

**VIDZEMES AUGSTSKOLA
INŽENIERZINĀTŅU FAKULTĀTE**

Oskars JAVA

**IMITĒJOŠĀS MODELĒŠANAS UN SENSORU SISTĒMAS
PIELIETOŠANA EKOSISTĒMAS PĀRVALDĪŠANAI**

PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS

VALMIERA, 2021

Promocijas darbs izstrādāts:

**Vidzemes Augstskolas
Inženierzinātņu fakultātes
Doktora studiju programmā “Sociotehnisko sistēmu modelēšana”**

no 2017.gada līdz 2021.gadam.

Zinātniskais vadītājs:

Juris Binde

Dr.oec.

Vidzemes Augstskolas profesors

Zinātniskais konsultants:

Kaspars Osis

Dr.sc.ing.

Vidzemes Augstskolas asociētais profesors

NB Šis ir tikai kopsavilkums! Lai izprastu tematiku pilnībā, ieteicams iepazīties ar nesaīsināto promocijas darba versiju.

Iesniegts aizstāvēšanai Vidzemes Augstskolas Sociotehnisko sistēmu modelēšanas promocijas padomē 2022.gadā

ISBN 978-9984-633-70-1 druka

ISBN 978-9984-633-71-8 PDF

**PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS
ZINĀTNES DOKTORA (PHD) ZINĀTNISKĀ GRĀDA IEGŪŠANAI
VIDZEMES AUGSTSKOLĀ**

Promocijas darbs zinātnes doktora (PhD) zinātniskā grāda iegūšanai elektrotehnikas, elektronikas, informācijas un komunikācijas tehnoloģiju nozarē tiek publiski aizstāvēts 2022.gada 27.maijā plkst.10:00 Vidzemes Augstskolā, Inženierzinātņu fakultātē, Valmierā, Tērbatas ielā 10 T121 auditorijā.

RECENZENTI:

Dr.sc.ing. prof. Artis Teilāns
Rēzeknes Tehnoloģiju akadēmija, Latvija

Dr.sc.ing. Sergejs Kodors
Rēzeknes Tehnoloģiju akadēmija, Latvija

Dr.sc.ing. prof. Irina Arhipova
Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Latvija

PhD prof. Dmitrioss Mošu (Dimitrios Moshou)
Saloniku Aristoteļa universitāte (Aristotle University of Thessaloniki), Grieķija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Vidzemes Augstskolas zinātnes doktora (PhD) zinātniskā grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā augstskolā vai universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Oskars Java

Datums

SATURA RĀDĪTĀJS

IEVADS	5
1. EKOSISTĒMAS RAKSTUROJUMS	14
2. HIDROLOĢISKO MODEĻU UN PROCESU PRIEKŠIZPĒTE.....	16
3. PURVU HIDROLOĢISKO SISTĒMU IMITĒJOŠĀ MODEĻA IZVEIDE	18
3.1. Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa matemātiskais formulējums	23
3.2. Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa veikspējas pārbaude	28
3.3. Hidroloģisko modeļu salīdzinājums	33
4. SENSORU SISTĒMAS IZVEIDE IEEJAS DATU IEGŪŠANAI IMITĒJOŠO MODEĻU EKOSISTĒMU PĀRVALDĪŠANAS VAJADZĪBĀM.....	36
5. DARBA EKONOMISKAIS UN SOCIOTEHNISKAIS PAMATOJUMS	39
SECINĀJUMI	42
IZZIŅAS AVOTI	47

IEVADS

Promocijas darba nosaukumā ietvertie jēdzieni “imitējošā modelēšana”, “sensoru sistēma”, “ekosistēma” un “pārvaldīšana” ir plaši interpretējami atkarībā no izmantojamās jomas, mijiedarbības un konteksta. Darba ievadā autors sniedz šo jēdzienu izpratni, mijiedarbību un interpretāciju promocijas darba ietvaros un kontekstā. .

Pirmais nosaukumā ietvertais termins ir “imitējošā modelēšana”. Imitējošā modelēšana ir reālas sistēmas modeļa atveidošana, attēlojot tai raksturīgās pazīmes un norises matemātiskā formā, lai pētīt sistēmas īpašības un darbības raksturlielumus, izdarītu secinājumus un pieņemtu lēmumus par šādu sistēmu ieviešanu vai uzlabošanu (Ozoliņa, 2021). Tas pasaka, ka promocijas darba centrā ir kāda reāla sistēma, kas izteikta matemātiskos vienādojumos un izteiksmēs, ar kuru palīdzību iespējams izspēlēt dažādus pārvaldīšanas scenārijus, lai (šajā gadījumā) sistēmu uzlabotu (degradētu atgrieztu dabīgā stāvoklī). Informācijas tehnoloģijas ir instrumenti, kurus lieto vai rada, lai risinātu problēmas, kas interesē visu nozaru speciālistus (Kuļikovskis, 2015) un imitējošā modelēšana ir viens no šiem instrumentiem. Imitējošā modelēšana ir sistēmas pārvaldīšanas process ar piemērotiem ieejas datiem un izejas datu novērtēšanu un analīzi (Yin & McKay, 2018). Piemērotus sistēmas datus iespējams nodrošināt izmantojot vides sensorus.

Otrais termins ir “sensoru sistēma”. Sensoru sistēma ir vairāki sensori, kas apvienoti vienā vienībā ar vienotu signāla apstrādes aparāturu un piekļuves saskarni (van Zyl, Simons, & McFerren, 2009). Sensoru sistēma ar datoru un sakaru līdzekļu starpniecību nodrošina jēldatu iegūšanu, glabāšanu, apstrādi un nosūtīšanu imitējošo modeļu ekosistēmu pārvaldīšanai vajadzībām. Sensoru sistēma pieskaitāma pie informācijas un komunikācijas tehnoloģijām, jo tā ir zināšanu, metožu, paņēmienu un tehniskā aprīkojuma kopums, kas ar datoru un sakaru līdzekļu starpniecību nodrošina informācijas iegūšanu, glabāšanu un izplatīšanu (Kuļikovskis, 2015). Imitējošo modeļu ieejas dati bieži ir balstīti uz objektīviem datiem, piemēram, tiek savākti no sistēmas, kura tiek modelēta (Yin & McKay, 2018) un bez sensoru sistēmas, kas datus iegūst tieši no sistēmas, tās imitējošā modeļa izveide var būt apgrūtināta, jo bieži trūkst kvalitatīvu *in situ* datu modeļu darbināšanai.

Trešais nosaukumā ietvertais termins ir “ekosistēma” – funkcionāla dabas vides sistēma, kurā ietilpst noteiktā teritorijā sastopamie augi, dzīvnieki un mikroorganismi un to eksistences vide (Baldunčika, 2007). Ekosistēmā pastāv līdzsvars, tā ir stabila, kamēr neiejaucas cilvēks vai dabas stihija (Bērziņa, 2008). Ekosistēmai ir pielāgošanās un pašregulācijas spēja (Bērziņa, 2008). Promocijas darba kontekstā, jāņem vērā, ka pirmā termina “imitējošā modelēšana” skaidrojumā minētā “reālā sistēma” šeit un tālāk tiek saprasta kā ekosistēma. Autora izstrādātais

purva hidroloģiskās sistēmas imitējošais modelis imitē purva ekosistēmas hidroloģisko sistēmu un procesus, jo tieši atbilstošs hidroloģiskais līmenis ir galvenais priekšnosacījums, lai degradētā purvā atgrieztos tam raksturīgā flora un fauna, kas ir divi galvenie dabīga purva ekosistēmu raksturojošie faktori. Detalizēts šīs ekosistēmas izklāsts, kas to raksturo, atšķir no citām dabas ekosistēmām un padara par unikālu, neatkārtojamo un vērtīgu, pieejams promocijas darba pirmajā nodaļā.

Ceturtais būtiskais termins ir "pārvaldīšana". Pārvaldīšana ir kāda objekta pārraudzīšana, vadīšana atbilstoši īpašnieka mērķiem, stratēģijai, ievērojot taupības režīmu, saimnieciskumu u.c. (Kvēle, 2005). Būtībā tā ir lēmumu pieņemšana, lai izvēlētos labāko pārvaldības veidu. Problēmu risināšanā un lēmumu pieņemšanā arvien vairāk tiek izmantoti imitējošie modeļi (Sarget, 2011). Modelēšana un imitācija ietver reālās pasaules sistēmas modeļa izstrādi, eksperimentu ar modeli veikšanu, lai iegūtu izpratni par sistēmas darbību dažādos apstākļos, alternatīvu pārvaldības stratēģiju novērtēšanu un lēmumu pieņemšanas procesus (Yin & McKay, 2018). Promocijas darba mērķis ir ar modelēšanas un imitācijas metodēm izstrādāt purva hidroloģiskās sistēmas imitējošo modeli mežaudzes koku vainagu seguma ietekmes uz ekosistēmas ūdens bilanci novērtēšanai un tā izmantošanas metodoloģiju, bet izvērstā 3.3.4.apakšnodaļa, kurā detalizēti aprakstīta purva hidroloģiskās sistēmas imitējošā modeļa darbības pārbaude un izdarītie secinājumi par ekosistēmas darbību, ir validācijas pieeja, praktiski pārbaudot tā darbību un, ar mainīgo izkliedes un prognozēšanas kļūdas standarta novirzes noteikšanu, parādot tā darbības augsto precizitāti un piemērotību ekosistēmas pārvaldīšanai.

Šis ir starpdisciplinārs promocijas darbs, kura autors tā tapšanas laikā ir pielietojis ne tikai savas zināšanas elektrotehnikā, elektronikā un informācijas un komunikācijas tehnoloģijās, bet arī papildus apguvis zināšanas bioloģijā, ģeoloģijā, hidroloģijā, hidraulikā un meteoroloģijā. Promocijas darbs apraksta sensoru sistēmas izveidi jēldatu iegūšanai imitējošās modelēšanas vajadzībām, datu apstrādi un purva ekosistēmas hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa BogSim izveidi, kas ir pamats sensoru sistēmas izveidei, jo sensoru sistēma risina kvalitatīvu ieejas datu pieejamību ekosistēmas imitējošo modeļu vajadzībām. Promocijas darbā modelētā ekosistēma ir purva hidroloģiskā sistēma, jo tieši atbilstošs gruntsūdens līmenis ir galvenais priekšnosacījums, lai degradētā augstajā purvā atjaunotos ekosistēmai raksturīgā, jutīgā flora un fauna.

Purva hidroloģisko sistēmu imitējošais BogSim modelis ar informācijas tehnoloģiju palīdzību risina problēmas, kas interesē citu nozaru speciālistus. Purva hidroloģisko procesu dinamiskās īpašības tiek atspoguļotas ar atbilstošiem matemātiskiem vienādojumiem, kas ļauj precīzi veikt

dažādus analītiskus aprēķinus, kas saistīti ar ūdens plūsmām purva ekosistēmā. Tiek piedāvāta metodika, kā aprēķinu veikšanai nepieciešamo purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli izveidot sistēmu dinamikas vidē. Šīs pieejas priekšrocība ir tā, ka tā ļauj uzskaitīt visas darbības, kas norit katrā no ekosistēmas daļām atkarībā no ieejas datiem un ūdens deficīta katrā no tvertņēm, novirzot plūsmas tā, kā tas notiek dabā. Autora piedāvāto purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli var izmantot kā inženiertehnisku rīku, kas palīdz izprast purvu ekosistēmas nelineāros un sarežģītos hidroloģiskos procesus, lēmumu pieņemšanai par to pareizu apsaimniekošanu, apmācībai un citiem mērķiem. BogSim imitējošā modeļa darbības verifikācijai ir izmantoti neskartā Mannikjarve purva, kas atrodas Igaunijas austrumu daļā, jēldati, bet validācijai, Somā Nacionālā parka, kas dislocēts Igaunijas dienvidrietumu daļā, degradētās purva daļas jēldati.

Sensoru sistēmas izveide ietver metodoloģiju, kā ar datoru un sakaru līdzekļu starpniecību nodrošināt jēldatu iegūšanu, glabāšanu, apstrādi un nosūtīšanu imitējošo modeļu ekosistēmu pārvaldīšanai vajadzībām. Tiek aprakstīta programmatūra un aparatūra, sensoru sistēmas arhitektūra un jēldatu apstrādes un ieejas datu izplatīšanas skripts, kas padara iespējamu NB-IoT sensoru sistēmas fizisku izveidi.

Zinātniskā novitāte

Šobrīd ir izstrādāti un pieejami vairāki hidroloģiskos procesus imitējošie modeļi. Kā jau modeļi, tie ir vienkāršots realitātes atspoguļojums, kas ir noderīgi liela mēroga modelēšanā, bet nespēj precīzi (tuvu procesiem dabā) attēlot visas tik specifiskās hidroloģiskās sistēmas kā purva ekosistēma ūdens plūsmas, kas ir vitāli svarīgas reģionāla līmeņa modeļos.

Šī pētījuma zinātniskā novitāte ietver šādus aspektus:

1. Darba autors ir izpētījis un salīdzinājis esošos hidroloģiskos modeļus, kas ļāva identificēt to trūkumus un koncentrēties uz to izskaušanu jaunās pieejas izstrādē. Autora izstrādātā purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa pieeja ļauj uzskaitīt dinamiskās sistēmas īpašības.
2. Autora piedāvātā metodoloģija sniedz precīzākus rezultātus nekā esošās pieejas, jo īpaša uzmanība pievērsta parametriem, kas citos hidroloģiskajos modeļos nav attēloti tik augstā detalizācijas līmenī vai arī vispār nav ņemti vērā. Šie parametri ir ar veģetāciju saistītās ūdens bilanci ietekmējošās ekosistēmas īpašības kā intercepcija un transpirācija, kas vairumā hidroloģisko modeļu nemaz nav iekļautas.
3. Esošie hidroloģiskie modeļi katram no augsnes tipiem izmanto vienu hidrauliskās vadītspējas proporcionalitātes konstanti, tāpēc par darba autora purva hidroloģisko

sistēmu imitējošā modeļa metodoloģijas novitāti uzskatāma arī akrotelma dinamiskās hidrauliskās vadītspējas ieviešana. Akrotelma dinamiskā hidrauliskā vadītspēja nozīmē, ka ūdens infiltrācijas ātrums kūdras slānī samazinās palielinoties attālumam līdz zemes virskārtai, līdz tiek sasniegts katotelms, savukārt katotelmā hidrauliskā vadītspēja saglabājas konstanta.

4. Darba autors izstrādāja vairākas loģiskās izteiksmes un vienkāršotu ūdens perkolācijas devona smilšakmens slānī pieeju, kā rezultātā ir uzlabota modeļa darbības precizitāte.
5. Izstrādātais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis ir testēts divās sistēmu dinamikas vidēs, *Stella Architect* un *Insight Maker*, kas ļāva identificēt būtiskas atšķirības starp maksas un bezmaksas produktu;
6. Autora piedāvātā metodoloģija ietver izstrādātu NB-IoT sensoru sistēmu un skaidri izklāstītu tās darbību un uzbūvi, tajā skaitā programmatūru un aparatūru, kas ļauj iegūt *in situ* jēldatus hidroloģisko un citu vidi imitējošo modeļu vajadzībām, apstrādi, glabāšanu mākoņserverī un izplatīšanu, risinot kvalitatīvu ekosistēmas un vidi imitējošo modeļu ieejas datu pieejamības problēmu.

Praktiskā nozīme

1. Autora piedāvātā metodoloģija ļauj ātrāk un efektīvāk atjaunot purva ekosistēmas ūdens bilanci, tādējādi palielinot dabas daudzveidību, atjaunojot ūdens ciklu, uzlabojot vietējo iedzīvotāju dzīves kvalitāti un veicinot rekreācijas iespējas. Purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis izmantojams kā mācību rīks vides zinātņu apmācības procesā;
2. Izstrādātais NB-IoT sensoru sistēma risina problēmu ar *in situ* jēldatu pieejamību vidi imitējošo modeļu vajadzībām;
3. Gan autora izstrādātais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis, gan sensoru sistēma kvalitatīvu datu ievākšanai ir atkārtojami un replicējami, koncepts izmantojams citiem modeļiem līdzīgās ekosistēmās.

Zinātniskie rezultāti eksperimentāli pārbaudīti, izmantojot sistēmu dinamikas modelēšanas rīkus. Autora izstrādātais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis *Insight Maker* vidē pieejams brīvpieejā tiešsaistē <https://insightmaker.com/insight/201089/Bog-hydrology-model>.

Pētījuma objekts

Ekosistēmas pārvaldīšana izmantojot informācijas un komunikācijas tehnoloģijas.

Pētījuma priekšmets

Imitējošais modelis un jēldatu ieguve, apstrāde un izmantošana ekosistēmas pārvaldīšanai.

Pētījuma mērķis

Pētījuma mērķis ir izstrādāt imitējošo modeli un sensoru sistēmu ekosistēmas pārvaldīšanai.

Darba uzdevumi:

- Definēt ekosistēmu un to raksturojošās īpatnības, kas to atšķir no citām ekosistēmām;
- Apzināt esošos modeļus, kas izmantojami hidroloģisko režīmu imitēšanai;
- Izpētīt elementus, kas veido ekosistēmu un mijiedarbojas viens ar otru;
- Izstrādāt purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli un tā pielietošanas metodoloģiju;
- Novērtēt izstrādātā purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa darbību un veiktspēju sistēmu dinamikas vidē;
- Apzināt IoT un tīkla tehnoloģijas, kas varētu kalpot *in situ* sensoru sistēmas izstrādei;
- Izstrādāt *in situ* sensoru sistēmu, kas autonomi ievāc jēldatus, tos apstrādā un nosūta uz datu mākonī, kur tie tiek pārveidoti imitējošo modeļu ekosistēmu pārvaldīšanai nepieciešamā ieejas datu formātā.

Hipotēze:

In situ sensori dati apvienojumā ar purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli un tā izmantošanas metodoloģiju hidroloģijas, ģeoloģijas un bioloģijas ekspertiem, kā arī iesaistītajām pusēm un lēmumu pieņēmējiem sniedz iespēju uzskatāmi novērtēt mežaudzes apjoma ietekmi uz purva ūdens bilanci, un skaidrot ekosistēmas atjaunošanas nozīmi un ietekmi uz vidi.

Metodes

Promocijas darbā izmantotas šādas metodes:

1. Teorētiskās metodes – veikta sistemātiska zinātnisko rakstu, grāmatu, administratīvo dokumentu un elektronisko resursu izpēte un analīze;
2. Datu ieguves metodes – netiešos novērojumos ar Mannikjarve un Somā purvos Igaunijā izvietoto aparatūru iegūti meteoroloģiskie, gruntsūdens līmeņa un ranžēšanas sensoru LIDAR dati;
3. Datu analīzes metodes – primārās matemātiski statistiskās metožu izmantošana gruntsūdens līmeņa mērījumu un imitāciju datu sadalījuma, vidējo vērtību, standarta novirzes, kļūdas robežas noteikšanai; sekundāro matemātisko statistisko metožu izmantošana korelācijas, kvadrāta regresijas un neatkarības noteikšanai;

4. Rezultāta novērtēšana – purva hidroloģisko sistēmo imitējošā modeļa verificēšana, salīdzinot tā izejas datu punktus ar neskarta augstā purva gruntsūdens līmeņa datiem;
5. Eksperimenti – inženiertehniskā risinājuma izstrādāšana purva hidroloģiskās sistēmas imitēšanai, izmantojot sistēmu dinamikas modelēšanas metodes, ar kuru fiksēt visus parametrus un pa vienam mainīt, lai novērotu to ietekmi uz izmaiņām gruntsūdens līmeni. Eksperimentu veikšana izmantojot vairāku degradēta purva nogabalu datus, kur manipulācijas ar mežaudzes retināšanu un/vai meliorācijas grāvju aizbēršanu, ar mērķi atjaunot purva dabisko hidroloģisko režīmu, veiktas dabā.

Pētījuma veikšanas periods

Pētījums tika veikts no 2017.gada septembra līdz 2021.gada augustam.

Aprobācija

Par zinātniskā darba rezultātiem ziņots:

1. The specification of hydrological model requirements for bog restoration. 25.-26.04.2019. International Scientific Conference SOCIETY. TECHNOLOGY. SOLUTIONS. Valmiera, Latvija
2. Bog restoration for greenhouse gas emissions sequestration and climate change mitigation, 2.-5.10.2018, AgroEco 2018, Kauņa, Lietuva
3. Why should degraded high bogs be restored? 24.-26.08.2018, International Smithy of Ideas 2018, Pluņģe, Lietuva
4. Restoration of degraded bog hydrological regime using system dynamics modelling, 21.-23.03.2018, International Conference on Innovations in Science and Education, Prāga, Čehija
5. Significance of thinning degraded swamps forest stands in sustainable ecosystem`s development, 23.-24.11.2017, Rural Development 2017, Kauņa, Lietuva
6. Degraded swamps hydrological regime restoration using system dynamics modelling. 13.14.10.2017. 58th International Scientific Conference SCEE`2017, Rīga, Latvija
7. The forest stand`s crown cover impact on the water balance of swamp`s ecosystem, 17.-19.05.2017, Research for Rural Development 2017, Jelgava, Latvija

Publikācijas:

1. Java, O., Kohv, M., Lohmus, A. (2021). Performance of a Bog Hydrological System Dynamics Simulation Model in an Ecological Restoration Context: Soomaa Case Study,

- Estonia. *Water*, 13(16), 1-13, DOI: 10.3390/w13162217 (Publikācija indeksēta Scopus un Web of Science)¹
2. Java, O., Sigajevs, A., Binde, J., Kepka, M. (2021). NB-IoT Sensor Network for Obtaining the Input Data for Hydrological Simulation Model. *Agris On-line Papers in Economics and Informatics*, 13(1), 59-69, DOI: 10.7160/aol.2021.130105 (Publikācija indeksēta Scopus)²
 3. Java, O., Kohv, M., Lõhmus, A. (2020). Hydrological model for decision-making: Mānikjārve bog case study, Estonia. *Baltic Journal of Modern Computing*. 8 (2020), No. 3, 379-390, DOI: 10.22364/bjmc.2020.8.3.01 (Publikācija indeksēta Scopus un Web of Science)³
 4. Java, O. (2020). The Specification of Hydrological Model Requirements for Bog Restoration. *Baltic Journal of Modern Computing*. 8 (2020), No. 2, 164-173, DOI: 10.22364/bjmc.2020.8.1.11 (Publikācija indeksēta Scopus un Web of Science)
 5. Java, O. (2018). Restoration of a degraded bog hydrological regime using system dynamics modelling, *CBU International Conference on Innovations in Science and Education*, Prague, Czech Republic, DOI: 10.12955/cbup.v6.1301 (Publikācija indeksēta Web of Science)
 6. Java, O. (2017). Significance of thinning degraded swamps forest stands in sustainable ecosystem`s development, *Proceedings of Rural Development 2017*, Kaunas, Lithuania, DOI: 10.15544/RD.2017.104 (Publikācija indeksēta Web of Science)

Zinātniskās pētniecības projekti

Izstrādātā metodoloģija jau promocijas darba izstrādes laikā tika pielietota starpdisciplinārā Eiropas Savienības pētniecības un inovāciju atbalsta programmas “Apvārsnis 2020” zinātnes pētniecības projektā “reSilienT fARminG by Adaptive microclimaTe managEment (STARGATE)” (projekta Nr.818187, 01.10.2019 - 30.09.2023), novērtējot izstrādātās tehnoloģijas un tās validējot. Projektā ir izmantota autora izstrādātā metodoloģija sensoru datu pārveidošanai formātā, kas nepieciešama, lai tos automātiski pārveidotu atbilstošos sistēmu dinamikas imitējošā modeļa ieejas datus, un princips ūdens plūsmas augsnē aprēķināšanai.

¹ O.J. ierosināja pamatteksta ideju, sagatavoja manuskriptu, izstrādāja jaunu perkolācijas smilšakmenī pieeju, veica modeļa pārbaudi un deva ieguldījumu tabulu un attēlu izveidē. M.K. nodrošināja hidroloģiskos un meteoroloģiskos datus, deva piensumu pamattekstam un attēliem. A.L. nodrošināja veģetācijas datus un deva piensumu pamattekstam un tā atbilstošai strukturēšanai.

² O.J. ierosināja pamatteksta ideju, sagatavoja manuskriptu, izstrādāja sensoru sistēmas arhitektūru, izstrādāja attēlus un tabulas. A.S. deva piensumu sensoru sistēmas arhitektūras izstrādei un nodrošināja sensoru datus. J.B. deva piensumu pamattekstam un tā atbilstošai strukturēšanai. M.K. deva piensumu pamattekstam.

³ O.J. ierosināja pamatteksta ideju, sagatavoja manuskriptu, izstrādāja attēlus un tabulas. M.K. nodrošināja hidroloģiskos un meteoroloģiskos datus un deva piensumu pamattekstam. A.L. nodrošināja veģetācijas datus.

Promocijas darba noslēguma posmā kopā ar Vidzemes Augstskolas Virtuālās un papildinātās realitātes laboratoriju tika uzsākts Fundamentālo un lietišķo pētījumu projektu programmas pētniecības projekts “Purvu hidroloģisko režīmu reāllaika un imitāciju datu vizualizācija virtuālā realitātē” (projekta Nr.lzp-2020/2-0396, 01.12.2020 – 31.12.2021), kura ietvaros autora izstrādātā un ar eksperimentālām metodēm sistēmu dinamikas vidē pārbaudītā purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa metodoloģija tika pielietota, lai izveidotu purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli *Python* skriptā, kas ūdens plūsmas ekosistēmā aprēķinās vairs nevis vienā, bet divās dimensijās. Lai lietotājiem būtu iespējams ar purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli iedarboties un iepazīties ar tā izejas datiem interaktīvā un viegli saprotamā veidā, izmantojot *Unity* starp-platformu spēļu dizainu, tas tiks apvienots ar virtuālās realitātes vidi.

Jau pēc promocijas darba izstrādes, darba autora izstrādātā sensoru sistēmas metodoloģija tiek pielietota Eiropas Savienības programmas “Erasmus+” Eiropas universitāšu projekta “Engaged and Entrepreneurial European University as Driver for European Smart and Sustainable Regions (E³UDRES²)” (projekta Nr.101004069, 01.10.2020 – 30.09.2023) iekšējā pētniecības projekta “Multi-Sensor Monitoring for Smart and Sustainable Farming in Europe (MULTISENS²E)” (01.10.2021 – 30.09.2023) ietvaros. Tiek strādāts pie tā, lai sensoru sistēmu pielāgotu lauksaimniecības vajadzībām, kā arī papildinātu ar mašīnmācīšanās algoritmiem trokšņu identificēšanai un interpolēšanai, sensoru automātiskai kalibrēšanai, savlaicīgai bojātu sensoru identificēšanai u.c.

Darba struktūra

Promocijas darbu veido ievads, 5 nodaļas, secinājumi un izziņas avoti. Promocijas darba pamatteksts ir 128 lappuses, tajā skaitā 8 tabulas, 27 attēli. Promocijas darbs ir papildināts ar 6 pielikumiem, kas ietver (1) sensoru datu apstrādes *Python* skriptu, (2) jaukto koku meža ūdens bilanci Karpatu kalnos, (3) augsnes īpašību tabulu, (4) ARSENAL sensorsistēmu kopējo darbības diapazonu, (5) purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa grafisko attēlojumu un (6) purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa *Stella Architect* vienādojumu pārskats. Bibliogrāfijas sarakstā ir 220 informācijas avoti.

Promocijas darbs izstrādāts, lai izstrādātu imitējošo modeli ekosistēmas pārvaldīšanai, praktiski pielietojot, pārbaudītu tā darbību un piedāvātu NB-IoT sensoru sistēmu kā rīku kvalitatīvu jēldatu iegūšanai imitējošo modeļu vajadzībām.

Darba pirmajā nodaļā tiek definēta ekosistēma, norādot uz tās galvenajām unikālajām īpašībām, kas to atšķir no citām dabas ekosistēmām un padara par tādu, kas būtu atjaunojuma, sniedzot pamatojumu tās hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa izveidei.

Otrajā nodaļā tiek veikta esošo hidroloģisko modeļu un imitējošo modeļu pielietošanas degradētu purvu atjaunošanas darbos priekšizpēte. Priekšizpēte ļauj apzināt iepriekš paveikto un identificēt apstākļus, kuriem jāpievērš pastiprināta uzmanība, lai izstrādātu purva ekosistēmas imitēšanai piemērotu hidroloģisko modeli.

Trešajā nodaļā darba autors pievēršas praktiskai purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa izveidei, sākot ar prasību specifiskāciju, modeļa matemātisko formulējumu, kas noved pie modeļa izveides sistēmu dinamikas vidē. Sākotnēji autora izstrādātais BogSim imitējošais modelis tiek izveidots gan *StellaArchitect*, gan *Insight Maker* vidē, kam seko padziļināta modeļa darbības pārbaude piecos Somā purva parauglaukumos Igaunijā. Nodaļā visi soļi ir detalizēti aprakstīti, kas kalpo par metodoloģija purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa atkārtotai izveidošanai un darbināšanai.

Ceturtajā nodaļa veltīta sensoru sistēmas izveidei ieejas datu iegūšanai imitējošo modeļu ekosistēmu pārvaldīšanai vajadzībām. Nodaļā aprakstītas atbilstošas tīkla tehnoloģijas izvēle, kas sniedz pietiekamu pārklājumu, lai NB-IoT sensoru sistēmu būtu iespējams novietot pat visattālākajā un grūtāk sasniedzamajā Latvijas nostūrī, un dati sasniegtu mākoņserveri. Nodaļas turpinājumā tiek aprakstītas NB-IoT sensoru sistēmas komponentes, darbības princips, arhitektūra un iegūto jēldatu apstrāde, lai tos pārveidotu ekosistēmu imitējošā modelī izmantojamus ieejas datus.

Piektajā nodaļā autors sniedz darba ekonomisko un sociotehnisko pamatojumu.

Lai nodaļās apkopoto informāciju padarītu vieglāk uztveramu, tās pēc vajadzības ir strukturētas līdz pat trīs līmeņu apakšnodaļās.

1. EKOSISTĒMAS RAKSTUROJUMS

Tāpat kā koraļļu rīfi, purvi ir īpašas zemes formas, jo tie galvenokārt veidojas bioloģisku, nevis fizisku procesu rezultātā, un tie paši veido virsmai raksturīgo formu un raksturu.

Purvs ir zemes virsmas nogabals, kuram raksturīgs pastāvīgs vai ilgstošs mitrums, specifiska augu valsts un kūdras veidošanās. Purvi veidojas apstākļos, kad nokrišņu daudzums pārsniedz iztvaikojumu. Purvu veidošanos veicina arī viļņotais reljefs un mālaini, vāji caurlaidīgi nogulumi, kādi raksturīgi lielā daļā Latvijas (Priede, Jātnieks, Kļaviņa, & Urtāns, 2017).

Degradētie augstie purvi ir tie augstie purvi, kuros izmainīts dabiskais hidroloģiskais režīms vai tie daļēji izmantoti kūdras ieguvei, bet kuros iespējams atjaunot hidroloģisko režīmu un kūdras veidošanās ir sagaidāma 30 gadu laikā (Auniņš, et al., 2010). Purvu degradācijai par pamatu ir meliorācijas grāvju izrakšana. Izrokot purvos grāvjus notiek pastiprinātas gruntsūdens līmeņa svārstības, kuras netraucētos purvos svārstās 0.2-0.5 metrus zem zemes virsmas (Vides risinājumu institūts, 2014). Turpretī traucētos hidroloģiskā režīma apstākļos gruntsūdens līmeņa gada svārstības var sasniegt vienu metru (Vides risinājumu institūts, 2014).

Hidroloģiskā režīma atjaunošana kavē strauju koku augšanu un nodrošina kūdras augsnes veidošanos – biotopam raksturīgos procesus, kas izmainītā hidroloģiskā režīma dēļ ir daļēji vai pilnībā apturēti (Vides risinājumu institūts, 2014). Hidroloģiskā režīma atjaunošanu var paātrināt, piepildot meliorācijas grāvjus un, ja teritoriju klāj mežaudze, nocērtot daļu no kokiem. Mežaudzes retināšana var būt nepieciešama hidroloģiskā režīma atjaunošanai, jo transpirācija no mežaudzes mērenajā klimata joslā var sasniegt līdz 35% no kopējo nokrišņu masas (Mind'āš, Škvarenina, & Střelcová, 2006), kalpojot par faktoru, kā ietekmē iztvaikojums pārsniedz saņemot nokrišņu daudzumu. Līdz šim nav izstrādāts imitējošais modelis, kas paredzēts optimālas koku retināšanas intensitātes noteikšanai ar mērķi atjaunot purva hidroloģisko režīmu (Java, Kohv, & Asko, 2020).

Dabīgi augstie purvi pilda vairākas svarīgas funkcijas un sniedz vērtīgus ekosistēmu produktus un pakalpojumus, kuru dēļ ir vērts saglabāt neskartos un atjaunot degradētos purvus. Diemžēl šie ekosistēmu produkti un pakalpojumi lielākoties netiek pārdoti tirgū, mēs tos saņemam par velti, tāpēc tiem nav noteikta cena, kas gadu desmitiem ir ļāvis tos iznīcināt balstoties tikai uz potenciāli iegūstamās kūdras un koksnes pienesumu ekonomikai, nenovērtējot nodarītos zaudējumus un ietekmi uz klimata pārmaiņām.

Ieguldīšana dabas kapitālā, tostarp ar oglekli bagātu biotopu atjaunošanā, tiek uzskatīta par vienu no piecām vissvarīgākajām fiskālās atveseļošanās politikām, kurām ir būtisks

ekonomisku daudzkārhojšošs efekts un pozitīva ietekme uz klimatu (Hepburn, O`Callaghan, Stern, Stiglitz, & Zenghelis, 2020). Purvi aizņem vien 3% no pasaules zemes platības, bet akumulē apmēram vienu trešdaļu augsnes oglekļa (Kiely, et al., 2018), kas ir divas reizes vairāk nekā mežu ekosistēmas (Parish, et al., 2008). Nepieciešamība saprast, kā šīs ekosistēmas darbojas un ko var sagaidīt cilvēku iejaukšanās gadījumā, jau sen ir atzīta par pētniecības prioritāti (Jørgensen, Mitch, & Kells, 1988), jo tā ļautu tās labāk pārvaldīt, lai sabiedrība varētu turpināt iegūt no ekosistēmas pakalpojumiem.

2. HIDROLOĢISKO MODEĻU UN PROCESU PRIEKŠIZPĒTE

Kā savās publikācijās ir minējis mitrzemju modelēšanas speciālists Jorgansens (Jørgensen), lai pareizi pārvaldītu purva ekosistēmas un optimizētu to nozīmi ainavā, ir svarīgi saprast, kā šīs sistēmas darbojas un ko gaidīt, kad mēs tajās iejauksimies vai tās mainīsim (Jørgensen, Mitch, & Kells, 1988). Ir skaidri jāsaprot, kā, mainot vienu purva daļu, mēs ietekmējam pārējās ekosistēmas daļas (Java, 2017). Gruntsūdens līmenis un tā svārstības ir galvenie šādas izpratnes parametri, tāpēc, uzsākot promocijas darba izstrādi, autors veica padziļinātu izpēti, lai noskaidrotu pasaules praksi līdzīgu problēmu risināšanā un izprastu purva hidroloģisko uzbūvi.

Arvien vairāk pieaug vajadzība pēc uzticamiem un pielietojamiem modelēšanas rīkiem ūdens apgādes un mitrāju stāvokļa novērtēšanai, kurus pēc tam var izmantot par pamatu zemes izmantošanas plānošanai un pārvaldībai. Šādu modelēšanas rīku vēlamā iezīme būtu to noturība pret specifiskām zemes izmantošanas izmaiņām, lai prognozētu, kādas sekas radīs jauni pārvaldības režīmi un mitrāju atjaunošana, kas nav izmērīta laikā.

Ir pieejama virkne ar hidroloģiskajiem modeļiem, kurus darba autors ir izpētījis un salīdzinājumam iekļāvis 1.tabulā. Kā jau modeļi, tie ir vienkāršots realitātes atspoguļojums, kuri ir noderīgi liela mēroga modelēšanā, bet nespēj precīzi attēlot visas tik specifiskās hidroloģiskās sistēmas kā purva ekosistēma ūdens plūsmas, kas ir vitāli svarīgas reģionāla līmeņa modeļos. Purva hidroloģiskās sistēmas izpratne ir izšķiroša ilgtspējīgai zemes attīstībai un efektīvai augsnes un dabas saglabāšanai (Mioduskzewski, Povilaitis, Querner, & Ślesicka, 2010), bet esošie hidroloģiskos procesus imitējošie modeļi nespēj attēlot nosusinātiem un apmežotiem purviem piemērotos atjaunošanas scenārijus.

1.tabula. Hidroloģisko modeļu salīdzinājums

Hidro- loģiskais modelis	Iekļauj virszemes ūdeni	Iekļauj pazemes ūdens	Iekļauj veģetācija	Iekļauj inter- cepciju	Iekļauj transpi- rāciju	Iekļauj sniega kušanu	Pielietots purvu atjauno- šanas projektos
MODFLOW	X	V	X	X	X	X	X
SWAT	V	V	V	V	V	X	X
WEAP	V	V	V	X	X	X	X
MIKE SHE	V	V	V	X	V	V	X
HecRAS	V	X	V	X	X	X	X
QUAL2K	V	X	X	X	X	X	X

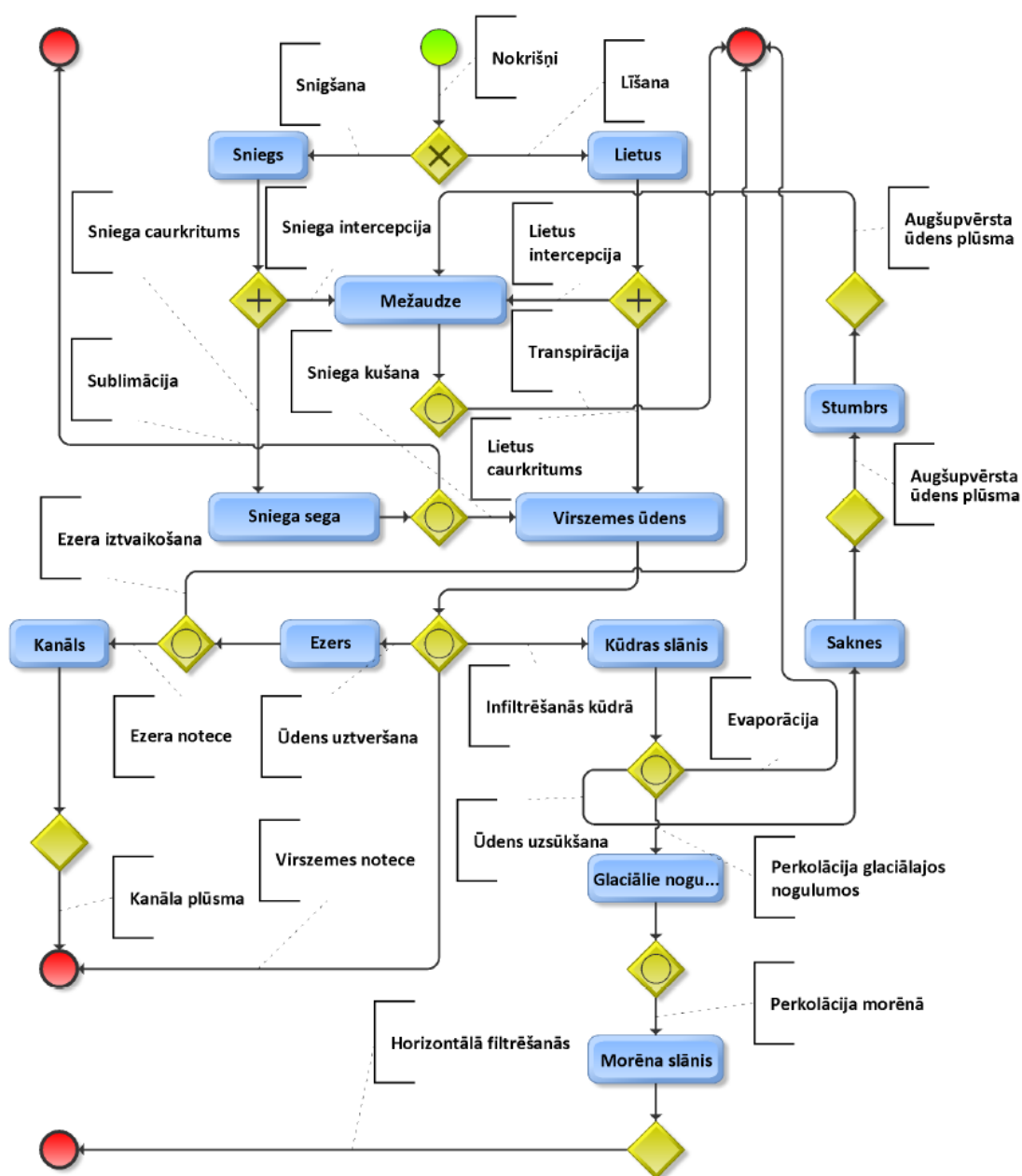
Avots: autors

Ir pieejama informācija par dažādiem degradētu purvu atjaunošanas projektiem, kur, lai noteiktu pēc iespējas optimālu iejaukšanās ekosistēmā⁴ mērogu, ir izmantoti imitējošie modeļi, tomēr, neviens no tiem nav brīvi pieejams un konstruēts veidā, kas ļautu tos pielāgot un pielietot citos purvu atjaunošanas projektos. Purvu atjaunošanai nepieciešams imitējošais modelis, kas piešķir lielāku nozīmi veģetācijas ietekmei uz ūdens bilanci un nodrošina precīzus rezultātus (tuvu procesiem dabā) reģionālā līmenī.

⁴ Optimāla iejaukšanās ekosistēmā nozīmē nodrošināt gruntsūdens līmeņa svārstības robežā 0.2-0.5 metrus zem zemes virsmas, kas ir dabīgam augstajam purvam raksturīgais līmenis (Vides risinājumu institūts, 2014), tādējādi neļaujot izzūt akrotelmam (augšējā kūdras slāņa daļu aptuveni 50 cm dziļumā aizņem (Priede & Silamiķele, 2015)) jeb dzīvajai sfagnu sūnu daļai, kas nodrošina sūnu augšanu un kūdras veidošanos, tātad, oglekļa akumulāciju, kā arī notur gruntsūdens līmeni nedaudz zem zemes virsmas, neļaujot to appludināt, lai neveicinātu CH₄ emisijas (Stark, 2008).

3. PURVU HIDROLOĢISKO SISTĒMU IMITĒJOŠĀ MODEĻA IZVEIDE

Lai varētu precīzi prognozēt cilvēka darbību ietekmi uz ekosistēmu, veicot purvu atjaunošanas darbus, nepieciešams izveidot jaunu purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli, kas īpaši izstrādāts šai ekosistēmai un pastiprinātu uzmanību pievēršot veģetācijai. Purva hidroloģiskā sistēma ir kompleksa sistēma ar daudzām komponentēm, tāpēc, lai, pirms purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa izveidošanas, noteiktu elementus, kas veido purva ekosistēmu un mijiedarbojas viens ar otru, tika izveidota purva hidroloģiskās sistēmas konceptuālā shēma (skatīt 1.attēlu).



1.attēls. Purva hidroloģiskās sistēmas konceptuālā shēma

Avots: autors

Izmantojot prasību specifikācijas metodi, tika noteikts, ka, lai darbinātu purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli, nepieciešami šādi ieejas dati:

1. Meteoroloģiskie dati (Java, 2020):

- Nokrišņi (lietus, sniegs);
- Vēja ātrums;
- Saules radiācija;
- Gaisa temperatūra;
- Relatīvais gaisa mitrums.

Meteoroloģiskie dati var tikt iegūti netiešu novērojumu veidā no ģeogrāfiski tuvākās meteoroloģiskās stacijas vai, lai iegūtu precīzākus un ticamākus purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa izejas datus, ievākti no purvā izvietotas meteoroloģiskās stacijas vai sensoru sistēma (Java, 2020).

2. Ģeoloģiskie dati (Java, 2020):

- Purva virsmas slīpums;
- Ezera laukums un vidējais dziļums;
- Kanāla platums, dziļums un kritums;
- Kūdras, glaciālo nogulumu un morēna slāņa dziļums;
- Kūdras, glaciālo nogulumu un morēna slāņa maksimālā ūdens ietilpība.

Ģeoloģiskie dati modeļa vajadzībām Baltijas artēziskajā reģionā var tikt iegūti brīvpieejā no Latvijas Universitātes modeļsistēmas, izmantojot mobilo lietotni MOSYS mobile (Latvijas Universitāte, 2018). Lai iegūtu augstāku precizitāti, autors rekomendē MOSYS modeļa vietā izmantot uz vietas veiktu ģeoloģisko mērījumu datus.

3. Augsnes hidrauliskās īpašības (Java, 2020):

- Kūdras slāņa sūcējspēks;
- Kūdras, glaciālo nogulumu un morēna kopējā porainība;
- Kūdras, glaciālo nogulumu un morēna efektīvā porainība;
- Kūdras galējā mitrumietilpība;
- Kūdras piesātinātā hidrauliskā vadītspēja.

Zinātniskajos rakstos, piemēram, “Estimation of Soil Water Properties” (“Augsnes ūdens īpašību novērtējums”) (Rawls, Brakensiek, & Saxton, 1982) un “Hydrological and Hydraulic Design of Peatland Drainage and Water Treatment Systems for Optimal Control of Diffuse

Pollution” (“Kūdras drenāžas un ūdens attīrīšanas sistēmu hidroloģiskais un hidrauliskais dizains optimālai izkliedētā piesārņojuma kontrolei”) (Mojammadighavam, 2017), aprakstītas dažādu minerālo un organisko augšņu hidrauliskās īpašības. Izmantojot šos pētījumus, iespējams izvēlēties datus no gadījuma studijām ar vistuvākajiem klimatiskajiem apstākļiem un augsnes sastāvu. Tomēr, lai iegūtu pēc iespējas precīzus purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa izejas datus, arī ieejas datiem jābūt precīziem, tāpēc ieteicams veikt augsnes paraugu laboratoriskos mērījumus (Java, 2020).

4. Attālās izpētes dati (Java, 2020):

- Atstarošana tuvu infrasarkanajā spektrā;
- Atstarošana sarkanajā spektrā.

Vispiemērotākie dati lapu laukuma indeksa aprēķināšanai ir attālinātā izpētē iegūtie dati tuvu infrasarkanajā un sarkanajā spektrā, kurus var iegūt, izmantojot gaismas noteikšanas un ranžēšanas sensoru LIDAR (Light Detection and Ranging sensor). Ja LIDAR dati nav pieejami, var izlīdzēties ar MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) satelītdatiem, kas ir noderīgi liela mēroga modelēšanā, bet nelielos reģionālos modeļos, pie kuriem var pieskaitīt Baltijas valstu purvus, to izšķirtspēja nebūs pietiekama (Java, 2020).

5. Kalibrējamie parametri (Java, 2020):

- Lapu izvietojuma leņķis;
- Specifiskā lapu ietilpība;
- Sniega intercepcijas koeficients;
- Maksimālā koku vainagu sniega ietilpība;
- Kūdras evaporācijas koeficients;
- Glaciālo nogulumu un morēna slāņa infiltrācijas koeficients.

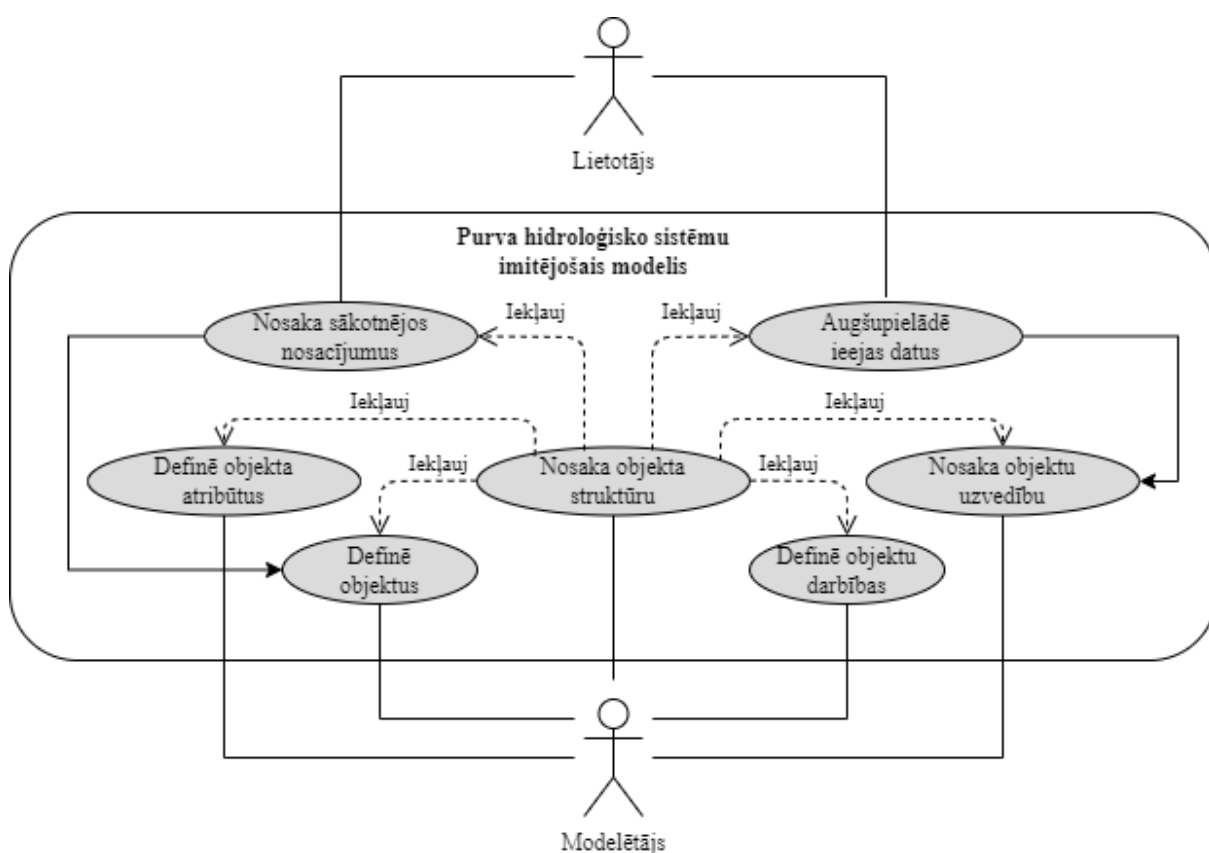
Darba autora izstrādātais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis ir nozīmīgs rīks, kas aprēķina un kā izejas datus atspoguļo vērtības, kurus dabā sarežģīti izmērīt, kā (Java, 2020):

- Gruntsūdens līmenis;
- Intercepcija;
- Transpirācija;
- Evaporācija;
- Ezeru notece;
- Virszemes notece;

- Infiltrācija kūdras slānī.

Sistēmu dinamikas vide ir slēgta dinamiska sistēma. Šis purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis tiek veidots, lai attēlotu ūdens kustību purva hidroloģiskajā sistēmā no ūdens ieejas slēgtajā sistēmā nokrišņu veidā, līdz izejai no tās izmantojot intercepciju, transpirāciju, evaporāciju, sānu plūsmu, ezera noteci un virszemes noteci.

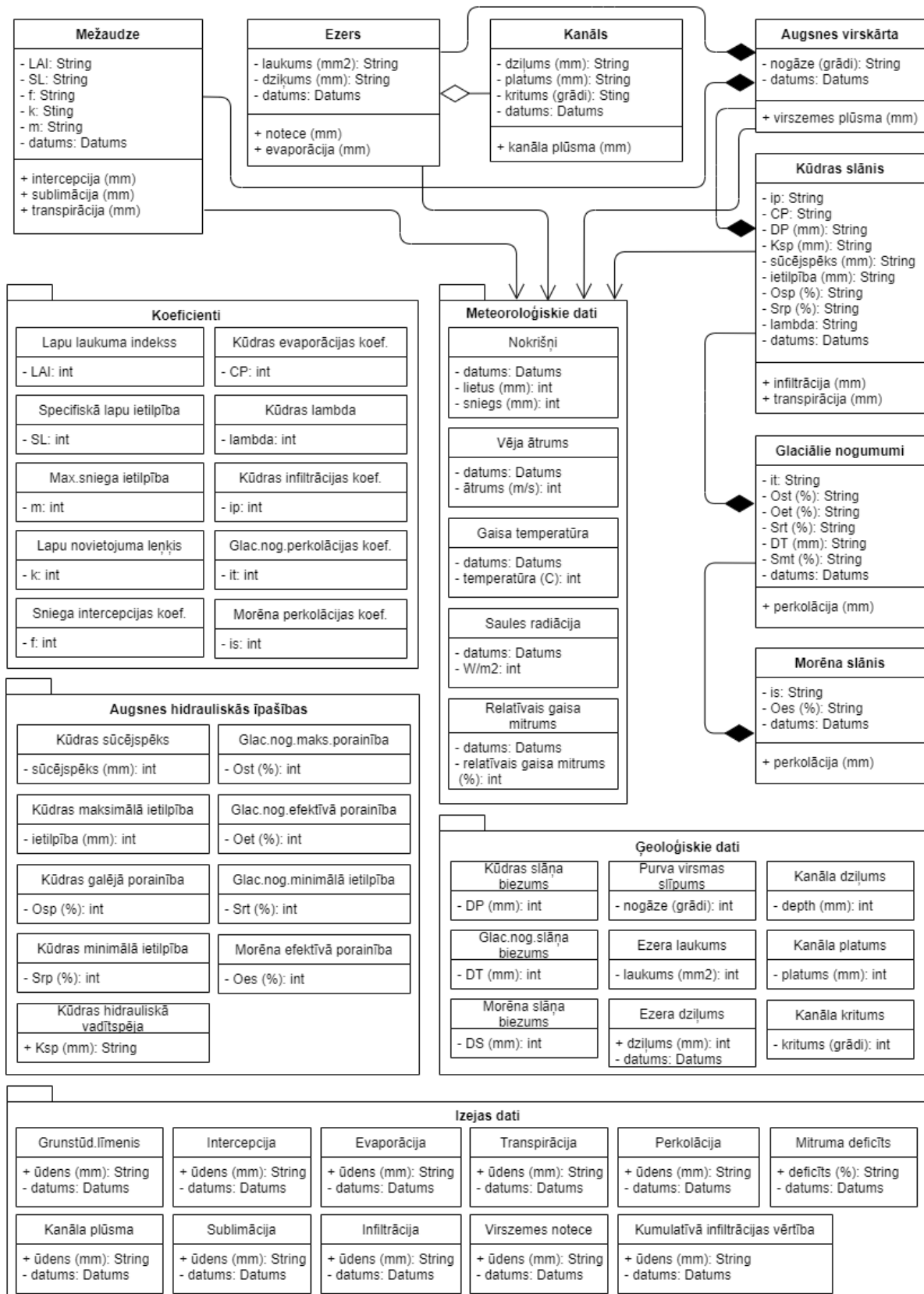
Ievades datus paredzēts ielādēt no CSV datu bāzes, bet to iespējams veikt arī manuāli. Purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis dod iespēju ģenerēt izvades datus biežuma tabulu un pārskata tabulu formātos. Kā lietotājs un modelētājs mijiedarbojas ar purva hidroloģisko modeli un kā modeļa iekšējās daļas mijiedarbojas viena ar otru, parādīts 2.attēlā.



2.attēls. Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa iekšējie soļi, UML lietošanas gadījumu diagramma

Avots: autors

Tāpat kā jebkurā dinamiskā sistēmā, purva hidroloģiskajā sistēmā ūdens plūsma no viena objekta nākamajā notiek pamatojoties uz savstarpējām cēloņsakarībām. Objekti, kuri saņem, glabā un nodod ūdeni tālāk, ir koku mežaudze, ezers, kanāls, augsne (kūdras, glaciālo nogulumu un morēna slānis).



3.attēls. Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa UML klašu diagramma

Avots: autors

3.attēlā visi purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa objekti ir vizualizēti klasēs. Visi ieejas dati ir sadalīti pa klasēm, pamatojoties uz piederību meteoroloģiskajiem, ģeogrāfiskajiem, augsnes hidraulisko īpašību datiem vai koeficientiem. Katra objekta klase izmanto ieejas datus kā atbilstošo atribūtu vērtības. Ūdens apjoma izmaiņas procesi tiek attēloti kā izejas dati.

Autora piedāvātajā problēmas formulējumā purva hidroloģiskā sistēma tiek uzskatīta par dinamisku sistēmu, kas sastāv no diferenciālvienādojumiem un loģiskajām izteiksmēm.

Autora piedāvātais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis nav pirmais sistēmu dinamikas vidē izstrādātais hidroloģiskais modelis. 2005.gadā tika izstrādāts SDW (System Dynamics Watershed – sistēmu dinamikas ūdensšķirtne) modelis (Elshorbagy, Julta, Barbour, & Kells, 2005). Tajā nebija iekļauti ar veģetāciju saistītie vienādojumi (Elshorbagy, Julta, Barbour, & Kells, 2005), tāpēc 2009.gadā tika izlaista tā uzlabotā versija GSDW (Generic System Dynamics Watershed Model – vispārējais ūdensšķirtnes sistēmu dinamikas modelis), kurā iekļauta intercepcija un evaporācija (Carey, Elshorbagy, & Keshu, 2009).

Par pamatu autora piedāvātajam purva hidroloģisko sistēmu imitējošajam modelim tiek izmantots GSDW modelis, kam nomainīti, pielāgoti un izstrādāti vairāki jauni matemātiskie vienādojumi un loģiskās izteiksmes, līdz sasniegts gaidītais rezultāts – imitētā gruntsūdens līkne atdarina izmērīto gruntsūdens likni, norādot uz to, ka modelis ietver un ņem vērā visas pārvaldāmās ekosistēmas daļas.

Autora izveidotais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis ir veidots tā, lai attēlotu ūdens kustību purva hidroloģiskajā sistēmā no ūdens ieejas nokrišņu veidā līdz ūdens izejai no sistēmas intercepcijas, sublimācijas, transpirācijas, evaporācijas, infiltrācijas dziļākos augsnes slāņos, ezeru iztvaikošanas, ezeru un virszemes noteces veidā. Kā dinamiskā sistēmā purva hidroloģisko sistēmu imitējošajā modelī ūdens no vienas krātuves nākamajā nonāk, pamatojoties uz savstarpējām matemātiskām cēloņsakarībām.

3.1. Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa matemātiskais formulējums

Autora izstrādātais BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis kopumā sastāv no 44 matemātiskajiem vienādojumiem un loģiskajām izteiksmēm. Promocijas darba kopsavilkumā tiek apskatīti tikai tie vienādojumi un loģiskās izteiksmes, kas, lai uzlabotu modeļa precizitāti, ir izstrādājis vai pārveidojis autors.

Autors izmēģināja vairākus zinātniskajā literatūrā atrodamos sniega intercepcijas aprēķināšanas vienādojumus, tomēr, eksperimentālā pārbaude norādīja uz kļūdām to darbībā, jo ziemas periodā pieauga atšķirība starp imitēto gruntsūdens līkni un mērījumiem, tāpēc autors pielāgoja lietus intercepcijas vienādojumu, tajā nomainot maksimālo lietus intercepcijas kapacitāti (S_{max}) ar maksimālo sniega intercepcijas kapacitāti (B) (Andreadis, Lettenmaier, & Storck, 2009), ievērojami uzlabojot modeļa precizitāti:

$$I_{snow} = C_p B \left(1 - EXP \left(-f \frac{P_S}{B} \right) \right) \quad (1)$$

kur I_{snow} ir ūdens daudzums (mm/d) ekvivalents sniega nokrišņiem, C_p ir koku vainagu ūdens pārklājuma funkcija (Oerlemans & Vink, 2010), P_S ir kopējie sniega nokrišņi (mm/d), f ir sniega intercepcijas koeficients.

Infiltrācijas kapacitāte f_P tiek aprēķināta balstoties uz kumulatīvo infiltrācijas tilpumu (Elshorbagy, Julta, Barbour, & Kells, 2005), par pamatu ņemot autora izstrādāto loģisko izteiksmi (2):

IF $\theta_{iP} < \theta_{sP}$ AND $S_{SW} < K_{sP}$

THEN $S_{SW} * C_{tP}$

ELSE IF $\theta_{iP} \geq \theta_{sP}$

THEN 0

ELSE (3) * C_{tP} (2)

$$f_P = K_{sP} \left(1 - \frac{(20)\psi_P}{F_P} \right) \quad (3)$$

IF $\theta_{iP} \geq \theta_{sP}$

THEN S_{rP}

ELSE $\theta_{sP} - \theta_{iP}$ (4)

kur S_{SW} ir virszemes ūdens (mm), K_{sP} ir kūdras slāņa piesātinātā hidrauliskā vadītspēja (mm/d), θ_{sP} ir kūdras slāņa porozitāte vai piesātinātības mitruma līmenis (mm), θ_{iP} ir sākotnējais mitruma līmenis (mm), ψ_P ir sūcēj spēka vadīšana kūdras slānī (mm), F_P ir kumulatīvās infiltrācijas kūdras slānī apjoms (mm) (Elshorbagy, Julta, Barbour, & Kells, 2005), S_{rP} ir minimālā kūdras slāņa ietilpība, citiem vārdiem sakot, minimālais mitruma līmenis, kādu iespējams sasniegt kūdrā (mm), un DP ir kūdras slāņa biezums (mm). 4. matemātiskajā izteiksmē aprakstīts autora izstrādāts sākotnējā mitruma deficīta (mm) aprēķins.

Kumulatīvās infiltrācijas kūdras slānī (F_P) apjoms (mm) tiek aprēķināts pēc autora izstrādātās pieejas, kur:

$$\begin{aligned} & \text{IF } R_t > 0 \text{ OR } S_{SW} > 0 \\ & \text{THEN } S_{Fp} \\ & \text{ELSE } 0 \end{aligned} \tag{5}$$

kur S_{Fp} ieeja

$$\begin{aligned} & \text{IF } \theta_{iP} \geq \theta_{sP} \text{ OR } S_{SW} > K_{sP} \\ & \text{THEN } f_p \\ & \text{ELSE } 0 \end{aligned} \tag{6}$$

kur S_{Fp} izeja

$$\begin{aligned} & \text{IF } M_S = 0 \text{ AND } R_t = 0 \\ & \text{THEN } S_{Fp} \\ & \text{ELSE } 0 \end{aligned} \tag{7}$$

kur R_t ir caurkritušais lietus (mm/d), M_S izkusušais sniegs (mm/d). Ņemot vērā, ka kūdras slānis nav homogēns, bet to veido akrotelms un katotelms, kuros ir dažāda atšķirīga hidrauliskā vadītspēja, un arī akrotelms pats par sevi nav homogēns, jo tā augšējo daļu aizņem dzīvās sfagņu sūnas, bet zemākajā notiek atmirušo sūnu sadalīšanās procesi, kā ietekmē pieaug blīvums un samazinās hidrauliskā vadītspēja, autors meklēja jaunu pieeju, kā precīzi atspoguļot ūdens plūsmu tajā. Par pamatu ņemot Kasteres un Grāfštālas (Custers & Graafstal, 2005) apjomīgo pētījumu “Ūdens plūsmas raksturojums baseina-grēdas mikrotopā purvā” (Characterisation of the water flow in a pool-ridge microtope in a bog), tika izveidota pieeja, kur kūdras slāņa piesātinātā hidrauliskās vadītspēja nav konstanta vērtība, bet tā tiek nolasīta no līknes (skatīt 2.tabulu). Sasniedzot katotelmu hidrauliskā vadītspēja paliek konstanta, kas atbilst 16mm/d.

2.tabula. Kūdras slāņa piesātinātā hidrauliskā vadītspēja atkarībā no attāluma līdz zemes virsmai

Attālums līdz zemes virsmas (cm)	K_{sP} (mm/d)
0	800
20	700

30	500
40	100
50	16

Avots: *autors*

Lai imitētu infiltrāciju sasalušā augsnē, infiltrācijas tiek reizināta ar Lī un Simoviča (Li and Simovic) koeficientu C_{IP} , kas ņem vērā augsnes atkušanu un atkārtotu sasalšanu un ir atspoguļojams izmantojot autora izstrādāto loģisko izteiksmi kā:

$$\begin{aligned} & \text{IF } T_I < T_{I_{max}} \text{ THEN } (T_I / T_{I_{max}})^{ci} \\ & \text{ELSE } 1 \end{aligned} \quad (8)$$

kur T_I

$$\begin{aligned} & \text{IF } N \geq N_n \text{ THEN } 0 \\ & \text{ELSE IF } T_a > 0 \text{ AND } N < N_n \\ & \text{THEN } \sum(T_a) \\ & \text{ELSE } 0 \end{aligned} \quad (9)$$

kur N

$$\begin{aligned} & \text{IF } T_a > 0 \\ & \text{THEN } 0 \\ & \text{ELSE } \sum(N_o) \end{aligned} \quad (10)$$

kur N_o

$$\begin{aligned} & \text{IF } T_a \leq 0 \\ & \text{THEN } 1 \\ & \text{ELSE } 0 \end{aligned} \quad (11)$$

kur T_a ir gaisa temperatūra (°C), $T_{I_{max}}$ (°C) ir maksimālais T_I punkts, kurā zemes virskārta ir pilnībā atkususi, ci ir rādītājs, kas raksturo T_I ietekmi uz augsnes atkušanu, N ir dienu skaits, kurās gaisa temperatūra atkārtoti ir negatīva, N_n ir maksimālais dienu skaits (N), pēc kurām augsnes atkušana (T_I) būs zaudēta un augsne atkal sasals, un N_o ir secīgs mainīgais, lai noteiktu, kurā dienā temperatūra ir pozitīva un kurās – negatīva. Vienādojuma būtība ir uzskaitīt

akumulēto pozitīvo un negatīvo gaisa temperatūru. Parametri ci un T_{max} tiek aprēķināti kalibrēšanas procesā (Li & Simonovic, Process).

Perkolāciju glaciālajos nogulumos var attēlot ar autora izstrādāto loģisko izteiksmi (12) un vienādojumu (13) šādi:

$$\begin{aligned}
 & \text{IF } \theta_{iP} \leq S_{rP} \\
 & \text{THEN } 0 \\
 & \text{ELSE IF } \theta_{iT} < \theta_{eT} \\
 & \text{THEN } 0 \\
 & \text{ELSE IF } \theta_{iT} > \theta_{sT} \\
 & \text{THEN } 0 \\
 & \text{ELSE (13)} \tag{12}
 \end{aligned}$$

$$f_T = (S_{mP}/S_{mT})I_T \tag{13}$$

kur I_T ir ūdens filtrācijas glaciālajos nogulumos koeficients, S_{mP} ir kūdras slāņa ūdens piesātinātība, S_{mT} ir glaciālo nogulumu slāņa ūdens piesātinātība, θ_{iT} apzīmē glaciālo nogulumu slāņa piesātinātību (%), θ_{eT} ir glaciālo nogulumu efektīvā piesātinātība (%) un θ_{sT} – glaciālo nogulumu porozitāti (%).

Ņemot vērā, ka Somā purvā (līdzīga ģeoloģiskā situācija ir vairumā Baltijas jūras reģiona purvu) morēna slānis atrodas zem vairāk kā 1 metru biezā kūdras slāņa un zem 5 metrus biezā glaciālo nogulumu slāņa un ūdens plūsma tajā ir gandrīz konstanta un niecīga (mazāk kā 1 cm/d), darba autors ir izvēlējis šim augsnes slānim pielietot vienkāršotu aprēķinu pieeju. Šajā pieejā morēna slānim nav tvertnes un ūdens plūsmu tajā (f_S) var atspoguļot ar autora izstrādāto pieeju kā:

$$\begin{aligned}
 & \text{IF } \theta_{iT} > \theta_{eT} \\
 & \text{THEN (15)} \\
 & \text{ELSE } 0 \tag{14}
 \end{aligned}$$

$$f_S = (S_{mT}/\theta_{fS})I_S \tag{15}$$

kur θ_{fS} ir ietilpība (%) un I_S – ūdens perkolācijas morēnā koeficients.

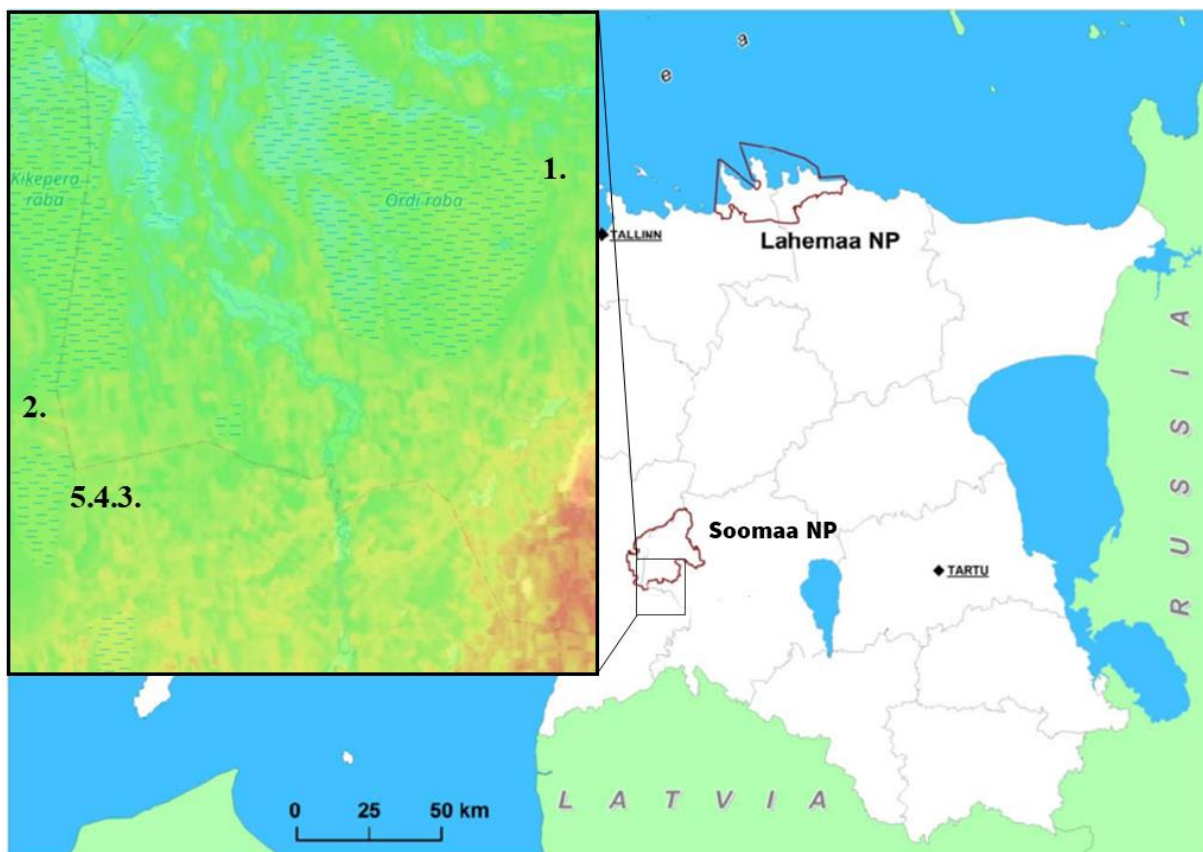
Lai arī uz aprakstītā matemātiskā modeļa pamata iespējams izstrādāt purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli citās programmēšanas valodās, darba autors izvēlējās pielietot sistēmu dinamiku. Sistēmu dinamikas būtiska kā vizuālas programmēšanas valodas priekšrocība ir tā, ka, lai arī modelis ar grafiski atspoguļotiem rezervuāriem, plūsmām un konvertoriem atgādina konceptuālo shēmu, tas ir strādājošs modelis, kurā skaidri saskatāmas tā sastāvdaļas un plūsmas. Sistēmu dinamika tiek plaši pielietota sarežģītu, dinamisku problēmu risināšanā un sistēmu, ar daudziem aspektiem un komponentēm, izprašanā un pareizu lēmumu, attiecībā uz ūdens un hidroloģiskajām sistēmām, nodrošināšanā (Mashal & Fernald, 2020). Grafiskais sistēmas attēlojums dod iespēju hidroloģijas un bioloģijas ekspertiem to ērti validēt, bet iesaistītajām pusēm un lēmumu pieņēmējiem – uzskatāmi parādīt mežaudzes apjoma ietekmi uz purva ūdens bilanci, un skaidrot ekosistēmas atjaunošanas nozīmi un ietekmi uz vidi.

Purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis gan *Stella Architect*, gan *Insight Maker* vidē (<https://insightmaker.com/insight/201089/Bog-hydrology-model>) ir izveidots, balstoties uz konceptuālo shēmu (skatīt 1.attēlu), saglabājot tādu pašu loģisko uzbūvi kā purva hidroloģiskajai sistēmai, kas atvieglo modeļa vizuālo uztveri un ļauj tajā vieglāk orientēties. Ar šo sistēmu dinamikas imitējošo modeļu palīdzību var veidot sistēmas diagrammas, kuras iespējams imitēt laikā. Šīs diagrammas ļauj labāk izprast sistēmas uzvedību un izsekot cēloņu-seku sakarībām tajā. Modelētāja un modeļa lietotāja iedarbošanās uz purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli ir veidota atbilstoši UML lietošanas gadījumu diagrammā (skatīt 2.attēlu) aprakstītajiem purva hidroloģiskā modeļa iekšējiem soļiem. BogSim imitējošā modeļa objekti un to atribūti, kā arī nepieciešamie ieejas dati un modeļa ģenerētie izejas dati apkopoti UML klašu diagrammā (skatīt 3.attēlu).

3.2. Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa veikspējas pārbaude

Lai validētu modeļa darbību, bija nepieciešams pārbaudīt tā veikspēju degradētā purvā, kur veiktas manipulācijas ar mērķi atjaunot purva hidroloģisko režīmu un ir pieejami imitējošā modeļa darbināšanai nepieciešamie ieejas dati. Šādai pārbaudei piemērota vieta ir Somā purvs, kura dažādos purva nogabalos, kuri komerciālu mežaudžu vajadzībām nodalīti viens no otra ar meliorācijas grāvjiem, 2014.-2015. gadā tika veikta eksperimentāla purva ekosistēmas atjaunošana, kas ietvēra koku retināšana un/vai meliorācijas grāvju aizbēršana. Purvā joprojām tiek veikts monitorings.

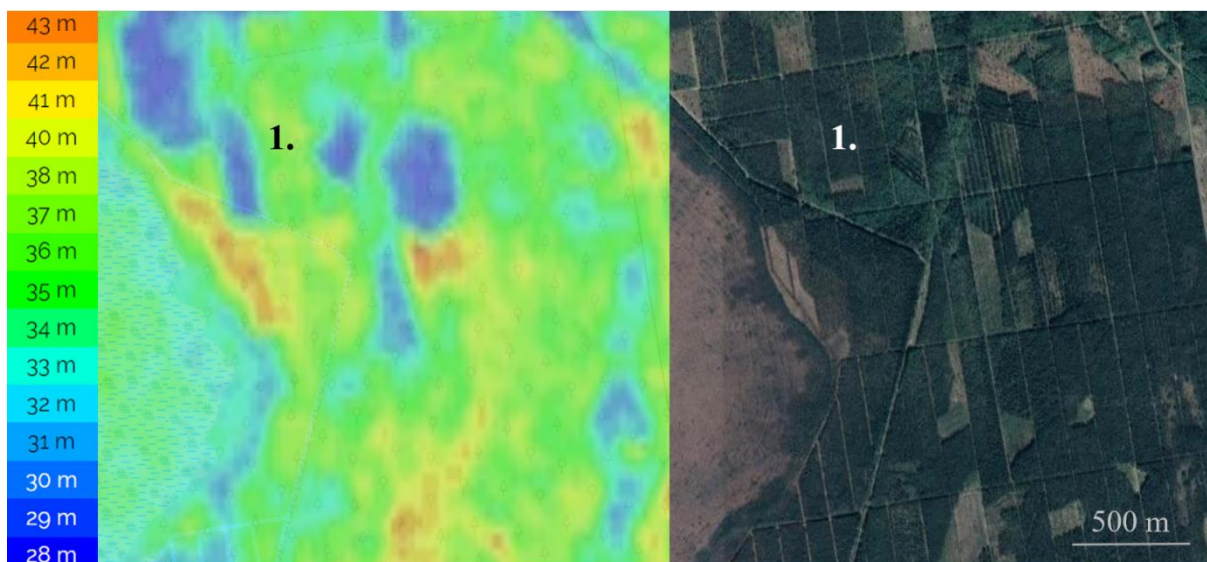
Šajā nodaļā tiek aprakstīts, kā *Stella Architect* vidē izstrādātais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis BogSim spēj imitēt izmaiņas gruntsūdens līmenī, kad tiek veikta meliorācijas grāvju aizbēršana un/vai daļēja mežaudzes retināšana.



4.attēls. Gadījuma studiju izpētes vieta, Somā (Soomaa) Nacionālais parks Igaunijā

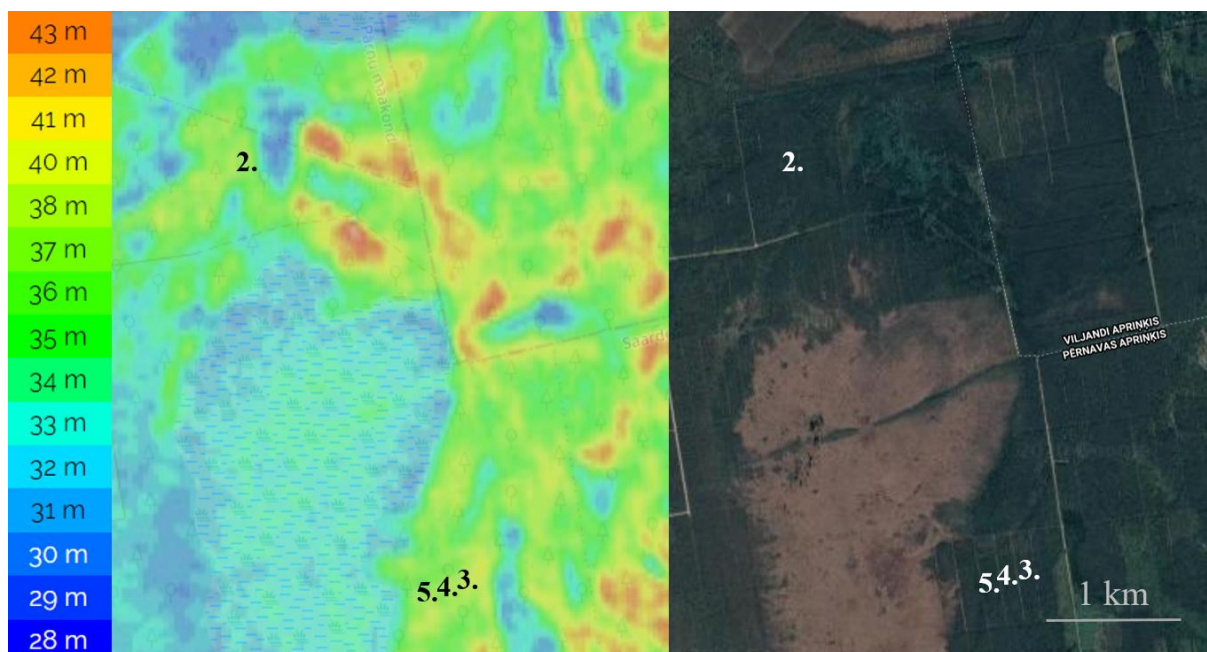
Avots: (Järv, Kliimask, Ward, & Sepp, 2016), (topographic-map.com, 2020)

Somā purvs atrodas Somā Nacionālajā parkā, Igaunijas dienvidrietumos, Pērnavas zemienes un Sakalas augstienes rietumu nogāzē (skatīt 4.attēlu) (Pöldmaa, et al., 2019). Somā Nacionālais parks, kas dibināts 1993.gadā, ir jaunākais nacionālais parks Igaunijā (Tooman & Ruukel, 2012). Nacionālajam parkam raksturīgajā ainavā ietilpst lieli purvu līdzenumi, no kuriem līdz 40% sezonāli applūst. Apmēram 42% no 39 884 ha teritorijas aizņem meži, kuros dominē priežu audzes. Komerciālo mežaudžu izveidošana ir saistīta ar 20.gadsimta 70.gados veiktajiem apjomīgajiem meliorācijas darbiem (Pöldmaa, et al., 2019). Pētījuma vajadzībām tika izmantoti dati no notiekoša eksperimenta, kas tika uzsākts 2013.gadā, ar mērķi atjaunotu purvu mežu biotopa medņa (*Tetrao urogallus*), ikoniskas putnu sugas Baltijas valstīs, dzīvotni (Lõhmus, et al., 2017). Eksperimenta darbības tika mērķētas uz purva platībām, kas nosusinātas laikā no 1970.līdz 1990.gadam, kombinējot drenāžas grāvju bloķēšanu ar daļēju mežaudzes retināšanu. Šīs metodes ir identiskas tām, kuras izmanto Igaunijā un citus purva biotopu vispārīgai atjaunošanai (Laine, et al., 2011). Detalizētā meža inventarizācija pirms un pēc eksperimentālajām darbībām un automātiski gruntsūdens līmeņa mērītāji padara šo purvu par labu izmēģinājuma poligonu arī purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa darbības pārbaudei.



5.attēls. Somā Nacionālā parka austrumu daļas topogrāfiskā karte un ortogrāfiskais fotoattēls

Avots: (topographic-map.com, 2020), (Google, 2020)



6.attēls. Somā Nacionālā parka dienvidu daļas topogrāfiskā karte un ortogrāfiskais fotoattēls

Avots: (topographic-map.com, 2020), (Google, 2020)

Kā redzams 5. un 6.attēlā, meliorācijas grāvji, kas izveidoti vairākās Somā Nacionālā parka daļās, veido taisnstūra formas nogabalus. Atsevišķos nogabalos ir atšķirīgs kūdras slāņa biezums, augstums virs jūras līmeņa un mežaudzes blīvums. Tā kā nogabali ir atdalīti ar meliorācijas grāvjiem, teorētiski to ietekme vienam uz otra hidroloģisko režīmu ir minimāla, tāpēc tie ir piemēroti, lai veiktu eksperimentus ar mežaudzes retināšanu.

Pētījuma vajadzībām tika izvēlēti pieci nogabali, kuros veiktas dažādas manipulācijas, lai novērtētu to ietekmi uz gruntsūdens līmeņa svārstībām, kas nākotnē kalpotu par pamatu

degradētu purvu atjaunošanas metodoloģijas izstrādei. Detalizēta nogabalu informācija apkopota 3.tabulā.

3.tabula. Nodaļā apskatīto nogabalu īpašības

Nr.	Kūdras biezums (m)	Devona smilšakmens biezums (m)	Mežaudzes retināšanas datums	Meliorācijas grāvju aizbēršanas datums	Mežaudzes retināšanas intensitāte (%)	Augstums virs jūras līmeņa (m)
1.	0.8	5	14.08.2014	Nav veikta	44	31
2.	1.2	5	15.10.2014	Nav veikta	31	31
3.	1.2	5	15.02.2015	Nav veikta	38	32
4.	1.3	5	Nav veikta	01.12.2015	0	31
5.	1.15	5	18.02.2015	01.12.2015	34	30

Avots: autors

Purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis tika darbināts izmantojot vēsturiskos datus no 2013.gada 1.novembra līdz 2018.gada 31.decembrim. Katrai dienai atbilda viens datu punkts ar atbilstošiem katras dienas datiem, kopā veidojot 1836 datu punktus. Ieejas datu kopa ietver meteoroloģiskos datus (diennakts nokrišņi gan lietus, gan sniega veidā, diennakts vidējā gaisa temperatūra, diennakts vidējais relatīvais gaisa mitrums, diennakts vidējais vēja ātrums, diennakts vidējā saules radiācija), attālās izpētes datus (atstarošanas Red un NIR gaismas spektrā pirms un pēc mežaudzes retināšanas), ģeoloģiskos datus (kūdras slāņa un glaciālo nogulumu biezumu, nogabala virsmas slīpumu), augsnes hidrauliskās īpašības (kūdras sūcējspēku, kūdras maksimālo ūdens ietilpību, kūdras galējo porainību, kūdras minimālo ūdens ietilpību, kūdras hidraulisko ūdens vadītspēju, glaciālo nogulumu maksimālo porainību, glaciālo nogulumu efektīvo porainību, glaciālo nogulumu minimālo ūdens ietilpību, morēna slāņa porainību) un kalibrējamās vērtības (specifisko lapu ietilpību, maksimālo sniega ietilpību, lapu novietojuma leņķi, sniega intercepcijas koeficientu, kūdras evaporācijas koeficientu, kūdras lambda koeficientu, kūdras infiltrācijas koeficientu, glaciālo nogulumu perkolācijas koeficientu, morēna perkolācijas koeficientu).

BogSim imitējošā modeļa veikspēja dažādos testa nogabalos bija atšķirīga ar vidējo nobīdi starp imitēto un izmērīto gruntsūdens līmeni no 0,88 līdz 2,63 cm (skatīt 4.tabulu). Zemāka vidējā nobīde un saknes vidējās kvadrātiskās kļūdas (RMSE) vērtība starp imitēto un izmērīto līkni, norādot uz augstāku modeļa precizitāti, bija nogabalos ar mērenu gruntsūdens līmeņa svārstību diapazonu. Pretstatā, korelācijas koeficients un daudzfaktoru korelācijas koeficienta kvadrāts R^2 augstāku vērtību un ciešāku sakarību starp imitēto un izmērīto gruntsūdens līmeņa

līkni uzrādīja nogabalos, kur tika veikti plašāki ekosistēmas atjaunošanas darbi, kam sekoja krass gruntsūdens līmeņa pieaugums.

4.tabula. Parametri, kas norāda uz BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa darbības precizitāti.

Nr.	Vidējā nobīde (cm)	Korelācija	R ²	RMSE (cm)
1	0.96	0.70	0.50	0.32
2	1.25	0.78	0.60	0.37
3	0.88	0.68	0.47	0.28
4	1.64	0.94	0.89	0.42
5	2.63	0.94	0.88	0.71

Avots: autors

Darba autora izstrādātais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis sistēmu dinamikas vidē BogSim kā veģetāciju raksturojošu rādītāju izmanto LAI. Pēc definīcijas LAI ir attiecība starp viļņusēju (skujkoku gadījumā četrsēķautņainās lapas dēļ – divpusēju) lapas laukumu pret vienu zemes laukuma vienību (Gong, Pu, Biginb, & Larrieu, 2003). LAI nosaka daudzus ekoloģiskos procesus, piemēram, transpirāciju, intercepciju un oglekļa plūsmu (Zheng & Moskal, 2009). Tas ir rādītājs, kas atspoguļo meža veģetācijas augšanas statusu (Yu, Wang, Liu, & Cheng, 2019), tāpēc šajā pētījumā LAI aprēķiniem tiek izmantota metode, kura balstās uz atstarošanas sarkanās (Red) un gandrīz infrasarkanajās (NIR) gaismas spektrā, šo indeksu nosakot pēc biomasas fotosintēzei patērētās enerģijas apjoma (Härkönen, Lehtonen, Manninen, Tuominen, & Peltoniemi, 2015).

5.tabula. Testa nogabalu mežaudzi raksturojošie lielumi

Nr.	NIR pirms	Red pirms	LAI pirms	NIR pēc	Red pēc	LAI pēc	Mežaudzes retināšanas intensitāte (%)	LAI starpība (%)
1	85	29	2.36	97	53	1.76	44	-25
2	77	41	1.76	97	60	1.54	31	-13
3	52	30	1.65	56	41	1.28	38	-22
4	59	31	1.78	70	36	1.81	0	+2
5	37	21	1.67	44	26	1.61	34	-4

Avots: autors

Kā novērojams 5.tabulā, LAI samazinājums nav tieši proporcionāls mežaudzes retināšanas intensitātei. Tas skaidrojams ar to, ka, izcērtot daļu koku, samazinās to vainagu noēnojošā ietekme, kas ļauj vairāk saules gaismai nonākt zemsedzē un veicina straujāku bioloģisko procesu norisi krūmos un sīkkokos (Java, Kohv, & Lohmus, 2021).

Jāpiezīmē, ka testa nogabalam Nr.1 NIR un Red mērījumi pēc mežaudzes retināšanas netika veikti, tāpēc tie tika piemeklēti ar tiem eksperimentējot, līdz imitētā gruntsūdens līkne pietuvojās cik iespējams tuvu gruntsūdens mērījumiem. Šī darbība var kalpot kā piemērs, kā kalibrētu imitējošo modeli pielietot, lai atrastu nezināmu parametra vērtību.

3.3. Hidroloģisko modeļu salīdzinājums

Kā aprakstīts 1.nodaļā, gan starp esošajiem hidroloģiskajiem modeļiem savā starpā, gan starp tiem un BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli pastāv būtiskas atšķirības, kas liedz tos objektīvi salīdzināt, tas ir – tos replicēt un darbināt ar, piemēram, Somā purva ieejas datiem un salīdzināt to ģenerētās gruntsūdens līknes. Tomēr, ir vērts ieskatīties zinātniskajā literatūrā pieejamās gadījuma studijās, kur izmantoti esošie hidroloģiskie modeļi, lai sniegtu kaut nelielu salīdzinošo priekšstatu ar BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli. Divas biežāk izmantotās vērtības, kas tiek izmantotas, lai parādītu hidroloģisko modeļu precizitāti, ir RMSE un R^2 . Vairumā gadījumu vienā zinātniskajā publikācijā tiek izmantota vai nu viena, vai otra, bet ļoti reti abas, kas apgrūtina hidroloģisko modeļu salīdzināšanu.

Vidējā kvadrātiskā kļūda RMSE ir prognozēšanas kļūdas standarta novirze. Prognozēšanas kļūda ir punktu attālums no regresijas līknes, bet RMSE norāda uz punktu izkliedi. Citiem vārdiem sakot, tas parāda, cik koncentrēti dati ir izvietojušies ap tendences līkni. RMSE tiek bieži izmantots klimatoloģijā, prognozēšanā un regresiju analīzē, lai verificētu rezultātus (Glen, 2021).

Daudzfaktoru korelācijas koeficienta kvadrāts R^2 ilustrē, cik labi imitācija raksturo izkliedētos mainīgos (Abdulkareem, Pradhan, Sulaiman, & Jamil, 2018). Imitētās vērtības, kas vienādas ar 1, norāda uz perfektu sadalījumu starp izmērītajām un modeļa imitētajām vērtībām, bet vērtības, kas vienādas ar 0, norāda, ka korelācija nepastāv (Abdulkareem, Pradhan, Sulaiman, & Jamil, 2018).

6.tabula. Hidroloģisko modeļu RMSE un R² salīdzinājums

	BogSim	MODFLOW	SWAT	WEAP	MIKE SHE	HecRAS	QUAL2K
RMSE (cm)	0.28-0.71	20-81	1.83	-	50-1500	-	-
R²	0.47-0.89	0.66-0.95	0.71	0.57-0.99	0.15-0.64	0.99	-

Avots: autors

Kā redzams hidroloģisko modeļu RMSE un R² salīdzinājuma tabulā (skatīt 6.tabulu), BogSim modeļa gruntsūdens RMSE variācija dažādos Somā purva nogabalos svārstās no 0.28 līdz 0.71 cm, kamēr MODFLOW pazemes ūdens plūsmas modelim gadījuma studijā Birdžandas līdzenumā (Birjand Plain) Irānā tā sastāda 20-30 cm (Aghlmand & Abbasi, 2019). Gadījuma studijā Vadi Samail (Wadi Samail) sateces baseinā Omānā vidējā RMSE vērtība sastāda 81 cm, bet secinājumos minēts, ka kalibrētie parametri izrādījās uzticami, jo nodrošināja nelielu RMSE vērtību (AL-Hasami, Gunawardhana, Sana, & Baawain, 2020). Gadījuma studijā Al Buraimi (Al Buraimi) Omānā RMSE vērtība ir vēl lielāka un sastāda 271 cm, bet tiek uzskatīta par samērīgu teritorijai, kurai raksturīga ievērojama ģeoloģiskā un hidroģeoloģiskā daudzveidība (Izady, Abdalla, Joodavi, & Chen, 2017). Ja tiek apskatīts R² korelācijas koeficients, kas Al Buraimi gadījuma studijā ir 0.69 (Izady, Abdalla, Joodavi, & Chen, 2017), tad šim apgalvojumam var piekrist, jo, par spīti lielajai vērtību izkliedei, R² ir tuvāk 1 nekā 0. Apskatot citas gadījuma studijas, kurās noteiktas tikai R² vērtības, tās ir robežās no 0.66 (Jovanovic, et al., 2017) līdz 0.95 (Jiang, Xie, & Wang, 2020), korelācijas koeficienti ir atšķirīgi dažādiem augsnes tipiem, precīzākus rezultātus sniedzot nogulumiežiem (de Graaf, Sutanudjaja, van Beek, & Bierkens, 2015). Augstākas R² vērtības ir arī gadījumos, kad tiek modelēta lielāka teritorija, piemēram, visa zemeslode (de Graaf, Sutanudjaja, van Beek, & Bierkens, 2015) pretstatā reģionālām gadījuma studijām.

Lai arī, salīdzinot ar citiem hidroloģiskajiem modeļiem, BogSim uzrāda vismazāko RMSE vērtību (nesasniedzot pa 1 cm), kas norāda uz ļoti ciešu imitēto gruntsūdens līmeņa datu koncentrāciju ap tendences līkni, tajā pašā laikā MODFLOW ar ievērojami lielāku RMSE vērtību (20 cm) uzrāda krietni augstāku R², sasniedzot 0.95, kas statistiski ir ļoti tuvu norisēm dabā. Ņemot vērā, ka esošie hidroloģiskie modeļi ir pārbaudīti upju sateces baseinos, kur (salīdzinot ar purvu, kas ūdeni saņem tikai nokrišņu veidā) cauri plūst milzīgas ūdens masas, tas sasaucas ar 2.2.nodaļā aprakstīto BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa darbības pārbaudi, kas atklāj, ka R² vērtības ir lielākas purva nogabalos, kuros veiktas

intensīvākas purva atjaunošanas darbības, veicinot krasākas gruntsūdens līmeņa svārstības lielākā amplitūdā.

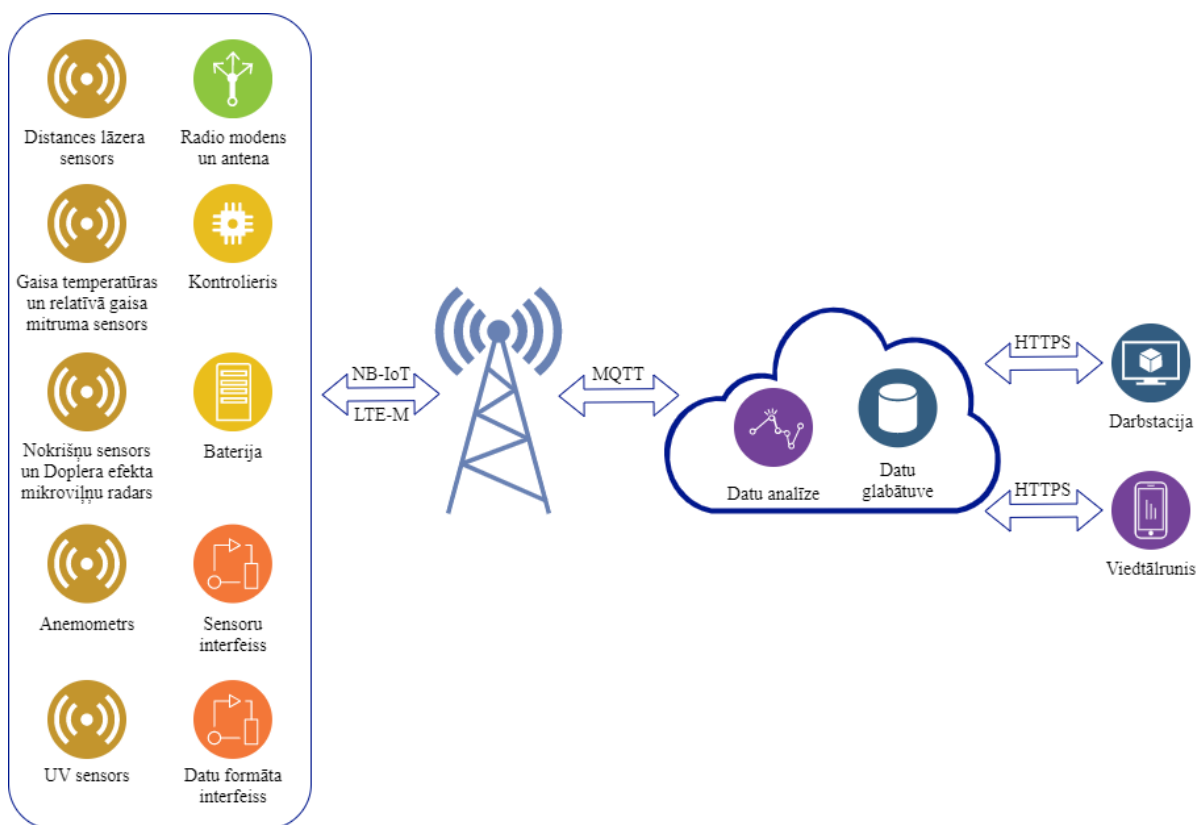
4. SENSORU SISTĒMAS IZVEIDE IEEJAS DATU IEGŪŠANAI IMITĒJOŠO MODEĻU EKOSISTĒMU PĀRVALDĪŠANAS VAJADZĪBĀM

Piekļuve reāllaika laikapstākļu datiem palīdz uzraudzīt potenciāli bīstamu notikumu biežumu un intensitāti, piemēram, sausumu, spēcīgas lietusgāzes, plūdus un ārkārtējas gaisa temperatūras (Idbella, et al., 2020). Šie dati noder arī imitējošo modeļu darbināšanai, kas ļauj izprast cēloņsakarības, lai mazinātu cilvēka darbības ietekmi uz vidi.

Paredzams, ka autora piedāvātais IoT sensoru sistēma darbosies līdzīgi kā automātiskā meteoroloģiskā stacija, taču tā galvenā priekšrocība būs tā, ka tam nebūs nepieciešams pieslēgums elektriskajam un interneta tīklam, tas būs kompakts un salīdzinoši lēts.

IoT tehnoloģiju galvenais mērķis ir uztvert, savienot, apkopot, analizēt un interpretēt datus (Fogwing, 2021). Meteoroloģiskie sensoru tīkli ir centrēti uz datiem un apstrādā sensoru savāktos meteoroloģiskos datus (Yang, et al., 2019). Lai iegūtu specifiski purva hidroloģisko sistēmu imitējošajam modelim nepieciešamos ieejas datus, sensoru sistēmai nepieciešams iegūt gruntsūdens līmeņa mērījums (mm) un tādos meteoroloģiskos datus kā nokrišņi (lietus, sniegs) (mm), vēja ātrums (m/s), saules radiācijas intensitāte (W/m^2), gaisa temperatūra ($^{\circ}C$), relatīvais gaisa mitrums (%). Ja modelēšana tiktu veikta ģeogrāfiski lielākā teritorijā nekā vidējais Latvijas purvs un tajā būtu izvietotas vairākas šādas sensoru sistēmas veidojot sensoru tīklu, tad svarīgi būtu ievākt arī informāciju par vēja virzienu. Tā kā promocijas darbā aprakstītais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis tiek darbināts ar vēsturiskiem datiem un tam nav nepieciešami reālā laika ieejas dati, to iegūšanai piemērotas NB-IoT tehnoloģijas, kas datus nolasa un nosūta pēc nepieciešamības, nevis nepārtraukti (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).

NB-IoT arhitektūra (skatīt 7.attēlu) sastāv no promocijas darba 4.2.1.apakšnodaļā aprakstītajiem sensoriem, kontroliera, sensoru interfeisa, datu formāta interfeisa, barošanas elementa, radio modema un antenas, kas kopā veido sensoru sistēmu (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).



7.attēls. NB-IoT sensoru sistēmas purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa ieejas datu iegūšanai arhitektūra

Avots: autors

Sensori ir integrēti vienā sistēmā un novietoti izvēlētajā attālajā atrašanās vietā, un tie ir savienoti ar radio modemu. Arhitektūra izmanto NB-IoT tīklu, lai pārsūtītu datus no ierīces uz mobilo sakaru bāzes staciju. Izmantojot MQTT protokolu, dati no mobilo sakaru bāzes stacijas tiek pārsūtīti uz datu mākonī, kur tie tiek saglabāti un analizēti. Mākonī neapstrādātie dati tiek dekodēti mērījumu datos. Modems ļauj modelētājam mijiedarboties ar tam pievienotajām ierīcēm. Kad ir iestatīts sakaru režīms un konfigurēts mākoņserveris, notiek saziņa starp sensoriem un mākoņserveri. Arhitektūra nodrošina, ka modelētājs var piekļūt mākonī saglabātajiem datiem izmantojot interneta pārlūku un, ja nepieciešams, attālināti mainīt saskarni starp sensoriem un datu formātu (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).

Piedāvātā NB-IoT sensoru sistēmas uzbūve ietver vairākas jaunas pieejas meteoroloģisko datu iegūšanai. Viena no tām ir Doplera efekta izmantošana nokrišņu mērīšanai. Doplera efekts izpaužas kā frekvences un viļņa garuma maiņa, kad avots rada svārstību vilni ar noteiktu frekvenci un viļņa garumu, un novērotājs fiksē kustības radīto fizisko vērtību izmaiņas (Sasso, 2020). Doplera efekta mikroviļņu radars ļauj noteikt kustību, ātrumu un virzienu (Infineon Technologies AG, 2020), ko iespējams pārvērst saņemto nokrišņu apjomā.

Jauna pieeja saules radiācijas mērījumiem ir autora piedāvātā IoT UV sensora izmantošana, kas pamatota ar mērījumiem, kuros noteikts, ka 6% no kopējās saules radiācijas, kas sasniedz Zemes virsmu, sastāda UV starojums (Gharehpetian & Mohammad Mousavi Agah, 2017), (Jacobsen & Dangles, 2017).

IoT sensoru zemās izmaksas un NB-IoT tīkla datu tehnoloģijas, nelielais izmērs un ilgaus akumulatora darbības laiks paver iespējas plašākai augstas kvalitātes *in situ* datu, kas izmantojami imitējošajos modeļos, iegūšanai. Kamēr nav izdevies, ar mākoņskaitļošanas algoritmu palīdzību, izveidot vienu globālu meteoroloģisko datu krātuvi ar pietiekamu izšķirtspēju, kur dati būtu brīvi pieejami un izmantojami augstas precizitātes reģionāla līmeņa imitējošo modeļu darbināšanai, IoT sensoru sistēmas ir piemērotas šo datu iegūšanai un nākotnē varētu kļūt par daļu no globālā sensoru tīkla. Sensoru sistēmai, kas vāc un apkopo hidroloģiskajam modelim nepieciešamos ieejas datus, ir iespējams izmantot mašīnmācīšanās paņēmienus, lai kalibrētu sensorus, identificētu kļūdainus sensorus, savlaicīgi identificētu, kad nepieciešama tehniskā apkope, un vajadzības gadījumā prognozētu nākotnes laika prognozi (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).

Lai vāktu un apkopotu *in situ* datus hidroloģisko modeļu ieejas datu nodrošināšanai, ievērojot autora piedāvāto arhitektūru un sensoru sistēmas darbības principus, iespējams izmantot arī analogus IoT sensorus un mikrokontrolierus. Izņēmums ir mikroviļņu Doplera efekta mikroviļņu radars, kuram sensoru sistēmas izstrādes laikā nebija pieejama alternatīva (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).

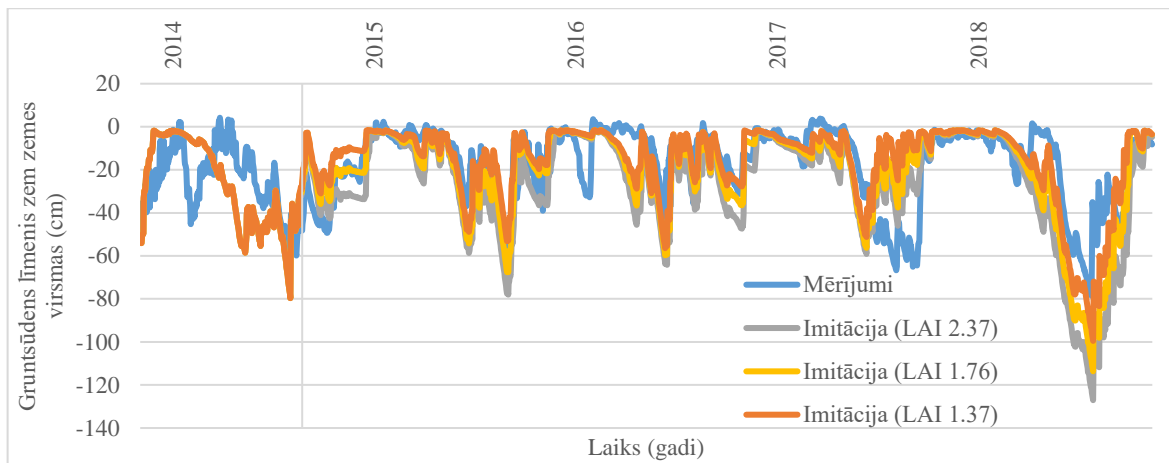
5. DARBA EKONOMISKAIS UN SOCIOTEHNISKAIS PAMATOJUMS

Lai arī ir iespējams monetāri aprēķināt ekonomisko ieguvumu, ko iespējams gūt degradējot purvus, lai tajos audzētu koksni vai iegūtu kūdru, jo, balstoties uz empīriskiem vienādojumiem, iespējams aprēķināt koksnes augšanas tempu un pieaugumu kubikmetros, un iespējams izmērīt izstrādājamās kūdras apjomu kubikmetros, tomēr nav iespējams aprēķināt ekonomisko ieguvumu no dabīga augstā purva, jo degradēšanas mirklī zaudētās purva funkcijas lielākoties netiek pārdotas tirgū un tām nav noteikta cena.

Galvenās dabīga augstā purva funkcijas ir SEG emisiju piesaistīšana un dažādi ekosistēmas pakalpojumi (ūdens pašattīrīšanās funkcija, ūdens cikla un klimata regulācijas funkcija, rekreācijas funkcija, dabas velšu (pārtikas, tēju, medicīnas) avots, arheoloģijas un pētniecības potenciāls).

Autora izstrādātie teorētiskie atzinumi, purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis un tā praktiskais pielietojums var tikt izmantots visā Baltijas jūras reģionā. Mainot modeļa parametrus, tā pielietojuma areālu iespējams ģeogrāfiski paplašināt. Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa galvenais pielietojums ir degradētu purvu atjaunošanas projekti - mežaudzes retināšanas intensitātes noteikšana, balstoties uz izmaiņām LAI, ar mērķi atjaunot dabīgam augstajam purvam raksturīgu gruntsūdens līmeni, kas ir priekšnosacījums, lai purvā atgrieztos tam raksturīgā flora un fauna. Tā kā modelī tiek izmantots LAI, vairāki dārgi ar veģetāciju saistīti mērījumi nav nepieciešami.

8.attēlā redzams, kā purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa imitētais gruntsūdens līmenis reagē uz izmaiņām LAI. Ar LAI 2.37 tiek atspoguļota situācija, kāda tā būtu, ja nogabalā nebūtu veikta mežaudzes retināšana. LAI 1.76 atspoguļo situāciju, kas atbilst veiktajām mežaudzes retināšanas manipulācijām. LAI 1.37 parāda, kāda situācija būtu, ja tiktu izcirsti vēl vairāk koki. Apskatot visas trīs līknes vienlaicīgi, galvenais secinājums, ko var izdarīt, ir – jo biežāka mežaudze, jo novērojamas lielākas gruntsūdens līmeņa svārstības. Ziemas periodā, kad bioloģiskie procesi skujkokos ir gandrīz apstājušies un tie augsnē esošo ūdeni patērē niecīgā apjomā, gruntsūdens līkne, neatkarīgi no mežaudzes apjoma, vienmēr sasniedz līmeni, kas atbilst augsnes piesātinātības līmenim, jo liekais ūdens apjoms, neatkarīgi no mežaudzes apjoma, nogabalu atstāj virszemes noteces veidā.

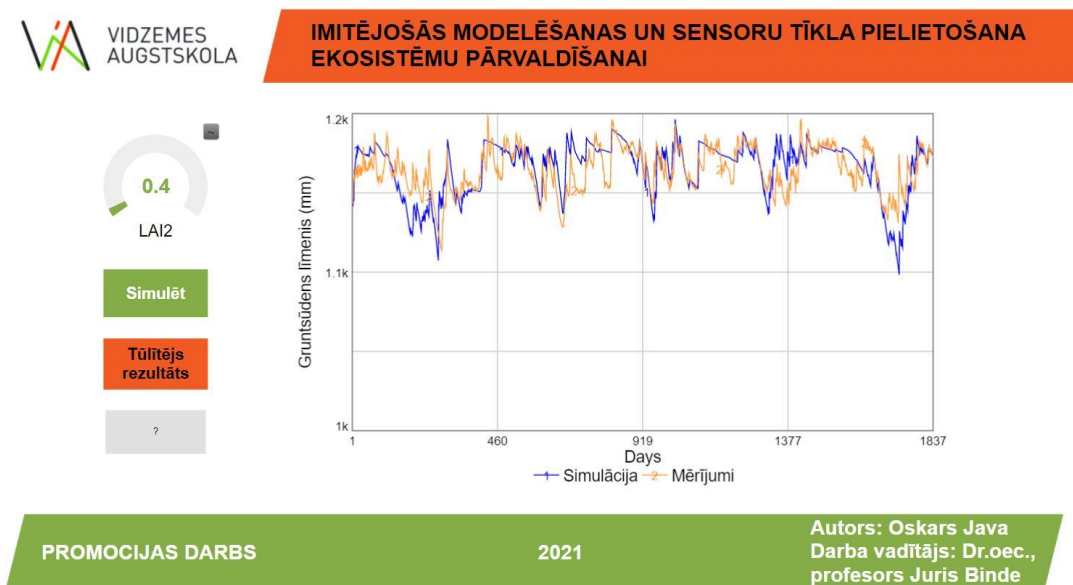


8.attēls. Testa nogabala Nr.1 gruntsūdens līmenis LAI manipulāciju ietekmē

Avots: autors

Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa imitētajā periodā nokrišņu summa sastādīja 3319 mm. Ar modeļa palīdzību bija iespējams aprēķināt, ka, ja nogabalā netiktu veikta mežaudzes retināšana, intercepcija un transpirācija sastādītu 1655 mm jeb 50% no nokrišņu summas, pašreizējā situācijā, tā ir samazināta līdz 1433 mm jeb 43% no nokrišņu summas, bet, LAI samazinot līdz 1.37, intercepcijas un transpirācijas ietekme uz ekosistēmas ūdens bilanci samazinātos līdz 1253 mm jeb 38 % no perioda kopējās nokrišņu summas.

Tā kā *Stella Architect* nav atvērta koda programmatūra un tās darbināšanai nepieciešams iegādāties licenci, darba autors ir izveidojis interneta pārlūka lietotāja saskarni, kurā ikviens interesents var veikt eksperimentu ar izmaiņām LAI nogabalā Nr.1 (skatīt 9.attēlu).



9.attēls. Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa lietotāja saskarnes ekrānšāviņš <https://exchange.iseesystems.com/public/oskarsjavapromocijasdarbs/bog-hydrological-model>

Avots: autors

Lietotāja saskarnē (skatīt 9.attēlu) iespējams imitēt gruntsūdens līmeņa izmaiņa sākot no LAI 0.1, kas atbilst virsmai principā bez nekādas veģetācijas, līdz LAI 8, kas atbilst vidējam priežu meža LAI (Sumida, Watanabe, & Miyaura, 2018), un ļauj novērot LAI ietekmi uz gruntsūdens līmeni plašākā amplitūdā.

BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis pilnā funkcionalitātē pieejams *Insight Maker*, interneta pārlūkā atverot šo hipersaiti <https://insightmaker.com/insight/201089/Bog-hydrology-model>. *Insight Maker* purva hidroloģisko sistēmu imitējošajā modelī kā ieejas dati ir izmantoti Mannikjarves purva mērījumu dati un tas atļauj detalizēti izpētīt modeļa uzbūvi un matemātisko formulējumu.

Purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis parāda, ka sistēmu dinamika ir piemērota hidroloģisko procesu un režīmu modelēšanai, jo tās struktūra ļauj izprast sistēmu un sniedz informāciju par tās darbību. Sistēmu dinamika arī sniedz ieskatu dažādu hidroloģisko procesu mijiedarbībā tādējādi pierādot, ka šis ir efektīvs modelēšanas rīks, kas ļauj strukturēt un integrēt esošo hidroloģisko procesu informāciju.

Darbā aprakstītās NB-IoT sensoru sistēmas tiešo ekonomisko ietekmi uz informācijas tehnoloģiju un komunikācijas nozari nav iespējams novērtēt, jo sistēmas izbūve pēc būtības sastāda tikai izmaksas. Tomēr, jāuzsver šīs pieejas praktiskā nozīme, jo vairākas reizes zemāko izmaksu dēļ, salīdzinājumā ar standarta meteoroloģiskajām stacijām, tā varētu veicināt sensoru sistēmu izmantošanu meteoroloģisko un hidroloģisko datu vākšanai, kas savukārt paplašinātu šī un citu vidi un ekoloģiju imitējošo modeļu pielietojuma ģeogrāfisko areālu, sniedzot pētniekiem vispārīgāku ieskatu par ekosistēmas ietekmējošo faktoru savstarpējo mijiedarbību un ietekmi uz procesiem. Pētnieku atziņas kalpotu ilgtspējīgas un drošas vides veidošanai, samazinot cilvēka ietekmes uz vidi sekas.

SECINĀJUMI

Pētījuma mērķis bija, balstoties uz reālas ekosistēmas uzbūves un tajā noritošo procesu analīzi, ar modelēšanas un imitācijas metodēm izstrādāt purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli mežaudzes koku vainagu seguma ietekmes uz ekosistēmas ūdens bilanci novērtēšanai un tā izmantošanas metodoloģiju, kā arī izstrādāt IoT sensoru sistēmas prototipu *in situ* meteoroloģisko un gruntsūdens līmeņa jēldatu ievākšanas, apstrādes un izmantošanas metodoloģiju.

Pētījuma laikā apstiprinājās hipotēze, ka *in situ* sensori dati apvienojumā ar purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli un tā izmantošanas metodoloģiju hidroloģijas, ģeoloģijas un bioloģijas ekspertiem, kā arī iesaistītajām pusēm un lēmumu pieņēmējiem sniedz iespēju uzskatāmi novērtēt mežaudzes apjoma ietekmi uz purva ūdens bilanci, un skaidrot ekosistēmas atjaunošanas nozīmi un ietekmi uz vidi:

- Kopīgi ar ģeoloģijas PhD, pētnieku Marko Kohv (Tartu Universitātes, Zinātnes un tehnoloģiju fakultātes, Ekoloģijas un zemes zinātņu, Ģeoloģijas departaments) un dzīvnieku ekoloģijas PhD, profesoru un vadošo pētnieku Asko Lõhmus (Tartu Universitātes, Zinātnes un tehnoloģiju fakultātes, Ekoloģijas un zemes zinātņu institūta, Bioloģijas aizsardzības departaments) sagatavojot kopīgu zinātnisko publikāciju, vienlaicīgi tika iegūta modeļa validācija, saņemot ekspertu, kuri kopīgi strādājuši degradētu purvu atjaunošanas projektā Igaunijā (Liina, et al., 2019), atzinumu par modeļa darbību un piemērotību, kas lasāms publikācijas “Performance of a Bog Hydrological System Dynamics Simulation Model in an Ecological Restoration Context: Soomaa Case Study, Estonia“ diskusijas daļā un iekļauts darba 3.nodaļas secinājumos;
- Fundamentālo un lietišķo pētījumu projektu programmas pētniecības projekta “Purvu hidroloģisko režīmu reāllaika un imitāciju datu vizualizācija virtuālā realitātē” (projekta Nr.lzp-2020/2-0396, 01.12.2020 – 31.12.2021) ietvaros, autora izstrādātā jaunā imitējošās modelēšanas metode un tā izmantošanas metodoloģija, apvienojumā ar izstrādāto IoT sensoru sistēmu kvalitatīvu *in situ* jēldatu iegūšanai un tā izmantošanas metodoloģiju, tika praktiski izmantota purvu ekosistēmas funkcionēšanas imitēšanai un vizualizēšanai virtuālās realitātes vidē;
- 5.nodaļā aprakstītā purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa lietotāja saskarne (skatīt 27.attēlu) kā vizuāls piemērs izmantots, lai par mežaudzes ietekmi uz purva ekosistēmas ūdens bilanci stāstītu (1) 30.03.2021 videolekcijā Aizkraukles vidusskolas

9.klašu grupai, (2) 17.08.2021 Ceļotāju dienas Zilākalnā apmeklētājiem, (3) 21.04.2022 Augšlīgatnes Jaunajās sākumskolas 3.-5.klašu grupai.

Darba rezultāti ir lietišķi un var tikt plaši pielietoti visā Baltijas reģionā.

Promocijas darba teorētiskā vērtība - izstrādātā purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa pieeja ļauj uzskaitīt dinamiskās sistēmas īpašības. Šī metodoloģija sniedz precīzākus rezultātus (zemāka vidējā nobīde un saknes vidējā kvadrāta kļūda) nekā esošās pieejas, jo īpaša uzmanība pievērsta parametriem, kas citos hidroloģiskajos modeļos nav attēloti tik augstā detalizācijas līmenī, vai arī nav iekļauti vispār. Šie parametri ir ar veģetāciju saistītās ūdens bilanci ietekmējošās ekosistēmas īpašības kā intercepcija un transpirācija, kas vairumā hidroloģisko modeļu nemaz nav iekļautas.

Promocijas darba zinātniskais jaunieguvums – ir izstrādāta metodoloģija imitējošās modelēšanas un sensoru sistēmas pielietošanai ekosistēmas pārvaldīšanai. BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa metodika caurvij gandrīz visu promocijas darbu un nav atsevišķi izdalīta un, balstoties uz to, iespējams replicēt šo modeli un veikt mežaudzes koku vainagu ietekmi uz jebkura Baltijas jūras reģiona purva ekosistēmas ūdens bilanci. No metodoloģijas viedokļa visnezīmīgākās apakšnodaļas ir (1) 3.1.5 Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa ieejas un izejas dati, (2) 3.1.6 Objektorientētais dizains, (3) 3.2 Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa matemātiskais formulējums, (4) 3.3 Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa izstrāde un (5) 4.2 NB-IoT sensoru sistēmas uzbūve. Metodoloģija atšķiras no esošajām hidroloģisko modeļu metodoloģijām, jo modelis izmantojams “lēnu” ekosistēmu hidroloģisko sistēmu imitēšanai. Esošie hidroloģiskie modeļi katram no augsnes tipiem izmanto vienu hidrauliskās vadītspējas proporcionalitātes konstanti, tāpēc par darba autora izstrādātā purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa metodoloģija novitāti uzskatāma akrotelma dinamiskās hidrauliskās vadītspējas ieviešana. Akrotelma dinamiskā hidrauliskā vadītspēja nozīmē, ka ūdens infiltrācijas ātrums kūdras slānī samazinās palielinoties attālumam līdz zemes virskārtai, līdz tiek sasniegts katotelms, savukārt katotelmā hidrauliskā vadītspēja saglabājas konstanta. Darba autors izstrādāja vairākas loģiskās izteiksmes un vienkāršotu ūdens perkolācijas devona smilšakmens slānī pieeju, kā rezultātā ir uzlabota modeļa darbības precizitāte. Kā zinātniskais jaunieguvums minama arī autora piedāvātā NB-IoT sensoru sistēmas arhitektūra, kas ietver vairākas jaunas pieejas meteoroloģisko datu vākšanā, kā, piemēram, Doplera efekta mikroviļņu sensora izmantošana nokrišņu mērīšanai un UV sensora izmantošana saules radiācijas aprēķināšanai.

Promocijas darba praktiskā nozīme - autora piedāvātā metodoloģija ļauj ātrāk un efektīvāk atjaunot purva ekosistēmas ūdens bilanci, tādējādi palielinot dabas daudzveidību, atjaunojot ūdens ciklu, uzlabojot vietējo iedzīvotāju dzīves kvalitāti un veicinot rekreācijas iespējas, tā izmantojama kā mācību rīks vides zinātņu apmācības procesā. Izstrādātā NB-IoT sensoru sistēma risina problēmu ar *in situ* jēldatu pieejamību vidi imitējošo modeļu vajadzībām. Izstrādātais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis ir testēts divās sistēmu dinamikas vidēs, *Stella Architect* un *Insight Maker*, kas ļāva identificēt būtiskas atšķirības starp maksas un bezmaksas produktu. Gan autora izstrādātais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis, gan sensoru sistēma kvalitatīvu datu ievākšanai ir atkārtojami un replicējami, un koncepts izmantojams citiem modeļiem līdzīgās ekosistēmās.

Promocijas darba izstrādes gaitā iegūti šādi galvenie secinājumi:

1. Purvu ekosistēma ir viena no vērtīgākajām un vismazāk novērtētajām dabas ekosistēmām, kas sniedz vairākus vērtīgus ekosistēmas pakalpojumus, nodrošina tīrus pazemes ūdeņus, samazina ugunsgrēku risku u.c., dēļ kā ir vērts to sargāt un atjaunot iepriekš degradētos purvus.
2. Autora izstrādātā BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa, kas izstrādāts sistēmu dinamikas vidē, imitētās gruntsūdens līknes dažādos nogabalos ar atšķirīgiem apstākļiem imitē izmērītā gruntsūdens līmeņa līknes trajektoriju un svārstības, arī mainoties LAI. Lai noteiktu, cik precīzi darbojas izstrādātais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis, autors veica statistiskos testus. Statistiskie testi apstiprina, ka purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis darbojas precīzi un ir izmantojams, ne tikai cēloņu seku novērošanai, ko rada purva hidroloģiskās sistēmas komponentu mijiedarbība, bet arī, pamatojoties uz LAI – mežaudzes retināšanas intensitātes noteikšanai purvu atjaunošanas projektu vajadzībām.
3. Eksperimenti ar autora izstrādāto BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli parādīja, ka LAI nav tieši proporcionāls mežaudzes retināšanas intensitātei, kam par pamatu varētu būt atšķirīgs koku vecums, veselības stāvoklis un fakts, ka, nocērtot kokus, samazinot zemesdzīves noēnojums, kas veicina bioloģiskos procesus pamežā.
4. Autora izstrādātais BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis ne tikai grafiski attēlo LAI izmaiņu ietekmi uz purva gruntsūdens līmeņa izmaiņām, bet ar tā palīdzību iespējams izteikt skaitļos un procentos mežaudzes ietekmi uz kopējo ekosistēmas ūdens bilanci. Piemēram, testa nogabalā Nr.1, pirms mežaudzes retināšanas, tā aizkavēja nonākšanu līdz zemes virsmai un patērēja bioloģisko procesu nodrošināšanai 50% no nokrišņu, bet, veicot mežaudzes retināšanu 44% apmērā, tās

- ietekme uz ūdens bilanci samazinājās par 7% un sastāda 43%. Ar mērinstrumentiem izmērīt intercepciju un transpirāciju būtu sarežģīti, laikietilpīgi un dārgi, kamēr imitējošajā modelī integrētie empīriskie vienādojumi šīs vērtības, balstoties uz LAI, meteoroloģiskajiem apstākļiem un augsnes piesātinātību, ļauj noteikt izdarot pāris peles klikšķus.
5. Sistēmu dinamikas pieeja palīdz imitēt procesus konkrētā punktā un saprast cēloņsakarības, kas padara to par piemērotu līdzekli, lai pārlicinātos, ka sistēma ietver visas komponentes pirms liela mēroga procesu modelēšanas citā vidē. Vienlaikus šī pieeja, kas ļauj izpētīt katru no sistēmas sastāvdaļām individuāli un visas kopā, padara to par lielisku imitāciju mācību metodi.
 6. Promocijas darba rezultāti ir praktiski pielietojami un tiek tālāk izmantoti tādos pētniecības projektos kā Eiropas Savienības pētniecības un inovāciju atbalsta programmas “Apvārsnis 2020” zinātnes pētniecības projektā “reSilienT fARminG by Adaptive microclimaTe managEment (STARGATE)” (projekta Nr.818187, 01.10.2019 - 30.09.2023), Fundamentālo un lietišķo pētījumu projektu programmas pētniecības projektā “Purvu hidroloģisko režīmu reāllaika un imitāciju datu vizualizācija virtuālā realitātē” (projekta Nr.lzp-2020/2-0396, 01.12.2020 – 31.12.2021), kā arī Eiropas Savienības programmas “Erasmus+” Eiropas universitāšu projekta “Engaged and Entrepreneurial European University as Driver for European Smart and Sustainable Regions (E³UDRES²)” (projekta Nr.101004069, 01.10.2020 – 30.09.2023) iekšējā pētniecības projektā “Multi-Sensor Monitoring for Smart and Sustainable Farming in Europe (MULTISENS²E)” (01.10.2021 – 30.09.2023).
 7. Grafiskais sistēmu dinamikas purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa attēlojums sniedz iespēju hidroloģijas un bioloģijas ekspertiem to ērti validēt, bet iesaistītajām pusēm un lēmumu pieņēmējiem uzskatāmi parādīt koku apjoma ietekmi uz purva ūdens bilanci, un skaidrot ekosistēmas atjaunošanas nozīmi un ietekmi uz vidi.
 8. Lielais lidmašīnu lidojumu skaita samazinājums koronavīrusa SARS-CoV-2 pandēmijas dēļ ir radījis problēmas laikapstākļu prognozēšanai, jo ievērojami samazinājies pieejamo meteoroloģisko datu apjoms (Guardian News & Media Limited, 2020). Autora piedāvātā NB-IoT sensoru sistēma ne tikai apkopo datus, kas nepieciešami hidroloģiskās sistēmas imitējošo modeļu darbībai, bet, piemēram, līdzīgās krīzes situācijās varētu sniegt datus, kas nepieciešami laikapstākļu prognozēšanai, it īpaši, ja šī sensoru sistēmas arhitektūra, tās zemo izmaksu dēļ, tiktu plaši pielietota visapkārt zemeslodei, veidojot vienotu globālu sensoru tīklu. Promocijas darba ietvaros tika izstrādāta sensoru sistēma *in situ* ieejas datu imitējošo modeļu darbināšanai

iegūšanai un apstrādei un izstrādāts plaši pielietojams purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis, kā plašāka praktiska pielietošana dotu lielu ekonomisku daudzkārsjošu efektu un labvēlīgi ietekmētu klimatu, sniedzot labumu visai sabiedrībai, tādējādi pamatojot IoT sensoru sistēmas pielietojumu un nepieciešamību. Novērtējot IoT sensoru sistēmas un purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa darbību, tika izdarīti secinājumi: NB-IoT sensoru zemās izmaksas, nelielais izmērs un ilgais barošanas elementu kalpošanas mūžs paver iespējas plašākai kvalitatīvu imitējošo modeļu ieejas datu iegūšanai, lai, piemēram, neatkārtotos situācija kā Gulbju salas purva atjaunošanas projektā (projekts “Mežu biotopu atjaunošana Gaujas nacionālajā parkā”, projekta numurs LIFE10 NAT/LV/000159 FOR-REST), kad gruntsūdens mērījumus divas reizes mēnesī veica vides inspektors, braucot uz objektu un lasījumus veicot manuāli ar mērlentu un pierakstot uz papīra lapas, bet datus varētu nolasīt attālināti vienu reizi dienā, vai biežāk, ja nepieciešams.

9. Kamēr, balstoties uz mākoņskaitļošanas algoritmiem, nav iespējams izveidot vienotu globālu meteoroloģisko datu glabātuvī ar pietiekami augstu izšķirtspēju, lai dati būtu pieejami un izmantojami lokālu imitējošo modeļu darbināšanai, kas prasa augstu precizitāti, lietu interneta sensoru sistēmas ir piemērotas šo datu iegūšanai un nākotnē varētu kļūt par daļu no globāla sensoru tīkla.

IZZINĀS AVOTI

- Abdulkareem, J. H., Pradhan, B., Sulaiman, W. N., & Jamil, N. R. (2018). Review of studies on hydrological modelling in Malaysia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1-29. doi:10.1007/s40808-018-0509-y
- Aghlmand, R., & Abbasi, A. (2019). Application of MODFLOW with Boundary Conditions Analyses Based on Limited Available Observations: A Case Study of Birjand Plain in East Iran. *II*, 1-21. doi:10.3390/w11091904
- Akter, A., & Ahmed, S. (2021). Modeling of groundwater level changes in an urban area. *Sustainable Water Resources Management*, 7(1). doi:10.1007/s40899-020-00480-x
- AL-Hasami, S., Gunawardhana, L., Sana, A., & Baawain, M. (2020). A Numerical Groundwater Flow Model of Wadi Samail Catchment Using MODFLOW Software. *International Journal of GEOMATE*, 18(70), 30-36. doi:10.21660/2020.70.5671
- Andreadis, K. M., Lettenmaier, D. P., & Storck, P. (2009). Modelling snow accumulation and ablation processes in forest environments. *Water Resource Research*, 45, 1-13. doi:10.1029/2008WR007042
- Auniņš, A., Bambe, B., Enģele, L., Ikauniece, S., Kabucis, I., Laime, B., . . . Sniedze, R. (2010). *Eiropas Savienības nozīmes īpaši aizsargājamie biotopi Latvijā*. Rīga: Latvijas Dabas fonds.
- Baldunčika, J. (2007). *Svešvārdu vārdnīca: vairāk nekā 16 000 citvalodu cilmes vārdu un terminoloģisku vārdkopu* (Sēj. 3). Rīga: Jumava.
- Bērziņa, K. (2008). *Tūrisma un viesmīlības terminu skaidrojošā vārdnīca*. Rīga: LR Ekonomikas ministrija.
- Carey, S., Elshorbagy, A., & Kesha, N. (2009). A generic system dynamics model for simulating and evaluating the hydrological performance of reconstructed watersheds. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 865-881.
- Custers, J., & Graafstal, H. (2005). *Characterization of the water flow in a pool-ridge microtope in a bog. A case study of Männikjärve bog, Estonia*. Wageningen University.
- de Graaf, I. E., Sutanudjaja, E. H., van Beek, L. P., & Bierkens, M. F. (2015). A high-resolution global-scale groundwater model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 823-837. doi:10.5194/hess-19-823-2015

- ECMWF. (2020). *Near surface meteorological variables from 1979 to 2018 derived from bias-corrected reanalysis*. Ielādēts no <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/derived-near-surface-meteorological-variables?tab=overview>
- Elshorbagy, A., Julta, A., Barbour, L., & Kells, J. (2005). System dynamics approach to assess the sustainability of reclamation of disturbed watersheds. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32, 144-158. doi:10.1139/L04-112
- European Commission. (1992). COUNCIL DIRECTIVE 92/43/EEC. *Official Journal of the European Communities*, 1-44.
- European Commission. (2020). *EU Biodiversity Strategy for 2030*. Brussels: European Commission.
- Fogwing. (2021). *What is Industrial IoT: Understanding IoT and IIoT in brief*. Ielādēts no Fogwing: <https://docs.fogwing.io/fogwing-platform/introduction-to-iiot>
- Gharehpetian, G. B., & Mohammad Mousavi Agah, S. (2017). *Distributed Generation Systems. Design, Operation and Grid Integration*. Elsevier Inc.
- Glen, S. (2021). *RMSE: Root Mean Square Error*. Ielādēts no Elementary Statistics for the rest of us: <https://www.statisticshowto.com/probability-and-statistics/regression-analysis/rmse-root-mean-square-error/>
- Gong, P., Pu, R., Biginb, G. S., & Larrieu, M. R. (2003). Estimation of Forest Leaf Area Index Using Vegetation Indices Derived From Hyperion Hyperspectral Data. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6), 1355-1362.
- Google. (2020). *Google Maps*. Ielādēts no <https://www.google.com/maps/>
- Grassini, P., van Bussel, L. G., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., . . . Cassman, K. G. (2015). How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. *Field Crops Research*, 177(2015), 49-63. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.004>
- Guardian News & Media Limited. (2020). *Decline in aircraft flights clips weather forecasts' wings*. Ielādēts no <https://www.theguardian.com/news/2020/apr/09/decline-aircraft-flights-clips-weather-forecasters-wings-coronavirus>

- Hancock, M., Cowie, N., & Field, R. (2014). *No.12: The science of peatland restoration*. RSPB Centre for Conservation Science.
- Härkönen, S., Lehtonen, A., Manninen, T., Tuominen, S., & Peltoniemi, M. (2015). Estimating forest leaf area index using satellite images: comparison of k-NN based Landsat-NFI LAI with MODIS-RSR based LAI product for Finland. *Boreal Environment Research*, 181-195.
- Hepburn, C., O'Callaghan, B., Stern, N., Stiglitz, J., & Zenghelis, D. (2020). Will COVID-10 fiscal recovery packages accelerate or retard progress on climate change? *Oxford Review of Economic Policy*, 1-25. doi:<https://doi.org/10.1093/oxrep/graa015>
- Idbella, M., Iadaresta, M., Gagliarde, G., Mennella, A., Mazzoleni, S., & Bonanomi, G. (2020). AgriLogger: A New Wireless Sensor for Monitoring Agrometeorological Data in Areas Lacking Communication Networks. *Sensors*, 20, 1-13. doi:10.3390/s20061589
- Infineon Technologies AG. (2020). *24 GHz transceiver - BGT24LTR11*. Munich: Infineon Technologies AG.
- IPBES. (2019). *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform of Biodiversity and Ecosystem Services*. Bonn: IPBES secretariat. doi:<https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579>
- Izady, A., Abdalla, O., Joodavi, A., & Chen, M. (2017). Groundwater Modeling and Sustainability of a Transboundary Hardrock–Alluvium Aquifer in North Oman Mountains. *Water*, 1-17. doi:10.3390/w9030161
- Yang, M., He, W., Zhang, Z., Xu, Y., Yang, H., Chen, Y., & Xu, X. (2019). An efficient storage and service method for multi-source merging meteorological big data in cloud environment. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 241(2019), 1-12. doi:<https://doi.org/10.1186/s13638-019-1576-0>
- Yin, C., & McKay, A. (2018). Introduction to Modeling and Simulation Techniques. *The 8th International Symposium on Computational Intelligence and Industrial Applications (ISCIIA2018)*, (lpp. 1-6).
- Yu, Y., Wang, J., Liu, G., & Cheng, F. (2019). Forest Leaf Area Index Inversion Based on Landsat OLI Data in the Shangri-La City. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 10. doi:<https://doi.org/10.1007/s12524-019-00950-6>

- Jacobsen, D., & Dangles, O. (2017). *Ecology of High Altitude Waters*. Oxford: Oxford University Press. doi:10.1093/oso/9780198736868.001.0001
- Järv, H., Kliimask, J., Ward, R. D., & Sepp, K. (2016). Socioeconomic Impacts of Protection Status on Residents of National Parks. *European Countryside*, 8(2), 67-85. doi:10.1515/euco-2016-0006
- Java, O. (2017). Significance of Thinning Degraded Swamps Forest Stands in Sustainable Ecosystem's Development. (lpp. 5). Kaunas: Proceedings of the 8th International Scientific Conference Rural Development 2017. doi:http://doi.org/10.15544/RD.2017.104
- Java, O. (2020). The Specification of Hydrological Model Requirements for Bog Restoration. *Baltic Journal of Modern Computing*, 8(2020), 164-173. doi:10.22364/bjmc.2020.8.1.11
- Java, O., Kohv, M., & Asko, L. (2020). Hydrological model for decision-making: Männikjärve bog case study, Estonia. *Baltic Journal of Modern Computing*, 8(3), 3798-390. doi:10.22364/BJMC.2020.8.3.01
- Java, O., Kohv, M., & Lõhmus, A. (2021). Performance of a Bog Hydrological System Dynamics Simulation Model in an Ecological Restoration Context: Soomaa Case Study, Estonia. *Water*, 13, 1-13. doi:10.3390/w13162217
- Java, O., Sigajevs, A., Binde, J., & Kepka, M. (2021). NB-IoT Sensor Network for Obtaining the Input Data for Hydrological Simulation Model. *Agris On-line Papers in Economics and Informatics*, 13(1), 59-69. doi:10.7160/aol.2021.130105
- Jenning, K. S., Kittel, T. F., & Molotch, N. P. (2018). Observations and simulation of the seasonal evolution of snowpack cold content and its relation to snowmelt and the snowpack energy budget. *Cryosphere*, 12(5), 1595-1614. doi:10.5194/tc-12-1595-2018
- Jiang, M., Xie, S., & Wang, S. (2020). Water Use Conflict and Coordination between Agricultural and Wetlands—A Case Study of Yanqi Basin. *Water*, 12, 1-18. doi:doi:10.3390/w12113225
- Jørgensen, S. E., Mitch, W. J., & Kells, J. (1988). Wetland Modelling. *Developments in Environmental Modelling*, 12, 1-8.

- Jovanovic, N., Bugan, R., Tredoux, G., Israel, S., Bishop, R., & Marius, V. (2017). Hydrogeological modelling of the Atlantis aquifer for management support to the Atlantis Water Supply Scheme. *Water SA*, 43(1), 122-138. doi:10.4314/wsa.v43i1.15
- Kiely, G., Leahy, P., McVeight, P., Laine, A., Lewis, C., Koehler, A. K., & Sottocornola, M. (2018). Survey of GHG Emission and Sink Potential of Blanket Peatlands. 34.
- Koohestani, N., Meftah Halaghi, M., & Dehghani, A. (2013). Numerical simulation of groundwater level using MODFLOW software (A case). *International journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 1(8), 858-873.
- Kuļikovskis, G. (2015). *Viedās specializācijas jomas - "Informācijas un komunikāciju tehnoloģijas" ekosistēmas analītiskais apraksts*. Rīga: Izglītības un zinātnes ministrija.
- Kvēle, V. (2005). *Grāmatvedības jēdzienu skaidrojošā vārdnīca*. Rīga: Avots.
- Laine, A. M., Leppälä, M., Tarvainen, O., Päätaalo, M. L., Seppänen, R., & Tolvanen, A. (2011). Restoration of Managed Pine Fens: Effect of Hydrology and Vegetation. *Applied Vegetation Science*, 14, 340-349. doi:doi:10.1111/j.1654-109X.2011.01123.x.
- Latvijas Universitāte. (2018). *MOSYS mobilā aplikācija*. Ielādēts no <https://www.puma.lv/aplikacija/>
- Latvijas valsts meži. (2020). *LĢIA topo karte 1:50000*. Ielādēts no Kartes: <https://www.lvmgeo.lv/kartes>
- Le Maresquier, L., Aapala, K., Alanen, A., & Hokkanen, M. (2016). *The Boreal Restoration Tour: Estonia, Latvia and Lithuania*. European Union.
- Li, L., & Simonovic, S. P. (Process). System dynamics model for predicting floods from snowmelt in North America prairie watersheds. *Hydrology*, 16, 2645-2666. doi:10.1001/hhyp/1064
- Liina, R., Lõhmus, A., Leibak, E., Kohv, M., Salm, J.-O., Lõhmus, P., . . . Rannap, R. (2019). Restoration dilemmas between future ecosystem and current species values: The concept and a practical approach in Estonian mires. *Journal of Environmental Management*, 250, 1-8. doi:10.1016/j.jenvman.2019.109439
- Lõhmus, A., Leivits, M., Pēterhofs, E., Zizas, R., Hofmanis, H., Ojaste, I., & Kurlavičius, P. (2017). The Capercaillie (Tetrao Urogallus): An Iconic Focal Species for Knowledge-

- Based Integrative Management and Conservation of Baltic Forests. *Biodiversity and Conservation*(26), 1-21.
- Martis, M. S. (2006). Validation of Simulation Based Models: A theoretical Outlook. *The Electronic Journal of Business Research Methods*, 4(1), 39-49.
- Mashal, A. F., & Fernald, A. G. (2020). Identifying Capabilities and Potentials of System Dynamics in Hydrology and Water Resources as a Promising Modeling Approach for Water Management. *Water*, 12(1342), 1-23. doi:10.3390/w12051432
- Mind'áš, J. V., Škvarenina, J., & Střelcová, K. (2006). Influence of tree transpiration and mass water balance of mixed mountain forests in the West Carpatians. *Biologia*, 61(19), 305-310. doi:10.2478/s11756-006-0178-6
- Mioduszkowski, W., Povilaitis, A., Querner, E. P., & Ślesicka, A. (2010). Modelling Peatland Hydrology: Three Cases from Northern Europe. *Polish J. of Environ. Stud.*, 19(1), 149-159.
- Moharir, K., Pande, C., & Patil, S. (2017). Inverse modelling of aquifer parameters in basaltic rock with the help of pumping test method using MODFLOW software. *Geoscience Frontiers*, 8(6), 1385-1395. doi:10.1016/j.gsf.2016.11.017
- Mojammadighavam, S. (2017). *Hydrological and Hydraulic Design of Peatland Drainage and Water Treatment Systems for Optimal Control of Diffuse Pollution*. Oulu: University of Oulu.
- NSRC. (2020). *HecRAS*. Ielādēts no Natural Resources Conservation Service: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/national/water/manage/hydrology/?cid=stelprdb1042484>
- Oerlemans, R., & Vink, R. P. (2010). *Rainfall Interception Experiments and Interception Mapping using Remote Sensing*. Utrecht University.
- Ozoliņa, V. (2021). *Imitējošās modelēšanas metodes*. Ielādēts no Kvantitatīvās metodes ekonomikā: <https://estudijas.rtu.lv/mod/resource/view.php?id=120783>
- Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayewa, T., Silvus, M., & Stringer, L. (2008). *Assessment on peatlands, biodiversity and climate change*. Global Environment Centre & Wetlands International.

- Pöldmaa, K., Spirin, V., Miettinen, O., Runnel, K., Savchenko, A., Pärtel, K., & Kõljalg, U. (2019). Fungi from Soomaa National Park: rarities and species new for Estonia. *Folia Cryptogamica Estonica*, 56(128), 1-10. doi:10.12697/fce.2019.56.13
- Priede, A., & Silamiķele, I. (2015). *Rekomendācijas izstrādātu kūdras purvu renaturalizācijai*. Salaspils: Latvijas Universitātes Bioloģijas institūts.
- Priede, A., Jātnieks, J., Kļaviņa, Ē., & Urtāns, A. V. (2017). *Vadlīnijas aizsargājamo biotopu saglabāšanā Latvijā. 4.sējums. Purvi, avoti un anoksnāji*. Sigulda: Dabas aizsardzības pārvalde.
- Ratcliffe, J. (2014). *Restoration of peatlands drained for forestry*. Alfred Toepfer.
- Rawls, W. J., Brakensiek, K. E., & Saxton, K. E. (1982). Estimation of Soil Water Properties. *Transactions of ASAE*, 25(5), 1316-1320.
- Sarget, R. G. (2011). Verification and Validation of Simulation Models. *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference* (lpp. 183-198). Phoenix: IEEE.
- Sasso, D. (2020). *The Doppler Effect in Contemporary Physics*. International Laboratory of Contemporary Physics. doi:10.13140/RG.2.2.36795.64808
- Shrestha, A., Nair, A. S., & Indu, J. (2020). Role of precipitation forcing on the uncertainty of land surface model simulated soil moisture estimates. *Journal of Hydrology*, 580, 1-26. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.124264
- Shu, L., Xu, Y., & Wu, P. (2017). Groundwater Flow Numeric Simulation Method Based on Uncertainties of MODFLOW Parameters. *Journal of Jilin University*, 47(6), 1803-1809. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.201706203
- Srivastava, A. K., Ceglar, A., Zeng, W., Gaiser, T., Mboh, C. M., & Ewert, F. (2020). The implication of different sets of climate variables on regional maize yield simulation. *Atmosphere*, 11(2), 1-15. doi:10.3390/atmos11020180
- Stark, M. (2008). Peatlands and Climate Change. *International Peatland Society*, 223.
- Sumida, A., Watanabe, T., & Miyaura, T. (2018). Interannual variability of leaf area index of an evergreen conifer stand was affected by carry-over effects from recent climate conditions. *Scientific Reports*, 1-11. doi:DOI:10.1038/s41598-018-31672-3

- Tooman, H., & Ruukel, A. (2012). Sustainable development of a remote tourism destination. The case study of Soomaa National Park, Estonia. *Sustainable development. Case studies from developing regions of the world*, 276-295.
- topographic-map.com. (2020). *Soomaa National Park*. Ielādēts no <https://en-ca.topographic-map.com/maps/nz32/Soomaa-National-Park/>
- van Zyl, T. L., Simons, I., & McFerren, G. (2009). The Sensor Web: systems of sensor systems. *International Journal of Digital Earth*, 2(1), 16-30. doi:10.1080/17538940802439549
- Vides risinājumu institūts. (2014). *Hidroloģiskā režīma atjaunošana purvainos mežos Gulbjusalas purva dabas liegumā*.
- Wang, Y., Jiang, R., Xie, J., Zhao, Y., Yan, D., & Yang, S. (2019). Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model: A Systemic Review. *Journal of Coastal Research*, 93, 22-30. doi:10.2112/SI93-004.1
- World Economic Forum. (2020). *Nature Risk Rising: Why the Crisis Engulfing Nature Matters for Business and the Economy*. Geneva.
- Zheng, G., & Moskal, M. (2009). Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: Theories, Methods and Sensors. *Sensors*, 9, 2719-2745. doi:10.3390/s90402719