [2] “EM-DAT, CRED / UCLouvain, Brussels, Belgium – www.emdat.be (D. Guha-Sapir)”.
- [3] A. Keating and S. Hanger-Kopp, “Practitioner perspectives of disaster resilience in international development,” *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 42, p. 101355, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.ijdr.2019.101355.
- [4] D. Gu, “Population Division Exposure and vulnerability to natural disasters for world’s cities*,” 2019. Accessed: Oct. 12, 2020. [Online]. Available: www.unpopulation.org.
- [5] T. Li, Y. Dong, and Z. Liu, “A review of social-ecological system resilience: Mechanism, assessment and management,” *Sci. Total Environ.*, vol. 723, no. 135, p. 138113, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138113.
- [6] J. W. Forrester, “Principle of Systems.” p. 197, 1961.
- [7] Blumberga, A., Blumberga, D., Bažbauers, G., Davidsen, P., Moxnes, E., Dzene, I., Barisa, A., Žogla, G., Dāce, E., Bērziņa, A. *System Dynamics for Environmental Engineering Students*. Rīga: Rīgas Tehniskās universitātes Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts. 2011.
- [8] D. Ozer, “Correlation and the Coefficient of Determination,” *Psychol. Bull.*, vol. 97, pp. 307–315, Mar. 1985, doi: 10.1037/0033-2909.97.2.307.
- [9] *Preliminary flood risk assessment for 2019-2024*. Latvian Environment, Geology and Meteorology Centre, 2019..
- [10] Yamane, *Statistics: An Introductory Analysis*. Harper & Row, 1967.