



VYTAUTAS AKSTINAS

**LIETUVOS UPIŲ
POTVYNIŲ IR JŲ
RIZIKOS
VERTINIMAS
KLIMATO KAITOS
SĄLYGOMIS**

DAKTARO DISERTACIJA

Kaunas
2019

LIETUVOS ENERGETIKOS INSTITUTAS

VYTAUTAS AKSTINAS

LIETUVOS UPIŲ POTVYNIŲ IR JŲ RIZIKOS
VERTINIMAS KLIMATO KAITOS
SĄLYGOMIS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, aplinkos inžinerija (T 004)

Kaunas, 2019

Disertacija rengta 2014–2018 metais Lietuvos energetikos instituto Hidrologijos laboratorijoje.

Mokslinė vadovė:

Dr. Jūratė Kriaučiušienė (Lietuvos energetikos institutas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija – T 004).

Interneto svetainės, kurioje skelbiama disertacija, adresas:

<http://ktu.edu>

Kalbos redaktorė:

Aldona Tomkevičienė

© V. Akstinas, 2019

ISBN 978-609-02-1585-2

Leidinio bibliografinė informacija pateikiama Lietuvos nacionalinės Martyno Mažvydo bibliotekos Nacionalinės bibliografijos duomenų banke (NBDB)

TURINYS

SANTRUMPOS IR MATAVIMO VIENETAI	5
ĮVADAS	8
1. LITERATŪROS APŽVALGA	11
1.1. Klimato kaitos aktualumas pasauliniu mastu	11
1.2. Potvynių reiškiniai pasaulyje	13
1.3. Potvynių tyrimai Lietuvoje	15
1.4. Klimato scenarijų raida XX a. pabaigoje ir XXI a. pradžioje	18
1.5. Globalaus klimato modeliai	22
1.6. Tinklelio raiškos didinimo metodai	23
1.7. Upių nuotėkio prognozės ir jų neapibrėžtumai taikant naujausius klimato scenarijus	24
1.8. Autoriaus indėlis į nagrinėjamą tematiką	26
2. METODIKA	28
2.1. Potvynių tyrimas taikant statistinius metodus	29
2.2. Penktosios Tarpvyriausybės klimato kaitos komisijos ataskaitos klimato scenarijai	32
2.3. Globalaus klimato modelių parinkimas	33
2.4. Meteorologinių duomenų adaptacija Lietuvos sąlygoms taikant statistinius tinklelio raiškos didinimo metodus	34
2.5. Potvynių prognozė naudojant HBV programinę įrangą	36
2.6. Upių nuotėkio ir potvynių prognozių neapibrėžtumo tyrimas	40
3. HIDROMETEOROLOGINIŲ DUOMENŲ BAZĖS SUDARYMAS	41
3.1. Duomenys praeities pavasario potvyniams bei vasaros ir rudens poplūdžiams vertinti	41
3.2. Duomenys pavasario potvynių dydžio formavimosi sąlygoms nustatyti	43
3.3. Duomenys pavasario potvyniams bei vasaros ir rudens poplūdžiams prognozuoti XXI a.	44
4. POTVYNIŲ VERTINIMAS PAGAL DAUGIAMEČIUS DUOMENIS	47
4.1. Pavasario potvynių bei vasaros ir rudens poplūdžių kaita praetyje	47
4.2. Pavasario potvynio dydį formuojantys veiksniai ir jų vertinimas statistiniais metodais	58
4.2.1. Pavasario potvynių formavimosi sąlygos	58
4.2.2. Pavasario potvynių maksimalių debitų ir maksimalių vandens atsargų sniege vertinimas tikimybiniais skirstiniais	63
4.2.3. Daugialypės tiesinės regresijos modeliai pasirinktų upių pavasario potvynių maksimaliems debitams įvertinti	64

5. HIDROMETEOROLOGINIŲ RODIKLIŲ PROGNOZĖS ANALIZĖ XXI a. PAGAL ĮVAIRIUS KLIMATO SCENARIJUS	67
5.1. Oro temperatūros ir kritulių kiekio prognozės analizė Lietuvoje pagal įvairius klimato scenarijus XXI a.	67
5.2. Lietuvos upių nuotėkio prognozė pagal įvairius klimato scenarijus XXI a.	74
5.3. Lietuvos upių potvynių prognozė pagal įvairius klimato scenarijus XXI a.	82
5.3.1. Pavasario potvynių maksimalių debitų prognozės analizė pagal įvairius klimato scenarijus	82
5.3.2. Vasaros ir rudens poplūdžių maksimalių debitų prognozės analizė pagal įvairius klimato scenarijus	88
5.4. Lietuvos upių nuotėkio ir potvynių prognozių neapibrėžtumų analizė	94
5.4.1. Vidutinio metinio nuotėkio prognozių neapibrėžtumų analizė	97
5.4.2. Pavasario potvynių maksimalių debitų prognozių neapibrėžtumų analizė	99
5.4.3. Vasaros ir rudens poplūdžių maksimalių debitų prognozių neapibrėžtumų analizė	101
6. REKOMENDACIJOS IR PASIŪLYMAI VANDENS TELKINIŲ IŠTEKLIŲ APSAUGOS IR VALDYMO DOKUMENTAMS RUOŠTI	103
IŠVADOS	109
LITERATŪRA	110
MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	120

SANTRUMPOS IR MATAVIMO VIENETAI

A1, A2, A1B, B1, B2	– SRES grupės emisijų scenarijai
A–D	– Andersono–Darlingo skirstinių tinkamumo testas
alfa	– debitų pikų netiesiškumo pataisos koeficientas
AR5	– Tarpvalstybinės klimato kaitos komisijos penktoji ataskaita
athorn	– supaprastinta Thornthwait lygtis, mm/parą °C
B	– daugialypės tiesinės regresijos modelio koeficientas
BC	– paklaidų korekcijos su kintamumu tinklelio raiškos didinimo metodas (angl. <i>BC – Bias Correction with variable</i>)
Beta	– rodiklis, rodantis nuotėkio susidarymą iš dirvožemyje sukauptų vandens atsargų
CC1, CC2, CC3, CC4	– hidrotechnikos statinių pasekmių klasės (angl. <i>CC – consequence class</i>)
CF	– pokyčio faktoriaus su kintamumu tinklelio raiškos didinimo metodas (angl. <i>CF – Change Factor with variable</i>)
cflux	– kapiliarinis viršutinių vandens sluoksnių judėjimas į dirvožemio vandens sluoksnį
cfmax	– sniego tirpsmo intensyvumas, mm/°C per parą
CMIP5	– Penktasis modelių palyginimo projektas (angl. <i>CMIP5 – Coupled Model Intercomparison Project Phase 5</i>)
dtm	– temperatūros riba, ties kuria prasideda sniego tirpsimas, °C
E	– evapotranspiracija, mm
EB	– Europos Bendrija
EKPF _{MR,KNL}	– globalaus klimato modelio meteorologinio rodiklio empirinė kumuliacinė pasiskirstymo funkcija klimato normos laikotarpiu
EKPF _{S,KNL-1}	– išmatuoto meteorologinio rodiklio empirinė kumuliacinė pasiskirstymo funkcija
EP	– energinis poveikis, W/m ²
fc	– maksimalios dirvožemio drėgmės atsargos, mm
GCM	– globalaus klimato modelis (angl. <i>GCM – Global Climate Model</i>)
GEV	– apibendrintųjų ekstremalių reikšmių tikimybinis skirstinys (angl. <i>GEV – Generalized extreme value</i>)
GFDL–CM3	– Žemės sistemos modelis, sukurtas Jungtinių Amerikos Valstijų Nacionalinės vandenyno ir atmosferos administracijos
GL	– apibendrintas logistinis tikimybinis skirstinys (angl. <i>GL – Generalized Logistic</i>)
HadGEM2– ES	– Žemės sistemos modelis, sukurtas Jungtinės Karalystės orų tarnybos Hadley centre

HBV	– kritulių–nuotėkio modelis, skirtas upės baseino hidrologiniams procesams vertinti
HTS	– hidrotechnikos statinys
IPCC/ TKKK	– Tarpvyriausybinė klimato kaitos komisija (angl. <i>IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)
k	– modulinis koeficientas
k4	– požeminio baseino recesijos koeficientas
KE	– CO ₂ koncentracijos ekvivalentas
khq	– viršutinio sluoksnio recesijos koeficientas, kai debitas yra maksimalus
K–S	– Kolmogorovo–Smirnovo skirstinių tinkamumo testas
LHMT	– Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba
lp	– potencialaus išgaravimo iš dirvožemio riba, mm
LZ	– požeminis vanduo, mm
MR	– meteorologinis rodiklis
MR _{BC}	– BC tinklelio raiškos didinimo metodu pakoreguotas GCM prognozuojamas meteorologinis rodiklis ateityje
MR _{CF}	– CF tinklelio raiškos didinimo metodu pakoreguotas GCM prognozuojamas meteorologinis rodiklis ateityje
MR _{KNL}	– GCM sumodeliuotas meteorologinis rodiklis klimato normos laikotarpiu
MR _{RAW}	– GCM prognozuojamas meteorologinis rodiklis ateityje
MS	– meteorologijos stotis
NOAA	– Nacionalinė vandenyno ir atmosferos administracija (angl. <i>NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration</i>)
NorESM1–M	– Žemės sistemos modelis, sukurtas Bjerkneso klimato tyrimų centre
P	– kritulių kiekis, mm
P ₁₀	– dešimties dienų kritulių suma prieš pavasario potvynio maksimalaus debito dieną, mm
RCM	– regioninio klimato modelis (angl. <i>Regional Climate Model</i>)
pcorr	– kritulių pataisa, susijusi su duomenų eilučių nehomogeniškumu
perc	– filtravimasis iš viršutinių sluoksnių į žemutinius (mm/parą)
Q	– debitas, m ³ /s
Q _{max}	– maksimalus potvynio ar poplūdžio debitas, m ³ /s
QM	– kvantilių priskyrimo tinklelio raiškos didinimo metodas (angl. <i>QM – Quantile Mapping</i>)
R	– Pirsono (angl. <i>Pearson</i>) koreliacijos koeficientas
RCM	– regioninio klimato modelis (angl. <i>Regional Climate Model</i>)

RCP (2.6, 4.5, 6.0, 8.5)	– šiltnamio efektą sukeliančių dujų koncentracijų scenarijai (angl. <i>RCP – Representative Concentration Pathways</i>)
Rfcf	– lietaus pavidalo kritulių pataisa
SD	– Statistinis tinklelio raiškos didinimo metodas (angl. <i>SD – statistical downscaling</i>)
Sfcf	– sniego pavidalo kritulių pataisa
S_{KNL}	– stebėjimų duomenys klimato normos laikotarpiu
SM	– dirvos drėgmė, mm
SP	– vandens atsargos sniege, mm
SRES	– TKKK Specialioji ataskaitoje apie emisijų scenarijus (angl. <i>SRES – Special Report on Emissions Scenarios</i>)
STR	– statybos techninis reglamentas
SWE	– vandens atsargos sniege, mm
SWE_{max}	– prieš potvynio pradžią susikaupusios maksimalios vandens atsargos sniege, mm
ŠESD	– šiltnamio efektą sukeliančios dujos
T	– oro temperatūra žemės paviršiuje, °C
Tt	– temperatūros slenkstis, ties kuriuo krituliai apibūdinami kaip sniegas ar lietus, °C
Tti	– temperatūros slenkstis, ties kuriuo krituliai apibūdinami kaip šlapdriba, °C
UBR	– upės baseino rajonas
UZ	– gruntinis vanduo
V	– vandens talpyklų tūris
VMS	– vandens matavimo stotis
W	– Veibulo tikimybinis skirstinys (angl. <i>Weibull</i>)
WatBal	– hidrologinis modelis, skirtas nuotėkiui modeliuoti
WMO	– Pasaulio meteorologijos organizacija
Z	– Mann–Kendall testo Z rezultatų reikšmė, nurodanti tendencijos kryptį ir stiprumą
$\sigma_{MR,KNL}$	– GCM išvesties duomenų standartinis nuokrypis klimato normos laikotarpiu
$\sigma_{MR,RAW}$	– GCM ateityje prognozuoto meteorologinio rodiklio standartinis nuokrypis
$\sigma_{S,KNL}$	– kasdienių stebėjimų standartinis nuokrypis klimato normos laikotarpiu

IVADAS

Lietuvos geografinėmis ir klimatinėmis sąlygomis upių potvyniai yra priskiriami ekstremaliems hidrologiniams reiškiniams. Šiame darbe analizuojami pavasario potvyniai bei vasaros ir rudens sezonų poplūdžiai. Jų susidarymą lemia skirtingos formavimosi priežastys. Upių potvyniai yra natūralus, dažniausiai kasmet gamtoje vykstantis reiškinys, o Lietuvos gamtinei zonai ypač būdingi pavasario potvyniai. Sniego tirpsmas yra pagrindinis pavasario potvynius formuojantis veiksnys, o jei atlydžio laikotarpis sutampa su lietumi, tada susidaro itin staigūs, dideli potvyniai. Pavasario potvynių dydį sąlygoja žemės paviršinio sluoksnio įšalas, kuris po žiemos dar būna nespėjęs atitirpti, todėl beveik nevyksta infiltracija ir didžioji dalis paviršinio nuotėkio patenka tiesiai į upes.

Lietuvoje vasaros ir rudens poplūdžius sukelia užsitęsios arba intensyvios liūtys. Pagrindinė vasaros liūčių priežastis yra po vasaros kaitros atslinkęs šaltas oro frontas arba konvekciniai kamuoliniai lietaus debesys, kurie dažnai pasižymi lokalumu. Svarbiausia sąlyga šiems debesims susiformuoti yra didelis saulės radiacijos kiekis, dėl kurio vyksta intensyvus garavimas iš jūros, ežerų, pelkių bei evapotranspiracija iš dirvos ir augalų. Susidarę kamuoliniai lietaus debesys savyje sukaučia milžiniškus vandens kiekius. Rudens poplūdžius iš esmės formuoja virš vietovės užslinkę gilūs ciklonai, paskui save nešantys gausius kritulius.

Šiuo metu vyrauja nuomonė, kad klimato kaita yra tarsi šalutinis antropogeninės veiklos produktas. Klimato kaita ateityje prognozuojama pagal CO₂ ir kitų šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos scenarijus, kurie priklauso nuo tolimesnės žmonių ūkinės, socialinės ir ekonominės raidos. Atsižvelgiant į tai, vienas iš pagrindinių aplinkos inžinerijos tikslų yra mažinti antropogeninės veiklos padarinius. Prognozuojant potvynių pokyčius ateityje klimato kaitos sąlygomis, būtų galima įvertinti jų poveikį žmonių gyvenamajai aplinkai ir žalą. Tik atlikus detalią potvynių kaitos analizę, galima numatyti problemų sprendimo būdus, pasiūlymus ir rekomendacijas. Klimato kaitos sąlygomis pasikeitęs Lietuvos upių hidrologinis režimas turės įtakos hidrotechninių statinių projektavimui, statybai bei priežiūrai. Dėl nepastovaus upių režimo, vandeningumo persiskirstymo ir sunkiai prognozuojamų ekstremalių hidrologinių reiškinų, apsaugos priemonių parinkimas ir įgyvendinimas, siekiant mažinti pavojaus riziką klimato kaitos sąlygomis, taps tikru XXI a. iššūkiu. Ekstremalių hidrologinių reiškinų galimi pokyčiai, susiję su klimato kaita, palies žmonių socialinę ir ekonominę aplinką.

Minėtiesiems iššūkiams spręsti yra siūlomi įvairūs būdai, tačiau visų pirma reikia sukurti tikslingą metodiką, kuri padėtų kruopščiai atrinkti tinkamiausius sprendimo būdus. Kalbant apie potvynius, svarbu detaliai išanalizuoti praėityje vykusius procesus tam, kad geriau suprastume kaip pasikeis hidrologiniai procesai ateityje. Visų pirma, keičiantis globalaus klimato, kartu ir regioninio klimato sąlygoms, keičiasi ir hidrologinis upių režimas. Vadovaujantis skirtingais klimato kaitos scenarijais, yra sudaromos būsimų potvynių kaitos prognozės. Turint apibendrintus tyrimų rezultatus, galima teikti rekomendacijas, kurios padėtų išvengti arba maksimaliai sumažintų ekstremalių hidrologinių reiškinų poveikį klimato kaitos sąlygomis. Ypač svarbu įvertinti prognozuojamų potvynių padarinius, kurie

gali būti susiję su pastatytų hidrotechninių statinių apgadinimais, taip pat statyba bei eksploatacija. Šiems statiniams didžiausią žalą gali padaryti retos pasikartojimo tikimybės potvyniai. Įvertinus šių potvynių tikimybę ir mastus klimato kaitos sąlygomis, galima teikti siūlymus bei rekomendacijas naujai statomiems hidrotechniniams statiniams.

Darbo aktualumas

Direktyva 2000/60/EB, nustatanti Bendrijos veiksmų vandens politikos srityje pagrindus, ir Europos potvynių vertinimo ir valdymo direktyva (Direktyva 2007/60/EB) reikalauja, kad šalių politikai ir asmenys, priimanys sprendimus, vertindami būsimų potvynių riziką, atsižvelgtų į vandens telkinių išteklių pokyčius, susijusius su klimato kaita ir siūlo reguliariai atnaujinti prognozes taikant naujos kartos klimato scenarijus.

Darbo objektas

Lietuvos upių pavasario potvyniai bei vasaros ir rudens sezonų poplūdžiai.

Darbo tikslas

Įvertinti Lietuvos upių pavasario potvynių bei vasaros ir rudens sezonų poplūdžių kaitos dėsningumus pagal daugiamečius duomenis ir atlikti šių hidrologinių reiškinių prognozę pagal naujausius klimato scenarijus taikant hidrologinį modeliavimą bei, įvertinus potvynių pokyčius ir jų riziką, pateikti rekomendacijas ir pasiūlymus vandens telkinių išteklių apsaugos ir valdymo dokumentams ruošti.

Darbo uždaviniai

1. Įvertinti upių potvynių kaitos dėsningumus ir nustatyti pagrindines šių reiškinių formavimosi sąlygas.
2. Sukurti upių potvynių prognozavimo metodiką klimato kaitos sąlygomis.
3. Taikant sukurtus hidrologinius modelius pasirinktoms upėms, atlikti potvynių prognozę bei įvertinti galimus jų pokyčius XXI a. pagal pasirinktus klimato scenarijus.
4. Įvertinti upių nuotėkio ir potvynių prognozių neapibrėžtumus, susijusius su klimato scenarijų, globalaus klimato modelių ir tinklelio raiškos didinimo metodų parinkimu.
5. Pateikti rekomendacijas ir siūlymus vandens telkinių išteklių apsaugos ir valdymo dokumentams ruošti.

Ginamieji disertacijos teiginiai

- Ateityje prognozuojama pavasario potvynių maksimalių debitų mažėjimo tendencija, tačiau atskirais metais išlieka tikėtini ekstremalūs potvyniai.
- Prognozuojami vidutiniai maksimalūs šiltojo sezono poplūdžių debitai didėja, kartu daugėja ir ekstremalių debitų pasikartojimo atvejų.

- Globalaus klimato modeliai, klimato scenarijai ir statistiniai tinklėlio raiškos didinimo metodai yra pirminiai potvynių prognozių neapibrėžtumų šaltiniai, kurių parinkimas daro reikšmingą įtaką galutinėms ekstremumų prognozėms.

Darbo naujumas ir pritaikomumas

Klimato kaitos įtaka potvyniams iki šiol yra mažai vertinta. Tik potvynių rizikos vertinimo ataskaitoje, UBR ir UBR potvynių rizikos valdymo planuose buvo įvertinta klimato kaita pagal SRES (angl. *SRES – Special Report on Emissions Scenarios*, 2000) grupės scenarijus, kurie tapo nebeaktualūs po RCP (angl. *RCP – Representative Concentration Pathways*) scenarijų pasirodymo 2013 m. Statybos techninio reglamento dokumentuose (STR 2.02.06:2004 ir STR 2.05.19:2005) nurodoma, kaip pagal hidrotechninių statinių pasekmių klases pasirinkti ekstremalių debitų tikimybes, tačiau tikimybinis vertinimas atliekamas pagal daugiamečius duomenis, neįvertinant galimų klimato kaitos tendencijų. Todėl šiame darbe RCP klimato scenarijų pagrindu sukurta prognozavimo metodika, patikrinta Lietuvos sąlygomis, leis įvertinti galimą klimato kaitos poveikį vandens telkiniams ir pateikti rekomendacijas bei pasiūlymus galimoms pasekmėms švelninti.

Doktorantūros studijų laikotarpiu dalis rezultatų buvo pritaikyta vykdant Nacionalinės programos projektą „Klimato kaitos ir kitų abiotinių aplinkos veiksnių poveikio vandens ekosistemoms vertinimas“ (2015–2018). Lietuvos upių nuotėkio ir potvynių prognozės ir jos neapibrėžtumo įvertinimas padės tiksliau nustatyti galimas Lietuvos upių sezoninių bei ekstremalių hidrologinių reiškinių ribines vertes pagal naujausius klimato scenarijus ir leis pateikti rekomendacijas bei pasiūlymus vandens telkinių išteklių apsaugos ir valdymo dokumentams (UBR ir UBR potvynių rizikos valdymo planai, potvynių grėsmės ir rizikos žemėlapiai, statybos techninis reglamentas) ruošti. Sukurta darbo metodika ir rezultatai bus naudingi vykdant esamus ir būsimus mokslinius projektus vertinant klimato kaitos įtaką hidrologiniams ekstremumams.

Publikacijos

Disertacijos tema paskelbtos 2 publikacijos „Clarivate Analytics“ duomenų bazėje „Web of Science Core Collection“ referuojamuose leidiniuose ir 1 publikacija priimta tai pačiai duomenų bazei priklausančiame žurnale. 1 publikacija yra paskelbta leidinyje, kuris registruotas SCOPUS duomenų bazėje. Pristatyti 8 pranešimai tarptautinėse konferencijose, iš kurių 2 vyko užsienyje.

Darbo struktūra ir apimtis

Disertaciją sudaro įvadas, šeši skyriai, išvados, literatūra ir mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas. Darbo apimtis – 121 puslapis, tarp jų 40 paveikslų ir 20 lentelių. Literatūros sąrašė pateikta 170 literatūros šaltinių.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Klimato kaitos aktualumas pasauliniu mastu

Terminą „klimato kaita“ pirmą kartą pasiūlė Pasaulio meteorologijos organizacija 1966 m. (angl. *WMO – World Meteorological Organization*) kaip sąvoką, kuri apibūdina klimato pokyčius, trunkančius ilgiau nei 10 metų, nepriklausomai nuo juos sukėlusių veiksnių. Dar XX a. septintajame dešimtmetyje mokslo bendruomenė klimato kaitą tyrė kaip šimtmečiais ar tūkstantmečiais vykusią procesų visumą, o nuo aštunto dešimtmečio klimato pokyčiai vis dažniau buvo pradėti sieti su žmogaus veiklos pasekmėmis dėl išaugusio energijos vartojimo ir maisto poreikio patenkinimo, augant žmonių skaičiui (Hulme, 2017).

Įvairių šalių mokslininkai pradėjo skelbti mokslines publikacijas klimato kaitos tematika ir 1977 m. buvo išleistas specialus žurnalas (*Climatic Change*), skirtas skelbti naujausiems tyrimams, kuriuos vykdo įvairių disciplinų mokslininkai, tiriantys klimato pokyčių įtaką skirtingoms gyvenimo sferoms (Schneider, 1977). Jau pirmuosiuose šio žurnalo numeriuose autoriai klimato kaitą siejo su žmogaus ūkine veikla bei kūrė pirmuosius klimato scenarijus pagal žmogaus ekonominės veiklos vystymosi tendencijas.

Pirmieji veiksmai, siekiantys stabilizuoti klimato kaitą, buvo 197 valstybių lyderių suvienijimas ratifikuoti tarptautinį susitarimą – Monrealio protokolą (1987 m. rugsėjo 16 d.). Šiuo dokumentu, protokolo šalys įsipareigojo taikyti ozono sluoksnį ardančių dujų (chloro ir fluoro angliavandenilių, halonų ir kt.) emisijos reguliavimo prevencines priemones, kad būtų mažinami jų kiekiai Žemės atmosferoje. Kaip ir anglies dvideginis, ozono sluoksnį ardančios dujos daro reikšmingą įtaką šiltnamio efektui formuotis, kuris savo ruožtu dažniau buvo pradėtas sieti su žmogaus ūkinės veiklos padariniais. Vis dažniau antropogeninę veiklą vertinant kaip klimato pokyčių katalizatorių, 1988 m. buvo įkurta Tarpvyriausybinė klimato kaitos komisija (angl. *IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change*) ir 1992 m. buvo pasirašyta Jungtinių Tautų bendroji klimato kaitos konvencija (angl. *UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change*), kurios vienas iš pagrindinių tikslų – sumažinti ar užkirsti kelią visų šiltnamio efektą sukeliančių dujų, nekontroliuojamų Monrealio Protokolo, emisijai. Po šių įvykių, sąvoka „klimato kaita“ įgavo naują prasmę, nes buvo pradėta vertinti kaip reiškinys, kurį sukėlė žmogaus veiklos padariniai kartu su natūraliais klimato procesais. Tokia klimato kaitos samprata plačiai pasklido tarp mokslininkų bei politikų ir tapo akstinu nuodugniai tirti šio reiškinio priežastis bei imtis visų įmanomų veiksmų galimoms pasekmėms švelninti.

Kitas žingsnis buvo Kioto protokolo pasirašymas 1997 m. Šis dokumentas buvo išplėstinė Jungtinių Tautų bendrosios klimato kaitos konvencijos versija ir jį pasirašiusios bei ratifikavusios šalys įsipareigojo 5 % sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisiją 2008–2012 m. laikotarpiu lyginant su 1990 m. Deja 2001 m. Jungtinės Amerikos Valstijos, kurios tuo metu buvo lyderės pagal išmetamo anglies dvideginio (CO₂) kiekį pasaulyje, atsisakė šio susitarimo, o daugiau nei 100 besivystančių valstybių (įskaitant Kiniją ir Indiją) buvo atleistos nuo protokolo įsipareigojimų. 2004 m. Kioto protokolui įgyvendinti vilties suteikė

minėto dokumento ratifikavimas Rusijos Federacijoje, nes tuo laikotarpiu Rusija buvo trečia pasaulyje pagal CO₂ emisiją. Įvykiai pasisuko kita linkme, kai 2011 m. Kanada pasitraukė iš Kioto protokolo teigdama, kad tokios milžinės kaip JAV ir Kinija niekada nesutiko su šio dokumento reikalavimais, todėl pasaulio bendruomenei yra reikalingas naujas paktas. Antrasis susitarimų laikotarpis prasidėjo 2012 m., kai Dohoje (Kataras) buvo atliktas Kioto protokolo pakeitimas (angl. *Doha Amendment to the Kyoto Protocol*), tačiau dokumento pildymo neratifikavo tokios anglies dvideginio emisijos milžinės kaip JAV, Rusija ir Japonija, kurios pagal Globalios anglies atlaso (angl. *Global Carbon Atlas*) duomenis, 2017 m. atitinkamai užėmė antrą, ketvirtą ir penktą vietas tarp visų pasaulio šalių pagal CO₂ išmetimą (Global Carbon Atlas, 2019).

Dėl jau minėtų priežasčių buvo neįmanoma pasiekti norimų rezultatų stabdant klimato kaitą. Todėl 2015 m. gruodžio 12 d. Paryžiuje susitarta dėl naujo veiksmų plano, kuriuo siekiama stabdyti klimato kaitą ir dėti pastangas, kad visuotinis atšilimas būtų mažesnis nei 2 °C lyginant su ikipramoninio laikotarpio temperatūra. Paryžiaus susitarimą pasirašė 195 šalys, iš kurių 185 ratifikavo šį dokumentą. Tačiau remiantis paskutinių metų įvykiais, vėl kartojasi Kioto protokolo scenarijus, kai 2017 m. JAV prezidentas Donaldas Trumpas pareiškė, kad jų šalis pasitraukia iš Paryžiaus susitarimo (White House, 2017). Toks JAV pareiškimas gali apsunkinti Paryžiaus susitarimo tikslų įgyvendinimą pasauliniu mastu, ypač kai JAV yra antra šalis pagal išmetamą CO₂ kiekį. Tačiau optimizmo suteikė Rusijos Federacija, nes šalis sugrįžo prie Paryžiaus susitarimo ratifikavimo klausimo svarstymo, bet kaip įspėja valdžios atstovai, tai bus ilgas procesas, kuris pirmiausiai turi pereiti valstybės teisės aktų leidybos patikrą (Sauer, 2019).

Dar vienas žingsnis, suvienijęs pasaulio valstybes kryptingai judėti klimato kaitos švelninimo link, tai Jungtinių Tautų rezoliucijos „Keiskime mūsų pasaulį: Darnaus vystymosi darbotvarkės iki 2030 metų“ (angl. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*) pasirašymas 2015 m. Šiame dokumente vienas (tryliktas) iš 17 išsikeltų darnaus vystymosi tikslų yra skirtas klimato kaitai spręsti ir ragina imtis skubių kovos su klimato kaita bei jos poveikiu veiksmų, kurie pirmiausiai turėtų būti įtraukti į nacionalinę valstybių politiką, strategiją ir planavimą (UN General Assembly, 2015). Tačiau prieš tai buvę susitarimai parodė silpnąją klimato kaitos politikos vietą – didžiųjų pasaulio valstybių negebėjimą susitarti, nors jos reikšmingai prisideda prie globalių klimato pokyčių. Tik suvokus negrįžtamas klimato kaitos pasekmes įvairioms gyvenimo sritims, galima įtikinti valstybių lyderius kiek įmanoma greičiau imtis visų įmanomų priemonių, kad susivienijusios šalys galėtų pažaboti klimato kaitą ir ateitiems kartoms papasakotų dar vieną sėkmingo bendradarbiavimo istoriją.

1.2. Potvynių reiškiniai pasaulyje

Kasmet įvairiose šalyse stichinės gamtos nelaimės padaro daug materialinių nuostolių ir nusineša daug žmonių gyvybių. 2012 metais pasaulyje įvyko 905 gamtinės katastrofos. Iš šių, 905 dokumentais paremtų atvejų, 45 procentai buvo meteorologiniai reiškiniai (audros), 36 procentai – hidrologiniai reiškiniai (potvyniai) ir 12 procentų sudarė klimato reiškiniai, tokie, kaip karščio arba šalčio bangos, sausros bei miškų gaisrai. Likę 7 procentai yra geofiziniai reiškiniai – žemės drebėjimai bei vulkanų išsiveržimai (Löw, 2013). Šie skaičiai rodo, kad kas trečia žmonijai grėsmę kelianti gamtinė nelaimė – potvyniai, kurių pasekmių galima buvo išvengti arba jas sušvelninti. Remiantis Europos aplinkos agentūros (angl. *European Environmental Agency*) skaičiavimais, per 1998–2009 m. laikotarpį įvyko virš 213 katastrofinių potvynių, pasiglemžusių 1126 žmonių gyvybes ir atnešusių 52 mlrd. eurų nuostolių (EEA, 2011).

Nors potvynių tyrimams skiriamas didelis dėmesys, tačiau paskutiniiais dešimtmečiais pasikartojantys dideli potvyniai Europoje atneša daug nuostolių (Handmer, 2001, Barredo, 2009). Nežiūrint milžiniškų investicijų, kurios skiriamos potvynių prevencijos priemonėms, šiuolaikiniams specialistams iki šiol nepavyksta kontroliuoti šio gamtos reiškinio. Galimybė prognozuoti ekstremalaus potvynio dydį ir pobūdį yra labai svarbi kontroliuojant ar valdant potvynį, kuris numatytas potvynių direktyvoje 2007/60/EB. Potvynio analizė ir prognozė yra svarbi esamų ir planuojamų hidrotechninių struktūrų, hidroelektrinių, pralaidų ir tiltų saugumui.

Pastaraisiais metais daugelį Europos valstybių siaubia didžiuliai potvyniai. Tokiose didelėse upėse kaip Dunojus, staigus ir aukštas vandens lygio pakilimas, sukeltas gausių kritulių ir liūčių, gali būti vertinamas kaip šiltojo laikotarpio poplūdis, bet dėl savo didelio masto vadinamas potvyniu (Blöschl et al., 2013; Melo et al., 2014). Todėl kyla klausimas, ar potvyniai iš tiesų didėja ir dažnėja? Norint nustatyti ir charakterizuoti ilgalaikę stebėjimo duomenų kaitą, labai plačiai naudojama trendų analizė, kuria buvo įvertinta Skandinavijos upių kaita remiantis istoriniais stebėjimais (Wilson, Hisdal ir Lawrence, 2010). Turint pakankamai upių nuotėkio duomenų, minėta analizė leidžia įvertinti tiriamų parametru kaitą laike bei jos reikšmingumą. Tačiau šis metodas duoda atsakymus, kurie priklauso nuo turimų duomenų, o nustatyti dėsningumai priklauso nuo stebėjimų vietos ir laiko. Jei turima duomenų eilutė per trumpa, kils sunkumų įvertinti, ar aptikta kaitos tendencija bus linkusi tęstis, ar tai tėra natūralūs vandeningo cikliški svyravimai. Jei natūralios kaitos fazės yra ilgesnės negu stebėjimo laikotarpis, tai šie svyravimai gali atrodyti kaip trendas (Yue, Kundzewich ir Wang, 2012; Hall et al., 2014). Chen ir Grasby (2009) trendams analizuoti rekomenduoja naudoti ilgesnes nei 50 metų duomenų eilutes, nors Yue ir kt. (2012) tvirtina, kad eilutės turi siekti 60 metų ir daugiau. Net ir 70 metų ilgio upių nuotėkio duomenų eilutes Europoje analizavę autoriai (Kundzewich et al., 2005) nerado neginčijamų įrodymų, kad metiniai maksimalūs debitai didėja. Šie mokslininkai nustatė, kad absoliučios metinės maksimalių debitų vertės 1981–2000 metais buvo stebimos dažniau (46 kartus) negu 1961–1980 metų laikotarpiu (24 kartus). Vėlesnis tyrimas parodė, kad 25 metų laikotarpiu nustatyta potvynių didėjimo tendencija, kuri savo dydžiu ir žala viršija įprastus potvynius. Bet autoriai palieka atvirą klausimą, ar iš tiesų dideli potvyniai turi aiškia tendenciją

augti, ar jų žalos mąstai glaudžiai susiję su atskirais regionais (Kundzewicz, Pinskiwar ir Brakenridge, 2013),

Hidrologiniams parametrų tirti plačiai naudojamas Mann–Kendall testas (Hisdal et al., 2007; Hannaford, Hannaford, 2008; Korhonen, Kuusisto, 2010; Danneberg, 2012; Velpuri, Senay, 2013) ir kiti metodai trendams nustatyti. Tai gali būti tiesinės regresijos metodas (Svensson et al., 2005) arba modifikuotas Mann–Kendall testas bei Pettitt, Buishand testai (Lang et al., 2006; Castellarin, Pistocchi, 2012). Svarbu ne tik iširti, ar potvynių režimas kinta, ar egzistuoja trendai, bet ir nustatyti, kodėl tie pokyčiai buvo nustatyti tiriamose duomenų eilutėse. Europiniu mastu vykdomi debitų trendų tyrimai padeda nustatyti klimato ir antropogeninės veiklos sukeltus pokyčius visame regione.

Norint apsaugoti potvynių metu užliejamus plotus bei įvertinti potvynio riziką, plačiai naudojama potvynio dažnumo analizė. Tai įprasta procedūra, skirta užtikrinti patikimą potvynių ir jų pasikartojimo dažnio įvertinimą. Prognozuoti pasirinktos tikimybės potvynius upėse naudojami stebėti metiniai maksimalūs debitai, jų vidurkiai, standartiniai nuokrypiai ir pasikartojimo intervalai. Vėliau šie statistiniai duomenys yra naudojami tikimybiniais skirstiniais sudaryti (grafikuose ir lentelėse matyti įvairaus dydžio debitų pasikartojimo tikimybė, priklausomai nuo pasikartojimo intervalo ar viršijimo tikimybės).

Istoriniai potvynių duomenys tikimybės įvertinti plačiai naudojami visame pasaulyje. Jungtinė Karalystė (JK) turi nustatytas potvynio dažnio analizės standartines procedūras, kurios yra naudojamos potvynio dažniui analizuoti bei projektiniams potvyniams nustatyti (pirmosios statistinės procedūros buvo paskelbtos 1975 metais (Flood Studies Report, 1975). Jungtinės Karalystės Potvynių studijų ataskaita paskatino Italijos mokslininkus vykdyti nacionalinį tyrimų projektą VA.PI („VALutazione PIene“, Potvynių vertinimas). Tai buvo speciali programa, leidžianti įvertinti skirtingų pasikartojimo periodų potvynio debitų vertes visuose didžiųjų Italijos upių baseinuose. Prancūzijos mokslininkai dalyvavo nacionaliniame tyrimų projekte Extra Flo, kuriame išsamiai palygino potvynio dažnio analizės metodus, remdamiesi gausia ilgamečių lietaus ir nuotėkio stebėjimų duomenų baze (Lang et al., 2010).

Potvynio dažnio tyrimus atliko mokslininkai, dirbę ir kitų valstybių remiamuose tyrimo projektuose. Didelis dėmesys potvynio pasikartojimo tyrimams skiriamas įvairiose pasaulio šalyse: Čekijoje (Blazkova, Beven, 2002), Austrijoje (Bloschl, Merz, 2008), Ispanijoje (Mediero, Jiménez, 2007), Australijoje (Vogel et al., 1993; Peel et al., 2001), Jungtinėse Amerikos Valstijose (Vogel, Wilson, 1996; Stedinger, Griffis, 2008), Afrikos šalyse (Kjeldsen et al., 2002; Abida, Ellouze, 2008) ir kitur.

Ekstremaliems potvyniams prognozuoti įvairiose šalyse naudojama daug skirtingų tikimybinių skirstinių. Tačiau vieno universalaus skirstinio modeliavimui nėra nustatyta. Be to, yra atlikta darbų, kurie patvirtina, kad to paties tyrimų objekto (upės baseino) skirtingos trukmės duomenų eilutės dažnai aprašo skirtingi tikimybiniai skirstiniai (Kidson, Richards, 2005; Mitosek et al., 2006). Tiriant metines ekstremalių debitų eilutes, dažniausiai naudojami Gumbelio, Veibulio, Apibendrintųjų ekstremalių reikšmių, Pirsono III tipo, logaritminis Pirsono III tipo

bei 3 parametrų logaritminis normalusis, skirstiniai. Dalis šių skirstinių buvo pritaikyti Baltijos šalių (Lietuva, Latvija ir Estija) potvynių maksimalių debitų tyrimuose (Šarauskienė, Kriaučiūnienė, 2011; Šarauskienė et al., 2014).

Hidrologinių ekstremalių reikšmių trendų ir dažnių analizė leidžia nustatyti jų kaitą ir pasikartojimo tikimybę, tačiau neatsako į klausimus, kaip nustatytus dėsningumus veikia bei veiks gamtiniai ir antropogeniniai veiksniai. Į šiuos klausimus padeda atsakyti matematinis hidrologinis modeliavimas, kurį naudojant galima atlikti trumpalaikes ir ilgalaikes upių ekstremalaus nuotėkio (potvynių ir poplūdžių) prognozes bei įvertinti galimą klimato kaitos įtaką (Bergstrom et al., 2001; Booij, 2002; Veijalainen et al., 2010). Upių nuotėkio formavimosi modeliai apima didelį kiekį natūralių veiksnių: temperatūrą, kritulius, dirvožemio savybes, reljefą, miškingumą, ežeringumą, pelkėtumą ir t.t. Tačiau turima informacija dažniausiai nepakankamai išsami ir tiksli, lemianti modeliavimo rezultatų patikimumą (Baldassarre, Montanari, 2009; Engeland et al., 2010).

Siekiant nustatyti klimato kaitos įtaką galimiems hidrologinių procesų pasikeitimams ateityje, dažnai yra naudojamas Švedijos meteorologijos ir hidrologijos instituto mokslininkų sukurtas HBV modelis (Integrated Hydrological Modelling System, 2005). Šio modelio pagrindą sudaro vandens balanso lygtis, kuri vertina kritulius, evapotranspiraciją, dirvos drėgmę, vandens atsargas sniege, gruntinį bei požeminį vandenį, vandens talpyklų tūrį, urbanizaciją bei dirvožemių tipą ir modeliuoja upės nuotėkį (Primožič et al., 2008). Platų šio modelio pritaikymą lemia sąlyginai nedidelis reikalingos įvesties informacijos kiekis: upės debitas, oro temperatūra ir kritulių kiekis bei modeliui kurti reikalinga geografinė informacija (baseino plotas, aukščiai virš jūros lygio, miškingumas, dirbamos žemės plotai, ežeringumas ir meteorologinės stotys, apibūdinančios modeliuojamo upės baseino meteorologinių sąlygų visumą). HBV modelis buvo plačiai pritaikytas daugiau nei 40 pasaulio šalių (nuo Švedijos iki Zimbabvės ir Kolumbijos) su itin skirtingomis tiek klimatinėmis, tiek fizinėmis geografinėmis sąlygomis bei skirtingais upių baseinų dydžiais – nuo mažųjų upelių iki Baltijos jūros baseino (SMHI, 2015).

1.3. Potvynių tyrimai Lietuvoje

Geografinės ir klimatinės sąlygos lemia, kad Lietuvoje ypač ekstremalūs gamtiniai reiškiniai pasitaiko gana retai. Dažniausiai Lietuvoje stebimi pavasario potvyniai ir vasaros bei rudens liūčių sukelti poplūdžiai. Ekstremalius potvynius dažniausiai sukelia staigus sniego dangos tirpsmas, lydymas stiprių liūčių. Poplūdžiai yra staigus ir palyginti trumpalaikis upės vandens lygio pakilimas. Jie nuo potvynių skiriasi tuo, kad susidaro nereguliariai. Poplūdžio maksimalus vandens lygis ir debitas gali būti didesnis už atitinkamų metų potvynio parametrus. Poplūdžiai susidaro dėl liūčių arba žiemą per atlydį staigiai pradėjus tirpti sniegui. Poplūdžiams priklauso ir kasmetinis vandeningumo padidėjimas rudenį dėl pagausėjusių kritulių bei sumažėjusio garavimo.

Sniego tirpsmo ir gausių liūčių sukelti potvyniai nuo seno daug žalos padarydavo prie didžiausių upių – Nemuno ir Neris – gyvenantiems žmonėms. Didžiausią pavojų keldavo Nemunas ties Kaunu ir deltoje bei Neris ties Vilniumi. Tačiau 1959 m. pastačius Kauno hidroelektrinę ir 1976 m. Vileikos–Minsko

vandens sistemą, katastrofiškų potvynių grėsmė Kaunui ir Vilniui bei jų apylinkėms labai sumažėjo. Tai siejama su potvynio sulaikymu Kauno HE tvenkinyje ir mažesne ledų sangrūdų susidarymo tikimybe ties Nemuno ir Neris santaka (Šikšnys, Jarmakaitė, 2012). Taip pat potvynius šiek tiek mažina ir Vileikos–Minsko vandens sistema, kuri dalį potvynio vandens gali sulaikyti suformuotoje talpykloje bei dalis vandens yra prarandama dėl infiltracijos pumpuojant vandenį (Gol'dberg, Pluzhnikov, 1976). Nors didelių potvynių tikimybė ir labai maža, Nemune ir Neryje ties Kaunu bei Neryje ties Vilniumi, bet ji visgi egzistuoja. Potvyniai gali kilti esant tam tikroms gamtinėms sąlygoms, neatsakingai eksploatuojant Kauno hidroelektrinę arba Vileikos vandens talpyklą. Tuo tarpu potvyniai Nemuno deltoje įsikūrusiems žmonėms žalos padaro kasmet. Daug problemų kelia ir mažesnėse Lietuvos upėse dėl intensyvių liūčių kylantys poplūdžiai, padarantys daug žalos užliejamoms teritorijoms bei urbanizuotoms teritorijoms.

Norint prognozuoti potvynių daromą žalą ar ją sušvelninti, būtina surinkti visą įmanomą informaciją apie šiuos reiškinius bei juos sukeliančius veiksnius; gautus duomenis susisteminti, išanalizuoti ir panaudoti ekstremalioms situacijoms prognozuoti. Hidrologijos mokslo Lietuvoje pradininkas S. Kolupaila (1934) paskelbė pirmąsias maksimalių debitų skaičiavimo empirines formules. Potvynių debitų nustatymo ir skaičiavimo problematiką nagrinėjo Macevičius ir Žilevičius (1955), Poška (1962), Lasinskas (1963), Macevičius ir Žilėnas (1965) bei kiti žymūs Lietuvos hidrologai. Jablonskis (1969; 1971) analizavo Nemuno nuotėkio kaitos ekstremumus ir juos formuojančius veiksnius. Gailiušis ir kt. (2001) išanalizavo Lietuvos upių pavasario potvynių nuotėkio, poplūdžių maksimalius debitus bei nuosėkio laikotarpio minimalius debitus, nagrinėjo ekstremalių debitų charakteristikas ir statistinius parametrus.

Lietuvos upių ekstremalaus nuotėkio kaitos reikšmėms tirti pastaruoju metu sėkmingai naudojama tendų analizė. Nemuno ir kitų Lietuvos upių potvynius analizavo Ascila ir kt. (2002), Dumbrasukas ir Punys (2003), Dumbrasukas ir kt. (2008). Šikšnys ir Jarmakaitė (2012) įvertino Kauno hidroelektrinės poveikį maksimaliems Nemuno potvynių debitams. Daug svarbių tiriamųjų darbų, susijusių su upių potvyniais, atlikta Lietuvos energetikos instituto Hidrologijos laboratorijoje. Bendruose projektuose su Baltijos ir Šiaurės šalių specialistais bei savarankiškose studijose Hidrologijos laboratorijos mokslininkai tyrė Lietuvos maksimalių debitų tikimybinis skirstinius (Šarauskiene et al., 2014) ir upių nuotėkio kaitą bei klimato kaitos įtaką upių vandeningumui (Meilutytė–Barauskienė, Kovalenkovienė, 2007; Meilutytė–Barauskienė, Kriauciūnienė ir Kovalenkovienė, 2010; Reihan et al., 2012). Nustatyta, kad dėl klimato kaitos žiemą Lietuvos upių nuotėkis didėja, o pavasarį potvyniai mažėja ir prasideda anksčiau, mažiausiai kinta vasaros ir rudens upių nuotėkis. Šie pokyčiai susiję su aukštesne oro temperatūra, dėl kurios sniego danga tirpsta anksčiau ir padidėja žiemos sezono nuotėkis.

Lietuvos upių nuotėkio formavimosi procesui analizuoti ir prognozuoti taip pat naudojama tikimybinė analizė, kai hidrologinių charakteristikų dydžiai išreiškiami tikimybės kreive (t.y. prognozė pateikiama tikimybinio būdu, be konkrečių tam tikro dydžio įvykio pasikartojimo datų). Išsamią nuotėkio ekstremalių reikšmių statistinę analizę atliko Gailiušis ir kt. (2001). Autoriai daugumai Lietuvos upių paskaičiavo

skirtingos tikimybės maksimalių debitų vertes, sukūrė 1 % tikimybės maksimalaus debito modulio bei 1 % tikimybės pavasario potvynio nuotėkio aukščio žemėlapius. Nemuno ties Kaunu ekstremalių potvynio debitų tikimybes ir pasikartojimo intervalus tyrė Simaitytė ir kt. (2007). Ilgos Nemuno nuotėkio duomenų eilutės analizuotos norint geriau įvertinti potvynio procesą upės deltoje; keletas tikimybinių skirstinių panaudota ekstremalių Nemuno debitų tikimybei analizuoti (Ascila et al., 2002). Atlikta pasirinktų Lietuvos upių skirtingų laikotarpių pavasario maksimalių debitų pasikartojimo dažnių analizė (Šarauskienė, Kriaučiūnienė, 2011).

Vilniaus universiteto Hidrologijos ir klimatologijos katedros mokslininkai K. Kilkus, E. Rimkus, G. Valiuškevičius, G. Bukantis, G. Stankūnavičius, E. Stonevičius ir kiti prognozavo Lietuvos upių vandens balanso struktūros pokyčius, susijusius su klimato kaitos prognozėmis. Taip pat buvo tirta Nemuno maksimalių debitų kaita (Valiuškevičius et al., 2004; Kilkus et al., 2006) bei meteorologinių sąlygų visuma prieš pavasario potvynio pradžią (Stankūnavičius et al., 2007) ir jų kaita XXI a. (Stonevičius et al., 2017). Nemuno nuotėkiui prognozuoti buvo pritaikytas HBV modelis (Valiuškevičius et al., 2004). Atlikta gautų modeliavimo rezultatų statistinė analizė ir nustatyta, kad HBV modelį galima taikyti trumpalaikėms Nemuno nuotėkio prognozėms. Šiame tyrime nepakankamai buvo nagrinėti ekstremalių nuotėkio reikšmių prognozės klausimai.

Lietuvos energetikos instituto mokslininkai taip pat prognozavo Nemuno nuotėkį bei jo ekstremalias reikšmes XXI a. (Kriaučiūnienė et al., 2008). Minėtos upės baseinui modeliuoti buvo taikytas HBV modelis, naudojant į Nemuno baseino ribas patenkančių Lietuvos ir Baltarusijos meteorologijos stočių duomenis. Nuotėkio prognozės XXI a. buvo sudarytos taikant dviejų bendrosios atmosferos cirkuliacijos modelių – ECHAM5 ir HadCM3 išvesties duomenis pagal tris SRES grupės klimato scenarijus (A1B, A2 ir B1). Prognozė buvo sudaryta iki Kauno HE, o bendrosios prognozių tendencijos numatė žiemos nuotėkio didėjimą ir pavasario nuotėkio mažėjimą. Panaudojus tuos pačius duomenis, vėliau buvo prognozuotas Merkio nuotėkis (Kriaučiūnienė et al., 2009) ir Nemuno prietaka į Kuršių marias (Jakimavičius, Kriaučiūnienė, 2013).

Norint prognozuoti klimato kaitos įtaką vandens ištekliams, naudojami klimato scenarijai, globalaus arba regioninio klimato modeliai ir tinklelio raiškos didinimo metodai, kurie aprašyti tolimesniuose skyriuose. Stebėjimo duomenų, hidrologinio modelio parametrų ir modelio struktūriniai neapibrėžtumai, atsirandantys dėl hidrologinių modelių negalėjimo matematinėmis formulėmis tobulai aprašyti fizinius procesus, taip pat neapibrėžtumai, susiję su klimato kaitos įtakos vertinimu (klimato scenarijai, globalaus klimato modeliai ir tinklelio raiškos didinimo metodai), lemia gautų modeliavimo rezultatų neapibrėžtumus, kuriuos itin svarbu įvertinti (Lawrence, Haddeland, 2011; Hwang et al., 2011; Gudmundsson et al., 2012a).

1.4. Klimato scenarijų raida XX a. pabaigoje ir XXI a. pradžioje

Klimato scenarijai yra vienas svarbiausių globalaus klimato ar regioninio klimato modelių įvesties duomenų, siekiant įvertinti ateities meteorologinių rodiklių pokyčius, susijusius su šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) emisija. Terminas „emisijų scenarijus“ arba „klimato kaitos scenarijus“ atsirado XX a. pabaigoje suintensyvėjus industrializacijos poveikiui. Dėl sparčiai išaugusių šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų, buvo nuspręsta imtis atitinkamų priemonių ši procesą stabdyti. 1988 metais Pasaulio meteorologijos organizacija (angl. *WMO – World Meteorological Organization*), bendradarbiaudama su Jungtinių tautų aplinkos programa (angl. *UNEP – United Nations Environment Program*), įsteigė Tarptautinę klimato kaitos komisiją – TKKK (angl. *IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change*). Šios institucijos pagrindinis tikslas – specialiųjų ataskaitų, susijusių su Jungtinių tautų klimato kaitos konvencijos įgyvendinimu, parengimas. Jau 1990 m. TKKK išleido savo pirmąją ataskaitą (angl. *FAR – First Assessment Report*), kurioje daug dėmesio skyrė ŠESD emisijai ir jos poveikiui klimato kaitai. Siekiant susisteminti galimus klimato pasikeitimus, buvo nuspręsta išleisti prognozuojamų ŠESD emisijų scenarijų rinkinius. Iš viso buvo sukurti 4 scenarijai (A, B, C, D), kurie pavadinti SA90 grupės scenarijais ir paremti ekonominiu bei socialiniu visuomenės vystymusi. Pagal A scenarijų didžioji dalis ateities energijos būtų gaunama iš iškastinio kuro, technologijos nežymiai patobulėtų, o drėgnųjų atogrąžų miškų kirtimas tęstųsi. B scenarijus prognozavo sumažėjusį anglies, bet padidėjusį gamtinių dujų suvartojimą, išaugusį energetinį įvairių technologijų efektyvumą bei kontroliuojamą miškų kirtimą. C scenarijaus pagrindą sudarė atsinaujinančių energijos šaltinių ir branduolinės energetikos plėtra XXI a. antroje pusėje. Optimistiškas D scenarijus prognozuoja, kad atsinaujinantys energijos šaltiniai ir branduolinė energetika įgaus vystymosi pagreitį jau XXI a. pradžioje, dėl to būtų sumažintos ir stabilizuotos CO₂ emisijos (IPCC, 1990).

Po FAR ataskaitoje aprašytų SA90 scenarijų, pasaulyje įvyko pasikeitimų, turėjusių įtakos naujų klimato scenarijų genezei. Patys įvykiai yra susiję su scenarijų kūrimo prielaidomis, kurios paremtos socialinės, ekonominės bei politinės situacijos kaita. Todėl XX a. pabaigoje Monrealio protokolo papildymas Londone, naujos Pasaulinio banko (angl. *World Bank*) ir Jungtinių Tautų organizacijos (angl. *UN – United Nations*) prognozės dėl gyventojų populiacijos augimo, politiniai bei ekonominiai pokyčiai buvusioje SSRS ir Rytų Europoje, Jungtinių tautų maisto ir žemės ūkio organizacijos (angl. *FAO – The Food and Agriculture Organization of the United Nations*) patikslinti drėgnųjų tropikų miškų naikinimo mastai paskatino naujų klimato scenarijų atsiradimą. Kaip bazė šešioms naujiems TKKK scenarijams (IS92a, IS92b, IS92c, IS92, d, IS92e, IS92f), buvo panaudoti SA90 scenarijai (Leggett, Pepper ir Swart, 1992). Pagal TKKK rekomendacijas, tokia scenarijų įvairovė buvo panaudota siekiant įvertinti visus galimus emisijų kiekių neapibrėžtumus (Alcamo et al., 1995). IS92a scenarijus paremtas tarpinėmis prielaidomis, kad vyks nuoseklus gyventojų ir ekonomikos augimas, o IS92b apjungia prieš tai išvardintus rodiklius bei įtraukia Tarptautinės ekonominio bendradarbiavimo ir plėtros organizacijos (angl. *OECD – Organization for Economic Cooperation and Development*) strategijas, kurios leistų stabilizuoti ir

sumažinti CO₂ emisiją. Minėti scenarijai buvo laikomi vidutiniais labiausiai tikėtiniais, lyginant su likusiais keturiais. IS92c prognozavo mažiausią gyventojų prieaugį ir smarkiai ribojamą iškastinio kuro naudojimą, todėl pastarasis scenarijus buvo pats švelniausias ir vienintelis prognozavo žemėjantį emisijų trendą. IS92d scenarijuje buvo daroma prielaida, kad gyventojų augimo tempai mažės dėl spartesnio ekonomikos augimo, kas skatintų nežymų emisijų padidėjimą. Radikaliausias IS92e scenarijus prognozavo tarpinį gyventojų kiekio prieaugį su sparčiais ekonomikos vystymo tempais ir gausiu iškastinio kuro naudojimu, dėl kurio būtų patys didžiausi emisijos kiekiai. IS92f paremtas prielaidomis, kad demografijos tempai bus didžiausi, tačiau ekonomika vystysis ne taip smarkiai kaip IS92e, todėl scenarijus liko antras pagal emisijos kiekius (Leggett et al., 1992; Houghton et al., 1995; IPCC, 1996). Visų IS92 grupės scenarijų įtaka klimato pokyčiams buvo nuodugnai įvertinta antrojoje TKKK ataskaitoje (angl. *SAR – Second Assessment Report*) (IPCC, 1996).

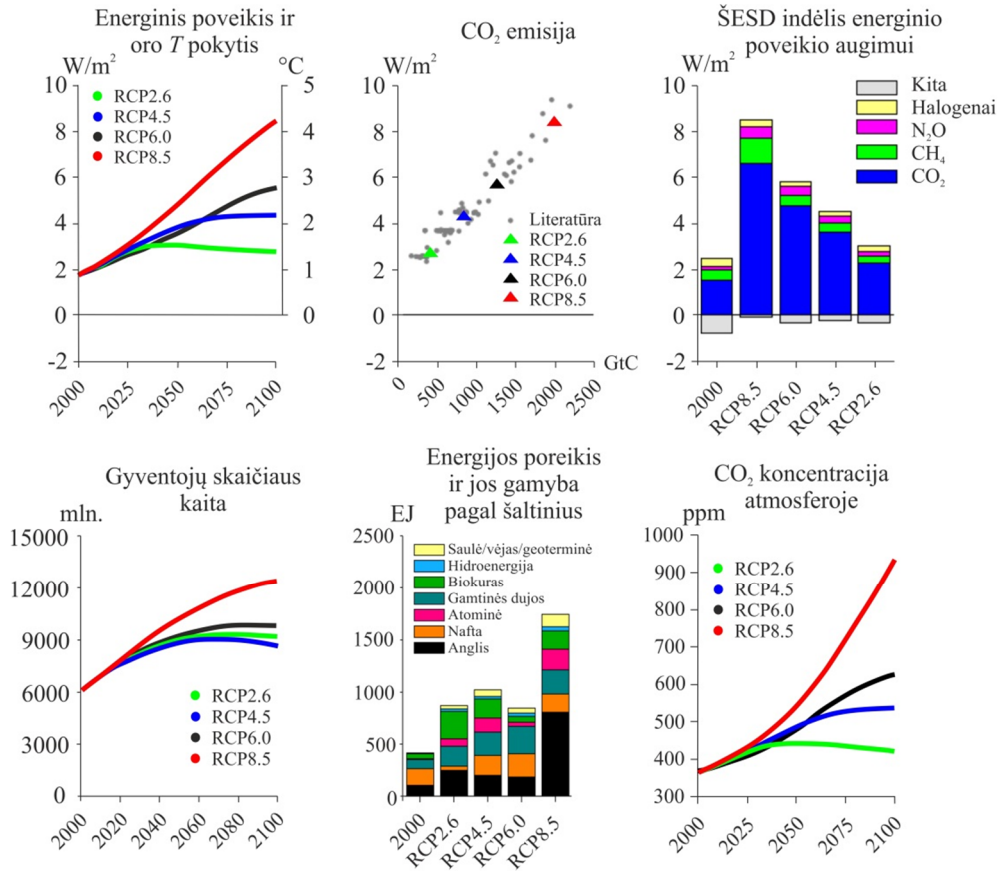
2000 m. TKKK savo Specialioje ataskaitoje apie emisijų scenarijus pateikė naujus SRES (angl. *SRES – Special Report on Emissions Scenarios*) grupės scenarijus, kurie buvo suskirstyti į keturias pagrindines žmonijos vystymosi kryptis (A1, A2, B1, B2) iki XXI amžiaus pabaigos. A1 šeimos scenarijai vertino sparčią ekonomikos raidą, naujų ir efektyvesnių technologijų kūrimą, bet mažą gyventojų skaičiaus augimą. Šios grupės scenarijų esmė buvo stiprinti socialinius ir kultūrinius ryšius tarp atskirų regionų bei mažinti socialinę ir ekonominę atskirtį. Scenarijus apima spartų ekonomikos vystymąsi bei žmonių populiacijos gausėjimą iki XXI a. vidurio ir laipsnišką mažėjimą antroje amžiaus pusėje. A1 yra skaidomas į A1FI (angl. *Fossil Intensive*), kuris paremtas intensyviu iškastinio kuro vartojimu, A1B (angl. *Balanced*), kuriame numatoma subalansuota reikiamos energijos gamyba iš įvairiausių energijos šaltinių bei A1T (angl. *Efficient Technologies*), kuris prognozuoja sparčią naujų ir efektyvesnių technologijų plėtrą (Parry, 2002). Priešingai nei A1 grupės scenarijuose, A2 scenarijuose prognozuojama, kad dėl nepakankamo socialinio švietimo smarkiai išaugtų gyventojų skaičius. Intensyvesnė ekonomikos raida orientuota tik į atskirus regionus, kuriuose būtų diegiamos pažangiausios technologijos, tačiau didesneje pasaulio dalyje technologijų diegimas būtų lėtesnis, dėl to gerokai išaugtų šiltnamio efektą sukeliančių dujų koncentracija (Nakićenović, Swart, 2000).

B1 scenarijus apibūdina darnų pasaulį su mažesniu žmonių populiacijos kiekiu nei A1 ir A2 grupių scenarijai. Prognozuojami drastiški pokyčiai ekonomikoje, kurios lydėtų paslaugų ir vartojimo įpročių pasikeitimai, nes dėmesys būtų koncentruojamas į racionalų išteklių naudojimą bei aplinką, taip pat energiją tausojančių technologijų diegimą. Apjungdamas esminius socialinius ir ekonominius raidos principus, šis scenarijus būtų pats švelniausias. B2 scenarijus buvo orientuotas į vietinės reikšmės socialinių, ekonominių ir aplinkos problemų, kurioms galima priskirti skurdą, socialinę nelygybę bei aplinkos taršą, sprendimą. Nors scenarijus paremtas darniu vystymusi, bet ekonomikos ir gyventojų prieaugio tempai bus aukštesni nei B1 scenarijuje, taip pat daug dėmesio bus skiriama įvairių technologijų, padėsiančių spręsti vietines problemas, kūrimui (Nakićenović, Swart, 2000; IPCC, 2001).

Išvardinti šeši SRES grupės emisijų scenarijai buvo panaudoti dviejose TKKK ataskaitose. Šių scenarijų poveikis klimato pokyčiams pirmą kartą nuodugniai įvertintas trečiojoje TKKK ataskaitoje (angl. *TAR – Third Assessment Report*), kurios duomenys buvo plačiai naudojami įvairiuose su klimato kaita susijusiuose tyrimuose (IPCC, 2001). Modeliuojant galimus ateities klimato pokyčius ir neapibrėžtumus, SRES scenarijai išliko reprezentatyvūs, todėl CMIP3 (angl. *Coupled Model Intercomparison Project phase 3*) šių scenarijų pagrindu buvo prognozuota klimato kaita, kuri naudota ketvirtojoje TKKK ataskaitoje (angl. *AR4 – Fourth Assessment Report*) (IPCC, 2007). Ataskaitoje pateikti klimato scenarijai sulaukė didelio pasaulio mokslininkų susidomėjimo. Taip pat šie tyrimai neaplenkė ir Lietuvos, kur buvo nuodugniai įvertintas galimas SRES grupės scenarijų poveikis ateities meteorologinių ir hidrologinių rodiklių kaitai.

Paviešinus AR4 ataskaitą, išaugo mokslinės bendruomenės susidomėjimas klimato kaita bei supratimu, kaip rasti tinkamiausias priemones jai mažinti. Kadangi klimato kaita nėra lokalus reiškinys, bet apima visus Žemės rutulio regionus, todėl taikytinos priemonės atitinkamai skiriasi, dėl to didelio dėmesio sulaukė adaptavimo priemonių paieška (Van Vuuren et al., 2011). Tai paskatino Tarpvyriausybinę klimato kaitos komisiją kreiptis į mokslo bendruomenę, kad būtų sukurtas naujas scenarijų rinkinys, palengvinsiantis ateities klimato vertinimą (Van Vuuren et al., 2011). Šiuo pagrindu 2013 m. buvo išleista penktoji Tarpvyriausybės klimato kaitos komisijos ataskaita (angl. *AR5 – Fifth Assessment Report*). Joje minimi RCP (angl. *Representative Concentration Pathways*) klimato scenarijai pakeitė prieš tai sukurtus SRES grupės scenarijus (IPCC, 2013), kurie buvo naudojami trečiojoje (TAR) ir ketvirtojoje (AR4) ataskaitose. Naujieji scenarijai apibrėžia tikėtinus socialinės ir ekonominės aplinkos kaitos etapus, kai žmonija vystytusi vienu ar kitu keliu. Pagrindinė RCP scenarijų išdava yra šiltnamio efektą sukeliančių dujų koncentracija atmosferoje bei šių dujų emisija, susijusi su prognozuojamu ekonomikos augimu (IPCC, 2013). Pagal kodinius pavadinimus yra keturi skirtingi klimato scenarijai: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5. Šalia esantys skaičiai nurodo prognozuojamą suminį įvairių aplinkos veiksnių energinį poveikį (angl. – *radiation forcing in W/m²*) visai klimato sistemai XXI a. pabaigoje arba jo stabilizavimąsi po 2100 m. (Moss et al., 2008; Meinshausen et al., 2011). 2011 m. suminis antropogeninės kilmės energinis poveikis buvo nustatytas 2,3 W/m² ir ši reikšmė yra 43 % didesnė lyginant su AR4 reikšme, kuri buvo nustatyta 2005 m. (IPCC, 2013). Pačiu švelniausiu yra laikomas RCP2.6 scenarijus, kitaip dar vadinamas RCP3–PD (angl. – *Peak and Decline*), pagal kurį prognozuojamas iki 3 W/m² augimas XXI a. viduryje ir laipsniškas mažėjimas iki 2,6 W/m² energinio poveikio 2100 m. AR5 ataskaitoje taip pat pateikiami du vidutinio stabilizavimosi scenarijai RCP4.5 ir RCP6.0. Šie scenarijai pagal poveikio prognozę vadinami vidutinio mažo poveikio (RCP4.5) ir vidutinio didelio poveikio (RCP6.0), nes jie atitinkamai prognozuoja 4,5 ir 6,0 W/m² energinio poveikio augimą iki 2100 m. bei stabilizavimąsi XXII a. Pats drastiškiausias RCP8.5 scenarijus numato didžiausius pokyčius – iki 8,5 W/m² XXI a. pabaigoje ir tolimesnį jo kilimą XXII a. Anot RCP scenarijų kūrėjų, energinis poveikis (W/m²) gali svyruoti 5 % ribose (Moss et al., 2008). Prognozuojamo energinio balanso pokyčiai iš esmės priklauso nuo CO₂ ir kitų

šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos bei jų koncentracijos atmosferoje, žmonių populiacijos priaugio, energijos poreikio bei jos gavybos iš skirtingų energijos šaltinių. Prognozuojama visų šių rodiklių kaita XXI a. pagal skirtingus RCP scenarijus pavaizduota 1.1 paveiksle.



1.1 pav. Įvairių aplinkos, socialinių ir ekonominių rodiklių kaita pagal skirtingus RCP scenarijus (pagal VanVuuren et al., 2011)

Visų keturių RCP scenarijų pagrindinis tikslas yra pateikti klimato modeliams pagrindinius įvesties duomenis, kurie yra reikalingi norint paleisti šiuos modelius ir globalaus klimato sistemoje pasiekti atitinkamą energinio poveikio lygį (t. y. 2,6; 4,5; 6,0 ar 8,5 W/m^2) klimato kaitos sąlygomis XXI a. pabaigoje. Šiam tikslui pasiekti naudojami integruoto vertinimo modeliai (angl. *IAM* – *Integrated Assessment Models*). Dėl plataus integruoto vertinimo modelių naudojimo jie tinka spręsti tarpdisciplininių mokslo sričių problemas, nes RCP scenarijų atveju didžiausias klimato pokyčių katalizatorius yra socialinės ir ekonominės aplinkos vystymasis (IPCC, 2013). Savo ruožtu integruoto vertinimo modeliai įtraukia energetikos sektoriaus ateities technologijų pokyčius, socialinės ir ekonominės aplinkos raidą, tikėtinas klimato kaitos politikos gaires. Kaip išvesties duomenis, IAM prognozuoja ateities antropogeninį poveikį, išreikštą šiltnamio efektą

sukeliančių dujų koncentracija bei emisija, įvertinant žemėnaudos pokyčius ateityje ir pan. (Moss et al., 2008; Moss et al., 2010). Detalizuotus išvardintų IAM parametrų apibūdinimus RCP scenarijams galima rasti mokslinėje literatūroje, nes Granier ir kt. (2011) įvertino emisijos kiekius praeityje ir jos ateities prognozes. Hurtt ir kt. (2011) pirmieji apibendrino ateities žemėnaudos pasikeitimus, kurie buvo prognozuoti integruoto vertinimo modeliais, taip pat buvo įvertintas oro taršos poveikis aerozolių ir ozono koncentracijoms pagal skirtingus scenarijus (Lamarque, 2011).

1.5. Globalaus klimato modeliai

Globalaus klimato modelių išvesties duomenys (oro temperatūra ir krituliai) yra reikalingi vertinant ateities upių nuotėkio pokyčius, todėl dabartinis mokslo pasaulis sunkiai įsivaizduoja bet kokius klimato ar su klimato kaita susijusius tyrimus be Atmosferos–vandenyno bendrosios cirkuliacijos modelių (angl. *AOGCM – Atmosphere–Ocean General Circulation Model*). Tai deterministiniai trimačiai modeliai, kurie į vieną visumą apjungia atmosferoje, vandenyne ir paklotiniame paviršiuje vykstančius dinامينius procesus (Lo, Yang, Pielke, 2008). Kai kalbama apie Bendrosios cirkuliacijos modelius (angl. *GCM – General Circulation Model*), negalima painioti šio termino su Globalaus klimato modeliais (angl. *GCM – Global Climate Model*) arba Globaliais jungtiniais modeliais (angl. *GCM – Global Couple Model*) (Edwards, 2010). Bendrosios cirkuliacijos modeliai gali būti skirstomi į atmosferos (angl. *AGCM – Atmosphere General Circulation Model*) ir vandenyno (angl. *OGCM – Ocean General Circulation Model*). Tik sujungus šiuos du modelius, gaunamas jungtinis Atmosferos–vandenyno bendrosios cirkuliacijos modelis (angl. *AOGCM – Atmosphere–Ocean General Circulation Model*), kurį jau galima vadinti Globalaus klimato modeliu. Pirmojo globalaus klimato modelio koncepcija, apjungusi AGCM ir OGCM, buvo sukurta 1960 m. Geofizinių skysčių dinamikos laboratorijoje (angl. *GFDL – Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*) Prinstone, JAV (NOAA 2012). Laikui bėgant, ši koncepcija įgavo pagreitį ir 1975 m. buvo sėkmingai paleistas skaitmeninis Atmosferos–vandenyno bendrosios cirkuliacijos modelio eksperimentas. Tyrimai buvo rezultatyvūs, nes AGCM ir OGCM tarpusavyje sąveikavo ir turėjo grįžtamąjį ryšį. Nors bandymas pavyko, tačiau tai dar nebuvo tikrasis Žemės modelis, nes kontinentų ir vandenynų ribos buvo lyg supaprastintas geometrinis brėžinys. Šis juodraštinis modelis turėjo itin mažos raiškos tinklelį, bet savyje apjungė tokius komponentus, kaip vandenynų srovės, pasatai (vėjai), pusiaujo konvergencijos zona, sniego danga. Tai padėjo lengviau suprasti energijos apykaitą tarp oro ir vandens (Bryan et al., 1975; Manabe et al., 1975). Nuo ankstyvųjų AOGCM, jungtiniai modeliai gerokai patobulėjo ir pirmosios TKKK ataskaitos (angl. *FAR – First Assessment Report*) metu naudoti modeliai turėjo kelis kartus detalesnę horizontalią tinklelio raišką, kuri siekė ~500 km (IPCC, 2007). Antrojoje TKKK ataskaitoje (angl. *SAR – Second Assessment Report*) naudotų modelių raiška padidėjo iki ~250 km bei buvo įtrauktas aerozolių poveikis, o trečiojoje ataskaitoje (angl. *TAR – Third Assessment Report*) taikytų modelių tinklelio raiška išaugo iki ~180 km. Pastarieji modeliai jau vertino

tokius procesus, kaip interaktyvi augalija (angl. *dynamic vegetation*) ir anglies ciklas (IPCC, 2013).

Netgi po visų patobulinimų AOGCM pirminė paskirtis liko nepakitusi, kadangi jie kuriami norint suprasti dinامينius procesus, vykstančius atmosferoje, vandenyne, žemės paviršiuje bei ledo dangoje, taip pat nuodugnai įvertinti galimus ateities klimato pokyčius, susijusius su šiltnamio efektą sukeliančiu dujų ir aerozolių poveikiu (IPCC, 2013). Tačiau siekiant visapusiškai išsiaiškinti galimą klimato kaitos įtaką, AOGCM teikiamos informacijos neužtenka, todėl pradėti naudoti Žemės sistemos modeliai (angl. *ESM – Earth System Model*). Tai tarsi išplėstinė AOGCM versija, kuri savyje apjungia įvairius biogeocheminius ciklus, tokius kaip anglies ciklas, sieros ciklas ar ozono kaita (Flato, 2011). Žemės sistemos modeliai sąlyginai yra pirminėje vystymo stadijoje, nes pradėti naudoti tik AR4 ir AR5 ataskaitose, bet vis labiau populiarėja. Šie modeliai naudojami siekiant išanalizuoti grįžtamuosius klimato kaitos ryšius, kai skaičiavimams reikia daug duomenų arba nustatyti ryšių jautrumą (Claussen et al., 2002; Petoukhov et al., 2005). Todėl AR4 ir AR5 ataskaitose naudoti kompleksiniai modeliai papildomai įtraukė atmosferos chemiją ir žemynuose esančius ledynus (IPCC, 2013).

1.6. Tinklelio raiškos didinimo metodai

Tinklelio raiškos didinimo metodai (angl. *downscaling*) dažnai naudojami hidrologijoje, norint įvertinti galimą klimato kaitos įtaką upių nuotėkiui bei ekstremaliems reiškiniams (Teng et al., 2014). Jie yra lengviausias būdas pereiti nuo mažos globalaus klimato modelių (GCM) skiriamosios gebos iki konkretaus taško arba kuriamo hidrologinio modelio ribų (Fowler, Blenkinsop ir Tebaldi, 2007). Patys tinklelio raiškos didinimo metodai gali būti skirstomi į dinامينius (angl. *dynamical downscaling*) ir statistinius (angl. *statistical downscaling*). Dinaminiai metodai paremti vietinio masto fiziniiais procesais, į kuriuos įtraukiamas detalesnis reljefo vaizdas, slėgio pokyčiai jūros lygyje, vėjo dedamosios ir pan. Tokiu būdu nuo stambaus mastelio (~200 km) globalaus klimato modelių (GCM), pereinama prie detalesnių (~10–50 km) regioninio klimato modelių (RCM) (Denis, 2002). Yra nemažai tyrimų, kai RCM po dinaminio tinklelio raiškos didinimo sumodeliavo itin detalius klimato rodiklius, kurie puikiai koreliavo su stebėtaisiais duomenimis (Früh et al., 2010; Kunz et al., 2010). Dinaminiai metodai turi nemažai privalumų, kadangi yra paremti fiziniiais, gamtoje vykstančiais procesais, gali atspindėti smulkesnio masto klimato procesus, tačiau reikalauja daug informacinių išteklių ir labai priklauso nuo pasirinkto GCM kraštinių sąlygų (Wilby, Wigley, 1997; Casanueva, 2013). Statistinių tinklelio raiškos didinimo metodų grupė pasižymi savo naudojimo paprastumu, nes nereikalauja daug informacijos ir laiko išteklių jiems įgyvendinti, todėl jie buvo kuriami siekiant paprasčiau perkelti stambaus mastelio GCM išvesties duomenis į analizuojamo tyrimų objekto ribas (Fowler et al., 2007). Bene paprasčiausias iš statistinių metodų yra vidurkio pokyčio faktorius (angl. *change factor of mean*), kuris paremtas santykiu tarp GCM prognozuojamo meteorologinio rodiklio ir sumodeliuoto meteorologinio rodiklio klimato normos laikotarpiu. Šis metodas yra plačiai taikomas hidrologiniuose tyrimuose, kurie susiję su klimato kaitos įtakos vertinimu (Prudhomme, Reynard ir Crooks, 2002; Sunyer, Madsen ir

Ang, 2012; Hanel et al., 2013). Vidurkio paklaidos korekcijos (angl. *bias correction of mean*) metodas taip pat naudojamas hidrologiniuose tyrimuose (Leander et al., 2008; Hanel et al., 2013), tik pastarajame transformacijos parametras skaičiuojamas iš stebėtų ir GCM sumodeliuotų duomenų (Leander, Buishand, 2006). Kiek patobulintos pokyčio faktoriaus ir paklaidos korekcijos tinklelio raiškos didinimo metodų versijos į perskaičiavimo metodiką įtraukia ne tik meteorologinio rodiklio vidurkio pataisą, bet ir jo dispersiją (Ho et al., 2012; Hawkins et al., 2013). Didelio susidomėjimo sulaukęs statistinio tinklelio raiškos didinimo metodas – kvantilių priskyrimas (angl. *quantile mapping*) – pasižymi tuo, kad yra neparаметrinis ir paremtas empiriniu pasiskirstymu (Gudmundsson et al., 2012b). Taikant kvantilių priskyrimo metodą į meteorologinių rodiklių pataisą įvedamas ne tik vidurkio pokytis, bet ir jo tikimybinis pasiskirstymas laike, dėl to šis metodas plačiai naudojamas hidrologiniuose tyrimuose (Piani, Haerter ir Coppola, 2010; Dosio, Paruolo, 2011; Gudmundsson et al., 2012; Sunyer et al., 2015). Visi išvardinti metodai yra aprobuoti mokslo bendruomenės, tačiau turi savų privalumų ir trūkumų, kuriuos detaliam išanalizavo Fowler ir kt. (2007), Maraun ir kt. (2010), Teutschbein ir Seibert (2013), Sunyer ir kt. (2015).

1.7. Upių nuotėkio prognozės ir jų neapibrėžtumai taikant naujausius klimato scenarijus

Pagal naujausios TKKK AR5 ataskaitos (IPCC, 2013) duomenis sudaryti keturi nauji šiltnamio dujų koncentracijos RCP scenarijai, kurie atitinka įvairius energinio poveikio klimato sistemai lygmenis. Šie naujos kartos scenarijai naudojami tiek klimato prognozėms, tiek upių hidrologinio režimo galimiems pokyčiams ateityje modeliuoti. Globalaus mastelio nuotėkio tyrimai rodo, kad XXI a. pabaigoje vidutinis, maksimalus ir minimalus nuotėkis tiek pagal didžiausią emisiją prognozuojantį RCP8.5 scenarijų, tiek pagal vidutinę emisiją numatantį RCP4.5 scenarijų, turėtų padidėti Šiaurės Eurazijoje ir šiaurinėje Šiaurės Amerikos dalyje, Azijoje, rytinėje ir centrinėje Afrikos bei Australijos dalyse. Nuotėkio sumažėjimas numatomas Europoje, Artimuosiuose Rytuose, Centrinėje Azijoje, šiaurinėje ir pietinėje Afrikoje, Jungtinių Valstijų pietvakariuose ir Centrinėje Amerikoje. Nors abu minėti scenarijai prognozuoja analogišką erdvinį nuotėkio pokyčių pasiskirstymą, mažesni santykiniai vidutinio ir maksimalaus nuotėkio dydžių pokyčiai yra tikėtini pagal švelnesnį RCP4.5 scenarijų, o prognozuojamo minimalaus nuotėkio pokyčio dydis yra panašus pagal abu tirtus scenarijus (Koirala, 2014). Drastiškus pokyčius prognozuoja RCP8.5 scenarijus, naudotas ir kitoje žinomoje studijoje (Davie, 2013) įvertinant ateities nuotėkį, sumodeliuotą pagal pasirinktus hidrologinius ir biomo (įtraukiančius CO₂ poveikį ir sezoninius augalijos pokyčius) modelius. Kundzewicz ir kt. (2017), panaudoję RCP scenarijus, apžvelgė potvynių prognozių skirtumų priežastis Europoje ir teigė, kad šie skirtumai yra tikras iššūkis priimantiems sprendimus dėl potvynių rizikos vertinimo. Prognozių skirtumai atsiranda dėl naudojamų skirtingų emisijų (SRES ar RCP) scenarijų, klimato modelių, tinklelio raiškos didinimo (angl. *downscaling*) metodų. Taip pat šių skirtumų priežastimi gali būti ir pasirinkti nevienodi prognozių ar baziniai laikotarpiai, trumpos stebėjimų eilutės bei daug kitų veiksnių. Autoriai pažymi, kad

ypač didelis neapibrėžtumas yra modeliuojant ekstremalius nuotėkio reiškinius pagal pesimistišką RCP8.5 scenarijų.

Viena naujausių studijų Europoje (Roudier et al., 2016), vertinanti +2 °C globalaus atšilimo įtaką ateities ekstremaliems potvyniams ir hidrologinėms sausroms, taip pat paremta RCP scenarijais. Jos rezultatai rodo didelius skirtumus tarp šiaurinės ir pietinės Europos dalies. Žymaus potvynių debitų padidėjimo tikimasi pietuose, išskyrus kai kuriuos regionus (Bulgariją, Lenkiją, Ispanijos pietus), kur maksimalių debitų pokyčiai nėra reikšmingi. Ypač reikšmingi pokyčiai tikėtini didesnėje Rumunijos teritorijoje, Ukrainoje, Vokietijoje, Prancūzijoje ir šiaurinėje Ispanijos dalyje. Prognozuojamas potvynių mažėjimas beveik visoje Suomijoje, Rusijos šiaurės vakaruose ir Švedijos šiaurinėje dalyje. Gauti ekstremalių sausrų prognozių rezultatai yra mažiau patikimi. Spėjama, kad jų intensyvumas ir trukmė gali padidėti Ispanijoje, Prancūzijoje, Italijoje, Graikijoje, Balkanuose, Jungtinės Karalystės pietuose ir Airijoje. Vertinant tiek minimalias, tiek maksimalias nuotėkio vertes išryškėja, kad tiriamas globalios temperatūros padidėjimas labiausiai paveiks Pietų Prancūziją ir Šiaurės Ispaniją. Alfieri ir kt. (2015) potvynių pasikartojimo dažnumo prognozes Europos teritorijoje pateikia naudodami didžiausios emisijos RCP8.5 scenarijų. Mokslininkai teigia, kad šio amžiaus pabaigoje tiek vidutinis metinis kritulių kiekis, tiek vidutinis upių debitas turėtų sumažėti Pietų Europoje, o Europos šiaurės rytinėje dalyje gali padidėti. Prognozuojamų ekstremalių debitų tendų pobūdis labai keičiasi dėl įvairių hidrologinių procesų sąveikos – tai šylančio klimato įtaka sutrumpėjusiam sniego akumuliacijos ciklui ir išgaravimo intensyvėjimas. Šių pokyčių rezultatas – prognozuojamas debitų pikų sumažėjimas Pietų Ispanijoje, Skandinavijoje ir Baltijos šalyse bei laipsniškai didėjantis debito pikų dydis ir dažnis didesnėje Centrinės Europos dalyje. Naujos kartos scenarijus jau pritaikė ir švedų mokslininkai bendroje Šiaurės–Baltijos šalių regiono studijoje apie klimato kaitos įtaką upių nuotėkiui ir azotui išplauti (Øygarden et al., 2014). Ateityje pagal RCP scenarijus Švedijoje prognozuojama didesnė ekstremalių hidrologinių reiškinių tikimybė. Bendram Lenkijos ir Norvegijos projektui *CHIHE* (angl. *Climate Change Impact on Hydrological Extremes*) susibūrę mokslininkai paruošė meteorologinių prognozių duomenis pagal RCP scenarijus ir įvertino klimato kaitos įtaką ekstremaliems upių debitams (Romanowicz et al., 2016).

Prognozuojant upių nuotėkio ir ekstremalių potvynių debitus yra svarbu įvertinti pačių prognozių neapibrėžtumus. Prognozėms taikomų hidrologinių modelių neapibrėžtumai yra reikšmingai mažesni nei emisijos scenarijų (Kriaučiūnienė et al., 2013) ar globalaus klimato modeliai (Chen et al., 2011a). Kaip teigia Latif (2011), pirmieji prognozių neapibrėžtumai yra sukelti natūralių gamtinių procesų nepastovumo, kurį ne visais atvejais galima kiekybiškai įvertinti, ir tik po to galima vertinti globalaus klimato modelių neapibrėžtumus. Paprastai neapibrėžtumai yra siejami su globalaus klimato modeliais ir šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos scenarijais, tačiau mažai dėmesio yra skiriama neapibrėžtumams, atsiradusiems dėl statistinių tinklelio raiškos didinimo metodų parinkimo (Chen, Brissette ir Leconte, 2011b). Chen ir kt. (2011b), palyginę nuotėkio prognozes pagal šešių skirtingus tinklelio raiškos didinimo metodus nustatė, kad tinklelio raiškos

didinimo metodai turi reikšmingą įtaką prognozių neapibrėžtumams, ypač susijusiems su hidrologiniais ekstremumais. Vis dėlto yra nuomonių, kad globalaus klimato modelio parinkimas didžiaja dalimi lemia nuotėkio prognozių neapibrėžtumus. Todėl siekiant nustatyti ilgalaikius nuotėkio pokyčius ateityje, yra svarbu įvertinti, kokius neapibrėžtumus globalaus klimato modelis pateikia istoriniu laikotarpiu (Chen et al., 2017; Shen et al., 2018). Kundzewicz ir kt. (2018) siūlo neapibrėžtumų mažinimą ir rekomendacijas, kurios pateikiamos per keturis pagrindinius blokus, susidedančius iš duomenų patikimumo didinimo, globalaus klimato modelių neapibrėžtumų mažinimo, regioninio klimato ir hidrologinių modelių integravimo bei hidrologinio modeliavimo optimizavimo sprendimų. Lietuvos upių nuotėkio prognozių neapibrėžtumai buvo įvertinti Merkio ir Neries upėse 2011–2040 m., 2041–2070 m. ir 2071–2100 m. laikotarpiais pagal du globalaus klimato modelius (ECHAM5 ir HadCM3), tris SRES grupės emisijų scenarijus (A2, A1B ir B1) bei HBV modelio kalibravimo parametrus (Kriaučiūnienė et al., 2013). Tyrimu buvo nustatyta, kad didžiausius neapibrėžtumus sukelia klimato scenarijai.

Lietuvoje atlikta mažai tyrimų, prognozuojant upių nuotėkio režimą naudojant naujausius RCP scenarijus. Tik Vilniaus universiteto Hidrologijos ir klimatologijos katedros mokslininkai atliko tyrimą (Stonevičius et al., 2017), kuriame Nemuno baseino hidrologiniai pokyčiai modeliuoti vandens balanso modeliu WatBal; prognozuojami mėnesio debitų pokyčiai tik pagal RCP2.6 ir RCP8.5 scenarijus ir tik paskutiniam XXI a. dvidešimtmečiui. Pagal visus RCP scenarijus ir kvantilių priskyrimo (QM) tinklelio raiškos didinimo metodą buvo prognozuota Nemuno prietaka į Kuršių marias (Jakimavičius, Kriaučiūnienė ir Šarauskienė, 2018). Prognozės parodė, kad Nemuno vidutinis metinis nuotėkis ties žiotimis 2081–2100 m. laikotarpiu gali sumažėti nuo 0,1 % pagal RCP2.6 iki 28,2 % pagal RCP8.5, o nuotėkis smarkiausiai keisis žiemos ir pavasario sezonais, kadangi pagal ekstremalų RCP8.5 klimato scenarijų prognozuojamas žiemos nuotėkio padidėjimas iki 10,3 % ir pavasario nuotėkio mažėjimas iki 9,7 %.

1.8. Autoriaus indėlis į nagrinėjamą tematiką

Įvertinus pasaulio ir Lietuvos mokslininkų atliktus tyrimus, susijusius su potvynių vertinimu praeityje ir jų prognozavimu XXI a. buvo nustatyta, kad pasaulyje atlikta daug tyrimų, susijusių su naujausių RCP klimato scenarijų taikymu prognozuojant ekstremalius potvynius. Tačiau Lietuvoje tokio pobūdžio mokslinių tyrimų gan mažai, nes iki šiol daugelis tyrimų vertino potvynių kaitą praeityje. Todėl šiame darbe pirmą kartą sukurta metodika, leidžianti prognozuoti pavasario potvynius bei vasaros ir rudens poplūdžius artimai ir tolimai ateičiai pagal tris naujausius RCP klimato scenarijus ir tris globalaus klimato modelius, geriausiai reprezentuojančius Lietuvos klimatinės sąlygas (2.2 ir 2.3 skyriai). Iki šiol globalaus klimato modelių išvesties duomenims (temperatūra ir krituliai) adaptuoti Lietuvos klimatinėmis sąlygomis buvo taikyti vos keletas tinklelio raiškos didinimo metodų, tačiau nebuvo įvertinti jų tarpusavio skirtumai ir įtaka galutinėms nuotėkio ir potvynių prognozėms. Todėl buvo taikyti trys tinklelio raiškos didinimo metodai: paklaidų korekcija su kintamumu (BC), pokyčio faktorius su kintamumu (CF) ir

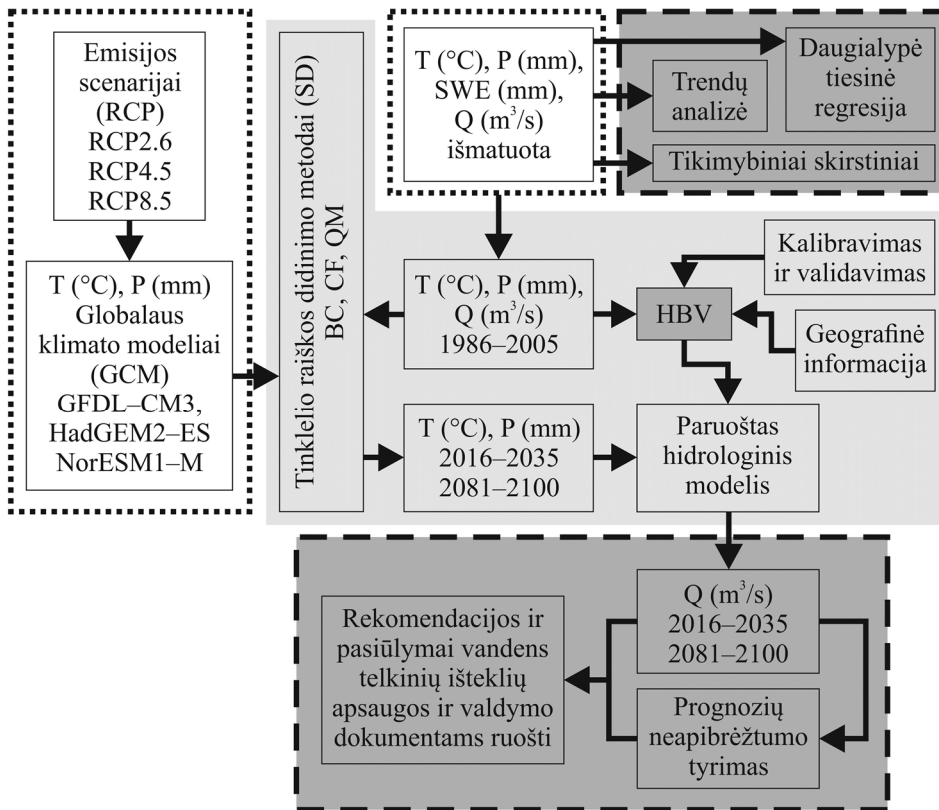
kvantilių priskyrimas (QM). BC ir CF metodai yra modifikuotos ankstesnės kartos tinklelio raiškos didinimo metodų versijos, taikytos pirmą kartą Lietuvos sąlygomis. Pagal sukurta metodiką buvo analizuotas ir prognozuotas pasirinktų Lietuvos upių nuotėkis ir potvyniai.

Prognozėms naudojant globalaus klimato modelius, RCP klimato scenarijus ir tinklelio raiškos didinimo metodus, galinčius daryti įtaką galutinėms prognozėms, buvo įvertinti šių trijų šaltinių sukelti vidutinio metinio nuotėkio ir potvynių maksimalių debitų prognozių neapibrėžtumai.

Apibendrinus esamą klimato kaitos vertinimo ir jos prognozavimo metodiką vandens telkinių išteklių apsaugos ir valdymo dokumentuose, buvo pateiktos rekomendacijos ir pasiūlymai minėtiems dokumentams ruošti siekiant įvertinti potvynių pavojaus riziką.

2. METODIKA

Vertinant potvynių kaitos dėsningumus praityje ir jų susidarymo sąlygas, buvo naudoti istoriniai hidrologinių ir meteorologinių stebėjimų duomenys (3.1 lent.). Šiems duomenims buvo pritaikyti trendų analizės, tikimybinių skirstinių ir daugialypės tiesinės regresijos metodai. Siekiant įvertinti galimus potvynių kaitos dėsningumus ateityje, pagal stebėjimų duomenis ir turimą geografinę informaciją buvo sukurti pasirinktų upių hidrologiniai modeliai. GFDL–CM3, HadGEM2–ES ir NorESM1–M globalaus klimato modelių išvesties duomenys – temperatūra (T , °C) ir krituliai (P , mm) pagal RCP (2.6, 4.5 ir 8.5) klimato scenarijus buvo adaptuoti Lietuvos sąlygomis taikant BC, CF ir QM tinklelio raiškos didinimo metodus. Naudojant HBV programinę įrangą, pagal minėtąsias T ir P duomenų eilutes buvo sumodeliuotos artimos (2016–2035 m.) ir tolimos ateities (2081–2100 m.) paros debitų prognozės. Prognozuotos nuotėkio vidutinės ir ekstremalios reikšmės buvo palygintos su TKKK AR5 rekomenduojamo foninio laikotarpio (1986–2005 m.) normos reikšmėmis. Atlikus neapibrėžtumo analizę ir įvertinus potvynių maksimalias reikšmes klimato kaitos sąlygomis, pateiktos rekomendacijos ir pasiūlymai vandens telkinių išteklių apsaugos ir valdymo dokumentams ruošti (2.1 pav.).



2.1 pav. Potvynių prognozė ir jų rizikos vertinimas klimato kaitos sąlygomis

2.1. Potvynių tyrimas taikant statistinius metodus

Siekiant įvertinti potvynių kaitos dėsningumus praeityje, buvo taikyta **trendų analizė**, kadangi trendas yra kryptingas tiriamo parametro pokytis laike. Potvynių trendai buvo analizuojami naudojant labai plačiai taikomą neparametrinį statistinės analizės Mann–Kendall (MK) testą, kuriuo aprašomi tiesiniai ir netiesiniai trendai. MK testą rekomenduoja Pasaulio meteorologijos organizacija (Maidment, 1993) ir jis yra taikomas norint įvertinti įvairių meteorologinių ar hidrologinių parametru kaitos trendus. Naudojant MK testą nustatomi teigiami arba neigiami tiriamo parametro trendai, kurie atitinka 30 % patikimumo lygmenį ir reikšmingi teigiami arba neigiami trendai, kurių patikimumo lygmuo – 5 %.

Mann–Kendall testo pagrindą sudaro analizuojamo parametro laiko eilutės reikšmės n ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$) ir dvi duomenų eilutės (P_i bei P_j), kur $i=1,2,3, \dots, n-1$, $j=i+1, i+2, i+3, \dots, n$. Tokiu būdu rodikliai įvertinami kaip santykinės tikimybinės reikšmės (rangai) ($P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$) ir gaunama ši statistinė išraiška (Yue, Wang, 2004; Shadmani, Marofi ir Roknian, 2012):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(P_j - P_i) \quad (1)$$

čia

$$\text{sign}(P_j - P_i) = \begin{cases} 1, & \text{jei } P_j > P_i \\ 0, & \text{jei } P_j = P_i \\ -1, & \text{jei } P_j < P_i \end{cases} \quad (2)$$

Kiekvieno rodiklio vertė yra lyginama su vėlesnėmis duomenų vertėmis. Jeigu vėlesnio laikotarpio duomenų vertė yra didesnė už ankstesnio laikotarpio duomenų vertę, tuomet S padidinama 1, priešingu atveju sumažinama 1.

Nulinės hipotezės (H_0) atveju, kai neaptinkamas joks reikšmingas trendas, tikimybinis skirstinys tampa artimas normaliajam ir turi tokią išraišką:

$$\mu = 0 \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

Teigiama S reikšmė nurodo, kad duomenų eilutė yra įgavusi teigiamą tendą, neigiama S reikšmė – neigiamą tendą. Trendų analizės rezultatai pateikiami įvertinus kiekvieno tiriamo parametro teigiamo arba neigiamo trendo reikšmingumą esant 5 % ir 30 % patikimumo lygmenims. Taikant trendų analizę, įvertinta Lietuvos upių pavasario potvynių ir vasaros–rudens poplūdžių kaita per daugiametį laikotarpį.

Tikimybiniai dažnio analizės metodai yra taikomi ekstremaliems hidrologiniams reiškiniams vertinti. Dažnio analizės tikslas – susieti tiriamų įvykių dydį su jų pasikartojimo dažnumu naudojant tikimybinius skirstinius. Pasirinktos tikimybės potvyniams upėse prognozuoti remtasi stebėtais metiniais maksimaliais

debitų duomenimis, skaičiuojant tokią statistinę informaciją, kaip vidurkiai, standartiniai nuokrypiai, asimetrija ir pasikartojimo intervalai. Vėliau šie statistiniai duomenys yra naudojami dažnio skirstiniams sudaryti (grafikuose ir lentelėse matoma įvairaus dydžio debitų pasikartojimo tikimybė priklausomai nuo pasikartojimo intervalo ar viršijimo tikimybės).

Gausūs Lietuvos upių hidrologiniai duomenys, išmatuoti vandens matavimo stotyse, suteikia labai vertingos informacijos apie upės vidutinį, maksimalų ir minimalų vandens debitą, lygį bei jų metinę kaitą. Ši informacija yra labai svarbi hidrotechninių statinių projektuotojams. Projektuojant statinius, priklausomai nuo statinio klasės, yra naudojamos atitinkamų tikimybių hidrologinių charakteristikų projektinės reikšmės. Minėtasis reikšmes reikėtų kuo tiksliau įvertinti, nes apskaičiavus mažesnius maksimalius debitus, padidėtų hidrotechninių statinių griūties rizika, o pervertinus debitus, išaugtų statybos kaina. Šiame darbe pasirinktų upių pavasario potvynių maksimalių debitų (Q_{max}) ir maksimalių vandens atsargų sniege (SWE_{max}) tikimybei analizuoti buvo pasirinkti Apibendrintųjų ekstremalių reikšmių (angl. *GEV – Generalized Extreme Values*), Apibendrintas logistinis (angl. *GL – Generalized Logistic*) ir Veibulo (angl. *W – Weibull*) tikimybiniai skirstiniai (2.1 lent.). Šie skirstiniai yra lankstūs trijų parametru modeliai. GEV skirstinys plačiai taikomas modeliuojant tokius reiškinius, kaip ekstremalus potvyniai, gausus snygis ir kt. GL skirstinys taip pat svarbus modeliuojant ekstremalius reiškinius. Veibulo skirstinys yra tolydusis tikimybinis skirstinys, kuris dažnai taikomas hidrologijoje ekstremalių reikšmių tyrimams, susijusiems su maksimalių debitų analize. Visi šie metodai yra plačiai aprašyti mokslinėje literatūroje (Burr, 1942; Johnson et al., 1994; Forbes et al., 2011).

2.1 lentelė. Naudotų skirstinių tikimybės tankio funkcijos ir parametrai

Skirstinys	Tikimybės tankio funkcija	Parametrai
Apibendrintųjų ekstremalių reikšmių	$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{1}{k}(1+kz)^{-1/k}\right), & k \neq 0 \\ \frac{1}{\sigma} \exp(-z - \exp(z)), & k = 0 \end{cases}$	k – tolydusis formos parametras; σ – tolydusis skalės parametras ($\sigma > 0$); μ – tolydusis padėties parametras; $z \equiv \frac{x - \mu}{\sigma}$
Apibendrintas logistinis	$f(x) = \begin{cases} \frac{(1+kz)^{-1-1/k}}{\sigma(1+(1+kz)^{-1/k})^2}, & k \neq 0 \\ \frac{\exp(-z)}{\sigma(1+\exp(-z))^2}, & k = 0 \end{cases}$	k – tolydusis formos parametras; σ – tolydusis skalės parametras ($\sigma > 0$); μ – tolydusis padėties parametras; $z \equiv \frac{x - \mu}{\sigma}$
Veibulo	$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x-y}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\left(\frac{x-y}{\beta}\right)^\alpha\right)$	α – tolydusis formos parametras ($\alpha > 0$); β – tolydusis skalės parametras ($\beta > 0$); γ – tolydusis padėties parametras

Parametrams vertinti naudoti momentų, L–momentų bei didžiausio tikėtinumo metodai. Tinkamiausi skirstiniai atrinkti naudojant Kolmogorovo–Smirnovą ir Andersono–Darlingo testus. Tyrimui pasitelkta „EasyFit“ (sukurta *Math Wave Technologies*, www.mathwave.com) programa.

Kolmogorovo–Smirnovą (K–S) testas yra taikomas siekiant nustatyti ar reikšmė, paimta iš imties, priklauso konkrečiam pasiskirstymui (Chakravarti et al., 1967). Šio metodo pagrindą sudaro empirinė kumuliacinė pasiskirstymo funkcija ($F_n(x)$):

$$F_n(x) = \frac{1}{n} [n \leq x] \quad (5)$$

Tokiu būdu Kolmogorovo–Smirnovą (K–S) testo statistinė išraiška (D) lygina teorinę pasiskirstymo funkciją $F(x)$ su empirine kumuliacine pasiskirstymo funkcija $F_n(x)$:

$$D_n = \max_{1 \leq i \leq n} \left(F(x_i) - \frac{i-1}{n}, \frac{i}{n} - F(x_i) \right) \quad (6)$$

Hipotezė, susijusi su pasiskirstymo forma, yra atmetama, jeigu statistinė išraiška D yra didesnė už kritinę reikšmę, gautą iš lentelės ties pasirinktu reikšmingumo lygmeniu α .

Andersono–Darlingo (A–D) testas yra modifikuotas K–S testas, kuris sąlyginai daugiau svorio suteikia skirstinio pakraščiams, negu centrinei jo daliai (Anderson, Darling, 1952). A–D testas yra taikomas kaip K–S testo alternatyva, siekiant nustatyti tinkamiausius skirstinius. Andersono–Darlingo testo statistinė išraiška yra išreiškiama per A^2 :

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) [\ln F(X_i) + \ln(1-F(X_{n-1+i}))] \quad (7)$$

Hipotezė, susijusi su pasiskirstymo forma, yra atmetama, jeigu statistinė išraiška A^2 ties pasirinktu reikšmingumo lygmeniu α yra didesnė už kritinę reikšmę, kuri EasyFit programoje priklauso nuo atrankos dydžio.

Daugialypė tiesinė regresinė analizė buvo pritaikyta paprastiems prognostiniams modeliams sukurti, kurie buvo naudoti maksimaliam pavasario potvynio debitui prognozuoti bei šių potvynių formavimosi sąlygoms aprašyti. Sukurtuose tiesinės regresijos modeliuose maksimalus pavasario potvynio debitas (Q_{max}) buvo išskirtas kaip prediktantas – priklausomas kintamasis, o maksimalios vandens atsargos sniege prieš pat potvynį (SWE_{max}) bei dešimties dienų kritulių suma prieš maksimalų pavasario potvynio debitą (P_{10}) buvo pasirinkti kaip prediktoriai – nepriklausomi kintamieji. Pasirinktieji meteorologiniai parametrai buvo apskaičiuoti iš gretimų upių baseinų meteorologijos stočių taikant Taisono poligonų metodą (angl. *Thiessen polygon*) (Fiedler, 2003).

Priklausomų kintamųjų, susijusių su nepriklausomais kintamaisiais, įvertinimas, gali būti naudojamas norint sukurti modelius paprastoms įvairių kintamųjų prognozėms (Higgins, 2005). Hidrologijoje prediktoriais gali būti įvairūs

klimate kintamieji, paviršinio nuotėkio veiksniai, sezoniškumas ir kt. (Holder, 1985). Šiame darbe prediktantas Q_{max} ir prediktoriai – SWE_{max} ir P_{10} buvo pasirinkti daugialypės tiesinės regresijos analizei ir Q_{max} kaitai aprašyti šia statistine išraiška:

$$Q_{max} = a + b_1 SWE_{max} + b_2 P_{10} \quad (8)$$

čia Q_{max} – prognozuojamas kintamasis, $a - Q_{max}$ konstanta, $b_1 - SWE_{max}$ koeficientas, apibūdinantis kiekvieno Q_{max} pokytį, $b_2 - P_{10}$ koeficientas, apibūdinantis kiekvieno Q_{max} pokytį, b_1 ir b_2 koeficientai yra apibūdinami šia statistine išraiška:

$$b_1 = \left(\frac{r_{Q_{max}, SWE_{max}} - r_{Q_{max}, P_{10}} r_{SWE_{max}, P_{10}}}{1 - (r_{SWE_{max}, P_{10}})^2} \right) \left(\frac{SD_{Q_{max}}}{SD_{SWE_{max}}} \right) \quad (9)$$

$$b_2 = \left(\frac{r_{Q_{max}, P_{10}} - r_{Q_{max}, SWE_{max}} r_{SWE_{max}, P_{10}}}{1 - (r_{SWE_{max}, P_{10}})^2} \right) \left(\frac{SD_{Q_{max}}}{SD_{P_{10}}} \right) \quad (10)$$

čia $r_{Q_{max}, SWE_{max}}$ – koreliacija tarp Q_{max} ir SWE_{max} , $r_{Q_{max}, P_{10}}$ – koreliacija tarp Q_{max} ir P_{10} , $r_{SWE_{max}, P_{10}}$ – koreliacija tarp SWE_{max} ir P_{10} , $(r_{x_1, x_2})^2$ – SWE_{max} ir P_{10} determinacijos koeficientas, $SD_{Q_{max}}$ – Q_{max} standartinis nuokrypis, $SD_{SWE_{max}}$ – SWE_{max} standartinis nuokrypis, $SD_{P_{10}}$ – P_{10} standartinis nuokrypis.

$$a = \overline{Q_{max}} - b_1 \overline{SWE_{max}} - b_2 \overline{P_{10}} \quad (11)$$

čia $\overline{Q_{max}}$ – Q_{max} vidurkis, $\overline{SWE_{max}}$ – maksimalių vandens atsargų sniege prieš pat pavasario potvynį vidurkis, $\overline{P_{10}}$ – dešimties dienų kritulių sumos prieš pavasario potvynio maksimalaus debito dieną vidurkis.

2.2. Penktosios Tarpvyriausybės klimato kaitos komisijos ataskaitos klimato scenarijai

Penktojoje Tarpvyriausybės klimato kaitos komisijos ataskaitoje aprašyti RCP klimato scenarijai susideda iš socialinių, ekonominių, šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų ir klimato prognozių rinkinių. RCP scenarijai skirstomi pagal tikėtiną energinį poveikį XXI a. pab., kuris nustatomas remiantis energijos balanso tarp ateinančios ir išeinančios spinduliuotės pokyčiais, susijusiais su atmosferos cheminės sudėties kaita. Šiame darbe naudotas tris RCP (2.6, 4.5 ir 8.5) klimato scenarijus kūrė trys modeliavimo grupės, kurios nepriklausomai viena nuo kitos kūrė ir naujausius scenarijus. Švelniausią RCP2.6 kūrė IMAGE (angl. *Integrated Model to Assess the Global Environment*) modeliavimo komanda iš Olandijos aplinkos vertinimo agentūros (angl. *Environmental Assessment Agency*). Pagal paskelbtą literatūrą, scenarijus prognozavo nedidelę šiltnamio efektą sukeliančių dujų koncentraciją, dėl kurios energinis poveikis pasiektų 3 W/m² XXI a. viduryje, kas sudaro ~490 ppm CO₂ koncentracijos ekvivalento ir laipsniškai mažėtų iki 2,6 W/m² amžiaus pabaigoje su tendencija mažėti (Van Vuuren et al.,

2006; Van Vuuren et al., 2007). Pati CO₂ koncentracijos ekvivalento skaičiavimo metodika paremta formule (Moss et al., 2008):

$$KE=278*\exp(EP/5,325) \quad (12)$$

čia KE – CO₂ koncentracijos ekvivalentas, o EP – energinis poveikis.

RCP4.5 kūrėjai taikė GCAM (angl. *Global Change Assessment Model*) integruoto vertinimo modelį, su kuriuo dirbo JAV įsikūrusio Jungtinio aplinkos pokyčių tyrimų instituto (angl. *JGCRI – Joint Global Change Research Institute*) mokslininkai. Tyrimų grupės nuomone, rezultatų energinis poveikis turėtų stabilizuotis po 2100 metų, kai pasiektų 4,5 W/m² ir tai sudarytų apie 650 ppm CO₂ ekvivalento (Smith, Wigley, 2006; Clarke et al., 2007; Wise et al., 2009).

Ekstremaliausias RCP8.5 scenarijus buvo kuriamas MESSAGE (angl. *Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact*) modeliu Tarptautiniame taikomųjų sistemų analizės institute (angl. *IIASA – International Institute for Applied Systems Analysis*). Šis scenarijus charakterizuojamas itin sparčiai augančia šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisija, susijusia su didėjančiais iškastinio kuro vartojimo kiekiais (Riahi, Grübler ir Nakicenovic, 2007). Dėl šių priežasčių XXI a. pabaigoje prognozuojamas energinis poveikis gali pasiekti 8,5 W/m² ribą, kas atitinka ~1370 ppm CO₂ ekvivalentą.

2.3. Globalaus klimato modelių parinkimas

Siekiant prognozuoti Lietuvos upių nuotėkio ir potvynių kaitą XXI a., iš didelės gausybės Globalaus klimato modelių, naudotų Pasaulinės klimato kaitos tyrimų programos Penktojo modelių palyginimo projekte (angl. *CMIP5 – Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*), buvo atrinkti trys modeliai, kurie geriausiai reprezentuoja Lietuvos klimatinės sąlygas. Didelis įdirbis pasirenkant modelius buvo padarytas Vilniaus universiteto Hidrologijos ir klimatologijos katedros mokslininkų (Keršytė, Rimkus ir Kažys, 2015). Jų tyrimas rėmėsi tik tais modeliais, kurių oro temperatūros ir kritulių kiekio išvesties duomenys buvo prognozuojami pagal visus keturis RCP scenarijus, todėl pirminiame etape iš visų CMIP5 projekte dalyvavusių modeliavimo centrų buvo atrinkti 24 modeliai. Norint įvertinti labiausiai Lietuvos klimatinės sąlygas apibūdinančius klimato modelius, pirmiausia iš KNMI (angl. *KNMI – Royal Netherlands Meteorological Institute, Ministry of Infrastructure and the Environment*) „Climate Explorer“ duomenų bazės buvo paimtos sumodeliuotos oro temperatūros ir kritulių kiekio reikšmės. Šių parametų prognozės sudarytos pagal RCP2.6, RCP4.5 ir RCP8.5 scenarijus. Pagal AR5 ataskaitą, laikotarpis nuo 2006 m. jau apima prognostines reikšmes, o istoriniai duomenys iki 2005 m. (imtinai) naudojami kaip bazinis laikotarpis (jie yra vienodi pagal visus RCP). „Climate Explorer“ duomenų bazėje duomenys suskirstyti į tinklėlį, o kiekvienos gardelės dydis yra lygus 2,5° × 2,5°. Lietuvos teritorija patenka į 5 gardeles, kuriose yra 16 Lietuvos hidrometeorologijos tarnybai (LHMT) priklausančių meteorologijos stočių (MS). Į pirmą gardelę patenka Klaipėdos, Nidos, Šilutės, Telšių ir Laukuvos MS, į antrą – Šiaulių, Raseinių, Panevėžio, Ukmergės ir Biržų MS, į trečią – Utenos MS, ketvirtoje gardelėje – Kybartų, Kauno, Lazdijų ir Varėnos MS, o penktoje – Vilniaus MS (Keršytė et al., 2015). Siekiant

išsiaiškinti, kurie modeliai geriausiai atitinka mėnesio vidutinės oro temperatūros ir kritulių kiekio reikšmes, modelių išvesties duomenys buvo palyginti su Lietuvos MS 1986–2005 m. laikotarpio stebėjimo duomenimis. Iš 24 CMIP5 projekte taikytų globalaus klimato modelių, kuriais buvo atliktas istorinis ir 3 RCP (RCP2.6, RCP4.5 ir RCP8.5) scenarijų ateities modeliavimas, sąrašo buvo parinkti trys: GFDL–CM3 (GFDL), HadGEM2–ES (Had), NorESM1–M (Nor), kaip geriausiai atitinkantys mėnesio vidutinės oro temperatūros ir kritulių kiekio reikšmes Lietuvos teritorijoje. Todėl minėtų modelių išvesties duomenys (vidutinė paros oro temperatūra ir paros kritulių kiekis) buvo paruošti ir pritaikyti HBV modeliui ir analizuotų hidrologinių ekstremumų prognozei artimai ir tolimai ateičiai.

Globalaus klimato modelių duomenys pateikiami NetCDF (angl. *NetCDF – Network Common Data Form*) formatu. Pradiniams išvesties duomenims nuskaityti naudotas Panoply version 4.4.3 įrankis, sukurtas NASA/GISS (<http://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>).

Oro temperatūros (T) duomenų formatas iš Kelvino (K) buvo verčiamas į $^{\circ}\text{C}$:

$$^{\circ}\text{C}=\text{K}-273,15 \quad (13)$$

Kritulių kiekio (P) formatas iš $\text{kg } \dot{\text{m}}^2/\text{s}$ buvo verčiamas į $\text{mm}/\text{parą}$ (P):

$$\text{mm}/\text{parą}=(\text{kg } \dot{\text{m}}^2/\text{s})*86400 \quad (14)$$

2.4. Meteorologinių duomenų adaptacija Lietuvos sąlygomis taikant statistinius tinklelio raiškos didinimo metodus

Taikant tris statistinius tinklelio raiškos didinimo metodus (angl. *statistical downscaling*) globalaus klimato modelių (GCM) išvesties duomenys (T ir P) buvo adaptuoti Lietuvos sąlygomis:

- a) paklaidų korekcija su kintamumu (angl. *BC – Bias Correction with variable*);
- b) pokyčio faktorius su kintamumu (angl. *CF – Change Factor with variable*);
- c) kvantilių priskyrimas (angl. *QM – Quantile Mapping*).

Šiais metodais buvo pašalintos sisteminės paklaidos, susijusios su GCM modelių neapibrėžtumu. Pakoreguotos temperatūros ir kritulių duomenų eilutės panaudotos Lietuvos upių nuotėkio ir potvynių prognozėms modeliuoti. Taikant statistinius tinklelio raiškos didinimo metodus, globalaus klimato modelių išvesties duomenys yra siejami su realiais, meteorologijos stotyse išmatuotais duomenimis, tokiu būdu iš stambios GCM gardelės meteorologiniai rodikliai adaptuojami pagal vietines sąlygas ir perkeltami į konkrečią meteorologijos stotį, patenkančią į atitinkamą gardelę. Pasirinktų GCM išvesties duomenys iš skirtingo dydžio gardelių buvo susieti su Lietuvoje esančių meteorologijos stočių oro temperatūros ir kritulių kiekio duomenimis AR5 klimato normos laikotarpiu (1986–2005 m.).

BC metodo pagrindą sudaro paklaidos, kurios susiformuoja GCM prognozuojant praities (foninio laikotarpio) klimato sąlygas, todėl BC metodu yra nustatomas skirtumas tarp išmatuotos meteorologinio rodiklio (MR) reikšmės ir GCM sumodeliuotos meteorologinio rodiklio reikšmės klimato normos laikotarpiu. Nustatytos paklaidos korekcija vidurkiui ir dispersijai yra įvedama į paros MR duomenis GCM ateities prognozėse (Ho et al., 2012; Hawkins et al., 2013):

$$MR_{BC}(t) = \overline{S_{KNL}} + \frac{\sigma_{S,KNL}}{\sigma_{MR,KNL}}(MR_{RAW}(t) - \overline{MR_{KNL}}) \quad (15)$$

Čia MR_{BC} – BC metodu pakoreguotas GCM prognozuojamas meteorologinis rodiklis ateityje, S_{KNL} – stebėjimų duomenys klimato normos laikotarpiu, MR_{KNL} – GCM sumodeliuotas meteorologinis rodiklis klimato normos laikotarpiu. MR_{RAW} – GCM prognozuojamas meteorologinis rodiklis ateityje. Vidurkis yra išskirtas ilgu brūkšniu virš simbolio. Formulė (15) aprašo ryšį tarp stebėjimų (S_{KNL}) ir globalaus klimato modelio (MR_{KNL}) išvesties duomenų klimato normos laikotarpiu per standartinio nuokrypio išraišką, kur $\sigma_{S,KNL}$ ir $\sigma_{MR,KNL}$ yra atitinkamai paros stebėjimų ir GCM išvesties duomenų standartiniai nuokrypiai klimato normos laikotarpiu.

CF metodas yra paremtas pokyčio faktoriumi tarp globalaus klimato modelio prognozės ateityje ir to pačio modelio simuliacijos klimato normos laikotarpiu. Nustatytasis pokytis yra įvedamas į stebėjimo duomenis ir gaunama tokia statistinė išraiška (Ho et al., 2012; Hawkins et al., 2013):

$$MR_{CF}(t) = \overline{MR_{RAW}} + \frac{\sigma_{MR,RAW}}{\sigma_{MR,KNL}}(S_{KNL}(t) - \overline{MR_{KNL}}) \quad (16)$$

Čia MR_{CF} – CF metodu pakoreguotas GCM prognozuojamas meteorologinis rodiklis ateityje. Pastaroji lygtis įvertina ryšį tarp MR_{RAW} (GCM prognozuojamas meteorologinis rodiklis ateityje) ir MR_{KNL} (GCM sumodeliuotas meteorologinis rodiklis klimato normos laikotarpiu) per standartinio nuokrypio santykį, kur $\sigma_{MR,RAW}$ ir $\sigma_{MR,KNL}$ yra atitinkamai paros GCM prognozuotų meteorologinių rodiklių ateityje ir GCM išvesties duomenų klimato normos laikotarpiu standartiniai nuokrypiai.

QM metodo pagrindą sudaro h faktoriaus transformacijos koncepcija, išreikšta per šią statistinę lygtį (Gudmundsson et al., 2012b):

$$S_{KNL} = h(MR_{KNL}) = EKPF_{S,KNL-1}(EKPF_{MR,KNL}(MR_{RAW})) \quad (17)$$

čia S_{KNL} – stebėjimų metu išmatuotas meteorologinis rodiklis klimato normos laikotarpiu, MR_{KNL} – globalaus klimato modelio išvesties duomenų meteorologinis rodiklis klimato normos laikotarpiu, MR_{RAW} – globalaus klimato modelio prognozuojamas ateities meteorologinis rodiklis, $EKPF_{S,KNL-1}$ – išmatuoto meteorologinio rodiklio empirinė kumuliacinė pasiskirstymo funkcija, $EKPF_{MR,KNL}$ – globalaus klimato modelio klimato normos laikotarpio meteorologinio rodiklio empirinė kumuliacinė pasiskirstymo funkcija.

Pirmiausiai yra apskaičiuojama empirinio pasiskirstymo funkcija $EKPF_{S,KNL-1}$ ir MR_{KNL} fiksuotais intervalais 0,01. Tada h yra apskaičiuojamas kaip santykinis skirtumas tarp dviejų $EKPF$ kiekviename intervale. Interpoliacija tarp fiksuotų intervalų yra paremta monotoniška trečiojo laipsnio ribinių kreivių (angl. *monotonic tricubic spline*) interpoliacija. Koreguojant kritulius, drėgnų dienų korekcijos slenkstis yra apskaičiuojamas iš $EKPF_{S,KNL-1}$ empirinės tikimybės didesnių už nulį reikšmių. Visos GCM reikšmės, kurios yra mažesnės už šį slenkstį, prilyginamos 0 (Sunyer et al., 2015). Šis metodas buvo pritaikytas naudojant *Python* programą.

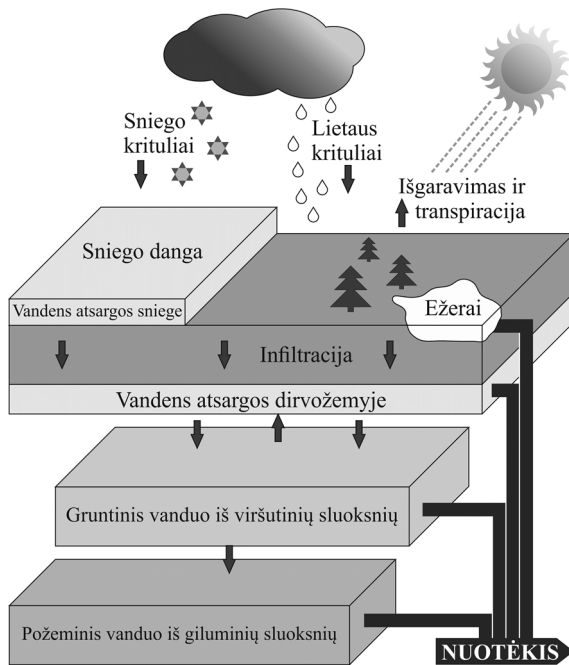
2.5. Potvynių prognozė naudojant HBV programinę įrangą

HBV (*Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning*) modelis, sukurtas Švedijos meteorologijos ir hidrologijos institute (SMHI, 2005), įvertina kritulių ir paviršinio nuotėkio sąveiką ir kaip išvesties rezultatą suskaičiuoja upės debitą. HBV modelio pagrindą sudaro ši vandens balanso lygtis (Integrated Hydrological Modelling System, 2005):

$$P - E - Q = \frac{d}{dt} [SP + SM + UZ + LZ + V] \quad (18)$$

čia: P – krituliai, E – evapotranspiracija, Q – nuotėkis, SP – vandens atsargos sniege, SM – dirvos drėgmė, UZ – gruntinis vanduo, LZ – požeminis vanduo, V – vandens talpyklų tūris.

HBV modeliu įvertinama ir apskaičiuojama, kaip tiriamos upės baseino teritorijoje iškritę atmosferos krituliai dėl temperatūros, garavimo, infiltracijos, akumuliacijos natūraliuose vandens telkiniuose ir baseino reljefo įtakos yra transformuojami į upių nuotėkį (2.2 pav.).



2.2 pav. HBV modeliu įvertintų procesų schema (pagal Integrated Hydrological Modelling System, 2005)

Modeliuojant upių nuotėkį HBV modeliu, reikia analizuojamo baseino pagrindinės geografinės informacijos: upės baseino ploto, jame esančių miškų, dirbamos žemės ir ežerų ploto santykio bei vidutinių baseino aukščių virš jūros lygio. Aukščiai virš jūros lygio paprastai yra skirstomi į tris aukščių kategorijas, siekiant detaliau apibūdinti aukščių perkritimą upės baseine. Po to įvedamas

meteorologijos ir vandens matavimo stočių tinklas kartu su jose esančiais istoriniais stebėjimų duomenimis (temperatūra, krituliai ir debitas). Nusistačius modeliuojamą laikotarpį, yra atliekama kalibravimo ir validavimo procedūra. Pagal metodinius nurodymus, rekomenduojama pasirinkti ne trumpesnę kaip 10 metų laikotarpį kalibravimui ir tokios pačios trukmės laikotarpį validavimui. Kiekvienos modeliujamos upės hidrologinis modelis kalibruojamas penkiais etapais naudojant 16 pagrindinių kalibravimo parametrų, kurie priklauso nuo geografinės zonos ir upės baseino vietinių fizinių geografinių charakteristikų (2.2 lent.).

2.2 lentelė. HBV modelio pagrindiniai kalibravimo parametrai (Integrated Hydrological Modelling System, 2005)

Kalibravimo parametras	Santrumpa	Rekomenduojamas reikšmės intervalas
Nuotėkio tūrio		
Kritulių pataisa, susijusi su duomenų eilučių nehomogeniškumu	pcorr	0,8–1,2
Sniego pavidalo kritulių pataisa	sfcf	0,8–1,4
Lietaus pavidalo kritulių pataisa	rfcf	0,9–1,3
Maksimalios dirvožemio drėgmės atsargos (mm)	fc	100–1500*
Sniego tirpsmo		
Temperatūros slenkstis, ties kuriuo krituliai apibūdinami kaip sniegas ar lietus (°C)	tt	-2–+2
Temperatūros slenkstis, ties kuriuo prasideda sniego tirpsmas (°C)	dttm	-2–+2
Temperatūros slenkstis, ties kuriuo krituliai apibūdinami kaip šlapdriba (°C)	tii	0–2,5
Sniego tirpsmo intensyvumas (mm/°C per parą)	cfmax	2–4,5
Dirvožemio drėgmės		
Potencialaus išgaravimo riba (mm)	lp	<=1
Rodiklis, nurodantis nuotėkio susidarymą iš dirvožemyje sukauptų vandens atsargų	beta	1–4
Supaprastinta Thornthwait lygtis (mm/parą °C)	athorn	0,2–0,3
Viršutinių vandens sluoksnių judėjimas į dirvožemio vandens sluoksnį kapiliarais	cflux	0–2
Reakcijos/atsako		
Požeminio baseino recesijos koeficientas	k4	0,001–0,1
Filtravimasis iš viršutinių sluoksnių į žemutinius (mm/parą)	perc	0,01–6
Viršutinio sluoksnio recesijos koeficientas, kai debitas yra maksimalus	khq	0,005–0,2
Pikų netiesiškumo pataisos koeficientas	alfa	0,5–1,1

*Priklauso nuo regiono

Naudojant prieš tai minėtus kalibravimo parametrus, ypač svarbu parinkti tinkamas jų reikšmes, pritaikant jas konkrečiam analizuojamos upės baseinui, nes nuo to priklausys galutinių modeliavimo rezultatų patikimumas. Norint gauti tiksliausias prognozes, modelio kūrėjai nurodo pagrindinius penkis kalibravimo etapus, kurie yra kartojami tol, kol koreliacijos koeficientas (R) bus didesnis už 0,8, o santykinė paklaida mažiausia (Integrated Hydrological Modelling System, 2005):

1 etape yra kalibruojami nuotėkio tūrio parametrai, kurie susideda iš *pcorr*, *sfcf* ir *rfcf*. *Pcorr* – kritulių pataisa, susijusi su duomenų eilučių nehomogeniškumu; pačioje kalibravimo pradžioje ji turėtų būti lygi 1,0 ir pirminiame etape neturėtų būti kalibruojama, ypač jeigu turimos nuoseklios duomenų eilutės. Todėl didesnė dėmesio dalis turėtų būti skirta *sfcf* ir *rfcf* parametrų kalibravimui. Pastarieji lemia modeliuojamo nuotėkio tūrį, tačiau pirmas žingsnis turėtų būti *sfcf* parametro reikšmės nustatymas, kuris yra atsakingas už pavasario potvynio tūrį. Parametro intervalas svyruoja tarp 0,8–1,4 ir yra kalibruojamas tol, kol santykinis skirtumas tarp stebėtojo ir sumodeliuoto pavasario potvynio tūrio bus mažiausias. Svarbu atkreipti dėmesį į tiriamo baseino miškingumą, kadangi *sfcf* reikšmė yra mažesnė miškingose teritorijose lyginant su atviromis teritorijomis. Pasiekus artimą reikšmę išmatuotajam pavasario potvynio tūriui, pereinama prie likusios metų dalies vandens tūrio, kuris kalibruojamas keičiant *rfcf* reikšmes, kurios svyruoja 0,9–1,3 intervalu. Galiausiai kalibruojamas *fc* parametras, kurio pataisa lemia bendrąjį nuotėkio tūrį.

2 etape yra kalibruojami sniego tirpsmo ir jo akumuliacijos parametrai (*tt*, *dtm*, *tti* ir *cfmax*). *Tt* parametras, apsprendžiantis atmosferos kritulių pobūdį (lietus ar sniegas) turi reikšmingos įtakos temperatūros slenksčiui, nuo kurio prasideda sniego akumuliacija. Temperatūros slenkstis, ties kuriuo prasideda sniego tirpsmas, yra kalibruojamas *dtm* parametru. Šie abu minėtieji parametrai, apibūdinantys sniego būklę, yra kalibruojami kartu ir jų intervalas kinta nuo -2° iki 2°C. *Tti* – temperatūros slenkstis, ties kuriuo krituliai apibūdinami kaip šlapdriba. Jis gali svyruoti nuo 0° iki 2,5°. Sniego tirpsmo intensyvumas kalibruojamas *cfmax* parametru ir rekomenduojama reikšmė turėtų būti tarp 2 ir 4,5.

3 etape parenkami dirvožemio drėgmės parametrai, susidedantys iš keturių pagrindinių rodiklių: *fc*, *lp*, *beta* ir *athorn*. Pirmieji trys parametrai yra skirti kalibruoti vasaros ir rudens laikotarpių upių debitus bei daro įtaką bendram nuotėkio tūriui. *Fc* parametras yra šiek tiek koreguojamas pirmame etape, bet prie jo sugrįžtama ir šiame etape, kadangi jis įvertina maksimalias dirvožemio drėgmės atsargas, išreikštas milimetrais. Atsižvelgiant į tiriamo upės baseino regioną, *fc* gali svyruoti nuo 100 iki 1500. Potencialaus dirvožemio drėgmės išgaravimo ribą nurodantis *lp* parametras turėtų būti mažesnis arba lygus 1. *Beta* rodiklis, nurodantis nuotėkio dalį iš dirvožemyje sukauptų vandens atsargų, kalibruojamas keičiant jo reikšmes intervale nuo 1,0 iki 4,0. *Athorn* parametras (mm/parą °C), reprezentuojantis supaprastintą Thornthwait lygtį, paprastai svyruoja 0,2–0,3 ribose. Dirvožemio drėgmės judėjimas kapiliarais yra kalibruojamas *cflux* parametru (svyravimo ribos kinta nuo 0 iki 2).

4 etape yra kalibruojami upių nuotėkio reakcijos–atsako parametrai, kurie susideda iš *k4*, *perc*, *khq* ir *alfa* parametru. Kalibruojant šiuos parametrus, modeliuojamas upės debitas yra perskirstomas laike, todėl tai daro įtaką

hidrografinei formai nepaveikiant bendrojo nuotėkio tūrio. $K4$ – parametras apibūdina nuosėkio laikotarpio debito recesiją ir jo galimos svyravimo ribos kinta nuo 0,001 iki 0,1. $Perc$ parametro parinkimas turi lemiamos įtakos minimalaus nuotėkio dydžiui, kai upė maitinama išskirtinai tik požeminių vandenių ir šis parametras gali svyruoti tarp 0,01 ir 6. Prieš kalibruojant khq parametras, pirmiausiai turėtų būti tinkamai iširta vasaros ir rudens debitų recesija, nes šis parametras lemia minėtųjų laikotarpių debitų pikus. Šio parametro intervalas svyruoja nuo 0,005 iki 0,2. $Alfa$ parametras yra kalibruojamas siekiant sutalpinti modeliuojamo debito maksimalius debitus į išmatuoto hidrografo ribas. Maksimalių pikų netiesiškumo koeficientas $alfa$ kinta nuo 0,5 iki 1,1. Kuo didesnė jo reikšmė, tuo didesnis pikas ir greitesnis jo slūgimas. Paskutinis kalibravimo parametras hq yra ne kalibruojamas, o apskaičiuojamas kaip $(MQ \cdot MHQ)^{1/2} \cdot 86,4/A$ (km²) arba $MHQ/2 \cdot 86,4/A$ (km²) stebėtam debitui. Čia MQ – vidutinis nuotėkis, o MHQ – vidutinis maksimalus nuotėkis.

Upių hidrologiniams modeliams kalibruoti ir validuoti buvo pasirinktas 1986–2005 m. foninis laikotarpis (1986–1995 m. kalibravimui ir 1996–2005 m. validavimui). Kalibruojant sukurtus modelius vertinama, kaip išmatuotas debitas sutampa su modeliuotu, keičiant kalibruojamų parametrus reikšmes. Sukurtų hidrologinių modelių kalibravimo ir validavimo reikšmės bei šių laikotarpių vidutiniai (apskaičiuoti ir sumodeliuoti) debitai yra pateikti 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Sukurtų hidrologinių modelių kalibravimo ir validavimo rezultatai

Upė– VMS	Kalibravimas			Validavimas		
	R	Vidutinis Q (m ³ /s)		R	Vidutinis Q (m ³ /s)	
		Išmatuotas	Sumodeliuotas		Išmatuotas	Sumodeliuotas
Minija– Kartena	0,88	17,7	18,4	0,83	16,8	16,6
Nevėžis– Dasiūnai	0,86	38,9	34,6	0,77	29,0	33,7
Šventoji– Ukmergė	0,75	46,5	44,5	0,68	41,8	43,9

Palyginus 2.3 lentelėje pateiktus debitus nustatyta, kad skirtumai tarp išmatuotų ir sumodeliuotų reikšmių nedideli: mažiausi yra Minijos upėje (iki 4 %), o didžiausi – Nevėžio upėje (iki 16 %). Šie nesutapimai yra nedideli, nes pagal įvairius tyrimus debito matavimo paklaidos atskirais atvejais gali siekti 35 % (Winter, 1981; Sattary, 2002; Neff, Nicholas, 2005). Atsižvelgiant į gautus modelio kalibravimo bei validavimo rezultatus ir įvertinus, kad šioms procedūroms panaudotos ilgos duomenų eilutės, galima teigti, kad modeliai tinkamai paruošti prognozuoti upių nuotėkį 2016–2035 m. bei 2081–2100 m. laikotarpiais pagal įvairius klimato kaitos scenarijus. Šių prognozių pagrindą sudaro GFDL–CM3, HadGEM2–ES ir NorESM1–M globalaus klimato modelių išvesties duomenys sugeneruoti pagal RCP2.6, RCP 4.5 ir RCP8.5 klimato scenarijus bei adaptuoti Lietuvos sąlygomis taikant BC, CF ir QM tinklelio raiškos didinimo metodus.

2.6. Upių nuotėkio ir potvynių prognozių neapibrėžtumo tyrimas

Prognozuojant artimos ir tolimes ateities nuotėkį, yra būtina įvertinti neapibrėžtumus, susijusius su pirminiais kilmės šaltiniais, kuriuos šiame darbe sudaro globalaus klimato modeliai (GCM), klimato scenarijai (RCP) ir tinklelio raiškos didinimo metodai (SD). Panašaus pobūdžio neapibrėžtumo analizė jau buvo taikyta Norvegijoje, kur buvo vertinami keturi neapibrėžtumo šaltiniai – GCM, klimato scenarijai, tinklelio raiškos didinimo metodai ir HBV modelio parametrai (Lawrence, Haddeland, 2011). Lietuvoje Merkio ir Neries upių pavyzdžiu, ateities nuotėkio prognozių neapibrėžtumai buvo įvertinti pagal tris neapibrėžtumo šaltinius; tai globalaus klimato modeliai, SRES grupės klimato scenarijai ir HBV modelio parametrai (Kriaučiūnienė et al., 2013). Metodikos pagrindą sudaro skirtingų neapibrėžtumo šaltinių kombinacijų prognozės. Vertinant tris neapibrėžtumo šaltinius (A_{RCP} , B_{GCM} ir C_{SD}), iš kurių kiekvienas susideda iš trijų komponentų ($A_{RCP2.6}$, $A_{RCP4.5}$, $A_{RCP8.5}$, B_{GFDL} , B_{Had} , B_{Nor} , C_{BC} , C_{CF} ir C_{QM}), sudaromos visos įmanomos jų kombinacijos (2.4 lent.).

2.4 lentelė. Nuotėkio prognozių kombinacijos

Nr.	$A_{RCP2.6}$	$A_{RCP4.5}$	$A_{RCP8.5}$
1.	$A_{RCP2.6} B_{GFDL} C_{BC}$	$A_{RCP4.5} B_{GFDL} C_{BC}$	$A_{RCP8.5} B_{GFDL} C_{BC}$
2.	$A_{RCP2.6} B_{GFDL} C_{CF}$	$A_{RCP4.5} B_{GFDL} C_{CF}$	$A_{RCP8.5} B_{GFDL} C_{CF}$
3.	$A_{RCP2.6} B_{GFDL} C_{QM}$	$A_{RCP4.5} B_{GFDL} C_{QM}$	$A_{RCP8.5} B_{GFDL} C_{QM}$
4.	$A_{RCP2.6} B_{Had} C_{BC}$	$A_{RCP4.5} B_{Had} C_{BC}$	$A_{RCP8.5} B_{Had} C_{BC}$
5.	$A_{RCP2.6} B_{Had} C_{CF}$	$A_{RCP4.5} B_{Had} C_{CF}$	$A_{RCP8.5} B_{Had} C_{CF}$
6.	$A_{RCP2.6} B_{Had} C_{QM}$	$A_{RCP4.5} B_{Had} C_{QM}$	$A_{RCP8.5} B_{Had} C_{QM}$
7.	$A_{RCP2.6} B_{Nor} C_{BC}$	$A_{RCP4.5} B_{Nor} C_{BC}$	$A_{RCP8.5} B_{Nor} C_{BC}$
8.	$A_{RCP2.6} B_{Nor} C_{CF}$	$A_{RCP4.5} B_{Nor} C_{CF}$	$A_{RCP8.5} B_{Nor} C_{CF}$
9.	$A_{RCP2.6} B_{Nor} C_{QM}$	$A_{RCP4.5} B_{Nor} C_{QM}$	$A_{RCP8.5} B_{Nor} C_{QM}$

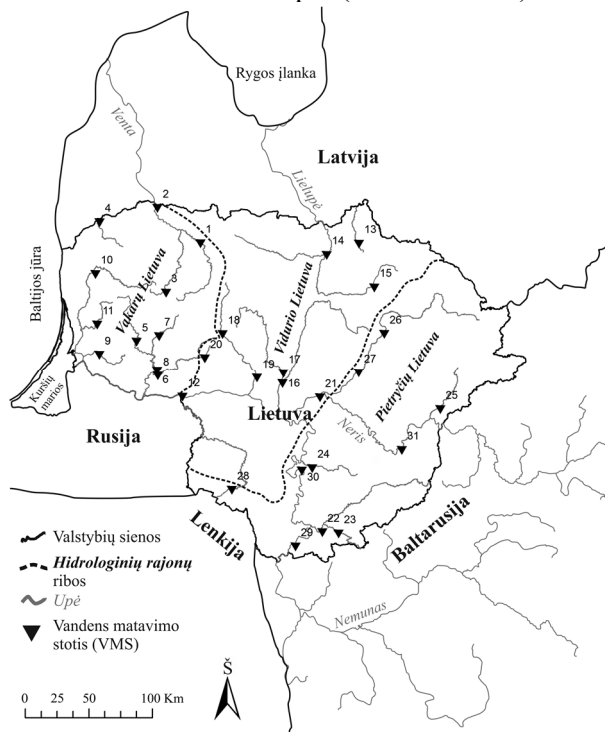
Kintamasis A_{RCP} reprezentuoja tiriamą neapibrėžtumo šaltinį, o B_{GCM} ir C_{SD} yra likusieji du neapibrėžtumo šaltiniai, kurių analogiškų komponentų (B_{GFDL} , B_{Had} , B_{Nor} , C_{BC} , C_{CF} ir C_{QM}) kombinacijos (2.4 lent.) padeda nustatyti neapibrėžtumus, sukeltus A_{RCP} kintamojo komponentų ($A_{RCP2.6}$, $A_{RCP4.5}$ ir $A_{RCP8.5}$). Šaltinio A_{RCP} neapibrėžtumai skaičiuojami pagal analogiškų B_{GCM} ir C_{SD} komponentų kombinacijas, kai iš pirmos kombinacijos eilutės išrenkama maksimali $A_{RCP2.6}$, $A_{RCP4.5}$ ar $A_{RCP8.5}$ reikšmė ir iš jos atimamas tos pačios eilutės minimumas. Taip apskaičiuavus visų 9 kombinacijų skirtumą, išvedamas aritmetinis minėtojo skirtumo vidurkis. Įvertinus visų trijų neapibrėžtumo šaltinių sukeltus neapibrėžtumus, pagal skirtumo vidurkį perskaičiuojamas kiekvieno šaltinio indėlis į prognozių rezultatų sklaidą bei nustatoma procentinė dalis kitų neapibrėžtumo šaltinių atžvilgiu.

3. HIDROMETEOROLOGINIŲ DUOMENŲ BAZĖS SUDARYMAS

Vertinant Lietuvos upių potvynių kaitos dėsningumus ir jų susiformavimo sąlygas praeityje bei kuriant upių hidrologinius modelius, buvo naudotas didelis hidrometeorologinių duomenų kiekis surinktas iš hidrologinių metraščių (Q , m^3/s), meteorologinių metraščių (T , $^{\circ}C$; P , mm ir SWE , mm), meteorologinių mėnraščių ir agrometeorologinių metraščių (SWE , mm). Modeliuojant potvynių prognozes artimai ir tolimai ateičiai, buvo panaudoti trijų globalaus klimato modelių (GFDL–CM3, HadGEM2–ES ir NorESM1–M) temperatūros ir kritulių duomenys, sugeneruoti pagal tris klimato scenarijus (RCP2.6, RCP4.5 ir RCP8.5).

3.1. Duomenys praeties pavasario potvyniams bei vasaros ir rudens poplūdziams vertinti

Siekiant praeties pavasario potvynių bei vasaros ir rudens poplūdzių kaitos dėsningumus įvertinti trendų analizės metodu, buvo pasirinkta 31 vandens matavimo stotis (VMS) iš Vakarų, Vidurio ir Pietryčių Lietuvos hidrologinių rajonų (3.1 pav.). VMS duomenys, surinkti iš Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos (LHMT) leidinių konkrečios upės stebėjimo laikotarpiu, pateikti 3.1 lentelėje. Iš paros debitų matavimo duomenų buvo išrinkti maksimalūs analizuojamų pavasario potvynių bei vasaros ir rudens poplūdzių dydžiai, naudoti tolimesniame tyrime, o jų vidutinės reikšmės WMO klimato normos laikotarpiu (1961–1990 m.) nurodytos 3.1 lentelėje.



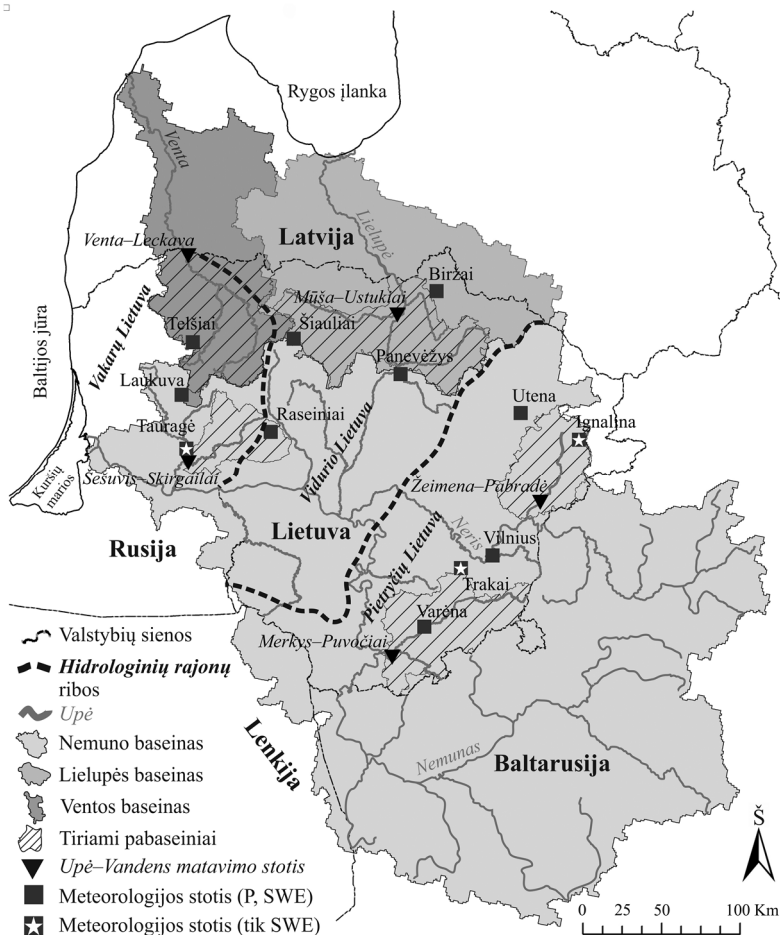
3.1 pav. Analizuojamų vandens matavimo stočių erdvinis pasiskirstymas (numeracija 3.1 lent.)

3.1 lentelė. Tirtų upių VMS duomenys, naudoti pavasario potvynių bei vasaros ir rudens poplūdžių kaitai analizuoti

Nr.	Upė	Vandens matavimo stotis (VMS)	Baseinas	Baseino plotas (km ²)	Stebėjimų laikotarpis	1961–1990 m. Q_{max} (m ³ /s) vidurkis	
						Pavasario potvynių	Vasaros ir rudens poplūdžių
Vakarų Lietuva							
1.	Venta	Papilė	Venta	1570	1948–2013	114	43
2.	Venta	Leckava	Venta	4060	1949–2014	231	128
3.	Rešketa	Gudeliai	Venta	84	1947–1996	9	7
4.	Bartuva	Skuodas	Pajūrio upių	612	1957–2013	71	58
5.	Jūra	Pajūris	Nemunas	876	1946–1999	117	103
6.	Jūra	Tauragė	Nemunas	1690	1925–2013	210	148
7.	Akmėna	Paakmenis	Nemunas	314	1955–2013	44	29
8.	Šešuvis	Skirgailai	Nemunas	1880	1941–2014	163	73
9.	Šyša	Jonaičiai	Nemunas	174	1960–1999	16	15
10.	Minija	Kartena	Nemunas	1230	1925–2013	117	111
11.	Veiviržas	Mikužiai	Nemunas	336	1954–1999	44	50
12.	Nemunas	Smalininkai	Nemunas	81200	1812–2013	1857	739
Vidurio Lietuva							
13.	Agluona	Dirvonakiai	Lielupė	66	1946–1999	9	2,3
14.	Mūša	Ustukiai	Lielupė	2280	1958–2014	152	39
15.	Lėvuo	Kupiškis	Nemunas	307	1955–1999	25	9
16.	Nevezis	Dasiūnai	Nemunas	5530	1961–2005	300	97
17.	Šušvė	Josvainiai	Nemunas	1100	1941–1999	76	36
18.	Dubysa	Lyduvėnai	Nemunas	1070	1941–2013	73	29
19.	Dubysa	Padubysys	Nemunas	1840	1930–1999	113	53
20.	Alsa	Paalsys	Nemunas	49	1957–1999	6	4
21.	Neris	Jonava	Nemunas	24600	1920–2013	660	272
Pietryčių Lietuva							
22.	Merkys	Puvočiai	Nemunas	4300	1946–2014	97	51
23.	Ūla	Zervynos	Nemunas	679	1960–2013	23	12
24.	Verknė	Verbyliškės	Nemunas	694	1952–2013	30	14
25.	Žeimėna	Pabradė	Nemunas	2580	1954–2014	46	28
26.	Šventoji	Anykščiai	Nemunas	3600	1928–2013	119	46
27.	Šventoji	Ukmergė	Nemunas	5440	1925–2013	190	70
28.	Šešupė	Kalvarija	Nemunas	444	1954–2004	14	6
29.	Nemunas	Druskininkai	Nemunas	37100	1945–2013	718	305
30.	Nemunas	Nemajūnai	Nemunas	42800	1920–2013	828	366
31.	Neris	Vilnius	Nemunas	15200	1923–2013	365	161

3.2. Duomenys pavasario potvynių dydžio formavimosi sąlygoms nustatyti

Pavasario potvynių susiformavimo sąlygoms nustatyti buvo pasirinkti penki upių (Venta, Šešuvis, Mūša, Merkys ir Žeimena) pabaseiniai iš trijų pagrindinių upių baseinų (Nemunas, Lielupė ir Venta) (3.2 pav.). Šios upės reprezentuoja kiekvieną Lietuvos hidrologinį rajoną ir turi vienodą nepertraukiamą paros debitą (Q , m^3/s) matavimo laikotarpį (1961–2014 m.), kuris naudotas šiam tyrimui. 1961–2014 m. laikotarpio paros kritulių (P , mm) duomenys buvo surinkti iš LHMT meteorologinių metraščių, o dekadų vandens atsargų sniege (SWE , mm) duomenys – iš agrometeorologinių ir meteorologinių metraščių bei meteorologinių mėnraščių. Trijų agrometeorologijos stočių SWE duomenys buvo naudoti tik jų stebėjimų laikotarpiu (Tauragė 1989–1997 m., Trakai 1961–1997 m. ir Ignalina 1966–1997 m.). Svertiniai meteorologijos stočių koeficientai, nurodantys upės baseino ploto dalį, priskirtą konkrečiai meteorologijos stociui, buvo apskaičiuoti Taisono poligonų metodu (angl. *Thiessen polygon*) (Fiedler, 2003).



3.2 pav. Analizuojamų upių pabaseinių vandens matavimo, meteorologijos ir agrometeorologijos stočių erdvinis pasiskirstymas

3.3. Duomenys pavasario potvyniams bei vasaros ir rudens poplūdžiams prognozuoti XXI a.

Ateities nuotėkui ir pavasario potvyniams bei vasaros ir rudens poplūdžiams prognozuoti iš Nemuno baseino buvo pasirinkti trys upių pabaseiniai (Minijos, Nevėžio ir Šventosios), kuriuos reprezentuoja vandens matavimo stotys Minija–Kartena, Nevėžis–Dasiūnai ir Šventoji–Ukmergė (3.3 pav.). Taip pat šių upių hidrologiniams modeliams sudaryti buvo pasirinktos meteorologijos stotys bei Taisono poligonų metodu nustatytas kiekvienos meteorologijos stoties svoris pasirinktuose upių pabaseiniuose. Kalibravimo ir validavimo laikotarpis apėmė 1986–2005 m., todėl paros vidutinės oro temperatūros (T , °C) ir kritulių kiekio (P , mm) stebėjimų duomenys minėtam laikotarpiui buvo paimti iš meteorologijos metraščių.

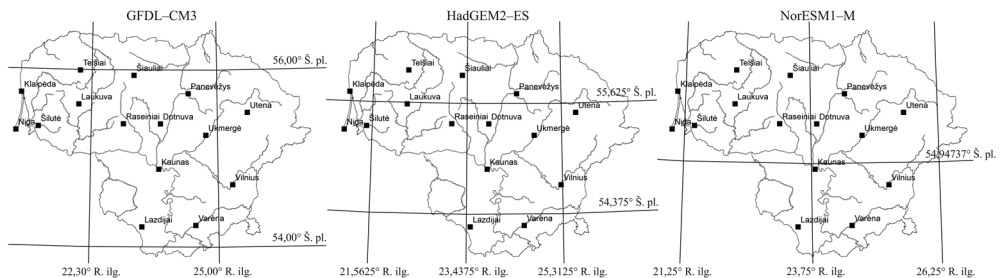


3.3 pav. Upių pabaseiniai, pasirinkti hidrologiniams modeliams kurti, ir modeliavimui naudotos vandens matavimo bei meteorologijos stotys

Pasirinktų Lietuvos upių nuotėkui ir pavasario potvyniams bei vasaros ir rudens poplūdžiams prognozuoti XXI a. buvo panaudoti CMIP5 projekto (Moss et al., 2010) trijų globalaus klimato modelių (GFDL-CM3, HadGEM2-ES ir NorESM1-M) paros vidutinės oro temperatūros prie žemės paviršiaus ir paros kritulių kiekio išvesties duomenys, sugeneruoti pagal tris RCP klimato scenarijus (RCP2.6, RCP4.5 ir RCP8.5). Vadovaujantis TKKK AR5 rekomendacijomis,

vertinant ateities hidrometeorologinių rodiklių kaitą pagal RCP scenarijus, šių rodiklių prognozės paprastai yra sudaromos dviem ateities laikotarpiais – artimais ateičiais (2016–2035 m.) ir tolimais ateičiais (2081–2100 m.) bei lyginamos su foniniu laikotarpiu, kuris pagal AR5 yra 1986–2005 m. (IPCC, 2013).

GFDL–CM3 modelio duomenys gauti iš NOAA GFDL portalo duomenų archyvo (<http://nomads.gfdl.noaa.gov/>). NorESM1–M ir HadGEM2–ES modelių duomenys gauti iš Pasaulinio klimatinė duomenų centro (angl. *WDCC – World Data Center for Climate*) CERA archyvo (<http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/>). Kiekvienas globalaus klimato modelis turi savo specifines charakteristikas ir skirtingo dydžio tinklelio gardelės, į kurias patenka Lietuvos meteorologijos stotys (3.4 pav.). Artimos ir tolimes ateities paros temperatūros ir kritulių kiekio duomenų eilutėms, paimtoms iš globalaus klimato modelių, buvo atliktas tinklelio raiškos didinimas (žr. 2.4 skyrių). Tinklelio raiškos didinimo metodų pagalba duomenys iš didelės GCM gardelės buvo perkelti į konkrečias meteorologijos stotis, naudotas upių hidrologinių modeliams sudaryti (3.4 pav.).



3.4 pav. Globalaus klimato modelių (GFDL–CM3, HadGEM2–ES ir NorESM1–M) gardelės ir į jas patenkančių Lietuvos meteorologijos stočių erdvinis pasiskirstymas (WGS84 koordinatų sistema)

GFDL–CM3 (angl. *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory – Climate Model3*) – Žemės sistemos modelį sukūrė Jungtinių Amerikos Valstijų Nacionalinės vandenyno ir atmosferos administracija (angl. *NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration*) (Donner et al., 2011). Šiuo modeliu yra atliktas istorinio laikotarpio modeliavimas (1860–2005 m.) bei ateities prognozės pagal keturis scenarijus (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 ir RCP8.5) 2006–2100 m. laikotarpiu. Modeliuoti metai turi 365 dienas, o modelio gardelės dydis yra 2,5° ilgumos ir 2,0° platumos (3.2 lent.). Modelio išvesties duomenų vienetai yra paros vidutinė oro temperatūra (K) ir kritulių kiekis (kg į m²/s).

3.2 lentelė. GFDL–CM3 modelio išvesties duomenų gardelių centriniai taškai ir Lietuvos meteorologijos stotys, patenkančios į konkrečią gardelę

Gardelės vidurio taškas		Meteorologijos stotys
Ilguma	Platuma	
21,25	55,0	Klaipėda, Laukuva, Nida, Šilutė, Telšiai
23,75	55,0	Dotnuva, Kaunas, Lazdijai, Panevėžys, Raseiniai, Šiauliai, Ukmergė, Varėna
26,25	55,0	Utena, Vilnius

HadGEM2–ES (angl. *Hadley Global Environment Model 2 – Earth System*) – Žemės sistemos modelį sukūrė Jungtinės Karalystės orų tarnybos Hadley centras (angl. *Met Office Hadley Centre for Climate Science and Services*) (Martin et al., 2011). Šiuo modeliu taip pat yra atliktas istorinio laikotarpio modeliavimas, kuris tęsėsi nuo 1859 m. iki 2005 m. ir atlikta prognozė XXI a. (2006–2100 m.) pagal RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 ir RCP8.5 klimato kaitos scenarijus. Modeliuotuose metuose 360 dienų (mėnesis – 30 d.), dėl šios priežasties mėnesių, turinčių 31 dieną, paskutiniosios dienos temperatūra buvo apskaičiuota išvedus gretimai esančių dienų aritmetinį vidurkį, o kritulių reikšmė prilyginta nuliui. Modelio gardelės dydis – 1,875° ilgumos ir 1,25° platumos (3.3 lent.). HadGEM2–ES išvesties duomenų meteorologiniai parametrai yra paros vidutinė oro temperatūra (K) ir kritulių kiekis (kg į m²/s).

3.3 lentelė. HadGEM2–ES modelio išvesties duomenų gardelių centriniai taškai ir Lietuvos meteorologijos stotys, patenkančios į konkrečią gardelę

Gardelės vidurio taškas		Meteorologijos stotys
Ilguma, °	Platuma, °	
20,625	56,25	Klaipėda
20,625	55,00	Nida, Šilutė
22,500	56,25	Šiauliai, Telšiai
22,500	55,00	Laukuva, Raseiniai,
24,375	56,25	Panevėžys
24,375	55,00	Dotnuva, Kaunas, Ukmergė, Vilnius
24,375	53,75	Lazdijai, Varėna
26,250	55,00	Utena,

NorESM1–M (angl. *Norwegian Earth System Model 1 – medium resolution*) – Žemės sistemos modelį sukūrė Bjerknese klimato tyrimų centras (angl. *Bjerknes Centre for Climate Research*) (Bentsen et al., 2013). Šiuo modeliu yra atlikta istorinio laikotarpio simuliacija, apėmusi 1850–2005 m. laikotarpį ir ateities klimato prognozė 2006–2100 m. laikotarpiui pagal RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 ir RCP8.5 scenarijus. NorESM1–M modelio gardelės dydis – 2,5° ilgumos ir 1,895° platumos (3.4 lent.), o kiekvienuose metuose yra 365 dienos. Šio klimato modelio išvesties duomenys – paros vidutinė oro temperatūra (K) ir kritulių kiekis (kg į m²/s).

3.4 lentelė. NorESM1–M modelio išvesties duomenų gardelių centriniai taškai ir Lietuvos meteorologijos stotys, patenkančios į konkrečią gardelę

Gardelės vidurio taškas		Meteorologijos stotys
Ilguma, °	Platuma, °	
20,0	55,895	Klaipėda, Nida
22,5	55,895	Laukuva, Raseiniai, Šiauliai, Šilutė, Telšiai
22,5	54,000	Lazdijai
25,0	55,895	Dotnuva, Panevėžys, Ukmergė, Utena
25,0	54,000	Kaunas, Varėna, Vilnius

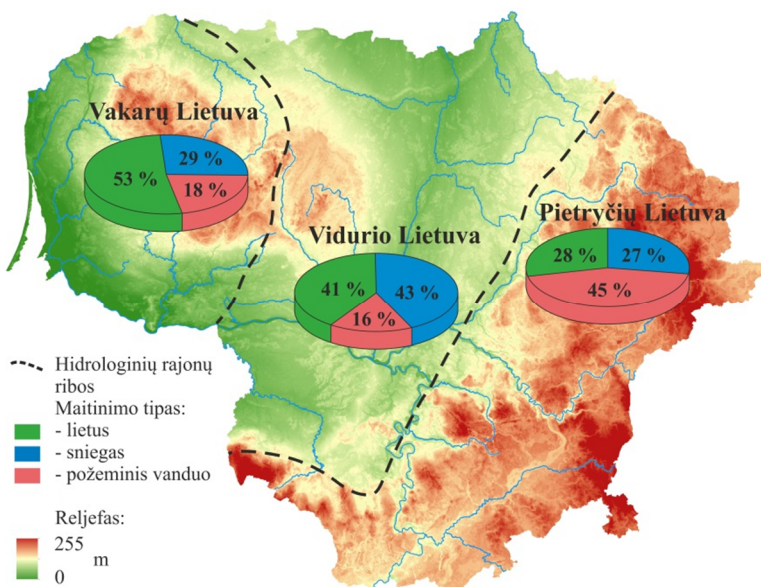
4. POTVYNIŲ VERTINIMAS PAGAL DAUGIAMEČIUS DUOMENIS

4.1. Pavasario potvynių bei vasaros ir rudens poplūdžių kaita praecityje

Pavasario potvynių ir šiltojo laikotarpio poplūdžių charakteristikos labai priklauso nuo hidrologinių rajonų, kurie yra suskirstyti pagal upių maitinimo tipą, būdingą to rajono upėms. Pagal Lietuvoje vyraujančias fizines–geografines ir hidrometeorologines sąlygas, Lietuvos teritorija yra suskirstyta į tris hidrologinius rajonus: Vakarų Lietuvos, Vidurio Lietuvos ir Pietryčių Lietuvos (Gailiusis ir kt., 2001). Pagrindiniai šių rajonų upių mitybos šaltiniai yra lietus, sniego tirpsmo vandenys ir požeminis maitinimas (4.1 pav.).

Vakarų Lietuvos hidrologiniame rajone vyrauja jūrinis klimatas, kuriam būdingas didžiausias kritulių kiekis, aukščiausia žiemos sezono oro temperatūra ir mažiausiai dienų su sniego danga (Kriaučiūnienė et al., 2012). Todėl šiame hidrologiniame rajone dominuoja lietaus maitinimo tipas, kuris sudaro net 53 %. Likę maitinimo šaltiniai – požeminis vanduo ir ištirpęs sniegas atitinkamai sudaro 18 ir 29 %. Dėl dažnai pasikartojančių žiemos atlydžių, Vakarų Lietuvos upėse susiformuojantys poplūdžiai savo dydžiu neretai viršija pavasario potvynius.

Vidurio Lietuvos hidrologinio rajono upių nuotėkio didžiąją dalį papildo lietaus krituliai (41 %) bei sniego tirpsmas (43 %) ir tik 16 % sudaro požeminis maitinimas. Toks upių mitybos šaltinis yra nulemtas Vidurio Lietuvoje vyraujančių velėninių glėjinių dirvožemių, kurie dėl savo fizinių savybių negali sukaupti gausių požeminio vandens atsargų, o iškritę atmosferos krituliai kartu su paviršiniu nuotėkiu patenka tiesiai į upių tinklą. Dėl šios priežasties upių nuotėkio dedamoji per metus yra labai nepastovi.



4.1 pav. Lietuvos upių maitinimo tipai ir jų procentinė dalis trijuose hidrologiniuose rajonuose (pagal Gailiusis ir kt., 2001)

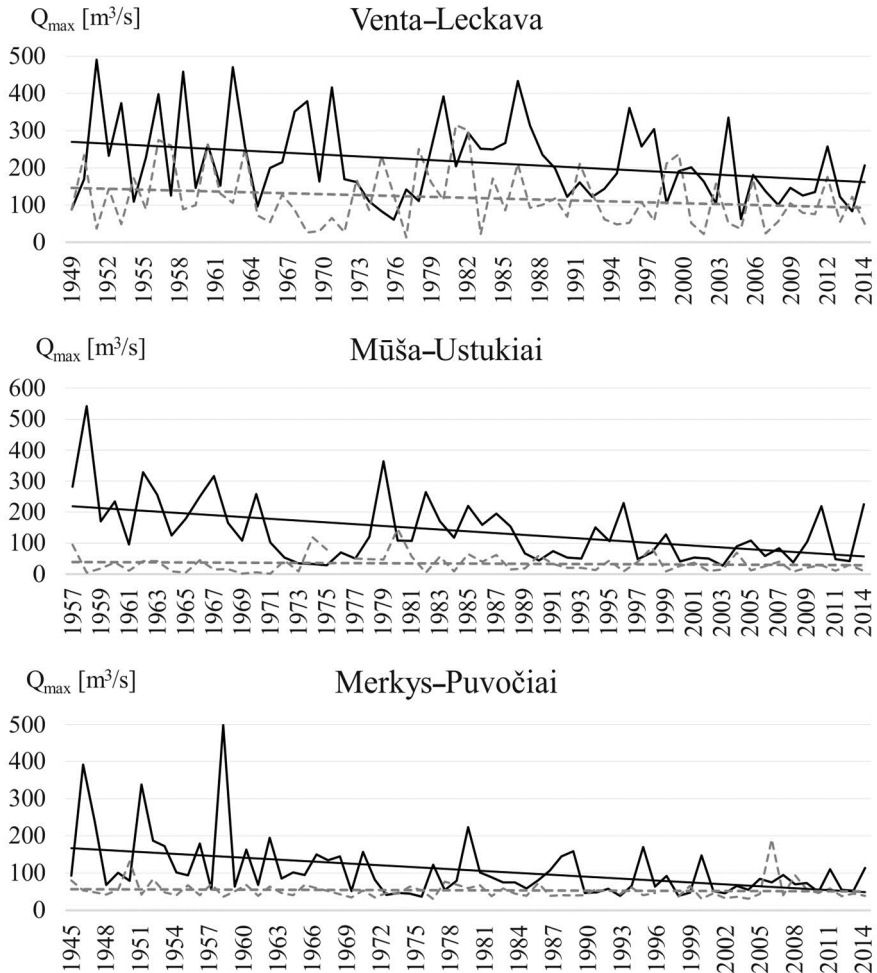
Pietryčių Lietuvos hidrologinis rajonas patenka į kontinentinio klimato sritį, kuri pasižymi ilgiausiai trunkančiu ir žemiausiu oro temperatūras turinčiu žiemos sezonu. Dėl šios priežasties Pietryčių Lietuvoje susiformuoja storiausia sniego danga, ištirpstanti vėliausiai lyginant su prieš tai minėtais hidrologiniais rajonais. Pietryčių Lietuvos hidrologiniame rajone plačiai paplitę smėliai ir priesmėliai efektyviai akumuliuoja dalį sniego tirpsmo vandens, kuriuos palaipsniui atiduoda vasaros nuosėkio laikotarpiu. Tokiu būdu Pietryčių Lietuvos upės net iki 45 % maitinimo gauna iš požeminio vandens, kuris, akumuliuodamas atmosferos kritulių perteklių, tolygiai paskirsto nuotėkį per metus. Todėl lietaus krituliai ir sniego tirpsmo vandenys tiesiogiai papildo upių nuotėkį atitinkamai 28 ir 27 %.

Vadovaujantis Lietuvos hidrologiniu rajonavimu, iš kiekvienos srities pasirinkus po būdingą to rajono upę, buvo sudaryti potvynių ir poplūdžių maksimalių debitų (Q_{max}) kaitos grafikai nuo konkrečios upės stebėjimų pradžios iki 2013 m. (4.2 pav.). Ventoje ties Leckavos vandens matavimo stotimi stebėti pavasario potvynio Q_{max} svyravo nuo 60,8 m³/s (1975 m.) iki 491 m³/s (1951 m.). Per visą stebėjimų laikotarpį buvo užfiksuoti periodai, kai maksimalaus debito reikšmės išaugdavo arba sumažėdavo. Vienas iš padidėjusio debito laikotarpių tęsėsi nuo 1951 iki 1962 m., kai buvo užfiksuoti penki maksimalūs debitai, viršiję 350 m³/s ribą. Nustatyti sumažėjusio debito laikotarpiai (1971–1977 m. ir 2003–2009 m.), kai maksimalūs pavasario potvyniai nesiekė 200 m³/s, o pavieniais atvejais ir 100 m³/s. Pastaraisiais dešimtmečiais Ventos ties Leckava pavasario potvyniai turi mažėjimo tendenciją ir patikrinus duomenų eilutę Mann–Kendall (MK) testu nustatyta, kad trendas yra neigiamas. Vertinant šiltojo laikotarpio poplūdžių maksimalių debitų kaitą nustatyta, kad jie svyravo labai didele amplitude, nes mažiausias buvo užfiksuotas 1976 m. (13,2 m³/s), o didžiausias 1980 m. siekė 315 m³/s. Ventos ties Leckava poplūdžiai taip pat turėjo neigiamą tendą.

Mūšos upėje ties Ustukių vandens matavimo stotimi stebėjimai pradėti 1957 m. ir tęsiasi iki šių dienų. Per tą laikotarpį maksimalūs pavasario potvynių debitai svyravo nuo 27,5 m³/s (2003 m.) iki 542 m³/s (1958 m.), o klimato normos laikotarpiu (1961–1990 m.) vidutinis maksimalus debitas buvo 152 m³/s. Kaip ir Ventoje, Mūšoje buvo du ilgesni laikotarpiai (1957–1971 ir 1978–1988 m.) su išaugusiais maksimaliais pavasario potvynių debita. Jų metu debitai keturis kartus viršijo 200 ir 300 m³/s. Sumažėję Mūšos pavasario potvynių debitai buvo stebimi 1972–1977, 1989–1993 ir 2000–2004 m., kurių metu maksimalus debitas nesiekė 100 m³/s, o atskirais atvejais tik 30 m³/s. Mūšos ties Leckava maksimalių pavasario potvynių debitai pagal MK testą turi reikšmingą neigiamą tendą, kuris parodo pavasario potvynių mažėjimą šioje upėje. Mūšos poplūdžių duomenų eilutė neturi jokio statistinio reikšmingo trendo, kuris nurodytų šio hidrologinio reiškinių kaitos dėsningumus. Mūšos poplūdžių grafike (4.2 pav.) matyti reikšmių svyravimo amplitudė, kuri prasideda nuo visiško poplūdžių nebuvimo (1,39 m³/s 1971 m. arba 2,21 m³/s 1969 m.) atskirais metais, iki 119 m³/s (1974 m.) ir 146 m³/s (1980 m.).

Merkyje ties Puvočiais per visą laikotarpį fiksuoti maksimalūs pavasario potvynio debitai turi statistinį reikšmingą neigiamą tendą. Amplitudė tarp aukščiausios ir žemiausios maksimalaus debito reikšmės siekia 461 m³/s. Iš viso buvo fiksuoti treji metai, kai debitų reikšmės viršijo 300 m³/s, nors per visą

stebėjimų laikotarpį apskaičiuotas pavasario potvynio vidutinis maksimalus debitas buvo $108 \text{ m}^3/\text{s}$. Didžiausias per stebėjimų laikotarpį nustatytas debitas siekė $498 \text{ m}^3/\text{s}$ (1958 m.), o mažiausias ($36,8 \text{ m}^3/\text{s}$) buvo išmatuotas 1975 m. Nustatyta, kad poplūdžiai Merkyje turi neigiamą tendenciją, o pačių poplūdžių dydis svyravo nuo $31,1 \text{ m}^3/\text{s}$ (2003 m.) iki $191 \text{ m}^3/\text{s}$ (2005 m.).

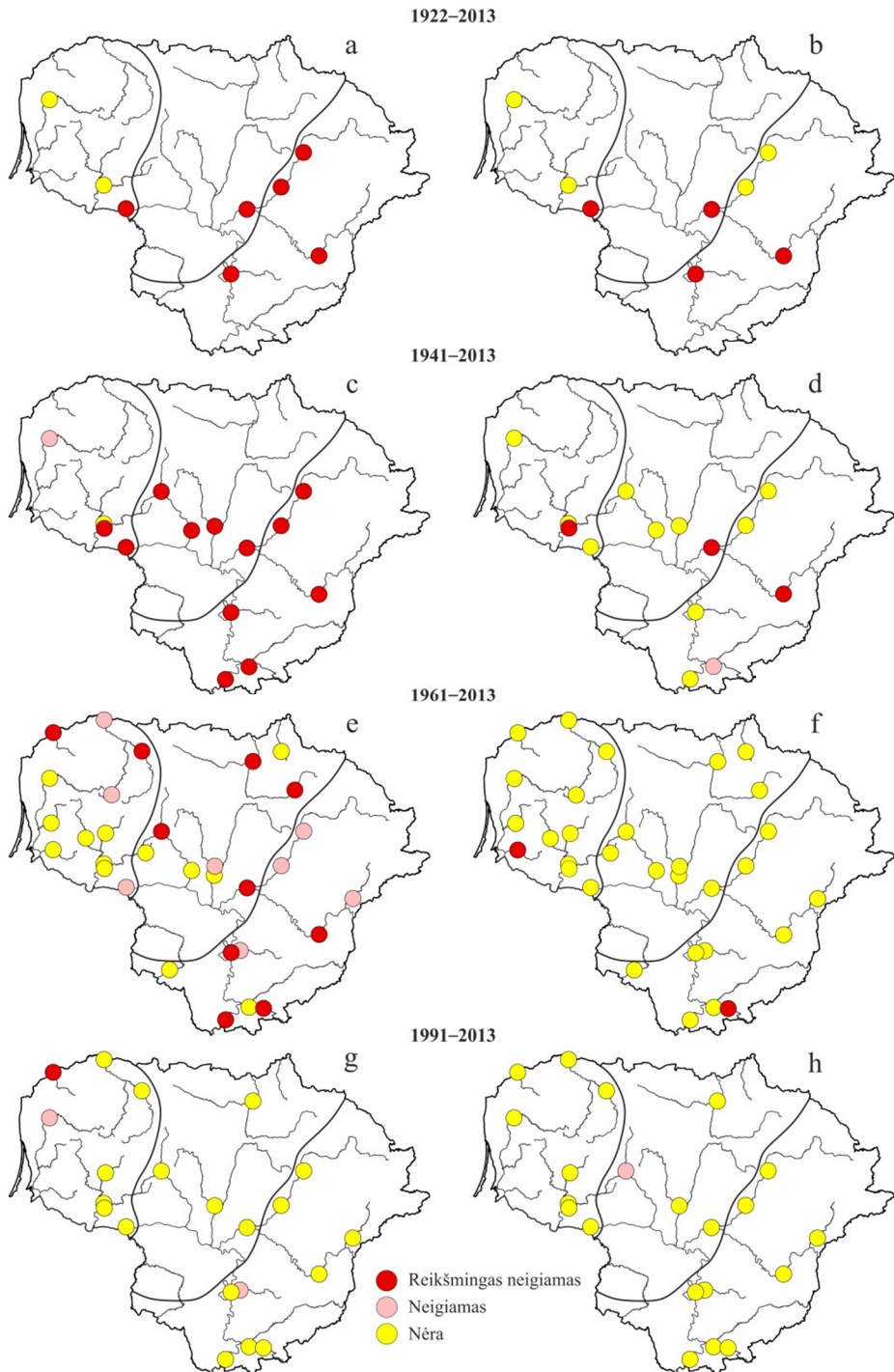


4.2 pav. Pavasario potvynių ir šiltojo laikotarpio poplūdžių Q_{max} kaita nuo stebėjimų pradžios skirtinguose Lietuvos hidrologiniuose rajonuose (Venta – Vakarų Lietuva, Mūša – Vidurio Lietuva, Merkys – Pietryčių Lietuva)

Taikant Mann–Kendall testą buvo nustatoma, ar pavasario potvynių ir vasaros–rudens sezonų poplūdžių maksimalių debitų (Q_{max}) eilutėse egzistuoja trendai (30 % reikšmingumo lygmenis), ar reikšmingi trendai, atitinkantys 5 % reikšmingumo lygmenį. Trendai analizuoti keturiais skirtingais laikotarpiais (1922–2013, 1941–2013, 1961–2013 ir 1991–2013 m.), norint įvertinti turimos hidrologinių duomenų eilutės ilgio svarbą pavasario potvynių ir vasaros–rudens poplūdžių kaitos tendencijoms (4.3 pav.). Iš viso tyrimui buvo panaudoti 31 VMS duomenys. Iš šių stočių paros debito duomenų išrinkus maksimalius pavasario potvynio ir vasaros–rudens poplūdžių debitus, pastarieji buvo patikrinti MK testu, siekiant nustatyti analizuojamų hidrologinių ekstremumų tendų statistinį patikimumą. Ilgiausiu laikotarpiu (1922–2013 m.) maksimalūs pavasario potvynio debitai daugelyje VMS turėjo reikšmingus neigiamus trendus (4.3a pav.). Tik Vakarų Lietuvos hidrologinio rajono dvi VMS (Minija–Kartena ir Jūra–Tauragė) pavasario potvynio Q_{max} neturėjo jokio trendo, o reikšmingi neigiami poplūdžių trendai buvo nustatyti keturiose iš aštuonių VMS (4.3b pav.). Dvi iš jų priklausė Pietryčių Lietuvos hidrologiniam rajonui ir po vieną Vakarų bei Vidurio hidrologiniams rajonams. Taip pat keturiose stotyse nebuvo nustatyta jokių tendų.

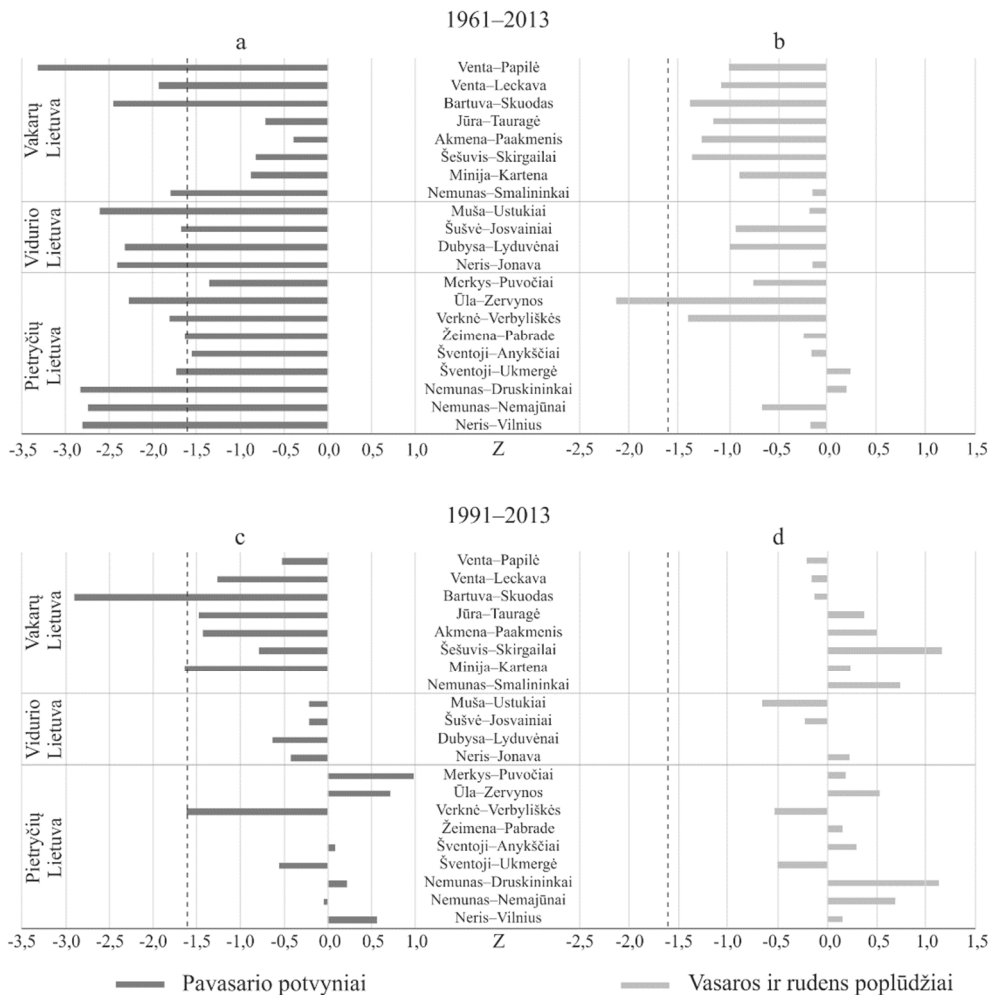
1941–2013 m. laikotarpiu pavasario potvynio Q_{max} turėjo mažėjimo tendenciją visose Vidurio ir Pietryčių Lietuvos hidrologinių rajonų VMS, kuriose buvo gauti reikšmingi neigiami trendai (4.3c pav.). Panaši situacija susiklostė ir Vakarų Lietuvoje, kur trijose upėse buvo nustatyti neigiami trendai, o dviejose iš jų – reikšmingi neigiami. Tik Jūroje ties Tauragė pavasario potvyniai neturėjo jokio trendo. Šiltojo laikotarpio poplūdžiai 1941–2013 m. neturėjo tokių tendų kaitos dėsninumų, kaip pavasario potvyniai, o reikšmingi neigiami trendai buvo užfiksuoti tik trijose VMS (Šešuvis–Skirgailai, Neris–Jonava ir Neris–Vilnia), t.y. po vieną iš kiekvieno hidrologinio rajono (4.3d pav.). Taip pat neigiamas trendas buvo nustatytas Merkyje ties Puvočiais.

Daugiausiai stebėjimo duomenų buvo 1961–2013 m. laikotarpiu, tačiau ne visose stotyse buvo vykdomi stebėjimai iki 2013 m. Dalis stočių buvo uždarytos 1999 ir 2005 m., bet tyrimui buvo panaudota prieinama duomenų dalis nuo 1961 m. iki stebėjimų pabaigos arba 2013 m. Minėtuojau laikotarpiu Vakarų Lietuvos hidrologiniame rajone neigiami pavasario potvynio trendai buvo nustatyti šiose vandens matavimo stotyse: Nemunas–Smalininkai, Venta–Leckava ir Rešketa–Gudeliai, o reikšmingi neigiami trendai – Bartuvoje ties Skuodu ir Ventoje ties Papilė (4.3e pav.). Vidurio Lietuvoje reikšmingi neigiami trendai vyravo net keturiose VMS. Pietryčių Lietuvos hidrologiniame rajone vyravo neigiamos tendencijos net 7 iš 10 analizuotų VMS. Poplūdžių kaitos tendencijos 1961–2013 m. išliko beveik nepakitusios, nes tik Vakarų Lietuvos (Šyša–Jonaičiai) ir Pietryčių Lietuvos (Ūla–Zervynos) vandens matavimų stotyse buvo aptikti reikšmingi neigiami trendai (4.3f pav.). Pačiu trumpiausiu 1991–2013 m. laikotarpiu reikšmingas neigiamas pavasario potvynių Q_{max} trendas nustatytas Bartuvoje ties Skuodu, o neigiamas trendas Minijoje ties Kartena ir Verknėje ties Verbyliškėmis. Likusiose stotyse jokių pavasario potvynio tendų nebuvo aptikta (4.3g pav.). Paskutiniu metu analizuotu laikotarpiu (1991–2013 m.) vasaros ir rudens poplūdžių Q_{max} neturėjo reikšmingų kaitos tendencijų (4.3h pav.).



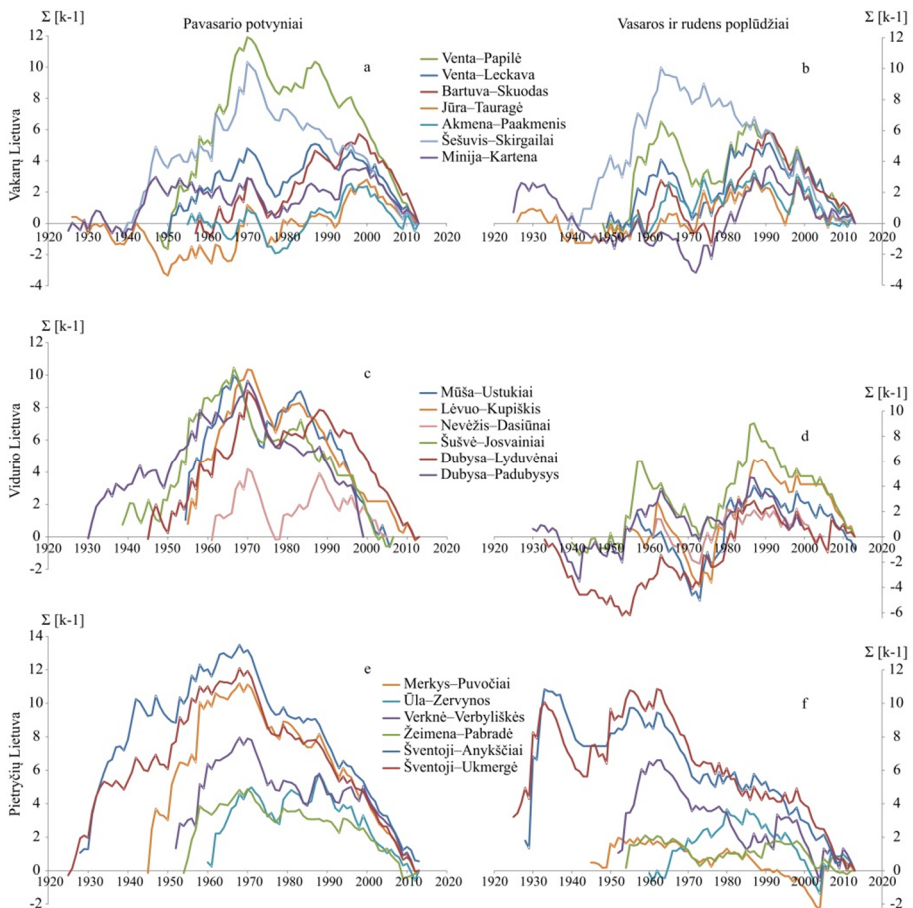
4.3 pav. Maksimalių pavasario potvynių (a, c, e, g) ir šiltojo laikotarpio poplūdžių (b, d, f, h) Q_{max} trendų erdvinis pasiskirstymas įvairiais laikotarpiais

Toliau analizuojant trendus, buvo pritaikytos Mann–Kendall testo Z rezultatų reikšmės, nurodančios tendencijos kryptį ir stiprumą (4.4 pav.) 1961–2013 m. laikotarpiu pavasario potvyniai mažėjo. Tai patvirtina 4.4a pav. esanti stulpelių diagrama. Iš 21 vandens matavimo stoties net 15 buvo nustatyti neigiami trendai, tarp kurių devyniose – reikšmingi (1,96 riba) neigiami. Vertinant to paties laikotarpio vasaros–rudens poplūdžius, galima pastebėti mažėjimo tendenciją, tačiau statistiniu patikimumu pasižymėjo tik Ūla–Zervynos VMS (4.4b pav.). 1991–2013 m. laikotarpiu buvo nustatytos tik dvi VMS, kuriose gauti neigiami trendai bei viena VMS (Bartuva–Skuodas), turinti reikšmingą neigiamą trendą (6c pav.). 1991–2013 m. laikotarpio poplūdžiai skirtingose VMS turėjo tiek didėjimo, tiek mažėjimo tendencijų, tačiau jokių reikšmingų trendų jose nebuvo nustatyta (6d pav.).



4.4 pav. Pavasario potvynių (a, c) ir vasaros bei rudens poplūdžių (b, d) Q_{max} Mann–Kendall testo Z reikšmių rezultatai 1961–2013 ir 1991–2013 m. laikotarpiais (punktyras – riba, nuo kurios trendas yra neigiamas)

Pavasario potvynių ir vasaros–rudens poplūdžių cikliškumams išryškinti buvo panaudotos integralinės moduliųjų koeficientų (k) nuokrypio kreivės (4.5 pav.), kurios parodo kintamųjų kaitos tendencijas vidurkio atžvilgiu. Didžioji dauguma Vakarų Lietuvos hidrologinio rajono upių, nepaisant smulkių svyravimų, iki 1971 m. turėjo vandeningą pavasario potvynių laikotarpį. Ypač ryški gausių potvynių tendencija užfiksuota Ventoje ties Papilė ir Šešuvyje ties Skirgailais. Nuo 1971 m. kitose upėse potvyniai mažėjo, o sausesnė fazė tęsėsi iki 1978 m. Po to vėl sekė vandeninga fazė, kol galiausiai pasiekė savo piką ir nuo 1999–2001 m. potvyniai pradėjo mažėti iki 2013 m. (4.5a pav.). Kaip ir Vakarų Lietuvoje, panaši situacija susiklostė ir Vidurio Lietuvos upėse, tik paskutinis mažesnio vandeningumo potvynių ciklas prasidėjo dešimtmečiu anksčiau – 1989 m. (4.5c pav.). Pietryčių hidrologinio rajono upių maksimalūs pavasario potvynio debitai buvo didesni už vidurkį nuo stebėjimų pradžios iki 1968–1971 m., kol pasiekė savo piką ir pradėjo sparčiai mažėti iki 2013 m. Kiek mažesni ir ne tokie ryškūs pokyčiai buvo nustatyti Ūlos ir Žeimenos upėse (4.5e pav.).



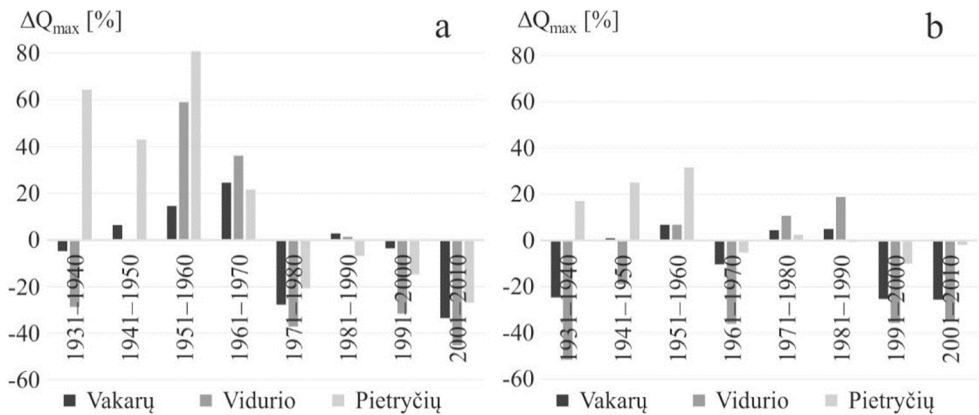
4.5 pav. Pavasario potvynių (a, c, e) bei vasaros ir rudens poplūdžių (b, d, f) Q_{max} moduliųjų koeficientų (k) nuokrypio nuo vidurkio integralinės kreivės skirtinguose hidrologiniuose rajonuose

Vasaros ir rudens poplūdžių maksimalių debitų tendencijos Vakarų Lietuvos upėse taip pat turėjo savitą pasiskirstymo dėsningumą, nes nuo 1955 m. iki 1963 m. buvo nustatytas vandeningų poplūdžių laikotarpis, o po 1964 m. prasidėjo mažėjimas iki 1971–1974 m. (4.5b pav.). Dar vienas poplūdžių didėjimo arba mažėjimo ciklas užfiksuotas nuo 1979 m. iki 2013 m., kai didžiojoje dalyje Vakarų Lietuvos upių vidutiniškai didesni potvyniai buvo nustatyti 1979–1988 m., o vidutiniškai mažesni – 1989–2013 m. Bartuvoje ties Skuodu vandeningi poplūdžiai išliko nuo stebėjimų pradžios iki 1963 m., vėliau jie palaipsniui mažėjo ir buvo mažesni už vidurkį. Vidurio Lietuvos upių vasaros ir rudens sezono poplūdžiai charakterizuojami dviem vandeningais ir dviem sausesniais laikotarpiais. Didesnių poplūdžių fazės apima 1953–1963 ir 1974–1987 m. laikotarpius, o sumažėję debitai buvo nustatyti 1964–1973 ir 1988–2013 m. (4.5d pav.). Pietryčių Lietuvos hidrologinio rajono upėse nenustatyti tokie ryškūs periodai su poplūdžių debitų padidėjimo ir sumažėjimo laikotarpiais, tik Šventojoje ties Anykščių ir Ukmergės VMS nuo 1963 m. iki 2013 m. nustatyti vidutiniškai mažesni poplūdžių debitai negu viso laikotarpio vidurkis (4.5f pav.).

4.1 lentelė. Vidutiniai maksimalių pavasario potvynių bei vasaros ir rudens poplūdžių debitų nuokrypiai (%) nuo WMO klimato normos laikotarpio (1961–1990) skirtinguose Lietuvos hidrologiniuose rajonuose

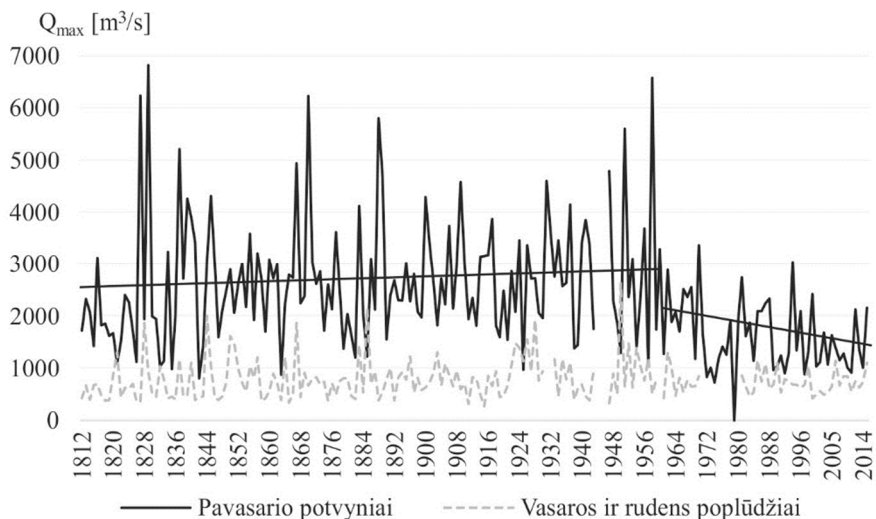
Laikotarpis	Pavasario potvyniai (%)			Vasaros ir rudens poplūdžiai(%)		
	Vakarų	Vidurio	Pietryčių	Vakarų	Vidurio	Pietryčių
1931–1940	-4,8	-28,6	64,5	-24,6	-51,6	17,1
1941–1950	6,4	-0,4	43,1	1,0	-19,0	25,0
1951–1960	14,7	59,2	80,8	6,8	6,9	31,6
1961–1970	24,6	36,2	21,6	-10,3	-36,0	-5,2
1971–1980	-27,6	-37,1	-20,6	4,5	10,7	2,4
1981–1990	2,9	1,4	-6,8	5,1	18,9	-0,6
1991–2000	-3,5	-31,5	-14,7	-25,3	-35,6	-10,0
2001–2010	-33,4	-45,2	-26,8	-25,5	-34,5	-1,9

Regioniniai pavasario potvynių bei vasaros ir rudens poplūdžių nuokrypių nuo klimato normos laikotarpio skirtumai parodo konkretaus dešimtmečio vandeningumą pagal analizuojamus ekstremalius hidrologinius reiškinius (4.6 pav.). Vakarų Lietuvos hidrologiniame rajone didžiausi pavasario potvyniai vyko 1961–1970 m. (24,6 %) palyginus su klimato normos laikotarpiu, o Vidurio ir Pietryčių Lietuvos hidrologiniuose rajonuose – 1951–1960 m. ir atitinkamai buvo 59,2 ir 80,8 % (4.1 lent.). Mažiausi pavasario potvyniai buvo nustatyti 2001–2010 m. Paskutiniaisiais dviem dešimtmečiais Vakarų ir Vidurio Lietuvos hidrologiniuose rajonuose ypač mažėjo pavasario potvynių bei vasaros ir rudens poplūdžių maksimalūs debitai (4.6a, b pav.), o jų nuokrypiai įgavo neigiamas reikšmes (nuo -25,3 iki -45,2 %) lyginant su klimato normos laikotarpiu.



4.6 pav. Pavasario potvynių (a) bei vasaros ir rudens poplūdžių (b) Q_{max} nuokrypiai (%) nuo klimato normos laikotarpio (1961–1990 m.) skirtinguose Lietuvos hidrologiniuose rajonuose

Nemuno ties Smalininkais vandens matavimo stotis pasižymi savo unikalumu, nes turi vieną ilgiausių pasaulyje nepertraukiamų hidrologinių stebėjimų eilutę, kuri tęsiasi virš 200 metų (Jablonskis, Lasinskas, 2011). Šios stoties ilgalaikiai duomenys yra labai vertingi hidrologiniams tyrimams, susijusiems su klimato kaitos poveikiu regioniniam upių nuotėkiui. Šiame darbe analizuojamos Pietryčių Lietuvos ir dalis Vidurio Lietuvos upių surenka savo vandenį bei plukdo jį Nemuną, todėl prieš tai nustatyti pokyčiai atskiruose upių baseinuose turi reikšmingą įtaką nuotėkio formavimuisi Nemune ties Smalininkų vandens matavimo stotimi. Nuotėkio rodikliai šioje VMS yra tarsi Lietuvos teritorijoje vykstančių hidrometeorologinių procesų rezultatas. Maksimalūs pavasario potvynio debitai Smalininkų VMS nuo 1811 m. iki 1959 m. neturėjo jokio trendo, o pačios maksimalios reikšmės svyravo didele amplitude, tačiau nuo 1960 m. pastebimas ženklus maksimalių pavasario potvynių debitų sumažėjimas, kuris turi reikšmingą neigiamą tendenciją (4.7 pav.). Tuo tarpu maksimalūs vasaros ir rudens poplūdžių debitai iki 1960 m. turėjo tendenciją didėti, tačiau po Kauno hidroelektrinės pastatymo, poplūdžių maksimalūs debitai esminių pokyčių neturėjo.



4.7 pav. Pavasario potvynių bei vasaros ir rudens poplūdžių Q_{max} Nemune ties Smalininkų VMS 1812–2013 m. laikotarpiu

Pačių pavasario potvynių sumažėjimas yra siejamas su Kauno hidroelektrinės (HE) pastatymu, nes suformuotas $63,5 \text{ km}^2$ tvenkinys geba sukaupti dalį potvynio tūrio ir jį paskirstyti laike. Šikšnys ir Jarmakaitė (2012) nustatė, kad Kauno marių akumuliuojantis poveikis ženkliai sumažina (10 % ir didesnės tikimybės) potvynius, maksimalių debitų vidurkį ir dispersiją. Todėl didžiausia Lietuvos upė – Nemunas tapo ne toks pavojingas dėl galimos pavasariinių potvynių žalos. Veikiant hidroelektrinei, žemutinis bježas niekada neužšąla, o artėjant pavasariui properšos formuojasi net iki Nevėžio žiočių, kas smarkiai sumažina ledų sangrūdas Nemuno ir Neries santakoje (Juozokaitė, 2011). Dėl išplovimo, vykstančio Kauno HE žemutiniame bježe ir nuolatinį gilinimo darbų, minimalus Nemuno vandens lygis ties Kauno VMS pažemėjo 1,75 m (Rimkus 2001), todėl tikėtina, kad pažemėjęs yra ir paties Nemuno dugnas, dėl ko pagerėja potvynių maksimalių debitų praleidimas (Šikšnys, Jarmakaitė, 2012).

Nemuno ties Smalininkais pavasario potvynių ir vasaros bei rudens poplūdžių Q_{max} palyginimas dešimtmečių skalėje parodė laikotarpius, kai minėtų ekstremalių hidrologinių reiškinių debitai buvo ženkliai padidėję ar sumažėję (4.2 lent.). Pavasario potvynių mastai buvo išaugę 1861–1870, 1931–1940 ir 1951–1960 m. laikotarpiais, kai nustatytieji maksimalių debitų teigiami nuokrypiai siekė iki 29 %. Žymus pavasario potvynių mažėjimas prasidėjo nuo 1960-ųjų ir paskutiniu metu dešimtmečiu (2001–2010 m.) maksimalių debitų nuokrypis siekė -45 % lyginant su analizuojama duomenų eilute. Šiltojo sezono maksimalūs poplūdžių debitai neturėjo tokių ryškių dėsningumų, tačiau atskirais dešimtmečiais padidėdavo iki 52 % (1921–1930 m.) arba sumažėdavo iki -21 % (1911–1920).

4.2 lentelė. Pavasario potvynių bei vasaros ir rudens poplūdžių Q_{max} dešimtmečių vidurkiai ir jų nuokrypiai nuo 1812–2010 m. laikotarpio Nemune ties Smalininkų VMS

Laikotarpis	Vidutinis maksimalus pavasario potvynių debitas (m^3/s) (nuokrypis (%))	Vidutinis maksimalus vasaros ir rudens poplūdžių debitas (m^3/s) (nuokrypis (%))
1812–1820	1958 (-19)	551 (-29)
1821–1830	2709 (12)	769 (-1)
1831–1840	2645 (9)	676 (-13)
1841–1850	2506 (4)	796 (2)
1851–1860	2605 (8)	814 (5)
1861–1870	3013 (24)	793 (2)
1871–1880	2451 (1)	699 (-10)
1881–1890	2745 (13)	833 (7)
1891–1900	2611 (8)	769 (-1)
1901–1910	2930 (21)	844 (9)
1911–1920	2533 (5)	608 (-22)
1921–1930	2373 (-2)	1183 (52)
1931–1940	3001 (24)	798 (3)
1941–1950	2746 (13)	877 (13)
1951–1960	3115 (29)	933 (20)
1961–1970	2178 (-10)	747 (-4)
1971–1980	1585 (-34)	702 (-10)
1981–1990	1811 (-25)	789 (1)
1991–2000	1556 (-36)	670 (-14)
2001–2010	1336 (-45)	701 (-10)

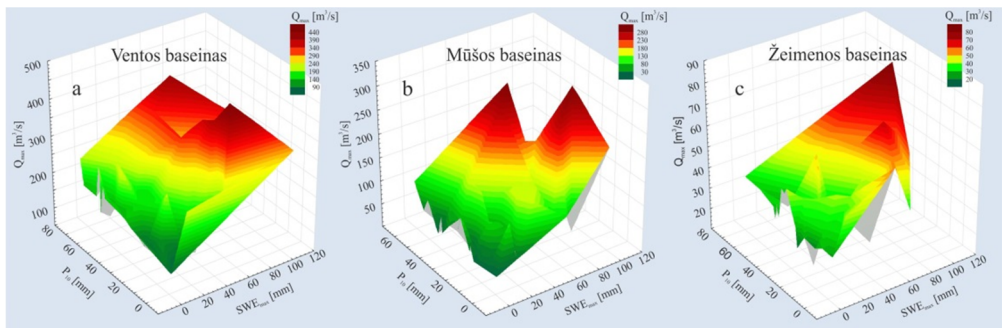
Įvertinus pavasario potvynių ir vasaros–rudens poplūdžių kaitos tendencijas Lietuvos upėse, buvo nustatyta, kad didžiausiais pokyčiais pasižymi pavasario potvynių maksimalūs debitai, o poplūdžių dydžiai išlieka mažai pakitę. Šiltojo sezono poplūdžiai yra labiau atsitiktinis negu reguliarus kasmetinis ar sezoninis hidrologinis reiškinys, nes smarkiai priklauso nuo ilgalaikėje perspektyvoje sunkiai prognozuojamų sinoptinių procesų. Pavasario potvyniai yra glaudžiai susiję su hidrometeorologiniais procesais, vykstančiais žiemos metu, dėl to yra svarbu nustatyti pagrindinius pavasario potvynio dydį formuojančius bei lemiančius veiksnius ir potvynių mažėjimo priežastis.

4.2. Pavasario potvynio dydį formuojantys veiksniai ir jų vertinimas statistiniais metodais

4.2.1. Pavasario potvynių formavimosi sąlygos

Didžiausi potvyniai Lietuvos teritorijoje vyksta pavasario metu, kai sniego tirpsmą veikia intensyvi saulės spinduliuotė, staigiai pakilusi oro temperatūra, vėjas ir lietus, kurie neretai virsta pavasarinėmis liūtėmis.

Siekiant įvertinti pavasario potvynių susiformavimo sąlygas, analizuoti buvo pasirinkti sniego ir lietaus kritulių parametrai. Susiformavusios sniego dangos storis labiausiai priklauso nuo oro temperatūros ir kritulių žiemos sezonu (gruodis–vasaris). Sniegas reikšmingiausiai įtaką potvyniams formuoti daro ankstyvo pavasario metu ir tiesiogiai lemia potvynio dydžio ir masto parametrus. Šie parametrai priklauso nuo vandens atsargų sniege ir jų dinamikos sniego storumėje, nes vandens atsargos yra veikiamos temperatūros svyravimų – užšalimo ir atlydžio reiškinų, lietaus sniego akumuliacijos laikotarpiu, dirvos išalo ir kt. Šiame darbe maksimalios vandens atsargos sniege (SWE_{max} , mm) buvo skaičiuotos iš daugiamečių dekadinių sniego storio ir jo tankio duomenų, kai sniego storis (S , cm) buvo dauginamas iš jo tankio (ρ , g/cm³) ir išrinktos maksimalios reikšmės prieš pat potvynio pradžią. Maksimalūs pavasario potvynių debitai yra veikiami lietaus, kuris sąveikoje su sniego danga tik paspartina sniego tirpsmą ir sukelia staigius didelio masto potvynius. Todėl tyrimui buvo pasirinkta 10 dienų kritulių, iškritusių prieš pat pavasario potvynio Q_{max} dieną, suma (P_{10} , mm). Lietuvos sąlygomis sniego ir lietaus sąveikoje besiformuojančiam pavasario potvynio maksimaliam debitui (Q_{max} , m³/s), didesnę įtaką daro sniego tirpsmo vandenys. Pats maksimalus debitas buvo išrinktas iš daugiamečių duomenų nuo sausio 1 d. iki gegužės 31 d. Trijų reprezentatyvių upių baseinų (priklausančių skirtingam Lietuvos hidrologiniam rajonui) minėtų parametrų sąveika yra pateikta 4.8 pav.



4.8 pav. Ryšys tarp trijų analizuojamų parametrų 1961–2014 m. laikotarpiu

Vakarų Lietuvos hidrologinį rajoną reprezentuojančioje Ventoje lietaus kritulių ir vandens atsargų sniege sąveika lemia maksimalių pavasario debitų formavimąsi, kadangi maksimalių debitų reikšmės patenka į abiejų analizuotų meteorologinių rodiklių įtakos sritis (4.8a pav.). Tuo tarpu Mūšos baseine (Vidurio Lietuvos hidrologinis rajonas) didžiausius debitus lėmė taip pat minėtųjų meteorologinių parametrų sąveika, tačiau pačios ekstremaliausios Q_{max} reikšmės

buvo suformuotos kiekvieno atskirai, kai maksimalūs potvynių pikai buvo pasiekti veikiant vienam arba kitam meteorologiniam rodikliui (4.8b pav.). Tai patvirtina, kad šio rajono upės priklauso nuo paviršinio nuotėkio, sukkelto kritulių ar sniego tirpsmo (Gailiušis ir kt., 2001). Žeimenos upės baseine, patenkančiame į Pietryčių Lietuvos hidrologinį rajoną, reikšmingą įtaką maksimalaus pavasario potvynio debito formavimuisi turėjo per žiemą susikaupusios maksimalios vandens atsargos sniege, kurios sukėlė didžiausius potvynius 1961–2014 m. laikotarpiu (4.8c pav.).

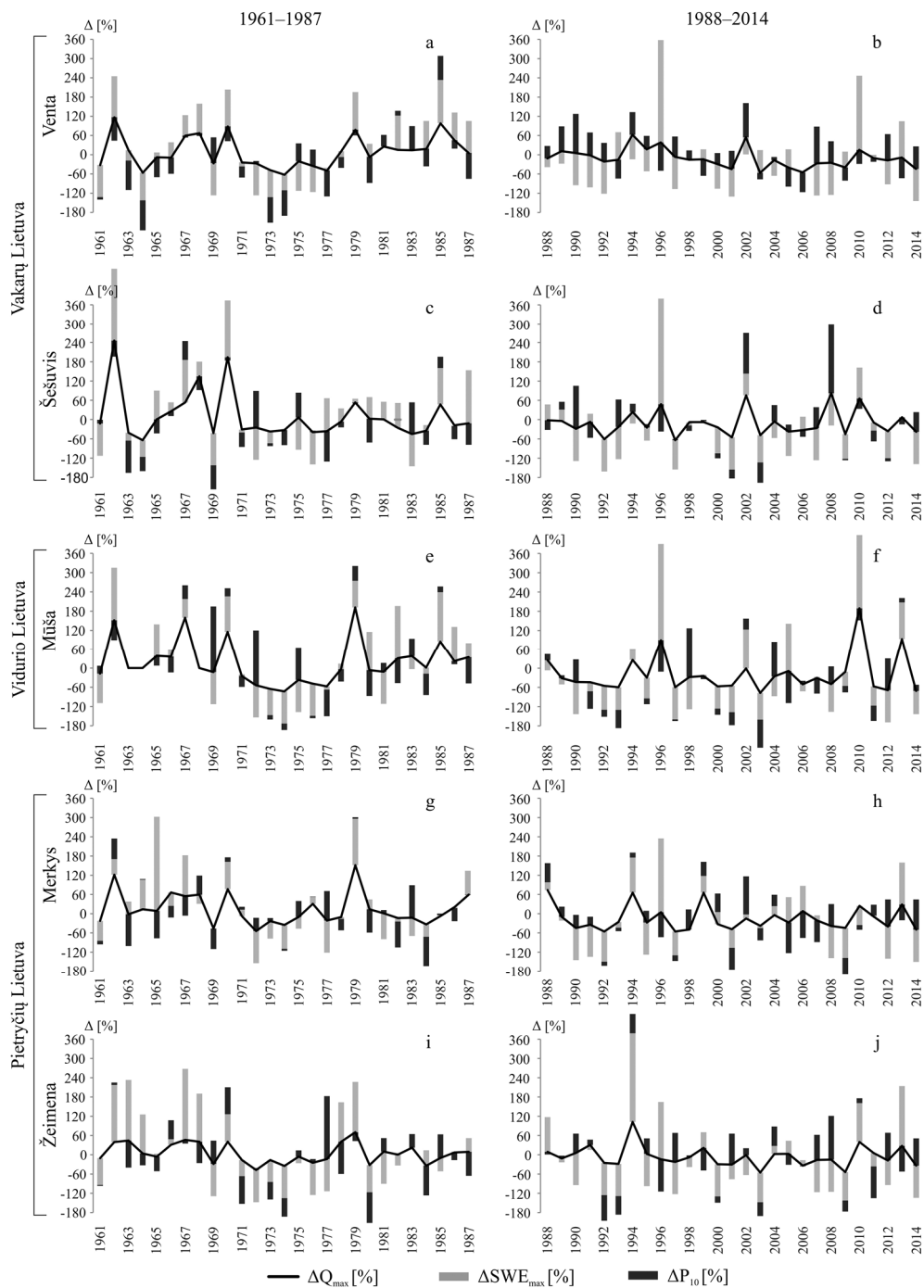
Penkioms, mažiausiai antropogeninės veiklos paveiktoms ir vienodas stebėjimų eilutes turinčioms, upėms iš trijų hidrologinių rajonų buvo atlikta Q_{max} , SWE_{max} ir P_{10} analizė (4.3 lent.). Nustatyti minėtųjų parametru pokyčiai 1988–2014 m. laikotarpiu (antrasis laikotarpis), buvo palyginti su 1961–1987 m. laikotarpio (pirmasis laikotarpis) reikšmėmis. Antruoju laikotarpiu Vakarų hidrologinio rajono upėse $\overline{Q_{max}}$ sumažėjo 42,7 m³/s (Ventoje) ir 30,2 m³/s (Šešuvyje), tai abiejose upėse sudarė -18 % maksimalaus debito sumažėjimą, o $\overline{P_{10}}$ gerokai išaugo tiek Ventoje (59 %), tiek ir Šešuvyje (37 %). Vidutinio maksimalaus debito sumažėjimas galėjo būti nulemtas $\overline{SWE_{max}}$, nes pastarasis meteorologinis parametras taip pat sumažėjo abiejų upių baseinuose. Ventos baseine šis rodiklis sumažėjo 5,8 mm, o Šešuvio baseine – 12,3 mm, kas atitinkamai sudarė -19 % ir -38 %. Didžiausi $\overline{Q_{max}}$ pasikeitimai nustatyti Mūšos upėje, kur vidutinis maksimalus debitas sumažėjo net 44,9 m³/s (-32 %) lyginant su 1961–1987 m. laikotarpiu. Šios Vidurio Lietuvos upės baseine $\overline{SWE_{max}}$ ir $\overline{P_{10}}$ taip pat pastaraisiais dešimtmečiais mažėjo, nes $\overline{SWE_{max}}$ sumažėjo 22 %, o $\overline{P_{10}}$ – 5 %. Merkio ir Žeimenos upėse atitinkamai nustatytas 25 ir 9 % $\overline{Q_{max}}$ sumažėjimas. Kaip ir Vakarų hidrologiniame rajone, Pietryčių rajone $\overline{P_{10}}$ padidėjo 1988–2014 m. laikotarpiu, tik pokyčiai buvo nedideli ir svyravo ~4 mm, bet $\overline{P_{10}}$ Merkio baseine išaugo 18 %, o Žeimenos – 19 %. Nustatytieji $\overline{Q_{max}}$ pokyčiai antruoju laikotarpiu yra tiesiogiai susiję su reikšmingu vidutinių maksimalių vandens atsargų sniege mažėjimu, kuris buvo užfiksuotas visuose analizuotų upių baseinuose. Nustatytieji pokyčiai parodo panašaus pobūdžio tyrimų svarbą siekiant geriau suprasti besikeičiančio klimato įtaką pavasario potvyniams ir jų kaitai ateityje.

4.3 lentelė. Vidutinės Q_{max} , SWE_{max} ir P_{10} reikšmės dviem skirtingais laikotarpiais

Rajonas	Upė	1961–1987 m.			1988–2014 m.		
		$\overline{Q_{max}}$ (m ³ /s)	$\overline{SWE_{max}}$ (mm)	$\overline{P_{10}}$ (mm)	$\overline{Q_{max}}$ (m ³ /s)	$\overline{SWE_{max}}$ (mm)	$\overline{P_{10}}$ (mm)
Vakarų	Venta	235,6	30,3	26,1	192,9	24,5	41,5
	Šešuvis	167,8	32,5	21,0	137,6	20,2	28,8
Vidurio	Mūša	139,0	28,3	20,4	94,1	22,1	19,3
Pietryčių	Merkys	99,4	36,3	21,0	74,9	29,2	24,8
	Žeimena	44,5	29,0	21,1	40,4	22,2	25,2

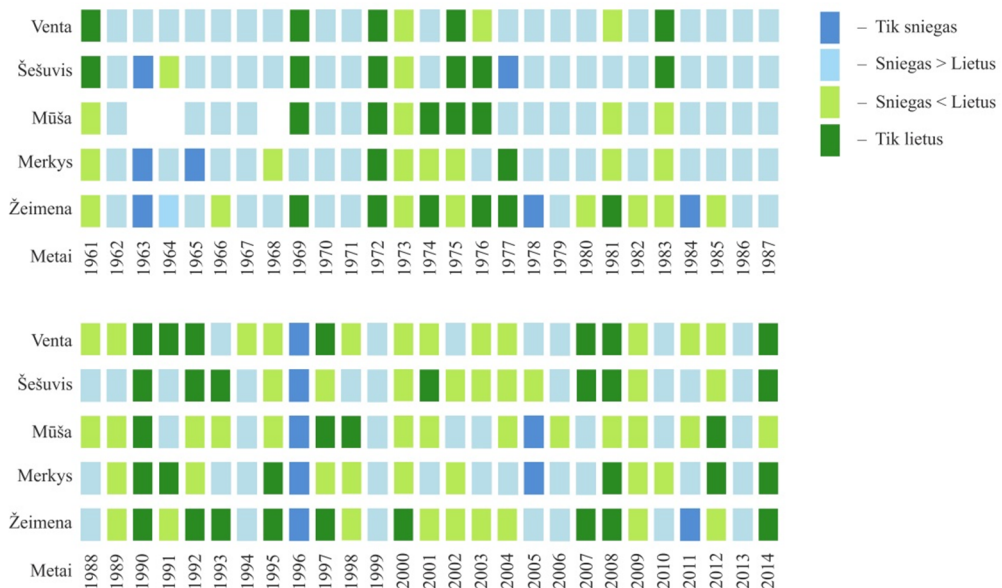
Taip pat yra svarbu įvertinti tiriamų meteorologinių parametrų ir maksimalių pavasario potvynių nuokrypius nuo viso laikotarpio vidurkio, norint nuodugniau įvertinti jų tarpusavio ryšius. Tam tikslui buvo sudaryti nuokrypių grafikai, kur maksimalių vandens atsargų sniege (ΔSWE_{max}) ir dešimties dienų kritulių sumos (ΔP_{10}) nuokrypių nulinis atskaitos taškas yra ant pavasario potvynio maksimalaus debito nuokrypio linijos (ΔQ_{max}). Tirti parametrai suskirstyti pagal hidrologinius rajonus ir į juos patenkančius upių baseinus (4.9 pav.). Ventoje, patenkančioje į Vakarų hidrologinį rajoną, pirmuoju laikotarpiu (1961–1987 m.) buvo nustatyta nemaža dalis metų su teigiamais ΔSWE_{max} , kurie turėjo įtakos teigiamiems maksimalių pavasario potvynių nuokrypiams. Tarp tokių metų galima paminėti 1962, 1968, 1970, 1979 m., o 1985 m. ΔSWE_{max} sąveika su teigiamu ΔP_{10} lėmė 98 % didesnę maksimalų pavasario potvynį nei viso laikotarpio vidurkis. Pasitaikė metų, kai ženkliai sumažėję pavasario potvyniai buvo sąlygoti SWE_{max} ir P_{10} sumažėjimo (1964 m. ir 1971–1977 m.) (4.9a pav.). Kitokie dėsningumai išryškėjo 1988–2014 m., nes buvo nustatyta nemažai metų su teigiamais ΔP_{10} , tačiau su sumažėjusiomis maksimaliomis vandens atsargomis sniege (4.9b pav.). Dėl to minėtu laikotarpiu nustatytas Q_{max} sumažėjimas. Kitokiu pobūdžiu pasižymėjo 1996 ir 2010 m., kurių metu prieš pat potvynį buvo susikaupusios gausesnės SWE_{max} nei vidurkis, tačiau jos neturėjo reikšmingos įtakos didesnio potvynio debitui susiformuoti. Priešingai nei Ventoje, pavasariniais Šešuvio potvyniams turėjo įtakos SWE_{max} ir P_{10} pasikeitimai, nes didžiausi teigiami Q_{max} nuokrypiai buvo nustatyti būtent teigiamų meteorologinių parametrų nuokrypių metu (4.9c,d pav.). Ypač dideli Šešuvio potvyniai dėl gausnesnių vandens atsargų sniege buvo nustatyti pirmojo laikotarpio 1962, 1968 ir 1970 metais (4.9c pav.). Antruoju laikotarpiu didžiausi pavasario potvynių debitų nuokrypiai buvo nustatyti esant padidėjusiam P_{10} (2002 ir 2008 m.), o neigiami SWE_{max} ir P_{10} nuokrypiai turėjo įtakos Q_{max} sumažėjimui (4.9d pav.).

Vidurio Lietuvos hidrologiniam rajonui priklausančios Mūšos pavasario potvyniai tiesiogiai priklauso nuo SWE_{max} ir P_{10} sąveikos. 1961–1987 m. laikotarpiu ši tarpusavio ryšį apibūdina 1967, 1970 ir 1979 m., nes esant abiejų meteorologinių parametrų teigiamiems nuokrypiams, potvyniai daugiau nei dvigubai viršijo viso laikotarpio vidurkį (4.9e pav.). Analogiška situacija susiklostė ir 1988–2014 m. laikotarpiu, kuriame didžiausių pavasarinų potvynių pikų metu (2010 ir 2013 m.) buvo nustatyti SWE_{max} bei P_{10} teigiami nuokrypiai (4.9f pav.). Abiejų laikotarpių grafikuose galima pastebėti, kad neigiami potvynių nuokrypiai susiję su analizuojamų meteorologinių parametrų reikšmių sumažėjimu. Pietryčių Lietuvos upės (Merkys ir Žeimenas) ne taip smarkiai yra veikiamos prieš pavasario potvynio maksimumą iškritusių kritulių kiekiu, kadangi atskirais metais, netgi esant teigiamam P_{10} , potvynio dydis ne taip smarkiai keičiasi kaip veikiamas SWE_{max} (4.9g, h, i, j pav.). Merkio ir Žeimenos Q_{max} nuokrypiai yra tolygesni ir svyruoja ne tokia didele amplitude, kaip prieš tai analizuotose upėse, tačiau taip pat yra jautrios SWE_{max} pasikeitimams ir glaudžiai su jomis susijusios, nes tiriamų Pietryčių hidrologinio rajono upių teigiami Q_{max} nuokrypiai yra lydimi teigiamų ΔSWE_{max} , o neigiami ΔQ_{max} – neigiamų ΔSWE_{max} reikšmių.



4.9 pav. Q_{max} (juoda linija), SWE_{max} (šviesūs stulpeliai) ir P_{10} (tamsūs stulpeliai) nuokrypiai (%) nuo 1961–2014 m. laikotarpio vidurkio dviem analizuojamais laikotarpiais (1961–1987 ir 1988–2014 m.) (SWE_{max} ir P_{10} nulinius atskaitos taškus ant Q_{max} nuokrypio kreivės, o stulpelio nebuvimas – reikšmė artima vidurkiui)

Siekiant nustatyti konkrečių metų lemiančių faktorių, analizuoti meteorologiniai rodikliai (sniego ir lietaus), kurie parodė jų reikšmingumą maksimaliam pavasario potvyniui susidaryti. Tam tikslui įgyvendinti buvo sudaryta penkių upių matrica su keturiomis meteorologinėmis situacijomis (4.10 pav.). Įvertinus 1961–1987 m. ir 1988–2014 m. laikotarpius nustatyta, kad didžiąją analizuotų metų dalį tiek sniegas, tiek lietus darė įtaką pavasario potvyniui, tik atskirais metais potvyniai buvo sukelti vieno meteorologinio parametro. 1961–1987 m. laikotarpiu išsiskiria 1972 m., o 1988–2014 m. laikotarpiu – 1990 m., kai pavasario potvynis buvo sukeltas išimtinai vien tik lietaus kritulių. Panaši situacija buvo susidariusi 1969, 2008 ir 2014 m., kai keturiose iš penkių upių buvo fiksuoti vien lietaus sukelti pavasario potvyniai. Tik sniego nulemti potvyniai fragmentiškai pasikartoja atskirais metais ir konkrečiose upėse, bet 1996 m. visose analizuotose upėse buvo nustatyti sniego tirpsmo sukelti potvyniai. Pirmuoju laikotarpiu (1961–1987 m.) sąveikoje su lietumi, sniegas turėjo didesnę įtaką maksimaliems pavasario potvyniams ir tai sudarė 57 % visų analizuotų atvejų, nors 1988–2014 m. vyravo lietaus sukelti potvyniai. Sąveikoje su sniegu, lietus dominavo 64 % analizuotų metų antruoju laikotarpiu. Tarp atskirų hidrologinių rajonų didesnių skirtumų neaptikta. Atlikus analizę pavyko nustatyti dviejų laikotarpių skirtumus pagal potvynių formavimąsi lemiančius meteorologinius rodiklius, kurie parodė aiškią sniego tirpsmo sukeltų potvynių skaičiaus mažėjimo tendenciją ir lietaus sukeltų potvynių dažnėjimą.



4.10 pav. Pavasario potvynio formavimosi sąlygos, atsižvelgiant į meteorologinių rodiklių įtaką maksimaliam debito dydžiui: tik sniegas – P_{10} neviršija 5 % SWE_{max} ; sniegas > lietus – $SWE_{max} > P_{10}$; sniegas < lietus – $SWE_{max} < P_{10}$; tik lietus – SWE_{max} neviršija 5 % P_{10}

4.2.2. Pavasario potvynių maksimalių debitų ir maksimalių vandens atsargų sniege vertinimas tikimybiniais skirstiniais

Norint nustatyti, kurie iš trijų pasirinktų tikimybinių skirstinių – Apibendrintųjų ekstremalių reikšmių (GEV), Apibendrintas logistinis (GL) ar Veibulo (W) yra labiausiai tinkami Ventos, Šešuvio, Mūšos, Žeimenos ir Merkio upių pavasario potvynių maksimaliems debitams (Q_{max}) bei šių upių baseinų maksimalioms vandens atsargoms sniege (SWE_{max}) aprašyti, buvo pritaikyti Kolmogorovo–Smirnovo (K–S) ir Andersono–Darlingo (A–D) testai. Analizuoti du skirtingi laikotarpiai ir geriausiai tinkantys skirstiniai pažymėti paryškintu šriftu (4.4 lent.). Abu K–S ir D–S testai parodė blogiausių rezultatų Veibulo (W) tikimybiniam skirstiniui Q_{max} ir SWE_{max} reikšmėms. Pirmuoju laikotarpiu (1961–1987 m.) GEV tikimybinis skirstinys parodė geresnius rezultatus pagal K–S ir D–S testus. Antruoju laikotarpiu K–S testu didžiajai daugumai upių baseinų ir jų hidrometeorologiniams rodikliams nustatytas GL skirstinio tinkamumas, nors D–S testo rezultatų pasiskirstymas tarp GEV ir GL skirstinių Q_{max} ir SWE_{max} reikšmėms išliko labai panašus (4.4 lent.).

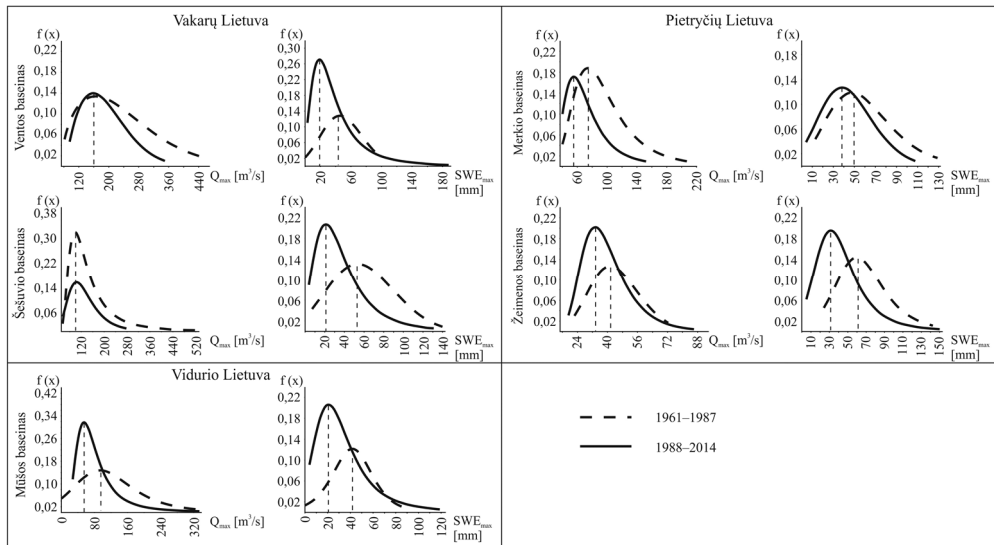
4.4 lentelė. K–S ir A–D tinkamumo testų rezultatai penkioms upėms ir jų baseinams (geriausi skirstiniai yra paryškinti)

1961–1987										
Testas	Venta		Šešuvis		Mūša		Žeimena		Merkys	
	Q_{max}	SWE_{max}	Q_{max}	SWE_{max}	Q_{max}	SWE_{max}	Q_{max}	SWE_{max}	Q_{max}	SWE_{max}
<i>Kolmogorovo–Smirnovo</i>										
GEV	0,0718	0,0695	0,0919	0,1300	0,1050	0,0985	0,1136	0,0965	0,0953	0,0985
GL	0,0833	0,0838	0,0950	0,1516	0,0928	0,0742	0,1286	0,0843	0,1063	0,1128
W	0,0684	0,0957	0,1598	0,1484	0,1708	0,0921	0,1210	0,1089	0,1016	0,0784
<i>Andersono–Darlingo</i>										
GEV	0,1915	0,1110	0,3094	0,4323	0,2313	0,2095	0,3018	0,2710	0,2153	0,2048
GL	0,2606	0,1714	0,3363	0,5639	0,2326	0,1216	0,4188	0,2624	0,2414	0,2892
W	0,1939	2,0307	0,8423	0,5273	4,9410	2,0778	0,3142	0,3526	0,3086	0,2327
1988–2014										
<i>Kolmogorovo–Smirnovo</i>										
GEV	0,1050	0,0659	0,1001	0,1047	0,0961	0,0792	0,9877	0,0659	0,0658	0,0835
GL	0,0953	0,0637	0,0942	0,0982	0,0925	0,0812	0,0883	0,0645	0,0734	0,1020
Veibullo	0,1070	0,0754	0,1166	0,1197	0,1351	0,0853	0,1293	0,0818	0,1349	0,0987
<i>Andersono–Darlingo</i>										
GEV	0,2541	0,1122	0,2627	0,3875	0,1973	0,1935	0,2924	0,1092	0,2185	0,1822
GL	0,2165	0,1192	0,2587	0,3557	0,2079	0,2039	0,2042	0,1079	0,2833	0,2528
W	0,3252	0,3311	0,3638	0,4816	1,3841	0,2782	0,4581	0,1739	1,2036	0,2215

Nustačius labiausiai tinkančius skirstinius (4.4 lent.), pagal juos buvo įvertintas Q_{max} ir SWE_{max} tikimybinis pasiskirstymas Ventoje, Šešuvyje, Mūšoje, Merkyje ir Žeimenoje 1961–1987 ir 1988–2014 m. laikotarpiais (4.11 pav.). Vakarų hidrologiniame rajone esančiose Ventos ir Šešuvio upėse nustatyta, kad labiausiai tikėtina maksimalaus pavasario potvynio debito reikšmė išlieka beveik nepakitusi tarp analizuojamų laikotarpių, tačiau antruoju laikotarpiu retos tikimybės maksimalių debitų reikšmės sumažėja. Šių upių baseinuose maksimalių vandens atsargų sniege labiausiai tikėtina reikšmė 1988–2014 m. laikotarpiu ženkliai sumažėjo (~20 mm Ventos baseine ir ~30 mm Šešuvio baseine). Vidurio hidrologinio rajono upės Mūšos antruoju laikotarpiu labiausiai tikėtinos Q_{max} reikšmės sumažėja kartu su SWE_{max} reikšmėmis lyginant su 1961–1987 m.

laikotarpiu. Tik itin retos tikimybės Mūšos Q_{max} reikšmės išlieka nepakitusios (4.11 pav.). Merkio ir Žeimenos upių baseinuose labiausiai tikėtinos Q_{max} ir SWE_{max} reikšmės 1988–2014 m. laikotarpiu sumažėja lyginant su 1961–2014 m.

Maksimalių pavasario potvynio debitų ir maksimalių vandens atsargų sniege tikimybinių skirstinių analizė patvirtina, kad Vidurio ir Pietryčių hidrologinių rajonų upės pakankamai didele dalimi priklauso nuo vandens atsargų sniege, susikaupusių per žiemos sezoną, o joms mažėjant, atitinkamai mažėja ir labiausiai tikėtinos debitų reikšmės. Vakarų Lietuvos hidrologiniame rajone nustatyti didžiausios tikimybės SWE_{max} pokyčiai neturėjo reikšmingos įtakos labiausiai tikėtinioms maksimalių pavasario potvynių debitų reikšmėms, tai galėjo būti dėl padidėjusio lietaus kiekio pradinėse potvynio formavimosi ir augimo stadijose.



4.11 pav. Q_{max} ir SWE_{max} tikimybinis pasiskirstymas Ventoje, Šešuvyje, Mūšoje, Merkyje ir Žeimenoje pagal geriausiai tinkančius tikimybinius skirstinius 1961–1987 ir 1988–2014 m. laikotarpiais

4.2.3. Daugialypės tiesinės regresijos modeliai pasirinktų upių pavasario potvynių maksimaliems debitams įvertinti

Daugialypė tiesinė regresinė analizė buvo taikyta pavasario potvynius lemiančių veiksnių įtakai potvynio dydžio formavimuisi vertinti, kai nėra pakankamo kiekio geografinės informacijos ir hidrometeorologinių duomenų, reikalingų hidrologiniam modeliavimui. Nustatytieji daugialypės tiesinės regresijos modelių koeficientai (B) yra reprezentatyvūs konkrečiai upei pagal du analizuojamus laikotarpius (4.5 lent.). Apskaičiuoti koreliacijos koeficientai (R) tarp stebėto Q_{max} ir prognozuoto Q_{max} (pagal daugialypės tiesinės regresijos lygtį) svyravo 0,63–0,86 ribose. Pirmuoju laikotarpiu aukščiausi koreliacijos koeficientai buvo nustatyti Ventoje (0,85) ir Žeimenos upėje (0,86), o mažiausi rodikliai buvo apskaičiuoti Merkyje ir Šešuvyje. 1988–2014 m. laikotarpiu situacija šiek tiek pasikeitė, aukščiausi koreliacijos koeficientai – 0,84 ir 0,86 buvo nustatyti

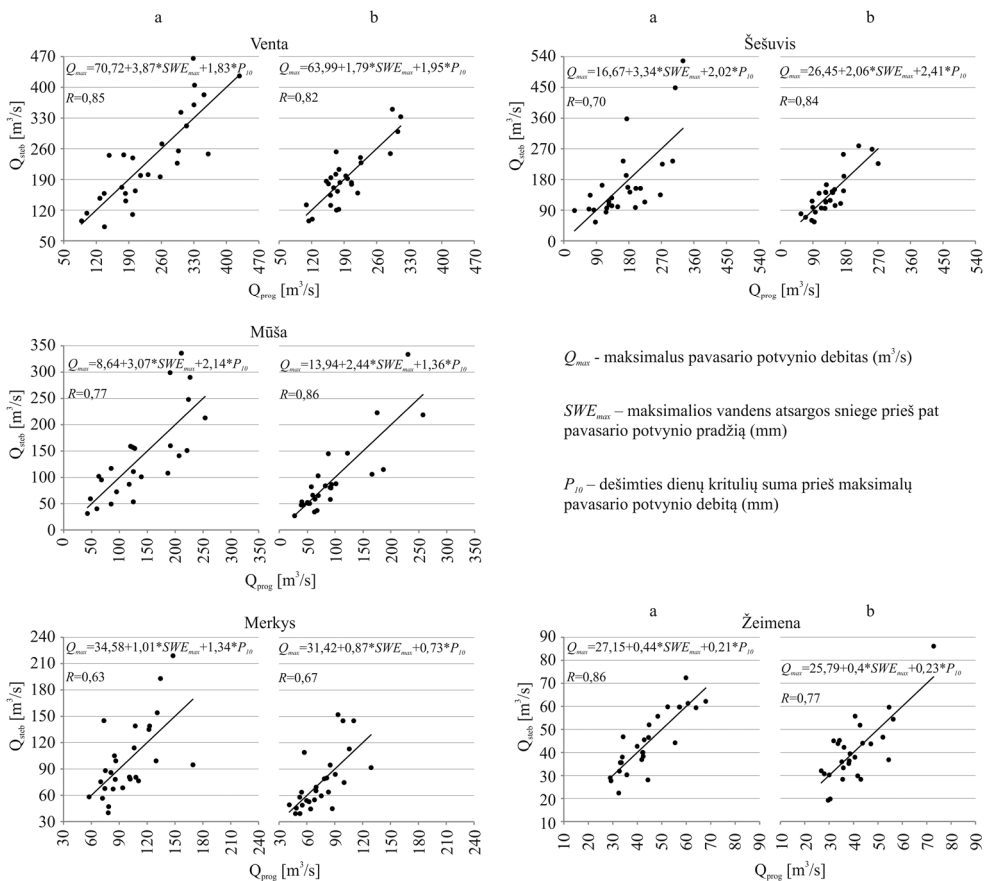
atitinkamai Šešuvio ir Mūšos upėse. Kaip ir pirmuoju laikotarpiu, žemiausias koreliacijos koeficientas (0,67) buvo Merkyje. Mažiausi koreliacijos koeficientai gali būti siejami su specifinėmis Merkio upės maitinimo sąlygomis, kadangi didžiąją šios upės nuotėkio dalį sudaro požeminis maitinimas, kuris nėra labai inertiškas laike (sukauptos atsargos atiduodamos palaipsniui) ir išlygina upės hidrografą. Todėl Merkys ne taip jautriai reaguoja į momentinius paviršinio nuotėkio procesus (SWE_{max} ir P_{10} įtaka) kaip likusias upes.

4.5 lentelė. Penkių upių baseinų 1961–1987 ir 1988–2014 m. laikotarpių daugialypės tiesinės regresijos rezultatai

Hidrologinis rajonas	Vakarų				Vidurio		Pietryčių				
Upė	Venta		Šešuvis		Mūša		Merkys		Žeimena		
Laikotarpis	1961–1987	1988–2014	1961–1987	1988–2014	1961–1987	1988–2014	1961–1987	1988–2014	1961–1987	1988–2014	
R	0,85	0,82	0,70	0,84	0,77	0,86	0,63	0,67	0,86	0,77	
B	Q_{max} konstanta	70,72	63,98	16,67	26,45	8,64	13,94	34,58	31,42	27,15	25,79
	SWE_{max}	3,87	1,79	3,34	2,06	3,07	2,44	1,01	0,87	0,44	0,40
	P_{10}	1,83	1,95	2,02	2,41	2,14	1,36	1,34	0,73	0,21	0,23
Apatinė riba	Q_{max} konstanta	14,92	18,03	-73,29	-8,91	-56,48	-23,06	-5,75	2,30	20,76	17,19
	SWE_{max}	2,82	1,25	1,89	1,47	1,91	1,81	0,47	0,47	0,33	0,26
	P_{10}	0,54	1,12	-0,61	1,51	0,30	0,02	0,12	-0,09	0,03	-0,02
Viršutinė riba	Q_{max} konstanta	126,52	109,95	106,63	61,80	73,75	50,95	74,91	60,55	33,54	34,38
	SWE_{max}	4,92	2,34	4,79	2,66	4,23	3,06	1,55	1,27	0,55	0,54
	P_{10}	3,12	2,781	4,66	3,32	3,99	2,70	2,57	1,55	0,40	0,48
Standartinis nuokrypis	Q_{max} konstanta	27,04	22,27	43,59	17,13	31,31	17,93	19,54	14,11	3,10	4,16
	SWE_{max}	0,51	0,26	0,70	0,29	0,56	0,30	0,26	0,20	0,05	0,07
	P_{10}	0,62	0,40	1,28	0,44	0,89	0,65	0,59	0,40	0,09	0,12

Ventos, Šešuvio, Mūšos, Merkio ir Žeimenos upių maksimalaus pavasario potvynio prognozės 1961–1987 ir 1988–2014 m. laikotarpiams buvo sudarytos pagal nestandartizuotą koeficientą B (4.5 lent.) kiekvienam nepriklausomam kintamajam (SWE_{max} ir P_{10}). Ryšio grafikai tarp išmatuotų ir apskaičiuotų Q_{max} reikšmių parodė įvairių nuokrypių nuo ryšio kreivės sklaidą (4.12 pav.). Glaudžiausi ryšiai buvo nustatyti skirtingais laikotarpiais Mūšoje ir Žeimenoje, taip pat geri ryšiai nustatyti ir Ventoje. Prasčiausios prognozės buvo Merkyje abiem laikotarpiais bei Šešuvyje 1961–1987 m. laikotarpiu, kai buvo didžiausia sklaida tarp stebėto ir prognozuoto maksimalaus pavasario potvynio debito (4.12 pav.). Analizuojant ekstremalius pavasario potvynio debitus nustatyta, kad daugialypės tiesinės regresijos modeliai prognozuoja žemesnes reikšmes, negu jos buvo užfiksuotos analizuojamų upių vandens matavimo stotyse. Ypač tai ryšku Mūšos upėje abiem laikotarpiais ir Šešuvyje bei Merkyje 1961–1987 m. laikotarpiu.

Norint nustatyti maksimalių vandens atsargų sniege (prieš pat potvynį) ir dešimties dienų kritulių sumos (prieš maksimalų pavasario potvynio debitą) įtaką maksimaliam pavasario potvynio debitui, buvo sudarytos daugialypės tiesinės regresijos modelių lygtys (4.12 pav.). Šių lygčių koeficientai parodo kiekvieno konkretaus nepriklausomo kintamojo (SWE_{max} ir P_{10}) indėlį maksimalaus debito reikšmei. Vakarų Lietuvos hidrologinio rajono upių baseinuose pirmojo laikotarpio metu SWE_{max} koeficientai buvo didesni nei P_{10} . Priešinga situacija susiklostė 1988–2014 m. laikotarpiu, kai Ventoje ir Šešuvyje didesnis koeficientas atiteko P_{10} , kas nurodo išaugusią kritulių įtaką pavasario potvynio formavimuisi šiame rajone. Mūšos ir Žeimenos upėse didesni koeficientai buvo apskaičiuoti SWE_{max} reikšmėms abiem analizuojamais laikotarpiais. Šiuose upių baseinuose maksimalių vandens atsargų sniege įtaka išlieka nepakitusi net kai prieš pat maksimalų pavasario debitą išskrinta krituliai.



4.12 pav. Ryšys tarp stebėtų (Q_{steb}) ir prognozuotų (Q_{prog}) pavasario potvynių Q_{max} penkiose analizuojamose upėse 1961–1987 (a) ir 1988–2014 m. (b) laikotarpiais

5. HIDROMETEOROLOGINIŲ RODIKLIŲ PROGNOZĖS ANALIZĖ XXI a. PAGAL ĮVAIRIUS KLIMATO SCENARIJUS

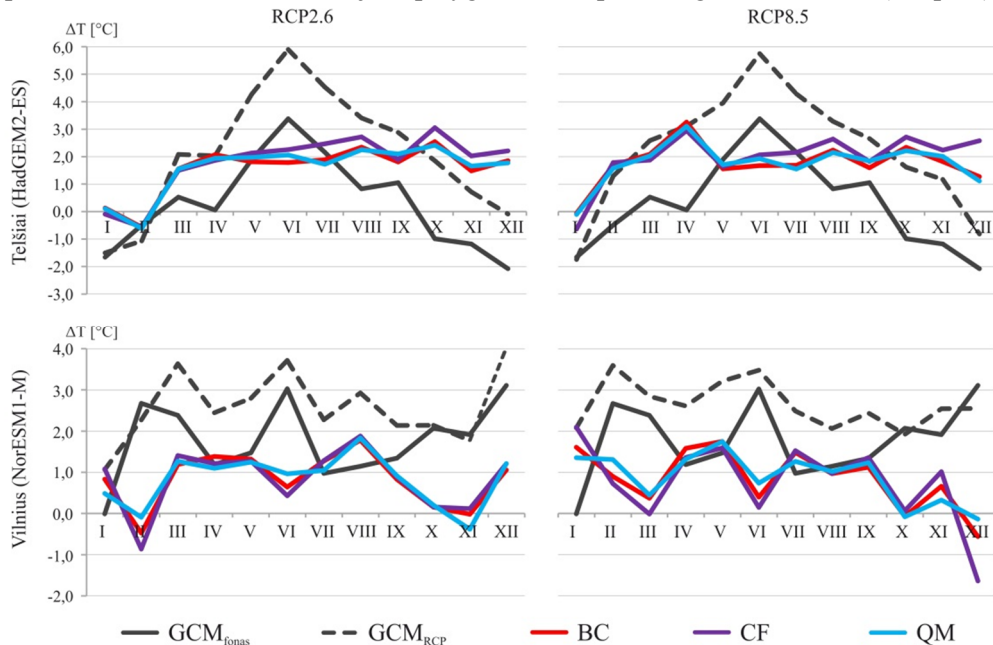
5.1. Oro temperatūros ir kritulių kiekio prognozės analizė Lietuvoje pagal įvairius klimato scenarijus XXI a.

Lietuva skirstoma į keturis klimato rajonus: Pajūrio, Žemaičių, Vidurio žemumos ir Pietryčių aukštumų (5.1 pav.). Šie rajonai skiriasi savo klimatinėmis sąlygomis, kurias lemia reljefas ir atstumas nuo Baltijos jūros. Pajūrio rajono klimata švelnina jūros poveikis, kuris sumažina oro temperatūros svyravimų amplitudę tarp sezonų, ir turi įtakos gausesniam saulėtų dienų kiekiui. Žemaičių rajono klimata gerokai veikia Žemaičių aukštumos, dėl kurių iškrenta gausesnis kritulių kiekis negu likusioje Lietuvos dalyje. Vidurio žemumos rajone, nuo šalia esančių aukštumų, adiabatiškai besileidžiantys žemyneigiai srautai lemia padidėjusią oro temperatūrą bei sumažėjusį kritulių kiekį. Pietryčių aukštumų rajonas kartu su įvairaus dydžio kalvomis ir specifine litologine sudėtimi (smėliai ir priesmėliai) lemia didelę oro temperatūros svyravimo amplitudę tarp sezonų bei sukuria palankias sąlygas formuotis temperatūrų inversijoms (Galvonaite et al., 2007). Tiriamas objektas (Nemuno baseinas) patenka į visus keturis klimato rajonus, todėl siekiant įvertinti galimus ateities meteorologinių parametrų pokyčius bei prognostinių eilučių adaptavimą Lietuvos sąlygomis, iš kiekvieno rajono buvo pasirinkta geografiškai reprezentatyviausia meteorologinė stotis (5.1 pav.).



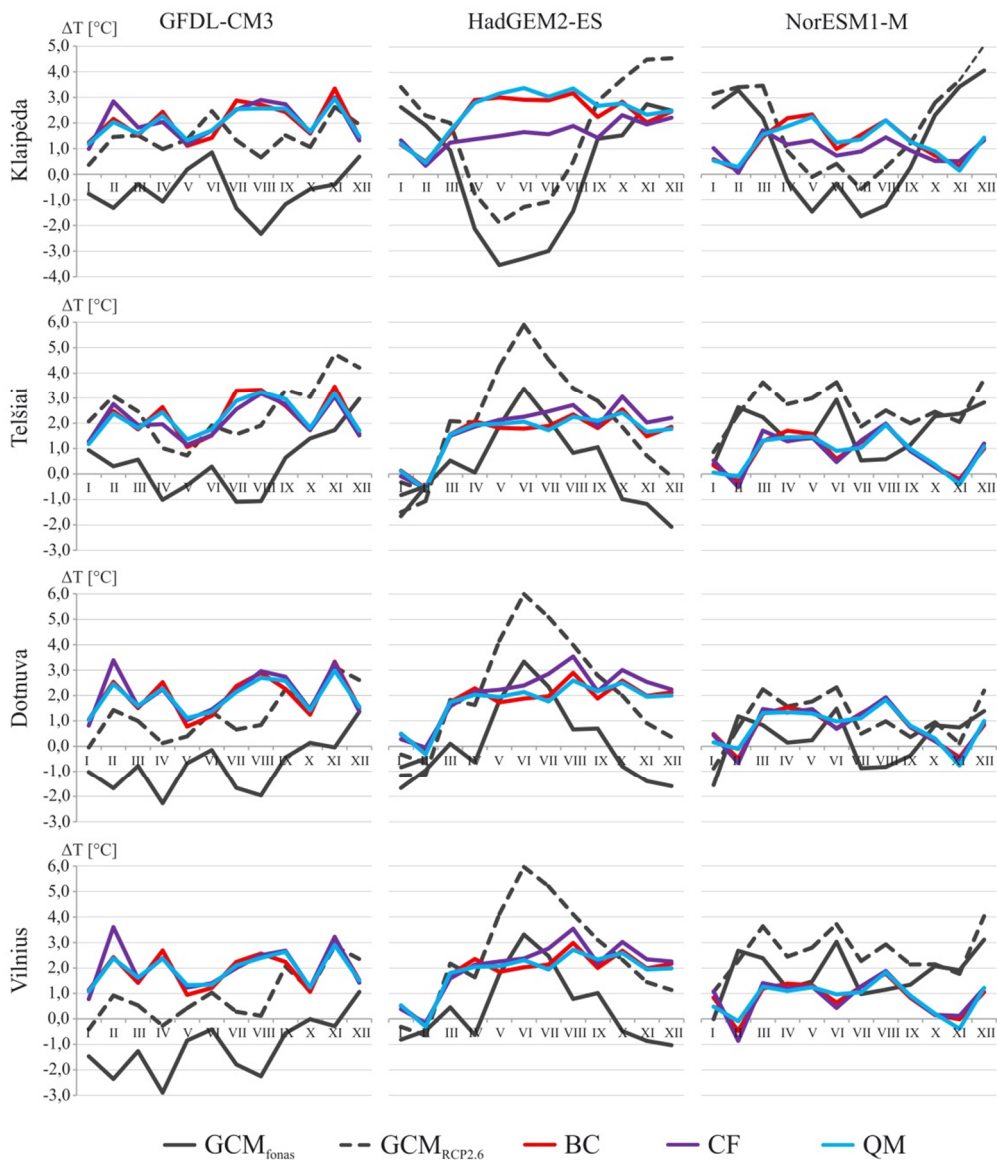
5.1 pav. Lietuvos klimato rajonai ir geografiškai reprezentatyvios meteorologinės stotys (pagal Lietuvos TSR atlasą, 1981)

Meteorologinių parametų (oro temperatūros ir kritulių) eilutės iš konkrečių globalaus klimato modelių (GCM) gardelių tinklelio raiškos didinimo metodais buvo adaptuotos į gardelių ribas patenkančių meteorologijos stočių (MS) vietas. Artimos ateities (2016–2035 m.) oro temperatūrai prognozuoti buvo pasirinkti RCP2.6 ir RCP8.5 ateities scenarijai, kurie apjungia mažiausią ir didžiausią klimato kaitos įtaką. Ribinių klimato scenarijų tarpusavio palyginimas pateiktas 5.2 pav. Jame pavaizduoti GCM foninio laikotarpio (GCM_{fonas}) ir artimos ateities vidutinės mėnesio oro temperatūros prognozių be tinklelio raiškos didinimo metodų (GCM_{RCP}) ir su trimis tinklelio raiškos didinimo metodais (BC, CF ir QM) nuokrypiai nuo 1986–2005 m. stebėjimo duomenų. Kadangi RCP2.6 ir RCP8.5 scenarijų palyginimas parodė nereikšmingus skirtumus, todėl analizuoti buvo pasirinktas tik RCP2.6 scenarijaus palyginimas tarp skirtingų MS ir GCM (5.3 pav.).



5.2 pav. Globalaus klimato modelių vidutinės mėnesio oro temperatūros nuokrypiai (°C) foniniu laikotarpiu (GCM_{fonas}) ir nuokrypių prognozės artimoje ateityje pagal du RCP scenarijus (GCM_{RCP}) ir tris tinklelio raiškos didinimo metodus (BC, CF ir QM) lyginant su foninio laikotarpio stebėjimais

Pagal skirtingus GCM, foninio laikotarpio oro temperatūros nuokrypiai svyravo plačiu diapazonu (5.3 pav.). Foniniu laikotarpiu ties Klaipėdos MS, GFDL–CM3 (GFDL) klimato modelio išvesties duomenys parodė žemesnes oro temperatūros reikšmes nei jos buvo fiksuotos stebėjimais. Išsiskyrė tik gegužės, birželio ir liepos mėnesiai, kai nuokrypiai buvo teigiami. Tinklelio raiškos didinimo metodų taikymas stipriai patobulino oro temperatūros prognozes ir pašalino paklaidas, susijusias su GCM neapibrėžtumu foniniu laikotarpiu. Todėl mėnesių reikšmės su neigiamu nuokrypiu foniniu laikotarpiu buvo pakeltos į teigiamą pusę, o teigiamų nuokrypių mėnesių reikšmės sumažintos.



5.3 pav. Globalaus klimato modelių vidutinės mėnesio oro temperatūros nuokrypiai ($^{\circ}\text{C}$) foniniu laikotarpiu ($\text{GCM}_{\text{fonas}}$) ir nuokrypių prognozės artimoje ateityje pagal RCP2.6 scenarijų, tris globalaus klimato modelius ($\text{GCM}_{\text{RCP2.6}}$) ir tris tinklelio raiškos didinimo metodus (BC, CF ir QM) lyginant su foninio laikotarpio stebėjimais keturiose meteorologijos stotyse

HadGEM2–ES (Had) modelio išvesties duomenys foniniu laikotarpiu smarkiai išsiskyrė Klaipėdos MS, nes Had modeliavo šiltesnius šaltuosius ir vėsesnius šiltuosius metų mėnesius (5.3 pav.). Priešinga situacija buvo Telšių, Dotnuvos ir Vilniaus MS. Šis oro temperatūros pasiskirstymas iš foninio laikotarpio buvo perkeltas ir nekoreguotoms GCM prognozuoti artimą ateitį. Oro temperatūros netolygumo pasiskirstymas yra nulemtas GCM gardelių padėties, kuri ne visais atvejais reprezentuoja vietines klimato sąlygas. Had modeliui svarbus tinklelio raiškos didinimo metodų taikymas, nes po korekcijų BC, CF ir QM metodais, oro temperatūros duomenys tampa tinkamesni tolimesnei analizei.

NorESM1–M (Nor) klimato modelio rezultatai foniniu laikotarpiu parodė, kad oro temperatūra Telšių ir Vilniaus MS buvo aukštesnė už stebėtąją, nors Dotnuvos MS pasitaikė mėnesių su neigiamais nuokrypiais (5.3 pav.). Klaipėdos meteorologijos stotyje, kaip ir Had modelio atveju, buvo sumodeliuoti šiltesni šaltieji ir vėsesni šiltieji metų mėnesiai. Šie pokyčiai gali būti nulemti Nor modelio gardelės, į kurią patenka Klaipėdos MS, nes ji didžiąja dalimi yra orientuota virš Baltijos jūros. Pirminės GCM išvesties duomenų paklaidos yra nulemtos modelių gebėjimu atkurti praeities sąlygas, kurios būtų artimos stebėtoms. Jeigu sumodeliuotos reikšmės foniniu laikotarpiu smarkiai skiriasi nuo išmatuotų, tada tokio paties pobūdžio paklaidos perduodamos ir ateities prognozėms. Dėl šių priežasčių tinklelio raiškos didinimo metodų taikymas yra neišvengiamas ir padeda gauti tikslesnius tyrimo rezultatus.

Tinklelio raiškos didinimo metodais buvo adaptuotos skirtingų globalaus klimato modelių oro temperatūros pagal RCP (2.6, 4.5 ir 8.5) klimato scenarijus bei pateiktas kai kurių meteorologijos stočių oro temperatūros nuokrypių nuo foninio laikotarpio stebėjimų palyginimas (5.1 lent.). RAW yra pradiniai oro temperatūros duomenys, kuriems nebuvo atliktas tinklelio raiškos didinimas. Didžiausią vidutinės metinės oro temperatūros kilimą prognozuoja GFDL klimato modelis, kai tuo tarpu Had modelis pateikia mažiausią temperatūros augimo prognozę. Oro temperatūros kilimas atitinkamai priklauso ir nuo RCP klimato scenarijų, kadangi švelniausius pokyčius numato RCP2.6, o ekstremalūs temperatūros pokyčiai prognozuojami pagal RCP8.5 scenarijų. Oro temperatūros prognozių skirtumai tarp skirtingų tinklelio raiškos didinimo metodų nebuvo tokie dideli, kaip skirtumai tarp GCM ir RCP. Galima apibendrinti, kad jau artimoje ateityje oro temperatūra, priklausomai nuo pasirinktos scenarijų kombinacijos, gali pakilti nuo 0,8 iki 3,1 °C, o tolimoje ateityje prognozuojami pokyčiai gali svyruoti platesne amplitude nuo 1,1 °C iki ekstremalaus 7,3 °C temperatūros pakilimo.

5.1 lentelė. Vidutinės metinės oro temperatūros nuokrypiai (°C) 2016–2035 ir 2081–2100 m. laikotarpiais nuo 1986–2005 m. normos trijose meteorologijos stotyse, kurių duomenys buvo naudoti Lietuvos upių ateities nuotėkiui prognozuoti

		GFDL		Had		Nor		
SD	RCP	2016–2035	2081–2100	2016–2035	2081–2100	2016–2035	2081–2100	
Telšiai	RAW	2.6	2,5	3,5	2,1	2,5	2,6	3,0
		4.5	2,9	5,0	2,0	3,7	2,7	4,0
		8.5	3,1	7,2	2,3	6,3	2,6	5,9
	BC	2.6	2,2	3,3	1,6	1,6	0,9	1,2
		4.5	2,6	4,9	1,5	1,5	1,0	2,2
		8.5	2,9	7,3	1,8	4,7	0,9	4,1
	CF	2.6	2,1	3,0	1,8	1,7	0,9	1,3
		4.5	2,5	4,6	1,7	2,9	1,1	2,4
		8.5	2,6	6,9	2,0	5,2	0,8	4,3
	QM	2.6	2,2	3,3	1,6	1,5	0,8	1,2
		4.5	2,6	4,8	1,5	2,6	1,0	2,3
		8.5	2,8	7,0	1,8	4,7	0,9	4,1
Dotnuva	RAW	2.6	1,3	2,3	2,2	2,5	1,1	1,5
		4.5	1,7	3,4	2,0	3,8	1,3	2,7
		8.5	2,0	6,3	2,3	6,5	1,2	4,6
	BC	2.6	1,9	3,0	1,8	1,6	0,8	1,1
		4.5	2,3	4,4	1,7	1,5	1,0	2,3
		8.5	2,6	6,7	1,9	5,0	0,8	4,1
	CF	2.6	2,0	3,0	2,1	1,8	0,8	1,1
		4.5	2,4	4,5	1,9	3,0	1,0	2,4
		8.5	2,7	7,1	2,1	5,5	0,8	4,3
	QM	2.6	1,9	2,9	1,8	1,6	0,8	1,1
		4.5	2,3	4,3	1,7	2,7	1,0	2,3
		8.5	2,5	6,4	1,9	4,8	0,9	4,1
Vilnius	RAW	2.6	0,9	2,0	2,5	2,8	2,6	3,0
		4.5	1,3	3,1	2,4	4,1	2,8	4,2
		8.5	1,6	6,1	2,6	6,8	2,6	6,2
	BC	2.6	1,9	3,0	1,8	1,6	0,8	1,2
		4.5	2,3	4,4	1,7	1,5	1,1	2,3
		8.5	2,6	6,8	1,9	5,1	0,9	4,3
	CF	2.6	2,0	3,0	2,1	1,8	0,8	1,2
		4.5	2,4	4,5	1,9	3,0	1,1	2,5
		8.5	2,7	7,2	2,1	5,5	0,8	4,4
	QM	2.6	1,9	2,9	1,8	1,7	0,8	1,2
		4.5	2,2	4,3	1,7	2,8	1,1	2,4
		8.5	2,5	6,5	1,9	5,1	0,9	4,5

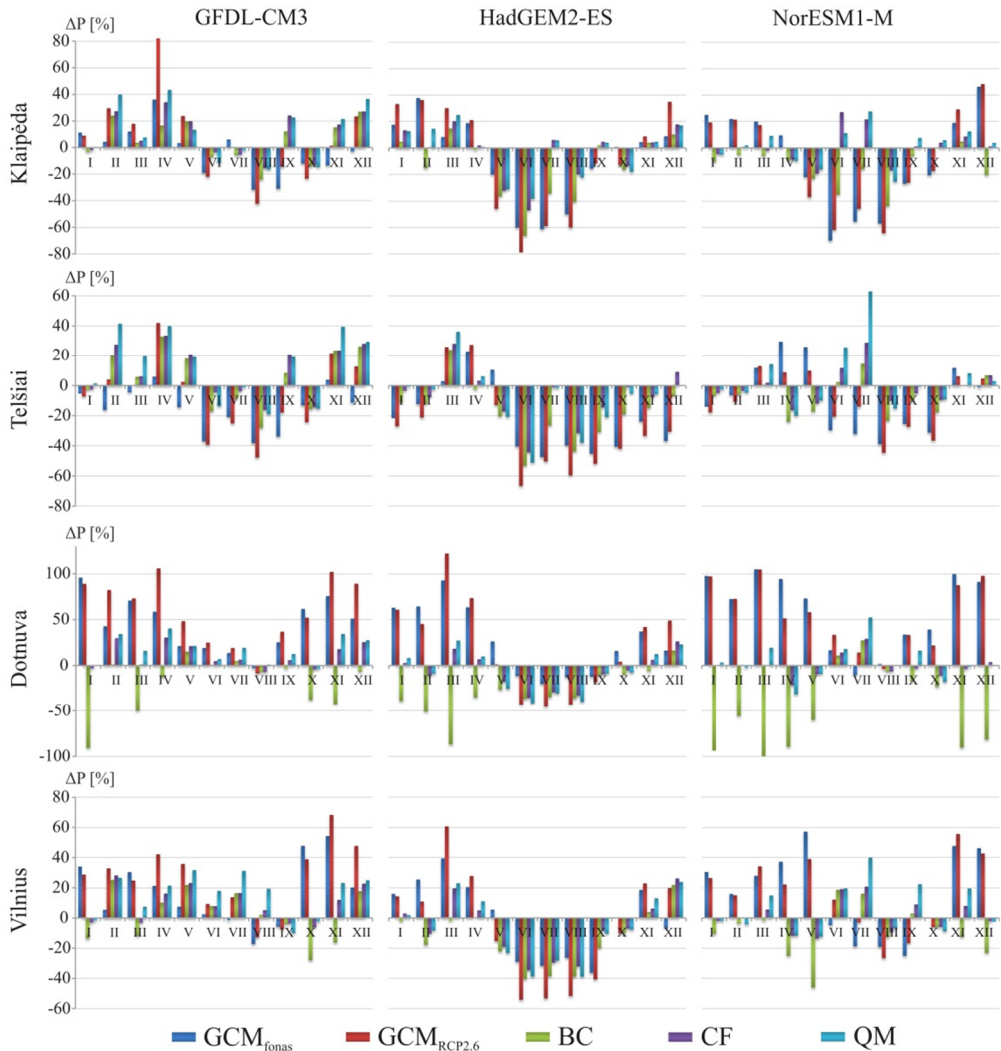
Artimos ateities kritulių kiekis analizuotas pagal du klimato kaitos scenarijus – RCP2.6 ir RCP8.5. Šių scenarijų parinkimą, kaip ir oro temperatūros atveju, lėmė dviejų ribinių scenarijų (optimistinio ir pesimistinio) poveikio vertinimas. Artimoje ateityje skirtumai tarp scenarijų išryškėjo tik atskirais mėnesiais (5.4 pav.). Tačiau nustatyti skirtumai nebuvo esminiai, todėl buvo pasirinktas tik RCP2.6 scenarijus siekiant detaliau išanalizuoti GCM ir tinklelio raiškos didinimo metodų įtaką artimos ateities kritulių prognozėms.



5.4 pav. Globalaus klimato modelių mėnesio kritulių sumos nuokrypiai (%) foniniu laikotarpiu (GCM_{fonas}) ir nuokrypių prognozės netolimoje ateityje pagal du RCP scenarijus (GCM_{RCP}) ir tris tinklelio raiškos didinimo metodus (BC, CF ir QM) lyginant su foninio laikotarpio stebėjimais

Prognozuojant mėnesio kritulių kiekį, išryškėjo pagrindiniai skirtumai tarp GCM. Had modelis prognozavo ypač didelius neigiamus nuokrypius šiltaisiais metų mėnesiais visose MS (5.5 pav.). Nor modelis panašius nuokrypius prognozavo tik Klaipėdos MS. Dotnuvos MS, kuri patenka į Vidurio žemumos klimato rajoną, turėjo kitokio pobūdžio GCM modelių išvesties duomenis negu kitos MS. Atskirais mėnesiais globalaus klimato modeliai foniniu laikotarpiu (1986–2005 m.) parodė ypač didelius kritulių kiekio nuokrypius, kurie pavieniais atvejais viršijo 100 % lyginant su išmatuotais kritulių rodikliais ties šia stotimi. Tokie GCM neapibrėžtumai foniniu laikotarpiu buvo perduoti ir į artimos ateities kritulių kiekio prognozes. Ypač dideli teigiami nuokrypiai buvo nustatyti sausio–balandžio ir lapkričio–gruodžio mėnesiais. Minėtiems atvejams būtina atlikti GCM išvesties duomenų korekcijas tinklelio raiškos didinimo metodais, tačiau ne visi metodai tinkamai pašalina GCM paklaidas. Dotnuvos MS pavyzdžiu, kai skirtumas tarp GCM išvesties duomenų foniniu laikotarpiu ir stebėjimo duomenų yra labai didelis

(~100 %), BC tinklelio raiškos didinimo metodą taikyti netikslinga. BC metodas yra paremtas santykiu tarp stebėtų duomenų ir sumodeliuotų GCM foniniu laikotarpiu. Jeigu foniniu laikotarpiu nuokrypis buvo labai didelis, tada tokiu pačiu santykiu, tik su priešingu ženklu, šis nuokrypis yra perkeliamas ateities prognozėms. Todėl CF ir QM metodų taikymas GCM kritulių korekcijoms yra tinkamesnis. Mažiausią kritulių rezultatų sklaidą parodė Nor modelis Vilniaus MS kartu su CF tinklelio raiškos didinimo metodu.



5.5 pav. Globalaus klimato modelių mėnesio kritulių sumos nuokrypiai (%) foniniu laikotarpiu (GCM_{fonas}) ir nuokrypių prognozės netolimoje ateityje pagal RCP2.6 scenarijų, tris globalaus klimato modelius ($GCM_{\text{RCP2.6}}$) ir tris tinklelio raiškos didinimo metodus (BC, CF ir QM) lyginant su foninio laikotarpio stebėjimais keturiuose meteorologijos stotyse

Tinklelio raiškos didinimo metodai ypač aktualūs kritulių eilučių prognozių adaptavimui konkrečiomis sąlygomis, nes GCM pateiktos nekoreguotos reikšmės (RAW) kai kurioms meteorologijos stotimis rodo didelius kritulių kiekio nuokrypius nuo foninio laikotarpio normos (5.2 lent.). Didžiausius neigiamus nuokrypius pateikia Had klimato modelis, o didžiausius teigiamus – GFDL. Skirtingai nei dėsningas oro temperatūros pasiskirstymas pagal skirtingus RCP klimato scenarijus, kritulių kiekio nuokrypiai neturėjo tokio ryškaus pasiskirstymo. Metiniam kritulių kiekiui gerokai didesnės įtakos turėjo tinklelio raiškos didinimo metodų taikymas, kuriais kritulių eilutės buvo adaptuotos pasirinktoms Lietuvos meteorologijos stotims. Blogiausiai GFDL ir Nor klimato modelių gardelės reprezentavo Dotnuvos meteorologijos stotį. Abu modeliai prognozavo vidutiniškai virš 50 % gausesnius kritulius nei klimato normos laikotarpiu, o tai prieštarauja realioms klimatinėms sąlygoms, todėl taikyti SD metodai padėjo maksimaliai sušvelninti GCM kritulių prognozių neapibrėžtumus. Tačiau Nor modelio pavyzdžiu ties Dotnuvos meteorologijos stotimi BC metodu pakoreguotos kritulių reikšmės suformavo neigiamus nuokrypius, todėl vykdant tolimesnius tyrimus reikėtų apsvarstyti, ar verta naudoti Nor klimato modelio ir BC metodo kombinaciją prognozuojant upių ateities nuotėkį.

5.2. Lietuvos upių nuotėkio prognozė pagal įvairius klimato scenarijus XXI a.

Prieš prognozuojant upių nuotėkį ateityje, labai svarbu įvertinti nuotėkio pasiskirstymo dėsningumus praeityje, todėl pagal TKKK AR5 rekomendacijas 1986–2005 m. laikotarpis buvo pasirinktas kaip fonas, su kuriuo bus lyginamos artimos (2016–2035 m.) ir tolimos (2081–2100 m.) ateities debitų prognozės. Prognozuojant buvo taikyti trys tinklelio raiškos didinimo metodai, kurie skiriasi savo koncepcija. BC ir QM metodai yra paremti santykiu tarp stebėtų duomenų ir GCM sumodeliuotų foniniu laikotarpiu, darant prielaidą, kad GCM išvesties duomenų paklaida foniniu laikotarpiu turės analogišką poveikį ateities prognozėms. Todėl pokyčio faktorius iš foninio laikotarpio yra perkeliamas į ateities prognozes. Siekiant homogeniškai lyginti prognozuojamus pokyčius, BC ir QM metodais pakoreguoti meteorologiniai GCM išvesties duomenys, buvo panaudoti foniniam laikotarpiui modeliuoti. Sumodeliuotos nuotėkio reikšmės, BC metodu pakoregavus meteorologinius parametrus, foniniu laikotarpiu tampa atskaitos tašku lyginant skirtumus tarp RCP scenarijų (2.6, 4.5 ir 8.5), kur prognozės koreguotos tuo pačiu BC metodu. Analogiška situacija ir taikant QM metodą. Šiuo metodu koreguoti GCM išvesties duomenų meteorologiniai parametrai foniniu laikotarpiu naudojami modeliuoti foninį nuotėkį bei su juo yra lyginamos RCP scenarijų prognozuotos nuotėkio reikšmės pagal tą patį QM metodą. Kiek kitokios koncepcijos yra CF metodas, kurio metodikos pagrindą sudaro pokyčio faktorius tarp GCM prognozės ateityje ir GCM simuliacijos foniniu laikotarpiu. Galiausiai šis pokytis įvedamas į stebėtus duomenis foniniu laikotarpiu ir tokiu būdu sudaroma GCM prognozė yra paremta tikrais stebėjimais. Todėl CF ateities nuotėkio prognozių lyginimas vyksta su foninio laikotarpio nuotėkio modeliavimo rezultatais, apskaičiuotais naudojant stebėtuosius meteorologinius duomenis.

5.2 lentelė. Metinio kritulių kiekio nuokrypiai (%) 2016–2035 ir 2081–2100 m. laikotarpiais nuo 1986–2005 m. normos trijose meteorologijos stotyse, kurių duomenys buvo naudoti Lietuvos upių ateities nuotėkiui prognozuoti

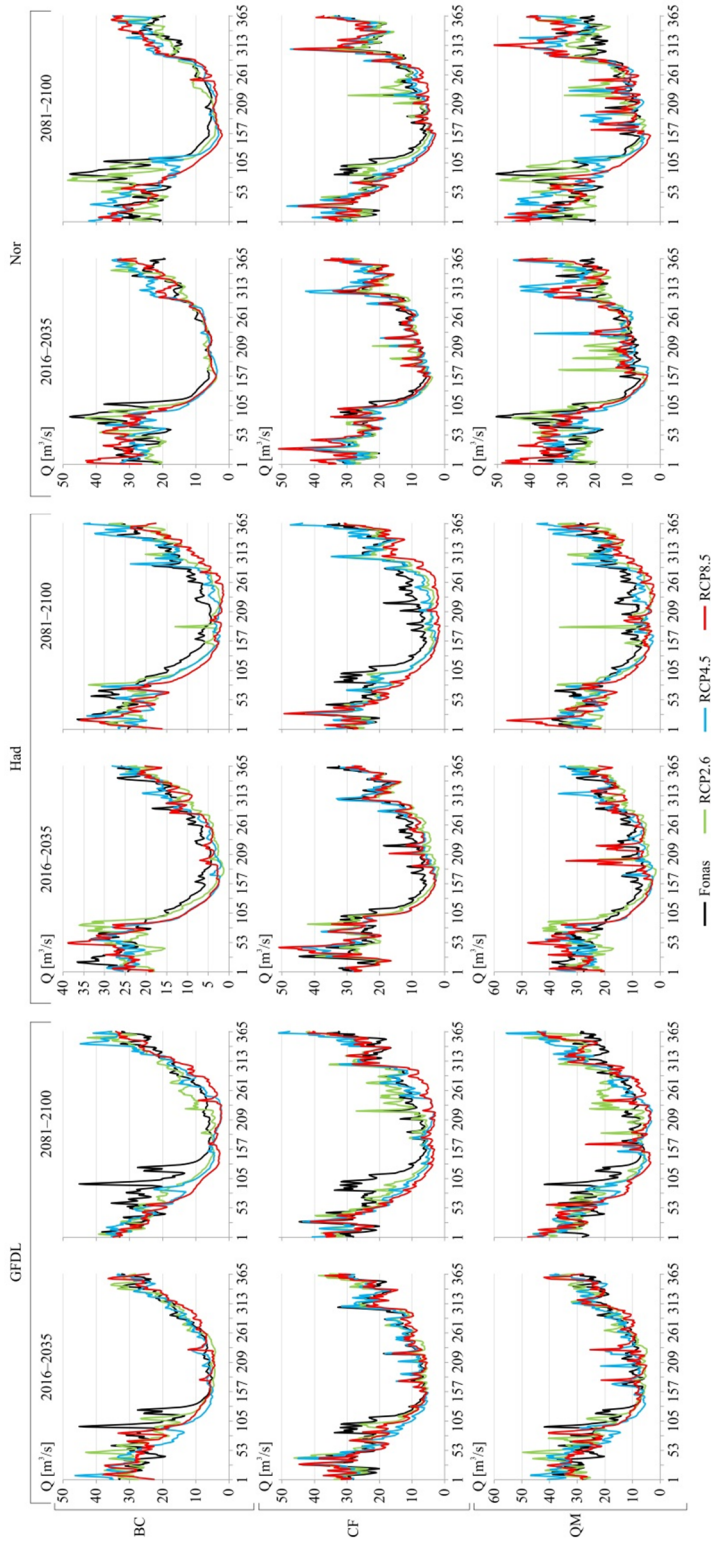
		GFDL		Had		Nor		
SD	RCP	2016– 2035	2081– 2100	2016– 2035	2081– 2100	2016– 2035	2081– 2100	
Telšiai	RAW	2.6	-11,0	-5,3	-34,5	-34,0	-14,4	-10,4
		4.5	-7,5	-6,9	-31,7	-28,1	-9,6	-6,6
		8.5	-10,6	-6,8	-30,8	-30,3	-9,3	-4,2
	BC	2.6	2,0	9,8	-21,1	-24,6	-6,4	-2,3
		4.5	6,7	6,6	-16,2	-16,4	-2,1	1,2
		8.5	2,6	6,0	-15,4	-21,1	-1,5	3,2
	CF	2.6	7,3	15,8	-9,3	-13,1	-0,2	4,2
		4.5	12,5	11,6	-3,3	-3,9	4,4	7,5
		8.5	8,1	10,7	-2,5	-10,2	4,9	9,2
	QM	2.6	9,8	25,4	-11,5	-14,5	5,2	10,9
		4.5	18,0	19,2	-3,8	-4,3	9,4	16,7
		8.5	12,2	22,4	-0,5	-7,3	11,6	22,6
Dotnuva	RAW	2.6	51,2	59,8	8,1	12,1	47,8	56,4
		4.5	58,1	63,0	10,4	18,9	52,5	59,7
		8.5	49,1	55,3	14,7	17,7	53,5	59,6
	BC	2.6	-15,3	-8,8	-28,2	-26,5	-37,6	-34,5
		4.5	-9,5	-13,4	-23,2	-22,0	-38,4	-38,3
		8.5	-18,0	-17,8	-19,1	-28,0	-38,0	-40,1
	CF	2.6	9,1	16,4	-10,8	-10,7	1,2	6,5
		4.5	15,3	13,9	-6,9	-5,3	2,8	6,0
		8.5	7,0	9,5	-2,3	-10,0	3,3	4,9
	QM	2.6	15,9	29,2	-11,8	-10,8	6,8	16,7
		4.5	22,4	27,6	-7,9	-4,4	7,0	14,8
		8.5	13,0	25,1	-3,2	-6,7	9,6	16,0
Vilnius	RAW	2.6	23,0	27,0	-13,6	-10,4	12,2	20,5
		4.5	30,6	34,0	-11,7	-5,0	14,2	22,2
		8.5	22,7	25,7	-8,3	-5,9	16,0	15,2
	BC	2.6	2,9	6,7	-17,3	-19,2	-6,6	1,0
		4.5	10,0	7,4	-13,6	-13,6	-6,4	-0,7
		8.5	1,8	1,6	-9,5	-17,7	-4,4	-7,0
	CF	2.6	9,3	13,2	-10,2	-12,0	2,6	10,7
		4.5	16,6	14,4	-6,4	-6,3	3,2	9,2
		8.5	8,3	8,8	-1,7	-10,9	4,9	2,5
	QM	2.6	16,0	25,2	-10,9	-12,3	7,5	21,4
		4.5	25,7	25,6	-8,1	-5,6	10,9	18,8
		8.5	16,6	23,4	-2,8	-9,5	11,2	10,1

Upių nuotėkiui prognozuoti buvo pasirinktos trys upės: Minija ties Kartena (Vakarų Lietuva), Nevėžis ties Dasiūnais (Vidurio Lietuva) ir Šventoji ties Ukmergė (Pietryčių Lietuva). Kiekviena iš šių pasirinktų upių reprezentuoja Lietuvos hidrologinį rajoną, kuriame ji yra. Prognozės buvo sudarytos taikant tris GCM, RCP ir SD. Prognozuojant Minijos nuotėkį dviem XXI a. laikotarpiams, išryškėja pasirinktų globalaus klimato modelių prognozių skirtumai (5.6 pav.). Artimoje ateityje GFDL modelis pagal įvairius klimato scenarijus ir tinklelio raiškos didinimo metodus prognozavo vidutiniškai 3,7 % mažesnę metinę Minijos nuotėkį lyginant su foniniu laikotarpiu, o Had modelio išvesties prognozės – vidutiniškai iki 12,9 % mažesnę nuotėkį. Mažiausi pokyčiai buvo pagal Nor modelio duomenų rezultatus, kai sumodeliuotas artimos ateities nuotėkis vidutiniškai buvo vos 0,5 % didesnis už foninio laikotarpio normą (4.21 pav.). Tolimoje ateityje vidutinio metinio nuotėčio pokyčiai kiek didesni ir pagal GCM prognozuojama, kad jie gali mažėti nuo 0,3 % (Nor) iki 20,6 % (Had).

Artimos ateities nuotėčio prognozės atskirais metų sezonais parodė, kad GFDL ir Nor modeliai Minijoje ties Kartena prognozuoja didžiausią nuotėčio persiskirstymą tarp žiemos ir pavasario sezonų, nes žiemą sumodeliuotas 10,0 % (GFDL) ir 9,9 % (Nor) nuotėčio padidėjimas, o pavasarį – atitinkamai 27,3 ir 20,1 % sumažėjimas. 2081–2100 m. laikotarpiu nuotėčio skirtumai tarp sezonų buvo kiek įvairesni, nes pagal GFDL modelį žiemos sezono nuotėkis turėtų vidutiniškai padidėti iki 16,9 %, bet pavasario – sumažėti net iki 46,0 %. Panaši tendencija yra ir pagal Nor modelį: žiemos nuotėčio padidėjimas vidutiniškai gali siekti 12,1 %, o pavasario sumažėjimas – 29,6 %. Pagal Had modelį prognozuota visų sezonų nuotėčio mažėjimo tendencija – nuo 5,5 % žiemos sezonu iki 43,0 % – vasarą. Vidutinis rudens nuotėčio pagausėjimas prognozuotas tik pagal Nor modelį nuo 6,1 % (artimoje ateityje) iki 18,6 % (tolimoje ateityje).

RCP scenarijų įtaka galutinėms Minijos nuotėčio prognozėms taip pat reikšminga. Artimoje ateityje švelniausiu laikomas RCP2.6 scenarijus, kartu su Had ir Nor modeliais, prognozuoja didžiausią nuotėčio sumažėjimą. RCP įtaka padidėja tolimoje ateityje, kai skirtumai tarp RCP scenarijų žymiai išauga. Tolimos ateities GFDL modelio nuotėčio prognozės pagal RCP svyravo nuo 2,5 % padidėjimo (RCP2.6) iki 19,7 % sumažėjimo (RCP8.5). Had modelio prognozės taip pat numato, kad didžiausias sumažėjimas (-29,7 %) yra pagal RCP8.5 scenarijų.

Priklausomai nuo taikytų tinklelio raiškos didinimo metodų, Minijos nuotėčio prognozės variavo plačiu diapazonu (5.6 pav.). Tiek artimoje, tiek ir tolimoje ateityje nuotėčio prognozės priklausė nuo tinklelio raiškos didinimo metodų taikymo, o mažiausio nuotėčio prognozės buvo sudarytos pagal BC metodą kartu su visais GCM. Artimoje ateityje nuotėčio prognozė, paremta BC metodu, vidutiniškai svyravo nuo -3,9 % pagal Nor iki -16,1 % pagal Had modelius. Tolimoje ateityje skirtumai didėjo ir prognozuojamas nuotėčio pokytis pagal BC metodą buvo jau -6,3 % (Nor), -16,0 % (GFDL) ir -22,8 % (Had). Didžiausio vidutinio metinio nuotėčio prognozė buvo sumodeliuota pagal QM tinklelio raiškos didinimo metodą. Nor modelis, kartu su QM metodu, pagal skirtingus RCP klimato scenarijus prognozavo vidutiniškai 5,0 % nuotėčio padidėjimą artimoje ateityje ir 8,8 % padidėjimą tolimoje (5.6 pav.).

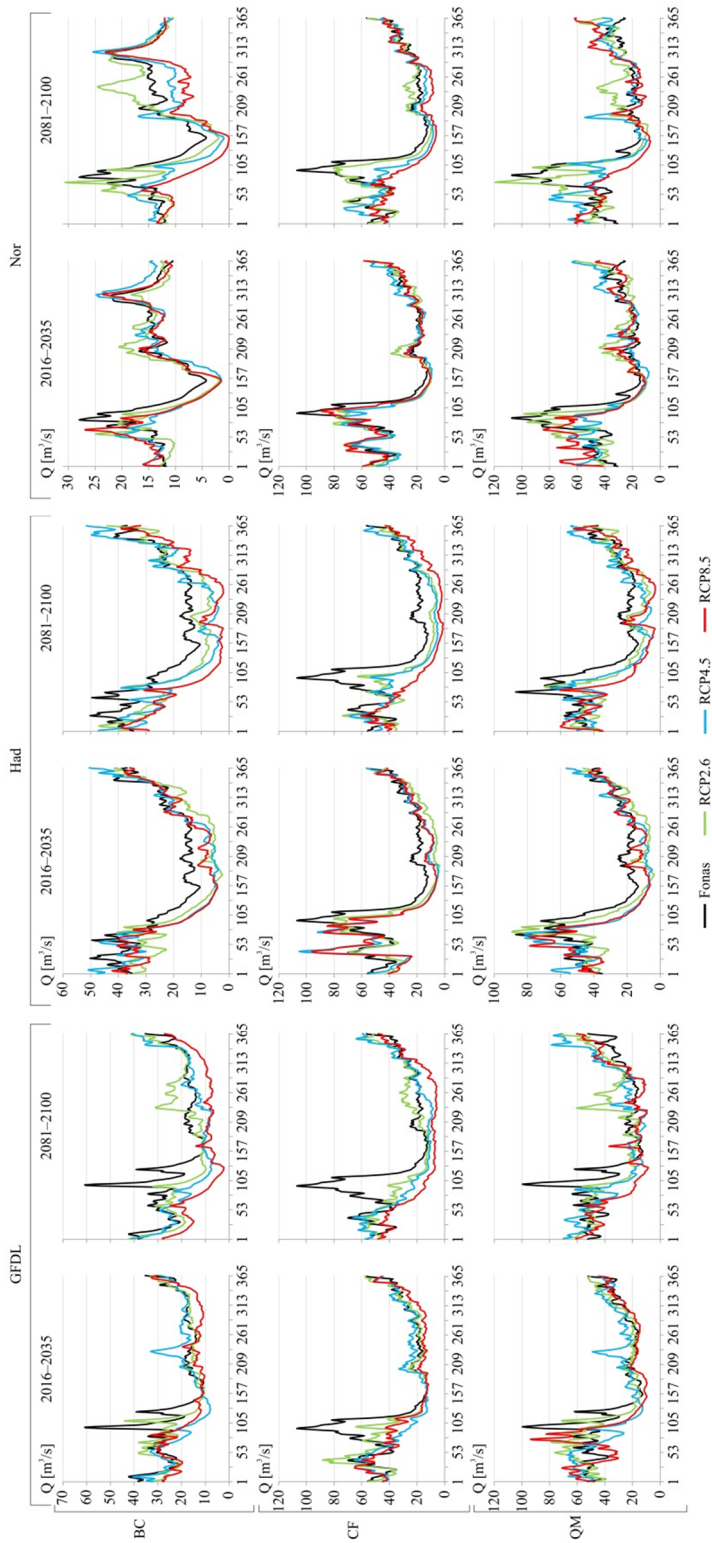


5.6 pav. Prognozuojamas Minijos ties Kartena nuotėkis (Q) pagal GFDL–CM3 (GFDL), HadGEM–2ES (Had) ir NorESM1–M (Nor) globalaus klimato modelius, tris RCP scenarijus (2.6, 4.5 ir 8.5) ir tris tinkamo raiškos dĖdinimo metodus (BC, CF ir QM) 2016–2035 ir 2081–2100 m. laikotarpiais

Nevėžio ateities prognozių modeliavimo rezultatai savo dėsningumais skyrėsi nuo Minijos upės ir buvo panašūs į Vidurio Lietuvos upėms būdingą hidrografą su aiškiai išreikštu pavasario potvyniu, vasaros nuosėkio laikotarpiu ir rudens bei žiemos sezonų vandeningumo padidėjimu. Tačiau prognozuojami Nevėžio ateities nuotėkio pokyčiai parodė kitokias tendencijas lyginant su foniniu laikotarpiu (5.7 pav.). Artimoje ateityje pagal GFDL modelį nustatyta, kad metinis nuotėkis vidutiniškai sumažės 9,6 %, o tolimoje ateityje – 18 % (4.15, 4.16 pav.). Sezoniniai GFDL modelio prognozių skirtumai pasižymi didesniu nuotėkiu žiemos metu ir smarkiai sumažėjusiu nuotėkiu pavasarį. Artimoje ateityje žiemos sezono upės debitas turėtų padidėti vidutiniškai 4,3 %, o tolimoje ateityje didės iki 9,2 %. Toks vandeningumo persiskirstymas vyksta dėl pavasario nuotėkio, kuris pagal skirtingus scenarijus gali mažėti nuo 27,6 iki 76,1 % XXI a. pabaigoje. Had modelio išvesties duomenys numato vidutinio metinio debito sumažėjimą vidutiniškai nuo 20,4 % (artimoje ateityje) iki 29,1 % (tolimoje ateityje), tačiau, žvelgiant į atskirus sezonus, skirtumai yra dar didesni. Šio modelio prognozės ypač pesimistiškos vasaros sezonui, kurio metu 2016–2035 m. debitai gali sumažėti nuo 26,3 iki 64,3 %, o tolimoje ateityje net iki 75,6 %. Nevėžyje ties Dasiūnais nežymūs nuotėkio pokyčiai prognozuojami taikant Nor modelio išvesties duomenis, pagal kuriuos vidutinis metinis debitas gali vidutiniškai sumažėti 4,5 % artimoje ateityje ir 10,3 % – tolimoje ateityje. Pažymėtina, kad Nor ir GFDL modeliai prognozuoja rudens sezono debitų padidėjimą, o pagal atskirus scenarijus XXI a. pabaigoje numatomas iki 11,1 % didesnis metinis nuotėkis.

2016–2035 m. ir 2081–2100 m. laikotarpiu Nevėžio nuotėkio prognozės priklausė ir nuo RCP klimato scenarijų. Artimoje ateityje GFDL modelis didžiausius nuotėkio pokyčius prognozavo pagal RCP8.5 (-18,2 %). Had modelio artimos ateities tendencijos rodė vidutiniškai 25,9 % metinio Nevėžio upės nuotėkio mažėjimą pagal RCP2.6 ir 16,7 % pagal RCP4.5. Tolimoje ateityje didžiausią nuotėkio sumažėjimą (40,9 %) prognozavo Had modelis kartu su RCP8.5 scenarijumi. Nor modelio išvesties duomenų prognozė pagal RCP scenarijus buvo panaši į GFDL modelio, tik tolimoje ateityje pagal RCP2.6 tikėtinas 3,5 % Nevėžio debito didėjimas.

Prognozuojant Nevėžio debitus artimoje ir tolimoje ateityje pagal pasirinktus GCM, nustatyta skirtinga tinklelio raiškos didinimo metodų įtaka nuotėkio prognozėms (5.7 pav.). Kaip ir Minijos upės atveju, mažiausias nuotėkio reikšmes Nevėžio upėje lėmė BC metodo taikymas. BC metodo pakoreguotų reikšmių prognozės svyravo nuo -6,3 % (Nor) iki -23,9 % (Had) artimoje ateityje ir nuo -15,7 % (Nor) iki -30,0 % (Had) tolimoje ateityje lyginant su foniniu laikotarpiu. Mažiausi pokyčiai prognozuoti remiantis QM tinklelio raiškos didinimo metodu. GFDL ir Nor modelių išvesties rezultatai, pakoreguoti pagal QM metodą, tolimoje ateityje vidutiniškai prognozavo tik 2,4 % (GFDL) ir 0,1 % (Nor) vidutinio metinio debito sumažėjimą lyginant su foninio laikotarpio vidurkiu. CF metodo taikymas Nevėžiui ties Dasiūnais, artimoje ateityje prognozavo vidutinį nuotėkio sumažėjimą nuo 5,3 % pagal Nor modelį iki 19,0 % pagal Had ir atitinkamai 14,9 ir 33,7 % mažesnę debitą 2081–2100 m.

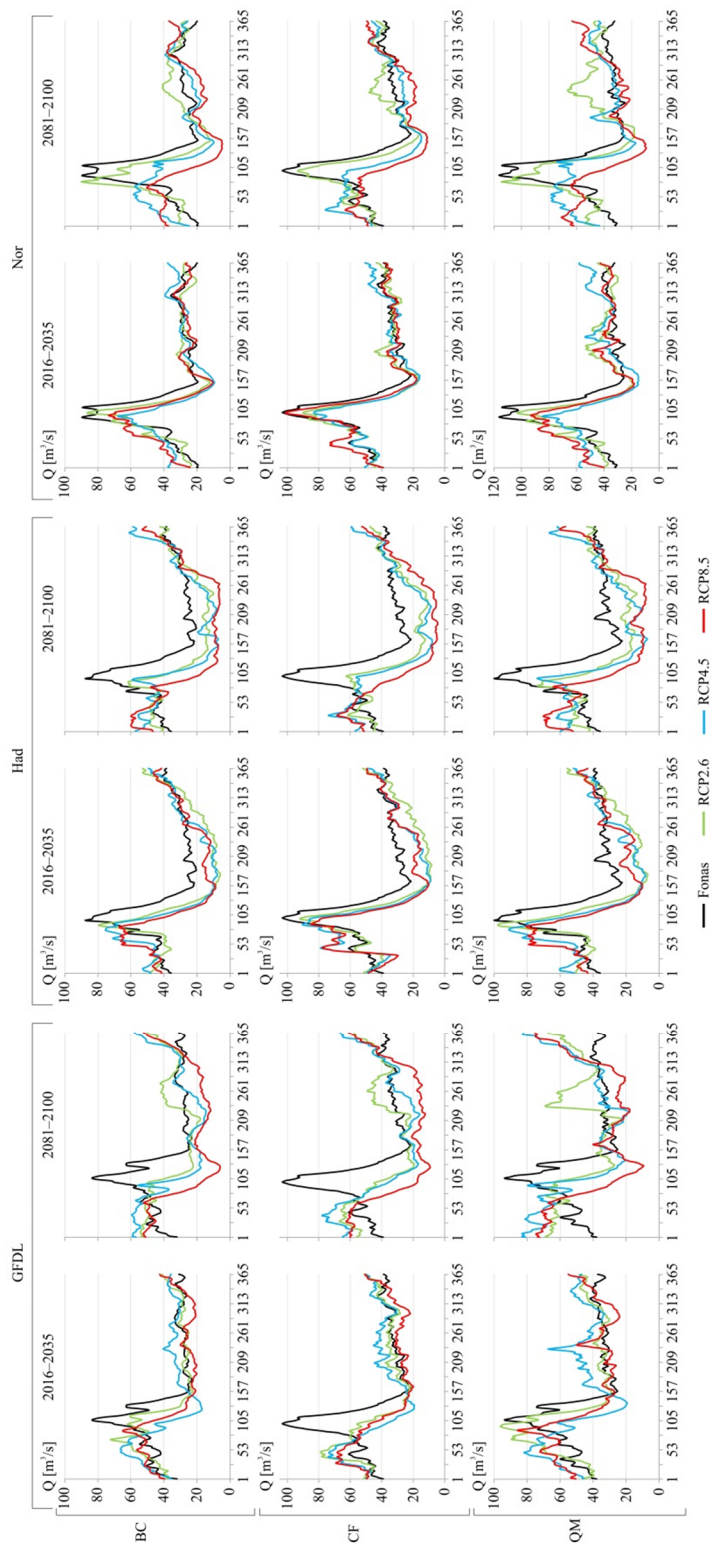


5.7 pav. Prognozuojamas Nevėžio ties Dasiūnais nuotėkis (Q) pagal GFDL–CM3 (GFDL), HadGEM–2ES (Had) ir NorESM1–M (Nor) globalaus klimato modelius, tris RCP scenarijus (2.6, 4.5 ir 8.5) ir tris tinkamo raiškos didinimo metodus (BC, CF ir QM) 2016–2035 ir 2081–2100 m. laikotarpiais

Remiantis Šventosios ties Ukmerge nuotėkio prognozėmis, sudarytomis pagal skirtingus scenarijus, matomi metinio nuotėkio pasikeitimai ir jo persiskirstymo tendencijos tarp sezonų (5.8 pav.). Artimoje ateityje pagal GFDL ir Nor modelių išvesties duomenis vidutinio metų nuotėkio pokyčiai turėtų būti patys mažiausi – vidutiniškai 3,8 % (GFDL) ir 3,5 % (Nor) mažesni lyginant su foniniu laikotarpiu. Had modelis jau artimoje ateityje numato 18,7 % mažesnę metų debitą. 2081–2100 m. prognozuojami nuotėkio pokyčiai dar labiau išryškėja, nes pagal Had modelį nuotėkis gali sumažėti 25,1 %. Švelniausios tendencijos prognozuojamos pagal Nor modelį XXI a. pabaigai, kai nuotėkis vidutiniškai gali sumažėti vos 6 %, o pagal atskirus scenarijus ir nepakisti. Ryškiausi Šventosios nuotėkio pokyčiai numatomi tarp skirtingų sezonų. GFDL ir Nor modeliai prognozuoja atitinkamai 27,1 ir 19,7 % sumažėjusį pavasario nuotėkį, tačiau 13,7 ir 6,9 % padidėjusį žiemos nuotėkį jau artimoje ateityje. Tolimoje ateityje šis skirtumas dar labiau išauga, nes iki 45,5 % (GFDL) ir 31,4 % (Nor) sumažėja vidutinis pavasario debitas ir atitinkamai 32,5 % ir 18,9 % padidėja nuotėkis žiemą lyginant su foninio laikotarpio norma. Pagal Had klimato modelį numatomos pesimistiškos prognozės Šventosios upei vasaros sezonu, kai 2016–2035 m. vidutinis vasaros debitas gali sumažėti per pusę ir siekti vos 51 % foninio laikotarpio normos. Tolimoje ateityje Had modelio prognozės reikšmingus pokyčius numato ne tik vasaros sezonu (-52,4 %), bet ir pavasario, kai nuotėkis vidutiniškai gali sumažėti 45,6 %.

Šventosios nuotėkio prognozių vidutiniai skirtumai tarp skirtingų RCP scenarijų artimoje ateityje nebuvo dideli ir neviršijo 10 %. Mažiausius pasikeitimus prognozavo GFDL modelis kartu su RCP4.5 klimato scenarijumi, kuris numato vos 0,5 % nuotėkio padidėjimą, tačiau tolimoje ateityje šis skirtumas išauga ir prognozuojamas 5,8 % sumažėjimas lyginant su foninio laikotarpio norma, o GFDL su RCP8.5 prognozuoja net 25,3 % sumažėjimą. Akivaizdu, kad artimoje ateityje nėra vieno dominuojančio RCP scenarijaus, kuris nustatytų aiškias kaitos tendencijas kartu su pasirinktais globalaus klimato modeliais, tačiau tolimoje ateityje pesimistišku laikomas RCP8.5 prognozuoja drastiškus Šventosios nuotėkio pasikeitimus, kurie lemia didžiausią nuotėkio mažėjimą. Nor kartu su RCP2.6 yra vienintelė klimato modelio ir scenarijaus kombinacija, numatanti vidutinio metinio nuotėkio padidėjimą (5,7 %) Šventosios upėje XXI a. pabaigai.

Tinklelio raiškos didinimo metodai taip pat turėjo įtakos galutinėms Šventosios vidutinio metinio nuotėkio prognozėms. GFDL ir Nor globalaus klimato modeliai, kartu su QM metodu, tiek artimoje, tiek ir tolimoje ateityje vidutiniškai prognozavo nuo 0,5 iki 4,4 % nuotėkio didėjimą, nors likusieji metodai – tik jo mažėjimą. Had modelis kartu su visais tinklelio raiškos didinimo metodais numato vidutiniškai 17,2–19,4 % mažesnę debitą artimoje ateityje ir 21,1–29,6 % mažesnę tolimoje ateityje. Šventosios ties Ukmerge prognozių metiniai hidrografai rodo, kad tiek artimoje, tiek ir tolimoje ateityje mažiausi nuokrypiai stebimi naudojant Nor klimato modelį kartu su CF metodu (5.8 pav.).



5.8 pav. Prognozuojamas Šventosios ties Ukmerge nuotėkis (Q) pagal GFDL–CM3 (GFDL), HadGEM–2ES (Had), NorESM1–M (Nor) globalaus klimato modelius, tris RCP scenarijus (2.6, 4.5 ir 8.5) ir tris tinkelio raiškos didinimo metodus (BC, CF ir QM) 2016–2035 ir 2081–2100 m. laikotarpiais

5.3. Lietuvos upių potvynių prognozė pagal įvairius klimato scenarijus XXI a.

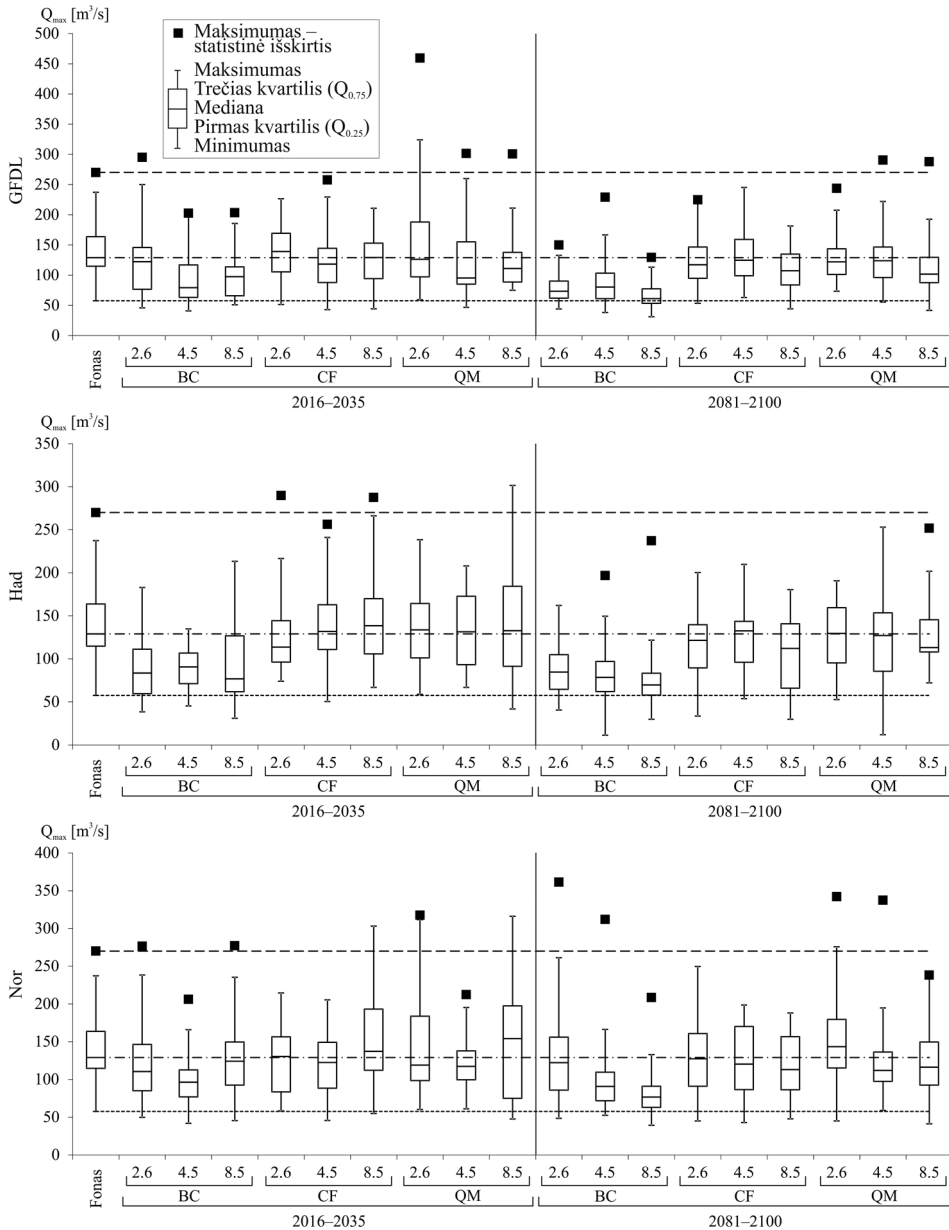
5.3.1. Pavasario potvynių maksimalių debitų prognozės analizė pagal įvairius klimato scenarijus

Remiantis artimos ir tolimos ateities temperatūros ir kritulių prognozėmis pagal tris globalaus klimato modelius (GFDL, Had ir Nor), tris RCP scenarijus (2.6, 4.5 ir 8.5) bei tris tinklelio raiškos didinimo metodus (BC, CF ir QM), sumodeliuoti Minijos, Nevėžio ir Šventosios upių paros debitai, iš kurių buvo išrinktos maksimalių pavasario potvynių debitų reikšmės 2016–2035 ir 2081–2100 m. laikotarpiais bei palygintos su 1986–2005 m. (foninis laikotarpis) (5.9–5.11 pav.). Pavasario potvynių prognozės buvo sudarytos remiantis 27 skirtingomis globalaus klimato modelių, klimato scenarijų ir tinklelio raiškos didinimo metodų kombinacijomis, kurios įvardijamos kaip scenarijai ir trumpinamos nuosekliai pagal trijų minėtųjų kintamųjų koduotes, pvz. GFDL2.6BC arba Had4.5CF.

Minijoje ties Kartena prognozuojami pavasario potvynių debitai jau artimoje ateityje pagal daugumą scenarijų yra linkę mažėti (5.9 pav.). GFDL modelio pavasario potvynių prognozės numato medianos mažėjimą pagal visus scenarijus, išskyrus GFDL2.6CF ir GFDL8.5CF artimos ateities laikotarpiu (5.9 pav.). Ypač didelis debitų sumažėjimas stebimas BC metodo korekcija paremtomis prognozėmis 2081–2100 m. laikotarpiu. GFDL8.5BC prognozuoja, kad pavasario potvynių mediana gali priartėti prie foninio laikotarpio minimumo ($57,6 \text{ m}^3/\text{s}$), o maksimalūs potvyniai gali vos siekti foninio laikotarpio medianą ($129 \text{ m}^3/\text{s}$). Mažiausius maksimalius debitus prognozuoja BC ir CF metodai artimoje ateityje ir BC metodas – tolimoje ateityje. GFDL klimato modelių paremtos ekstremalių potvynių prognozės rodė tap pat labai dideles reikšmes, kurios savo dydžiu viršijo ir foninio laikotarpio maksimumą ($270 \text{ m}^3/\text{s}$). Didžiausią $460 \text{ m}^3/\text{s}$ debitą 2016–2035 m. prognozavo GFDL2.6QM scenarijus. Naudojant QM metodą, maksimalių potvynių prognozių dydžiai viršija foninio laikotarpio maksimumą, pvz. pagal GFDL4.5QM ir GFDL8.5QM artimoje ir tolimoje ateityje.

Had modelio išvesties duomenimis paremtos pavasario potvynių prognozės pasižymėjo mažai pakitusia mediana, tačiau sumažėjusiomis ekstremaliomis reikšmėmis (5.9 pav.). 2016–2035 m. laikotarpiu ženkliesni potvynių medianos pokyčiai numatomi scenarijų, kurių tinklelio raiškos didinimo metodas buvo BC. Didesnių debitų, kurie viršytų foninio laikotarpio maksimumą, prognozės artimoje ateityje gautos pagal Had2.6CF ir Had8.5CF bei Had8.5QM, kai maksimalus pavasario potvynio debitas buvo nuo 18 iki $32 \text{ m}^3/\text{s}$ didesnis nei foniniu laikotarpiu ($270 \text{ m}^3/\text{s}$). Mažiausius pavasario potvynio pikus prognozavo Had8.5BC ir Had8.5QM scenarijai artimoje ateityje bei Had4.5BC ir Had4.5QM – tolimoje, nors pesimistiškomis prielaidomis jie gali siekti vos $12 \text{ m}^3/\text{s}$. Optimaliausias ir arčiausiai foninio laikotarpio normos esančias sąlygas prognozavo Nor globalaus klimato modelis (5.9 pav.). Pagal skirtingus scenarijus mediana buvo artima foninio laikotarpio normai, o pastebimai mažesnes reikšmes prognozavo Nor4.5BC ir Nor8.5BC scenarijai. Nor modelio minimalių pavasario potvynio Q_{max} prognozių rezultatai pasižymėjo pakankamai aukštomis reikšmėmis lyginant su GFDL ir Had klimato modelių prognozėmis. Netgi remiantis pesimistiškiausiais scenarijais,

Had4.5BC artimoje ateityje ir Had8.5BC bei Had8.5QM tolimoje ateityje, mažiausias Q_{max} sumažėja 18 m^3/s lyginant su foniniu laikotarpiu. Ekstremaliai aukštos reikšmės prognozuojamos pagal Nor2.6QM ir Nor8.5QM 2016–2035 m., o tolimoje ateityje – pagal Nor2.6QM ir Nor4.5QM scenarijus.

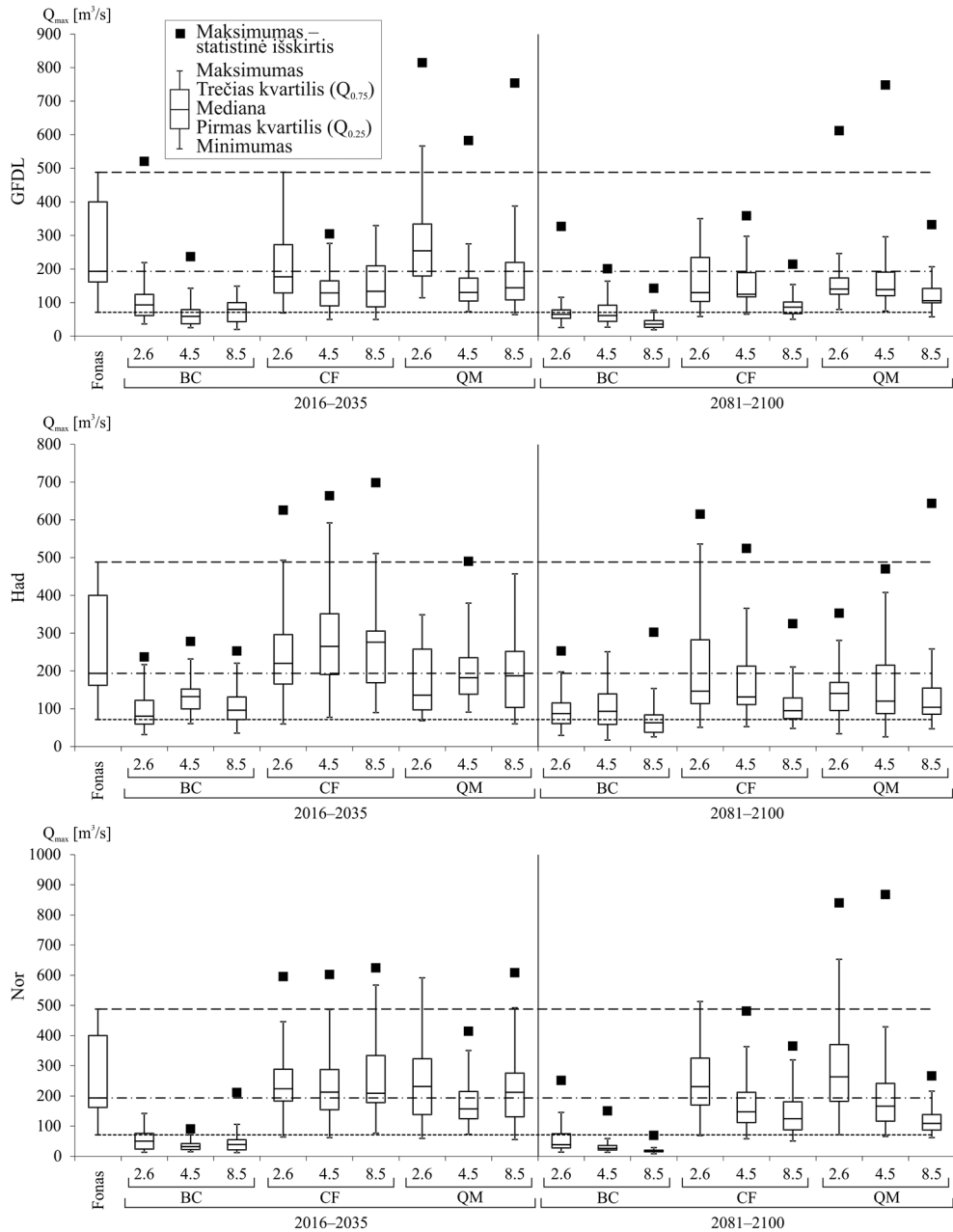


5.9 pav. Minijos ties Kartena pavasario potvynių maksimalių debitų (Q_{max} , m^3/s) prognozės pagal GFDL–CM3 (GFDL), HadGEM–2ES (Had) ir NorESM1–M (Nor) globalaus klimato modelius, tris RCP scenarijus (2.6, 4.5 ir 8.5) ir tris tinklelio raiškos didinimo metodus (BC, CF ir QM) 2016–2035 ir 2081–2100 m. laikotarpiais

Kitokia situacija prognozuota Nevėžio upėje ties Dasiūnais. Šios upės ateities ekstremalių pavasario potvynių prognozės, pagal skirtingus globalaus klimato modelius ir sukurtus scenarijus, svyravo plačia amplitude (5.10 pav.). Pagal GFDL klimato modelio išvesties duomenų prognozes, artimoje ateityje tik pagal vieną scenarijų (GFDL2.6QM) prognozuojamų pavasario potvynio maksimalių debitų mediana viršijo foninio laikotarpio normą ($194 \text{ m}^3/\text{s}$), o tolimoje ateityje pagal visus scenarijus prognozuojami vidutiniškai mažesni maksimalūs debitai (5.10 pav.). Nevėžyje mažiausių debitų prognozėmis pasižymėjo scenarijai, kuriems buvo taikytas BC tinklelio raiškos didinimo metodas. Tiek artimoje, tiek ir tolimoje ateityje Had2.6, 4.5 ir 8.5BC scenarijai nenumato potvynių, kadangi jų mediana yra arti arba žemiau foninio laikotarpio mažiausių potvynių Q_{max} ($71,2 \text{ m}^3/\text{s}$), o ateities maksimalūs potvyniai retais atvejais viršija foninio laikotarpio medianą ($194 \text{ m}^3/\text{s}$). Ypač aukštas maksimalių debitų reikšmės prognozuoja GFDL modelis kartu su QM tinklelio raiškos didinimo metodu ir visais RCP scenarijais 2016–2035 m. ir pagal RCP2.6 bei 4.5 2081–2100 m. Pagal skirtingus scenarijus, nuo 520 iki $814 \text{ m}^3/\text{s}$ prognozuojami maksimalūs debitai patvirtina ekstremalių pavasario potvynių susiformavimo tikimybę ateityje. Had modelio prognozių rezultatai pasižymi ne tokia įvairia pavasario potvynių maksimalių debitų sklaida tarp skirtingų scenarijų nei GFDL modelio rezultatai (5.10 pav.). Tačiau mažiausių debitų rezultatus prognozuoja BC metodu paremti scenarijai. Tuo atveju, nepriklausomai nuo RCP scenarijaus, Q_{max} buvo gerokai mažesni lyginant su 1986–2005 m. laikotarpiu. Pagal Had2.6CF scenarijų, 2016–2035 m. nors ir išauga maksimalių debitų mediana, tačiau svyravimų diapazonas išlieka panašus į foninio laikotarpio normą. Taip pat minėtasis scenarijus prognozuoja ir vieną ekstremaliai didelį debitą ($626 \text{ m}^3/\text{s}$). Didesnius pavasario potvynių maksimumus prognozavo tuo pačiu CF metodu paremti scenarijai – Had4.5CF ($664 \text{ m}^3/\text{s}$) ir Had8.5CF ($698 \text{ m}^3/\text{s}$), kai foniniu laikotarpiu maksimalus Q_{max} siekė $488 \text{ m}^3/\text{s}$. Tolimoje ateityje didžiausias debitas ($643 \text{ m}^3/\text{s}$) numatomas pagal Had8.5QM scenarijų. Po jo eina Had2.6CF ir Had4.5CF scenarijų Q_{max} reikšmės, kurios atitinkamai yra 615 ir $524 \text{ m}^3/\text{s}$. Nepaisant pavienių ekstremalių reiškinų prognozės, potvynių dydis ir jų mažiausios reikšmės yra linkusios mažėti, ką parodo Had modelio suprognuozuotų debitų mediana ir minimalios potvynių reikšmės.

Nevėžio ties Dasiūnais drastiškos prognozės sudarytos pagal Nor modelį ir BC tinklelio raiškos didinimo metodą (5.10 pav.). Jeigu Had modelis, kartu su BC metodu, prognozavo itin mažas reikšmes, tai Nor modelis, kartu su BC metodu, pateikia visiškai realybės neatitinkančias Q_{max} prognozes. Todėl Nor klimato modelio ir BC metodo kombinacija nenaudotina Nevėžio (Vidurio Lietuvos hidrologinis rajonas) upės ekstremumams prognozuoti. Artimoje ateityje pagal kitus scenarijus, tokius kaip Nor2.6, 4.5 ir 8.5CF, pavasario potvynių maksimalūs debitai svyruoja foninio laikotarpio ribose, tik pačios ekstremaliausios reikšmės viršija jį. Tolimoje ateityje pagal Nor modelį maksimalių debitų mediana padidėja tik pagal Nor2.6CF ir QM scenarijus, o pagal Nor2.6 ir Nor 4.5QM prognozuojami ypač ekstremalių potvynių Q_{max} gali siekti atitinkamai 840 ir $867 \text{ m}^3/\text{s}$. Tuo tarpu minimalūs potvyniai praktiškai nesikeičia ir yra artimi foniniam laikotarpiui, kiek

ryškesnis sumažėjimas prognozuojamas pagal Nor8.5CF (21 m³/s) ir Nor8.5QM (15 m³/s) scenarijus lyginant su foninio laikotarpio minimaliu Q_{max} (71,2 m³/s).



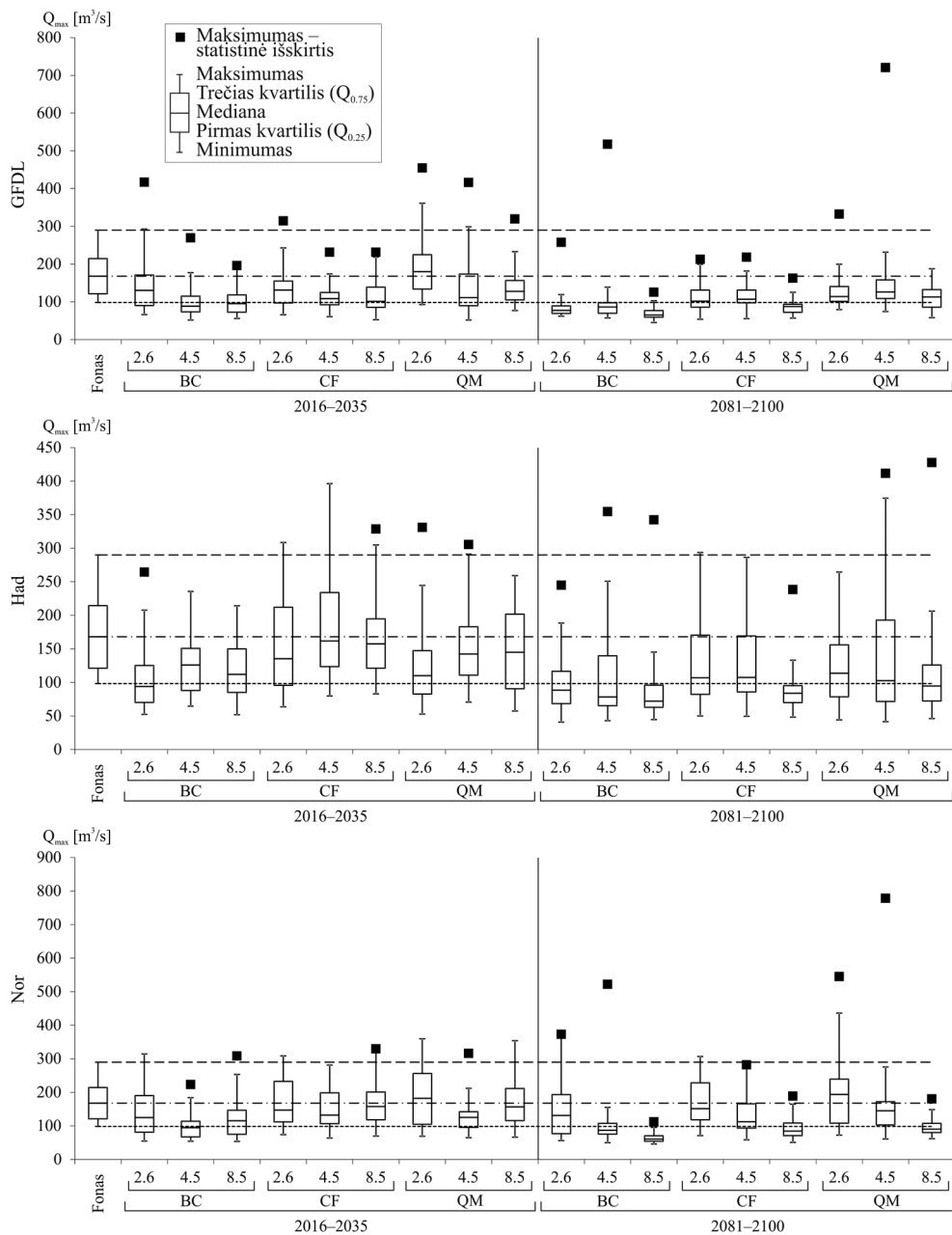
5.10 pav. Nevėžio ties Dasiūnais pavasario potvynių maksimalių debitų (Q_{max} , m³/s) prognozės pagal GFDL–CM3 (GFDL), HadGEM–2ES (Had) ir NorESM1–M (Nor) globalaus klimato modelius, tris RCP scenarijus (2.6, 4.5 ir 8.5) ir tris tinklėlio raiškos didinimo metodus (BC, CF ir QM) 2016–2035 ir 2081–2100 m. laikotarpiais

Prognozuojant Šventosios ties Ukmergė (Pietryčių Lietuvos hidrologinis rajonas) pavasario potvynių maksimalius debitus, nustatyti žymūs prognozių skirtumai tarp pasirinktų globalaus klimato modelių (5.11 pav.).

Pagal GFDL modelį, abiem analizuojamais laikotarpiais prognozuojamas vidutinių pavasario potvynių sumažėjimas, tačiau pagal atskirus scenarijus aukščiausios debitų reikšmės viršija foninį laikotarpį (5.11 pav.). 2016–2035 m. mažiausius potvynius numatė GFDL4.5BC, GFDL8.5BC bei GFDL4.5CF scenarijai. Pagal juos, maksimalių debitų mediana smarkiai sumažėja ir priartėja prie foninio laikotarpio mažiausių reikšmių. Prognozės, paremtos QM tinklelio raiškos didinimo metodo korekcijomis, numato ekstremalių potvynių padidėjimą, nes Q_{max} dydis svyruoja nuo 319 m³/s pagal GFDL8.5QM, iki 455 m³/s pagal GFDL2.6QM scenarijų (foninio laikotarpio maksimalus Q_{max} – 290 m³/s). Tolimos ateities pavasario potvynių maksimalių debitų GFDL prognozės Šventosios upėje numato tendencingą potvynių medianos sumažėjimą pagal visus scenarijus. Ypač didelis lūžis įvyksta BC metodo scenarijuose, kur vidutinės reikšmės pasiekia foninio laikotarpio minimumą (98,3 m³/s). 2081–2100 m. gauname ir labai ekstremalių prognozių, kurios smarkiai viršija 1986–2005 m. maksimalius debitus. Tarp tokių patenka GFDL4.5QM scenarijus su 720 m³/s, kai foninio laikotarpio maksimumas viršytas 2,5 karto. Taip pat ekstremalų debitą (517 m³/s) prognozuoja GFDL4.5BC.

Jau artimoje ateityje Had klimato modelis, kartu su visais RCP scenarijais ir tinklelio raiškos didinimo metodais, prognozuoja mažesnę pavasario potvynių maksimalių debitų medianą negu foniniu laikotarpiu – 168 m³/s (5.11 pav.). Nors ir prognozuojamas maksimalių debitų medianos sumažėjimas 2016–2035 m., tačiau yra scenarijų, kurių maksimumai viršija foninio laikotarpio reikšmes. Had4.5CF numato iki 396 m³/s pavienius pavasario potvynius (37 % didesnis maksimumas foninio laikotarpio atžvilgiu). Tolimoje ateityje pagal visus scenarijus prognozuojami pavasario potvyniai dar labiau sumažėja ir jų mediana priartėja prie foninio laikotarpio minimalių reikšmių, bet atskiri scenarijai prognozuoja pavienius, labai didelius potvynius, kurių debitai gali siekti 412 (Had4.5QM) ar 428 m³/s (Had8.5QM). Remiantis šiomis prognozėmis tikėtina, kad kasmetiniai potvyniai Šventosios upėje gali išnykti ir bus tik pavieniai, labai ekstremalūs potvyniai, kurie gali pridaryti daug ekonominių ir socialinių nuostolių.

Nor modelio prognozės artimoje ateityje pagal įvairius scenarijus yra mažiausiai nutolusios nuo foninio laikotarpio normų (5.11 pav.). Tik Nor4.5BC, Nor8.5BC ir Nor4.5QM scenarijai numato pastebimai mažesnes pavasario potvynių maksimalių debitų reikšmes. Likusių scenarijų medianos varijuoja arti foninio laikotarpio, o maksimalūs potvyniai pasiekia nuo 309 m³/s pagal Nor2.6CF iki 360 m³/s pagal Nor2.6QM scenarijų. Situacija keičiasi 2081–2100 m. laikotarpiu, kai Šventosios ties Ukmergė maksimalių debitų prognozėse matyti RCP klimato scenarijų įtaka. Pagal skirtingus tinklelio raiškos didinimo metodus, RCP2.6 prognozuoja pakankamai aukštas Q_{max} medianos reikšmes, kurios mažėja pritaikius RCP4.5 scenarijų, o patį minimumą pasiekia su RCP8.5. Prognozuota ir pavienių, ypač ekstremalių pavasario potvynių, siekiančių 545 m³/s (Nor2.6QM) ar net 779 m³/s (Nor4.5QM) ir foninio laikotarpio maksimumą viršijančių daugiau nei 2,5 karto.



5.11 pav. Šventosios ties Ukmerge pavasario potvynių maksimalių debitų (Q_{max} , m^3/s) prognozės pagal GFDL–CM3 (GFDL), HadGEM–2ES (Had) ir NorESM1–M (Nor) globalaus klimato modelius, tris RCP scenarijus (2.6, 4.5 ir 8.5) ir tris tinklelio raiškos didinimo metodus (BC, CF ir QM) 2016–2035 ir 2081–2100 m. laikotarpiais

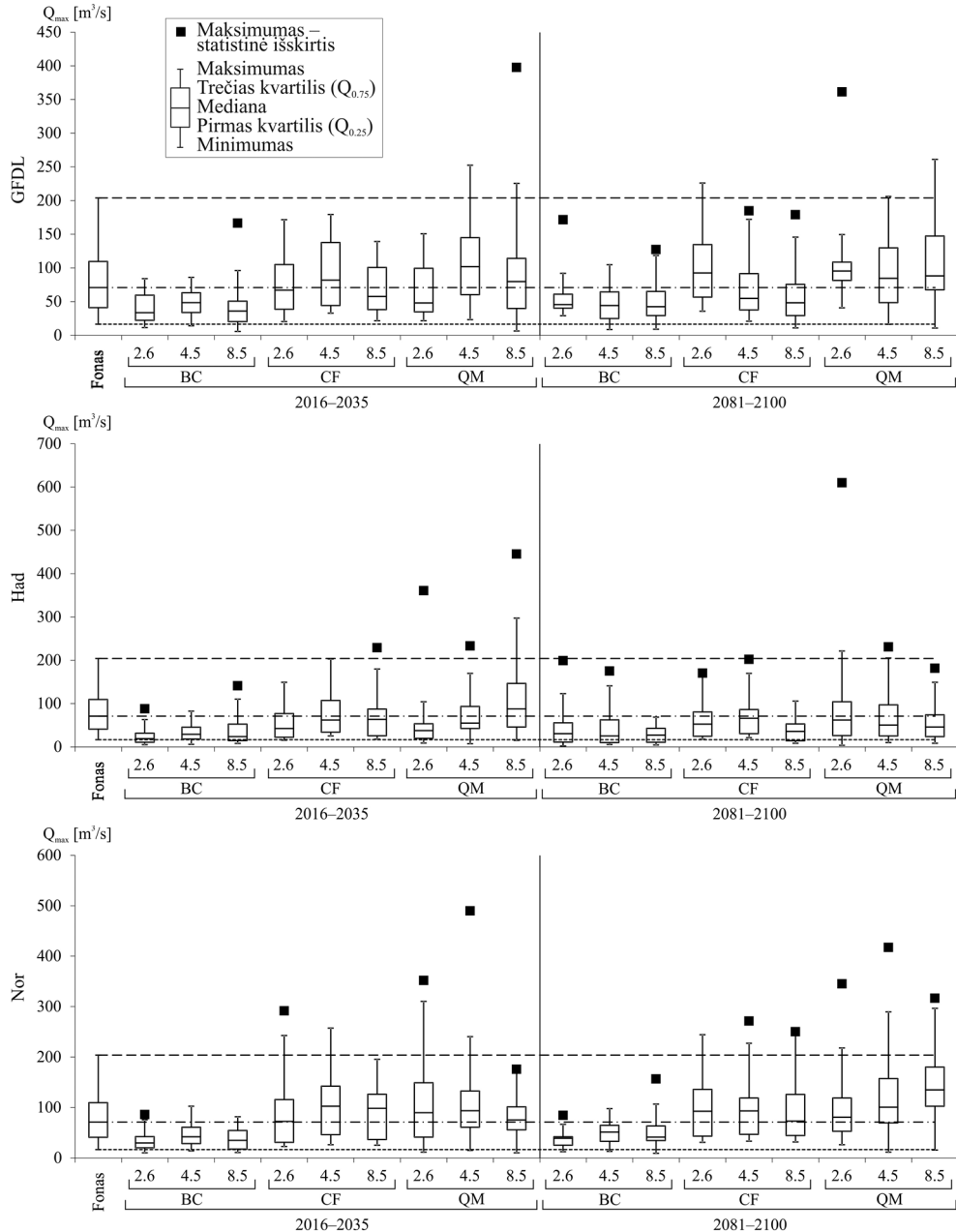
5.3.2. Vasaros ir rudens poplūdžių maksimalių debitų prognozės analizė pagal įvairius klimato scenarijus

Minijos, Nevėžio ir Šventosios vasaros ir rudens sezonų poplūdžių maksimalūs debitai 2016–2035 ir 2081–2100 m. laikotarpiais buvo išrinkti iš modelių paros debitų eilučių, kurios buvo prognozuotos pagal GFDL, Had ir Nor globalaus klimato modelių ir trijų RCP scenarijų (2.6, 4.5 ir 8.5) išvesties duomenis, koreguotus BC, CF ir QM tinklelio raiškos didinimo metodais (5.12–5.14 pav.) Pagal GFDL klimato modelio išvesties duomenis prognozuoti Minijos ties Kartena šiltojo laikotarpio poplūdžiai, priklausomai nuo pasirinkto scenarijaus, svyravo plačia amplitude (5.12 pav.). Artimoje ateityje didžiausią poplūdžių mažėjimą prognozavo scenarijai, kurių tinklelio raiška buvo didinama BC metodu, kadangi maksimalių debitų mediana pagal GFDL2.6BC ir GFDL8.5BC scenarijus sumažėja dvigubai lyginant su foninio laikotarpio mediana (71 m³/s). Didžiausius vasaros ir rudens poplūdžius artimoje ateityje numato GFDL4.5 ir 8.5QM scenarijai. Pastarųjų scenarijų reikšmės išauga nuo 252 iki 398 m³/s. Mažiausius 2016–2035 m. laikotarpio pokyčius, lyginant su foniniu laikotarpiu, prognozuoja GFDL2.6CF scenarijus. Remiantis tolimes ateities maksimalių poplūdžių prognozėmis tikėtina, kad maksimalios reikšmės išliks mažai pakitusios foninio laikotarpio atžvilgiu, o pagal atskirus scenarijus gali būti ir didesnės, pvz., GFDL2.6CF (226 m³/s), GFDL2.6QM (361 m³/s) ir GFDL8.5QM (261 m³/s) scenarijai. XXI a. pabaigai mažiausi poplūdžių pokyčiai foninio laikotarpio atžvilgiu yra prognozuojami pagal GFDL4.5QM scenarijų.

Had modelio prognozės pasižymi mažesne maksimalių vasaros ir rudens poplūdžių mediana nei foniniu laikotarpiu (5.12 pav.). Jau artimoje ateityje prognozuojamas vidutinio dydžio poplūdžių mažėjimas. Tik Had8.5QM scenarijus numato poplūdžių debitų didėjimą kartu su ekstremalių reikšmių prognozėmis, galinčiomis pasiekti 445 m³/s. Gerokai aukštesnį nei foninio laikotarpio maksimumą (204 m³/s) numato Had2.6QM scenarijus (361 m³/s). Mažiausius artimos ateities poplūdžių pokyčius prognozuoja Had4.5CF scenarijus. Had modelio prognozės 2081–2100 m. laikotarpiu nedaug pasikeičia lyginant su artima ateitimi, nes poplūdžių maksimalių debitų mediana sumažėja tik pagal RCP8.5 klimato scenarijaus prognozes. Arčiausiai foninio laikotarpio normos esančios 2081–2100 m. laikotarpio prognozės buvo sudarytos pagal Had4.5CF scenarijų, kaip ir artimos ateities laikotarpio atveju.

Kiek kitokios artimos ir tolimes ateities prognozės buvo nustatytos pagal Nor modelio išvesties duomenis, kurie daugiausia prognozavo vidutiniškai didesnius šiltojo sezono poplūdžių debitus nei foniniu laikotarpiu (5.12 pav.). Tačiau kaip ir prieš tai analizuotieji modeliai, Nor kartu su BC tinklelio raiškos didinimo metodu prognozuoja realių sąlygų neatitinkančias maksimalių debitų reikšmes, kadangi net ekstremalios prognozės vos viršija foninio laikotarpio medianą (71 m³/s). Galima daryti prielaidą, kad BC metodas nėra tinkamas naudoti Lietuvos sąlygomis ir ypač su Nor globalaus klimato modeliu. Nepaisant labai žemų prognozių pagal BC metodą, likę scenarijai kartu su Nor modeliu pateikia ir labai didelių debitų prognozes. Artimoje ateityje, pagal Nor2.6QM ir Nor4.5QM scenarijus šiltojo laikotarpio poplūdžių Q_{max} atitinkamai gali pasiekti 352 ir 490 m³/s debitą,

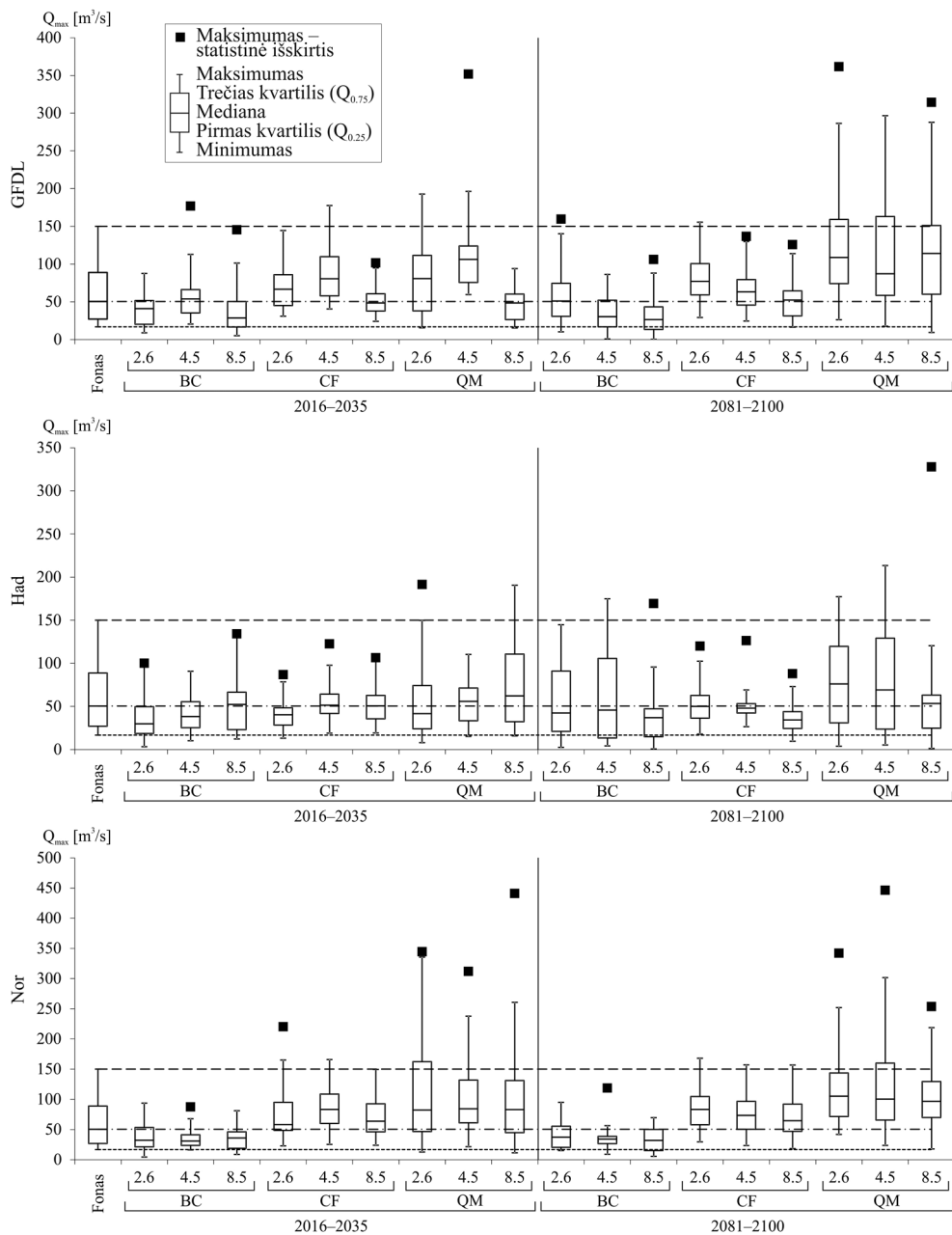
o tolimoje ateityje prognozuojami ekstremalūs poplūdžiai, kurių maksimalūs debitai gali siekti 317 m³/s (Nor8.5QM) ar net 417 m³/s (Nor4.5QM).



5.12 pav. Minijos ties Kartena vasaros ir rudens poplūdžių maksimalių debitų (Q_{max} , m³/s) prognozės pagal GFDL–CM3 (GFDL), HadGEM–2ES (Had) ir NorESM1–M (Nor) globalaus klimato modelius, tris RCP scenarijus (2.6, 4.5 ir 8.5) ir tris tinklelio raiškos didinimo metodus (BC, CF ir QM) 2016–2035 ir 2081–2100 m. laikotarpiais

Nevėžio ties Dasiūnais šiltojo sezono poplūdžių maksimalių debitų prognozės, priklausomai nuo pasirinkto globalaus klimato modelio, buvo tiek mažėjančių, tiek ir didėjančių tendencijų (5.13 pav.). Pagal GFDL modelį, artimoje ateityje nustatyta didelė maksimalių debitų sklaida tarp skirtingų scenarijų. Mažiausių reikšmių prognozės buvo sudarytos taikant BC tinklelio raiškos didinimo metodą bei RCP8.5 klimato scenarijų (5.13 pav.). Netgi QM metodu pakoreguoti meteorologiniai rodikliai prognozavo sumažėjusią poplūdžių dydžio amplitudę pagal RCP8.5. Aukštesnes maksimalių poplūdžių reikšmes nei foniniu laikotarpiu ($150 \text{ m}^3/\text{s}$) numato GFDL4.5 kartu su BC ir CF metodais, o didžiausią $352 \text{ m}^3/\text{s}$ debitą – GFDL4.5 QM scenarijus. Tolimoje ateityje skirtumai tarp prognozių, pakoreguotų skirtingais tinklelio raiškos didinimo metodais, dar labiau išauga, nes BC metodo prognozės svyruoja nuo ekstremaliai žemų reikšmių iki foninio laikotarpio normų. CF metodu paremtos prognozės kinta foninio laikotarpio normos ribose, o GFDL2.6CF ir GFDL4.5CF scenarijai prognozuoja netgi vidutinių poplūdžių didėjimo tendenciją. Didžiausios amplitudės prognozės tolimai ateičiai sudarytos pagal GFDL modelį kartu su QM tinklelio raiškos didinimo metodu ir, nepaisant RCP klimato scenarijų, visos ekstremalios poplūdžių prognozės siekia nuo 297 iki $362 \text{ m}^3/\text{s}$ debitą ir dvigubai viršija foninio laikotarpio maksimumą ($150 \text{ m}^3/\text{s}$). Had modelio Nevėžio upės poplūdžių prognozės artimai ateičiai pagal daugelį scenarijų svyruoja foninio laikotarpio ribose (5.13 pav.). Mažiausi poplūdžių debitai prognozuojami pagal Had2.6BC ir Had4.5BC scenarijų. Pagal Had4.5CF ir Had8.5CF scenarijus poplūdžių mediana beveik nesikeičia lyginant su foniniu laikotarpiu ($50,4 \text{ m}^3/\text{s}$), tačiau patys didžiausi poplūdžių debitai sumažėja. Ekstremumų padidėjimą prognozuoja Had2.6QM ir Had8.5QM. Pagal šiuos scenarijus didžiausi Q_{max} gali siekti $191 \text{ m}^3/\text{s}$. 2081–2100 m. laikotarpiu situacija keičiasi, kadangi mažiausią šiltojo sezono poplūdžių debitų svyravimo amplitudę prognozuoja CF metodu pakoreguoti scenarijai. Šių scenarijų rezultatai rodo tolygius, vidutinius vasaros–rudens poplūdžius. Tolimos ateities prognozės pasižymi dideliu reikšmių svyravimo diapazonu, kuris prasideda nuo visiško poplūdžių nebuvimo iki reikšmių, viršijančių foninio laikotarpio maksimumą. Tokios Had modelio prognozės sudarytos pagal RCP2.6 ir 4.5 klimato scenarijus bei BC ir CF metodus.

Pagal Nor modelio išvesties duomenis sudarytos šiltojo sezono poplūdžių maksimalių debitų prognozės didžiausia dalimi priklausė nuo pasirinkto tinklelio raiškos didinimo metodo (5.13 pav.). Abiem analizuojamais laikotarpiais (2016–2035 ir 2081–2100 m.) ženklų poplūdžių sumažėjimą prognozavo Nor modelis kartu su BC tinklelio raiškos didinimo metodu. Prognozės, esančios arčiausiai foninio laikotarpio sąlygų, buvo sudarytos taikant CF metodą. Pagal jį, tiek artimoje, tiek ir tolimoje ateityje prognozuojamas vidutinių maksimalių debitų padidėjimas, o ekstremaliausios reikšmės vos 7–10 m^3/s didesnės nei foninio laikotarpio maksimumas, tik artimoje ateityje pagal Nor2.6CF prognozuotas $220 \text{ m}^3/\text{s}$ debitas. Nor modelio prognozės kartu su QM metodu taip pat numato vidutinių poplūdžių padidėjimą, kurį lydi pavieniai itin dideli poplūdžiai. Pagal šį modelį prognozuojami maksimalūs debitai gali svyruoti nuo 312 iki $441 \text{ m}^3/\text{s}$ artimoje ateityje ir nuo 254 iki $446 \text{ m}^3/\text{s}$ – tolimoje.

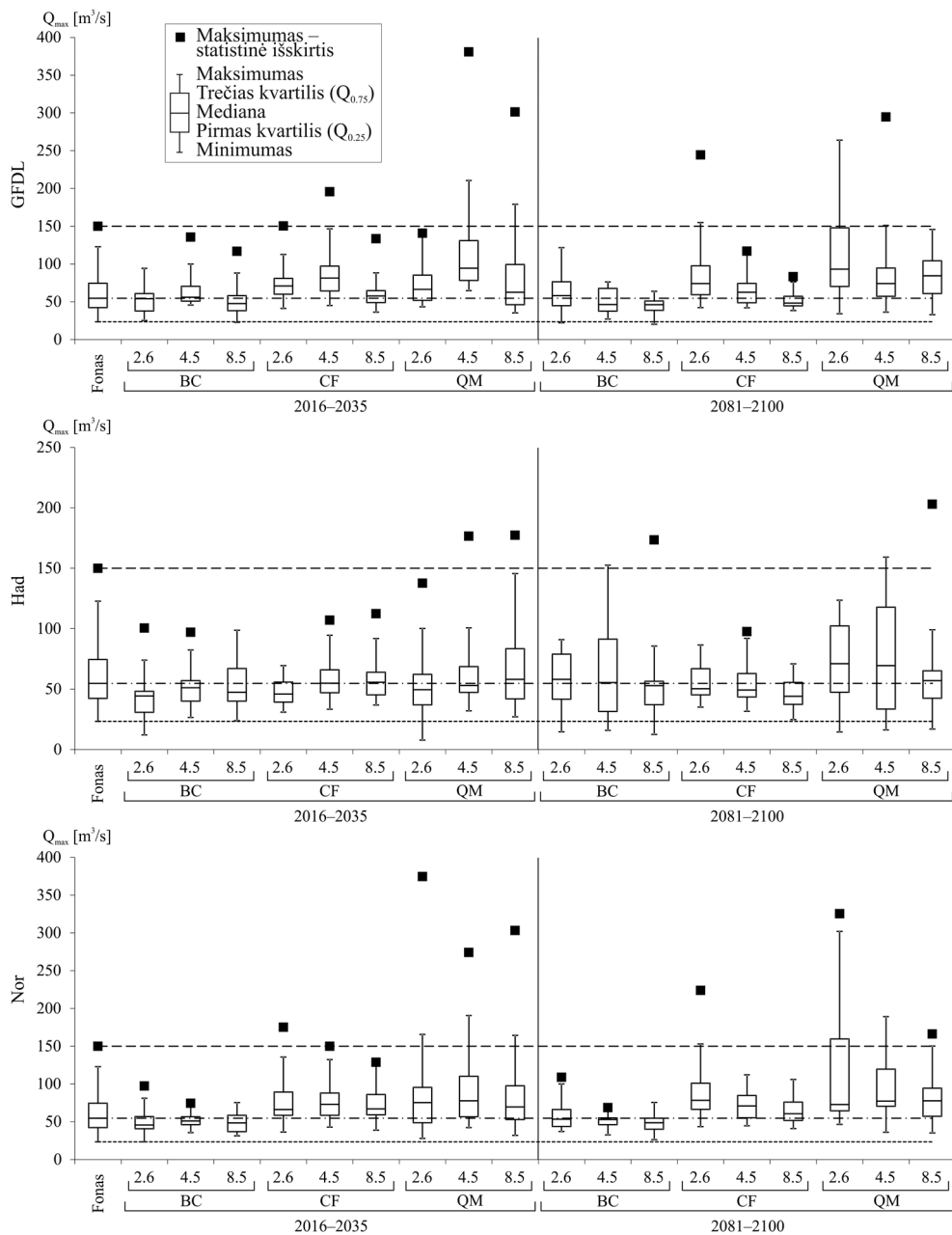


5.13 pav. Nevėžio ties Dasiūnais vasaros ir rudens poplūdžių maksimalių debitų (Q_{max} , m^3/s) prognozės pagal GFDL–CM3 (GFDL), HadGEM–2ES (Had) ir NorESM1–M (Nor) globalaus klimato modelius, tris RCP scenarijus (2.6, 4.5 ir 8.5) ir tris tinklelio raiškos didinimo metodus (BC, CF ir QM) 2016–2035 ir 2081–2100 m. laikotarpiais

Šventosios upės vasaros ir rudens poplūdžių prognozių ties Ukmergės vandens matavimo stotimi pasiskirstymo dėsningumai tarp skirtingų scenarijų (5.14 pav.) buvo panašūs į Nevėžio prognozes. Artimoje ateityje pagal GFDL modelį prognozuoti šiltojo sezono poplūdžių maksimalūs debitai, taikant CF ir QM tinklelio raiškos didinimo metodus, buvo vidutiniškai didesni lyginant su foninio laikotarpio normos mediana (5.14 pav.), o mažiausių poplūdžių reikšmės padidėjo foninio laikotarpio minimumo ($23,4 \text{ m}^3/\text{s}$) atžvilgiu. GFDL2.6BC scenarijus prognozuoja vidutinių poplūdžių dydžius, artimus foniniam, tačiau numato didžiausių poplūdžių sumažėjimą. Ekstremalios Q_{max} prognozės sudarytos taikant QM tinklelio raiškos didinimo metodą ir pagal GFDL8.5QM bei GFDL4.5QM scenarijus pačių didžiausių poplūdžių debitai atitinkamai gali pasiekti $301 \text{ m}^3/\text{s}$ ar net $381 \text{ m}^3/\text{s}$ (foninio laikotarpio maksimalus $Q_{max} - 150 \text{ m}^3/\text{s}$). Pagal GFDL klimato modelį, tolimoje ateityje tendencijos išlieka panašios. BC metodu paremtos prognozės numato poplūdžių dydžio sumažėjimą, tik pagal GFDL2.6BC scenarijų poplūdžių Q_{max} mediana išliks artima foniniam laikotarpiui ($54,7 \text{ m}^3/\text{s}$). GFDL2.6CF, GFDL2.6QM ir GFDL4.5QM scenarijai prognozuoja, kad patys ekstremaliausi poplūdžių debitai gali svyruoti tarp $245-295 \text{ m}^3/\text{s}$.

Remiantis Had modelio prognozėmis tikėtina, kad vidutinio dydžio vasaros ir rudens poplūdžiai išliks panašūs kaip foniniu laikotarpiu, tačiau sumažės poplūdžių amplitudė tarp žemiausios ir aukščiausios jų reikšmės (5.14 pav.). Kaip ir ekstremalių reikšmių prognozės artimoje ateityje, didesnės amplitudės buvo nustatytos taikant QM tinklelio raiškos didinimo metodą. Pagal Had4.5QM ir Had8.5QM scenarijus ekstremaliausios reikšmės gali siekti $177 \text{ m}^3/\text{s}$ debitą. Had4.5 ir 8.5CF scenarijų prognozuojama maksimalių debitų mediana išlieka mažai pakitusi ir artima foniniam laikotarpiui ($54,7 \text{ m}^3/\text{s}$). 2081–2100 m. laikotarpiu CF tinklelio raiškos didinimo metodu pakoreguotos prognozės numato, kad šiltojo sezono poplūdžių Q_{max} vidutiniškai bus mažesni nei foniniu laikotarpiu, o amplitudė sumažės tarp mažiausių ir didžiausių prognozuojamų poplūdžių. Ekstremaliausius debitus prognozavo Had8.5BC ($174 \text{ m}^3/\text{s}$) ir Had8.5QM ($203 \text{ m}^3/\text{s}$) scenarijai.

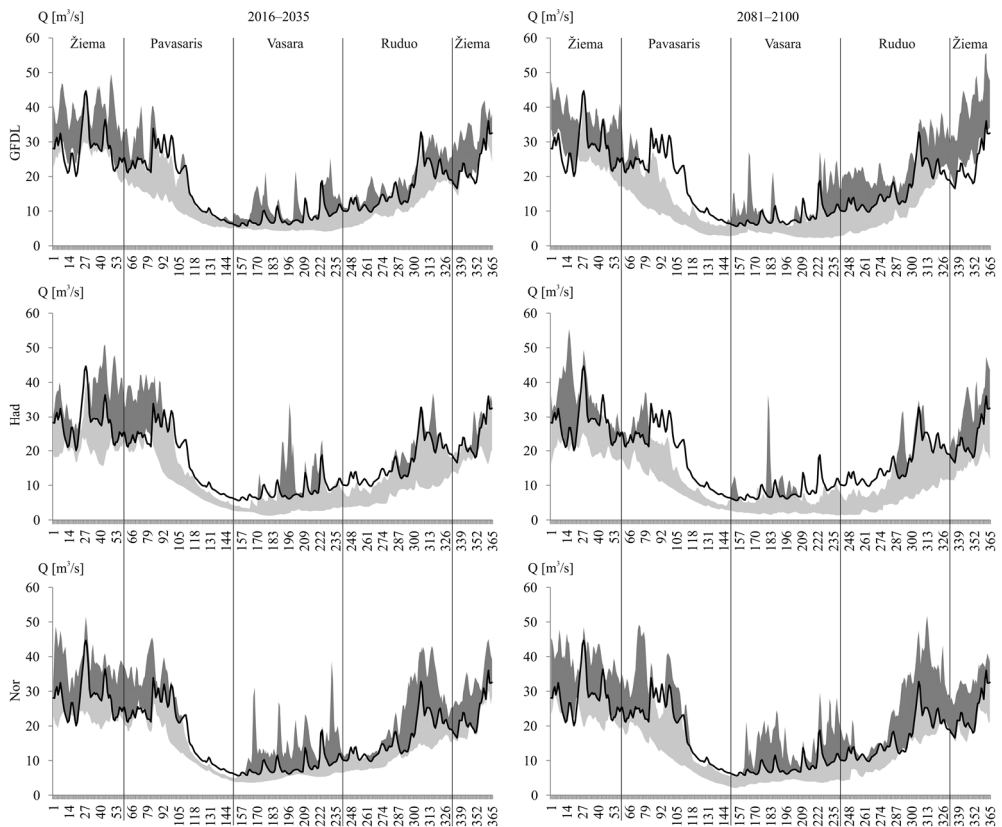
Šventosios ties Ukmergėje šiltojo sezono poplūdžių prognozės pagal Nor modelio išvesties duomenis, kaip ir Nevėžio upėje, labiausiai priklausė nuo taikyto tinklelio raiškos didinimo metodo (5.14 pav.). Tiek artimoje, tiek ir tolimoje ateityje poplūdžių mažiausių debitų prognozės buvo sudarytos naudojant Nor klimato modelio ir BC metodo kombinaciją. BC metodas jau ankstesnių upių pavyzdžiu parodė, kad Lietuvos sąlygomis yra netaikytinas, o kombinacija su Nor modeliu, nepriklausomai nuo pasirinkto RCP scenarijaus, prognozuoja realybės neatitinkančias reikšmes. Jeigu tokios prognozės pasitvirtintų, tai kasmet turėtume laukti katastrofiškų hidrologinių sausrų, o ne ekstremalių vandens lygio pakilimų. Prognozės, esančios arčiausiai foninio laikotarpio sąlygų, buvo sudarytos taikant CF metodą. Pagal jį tiek artimoje, tiek ir tolimoje ateityje prognozuojamas vidutinių maksimalių debitų padidėjimas. Pagal Had modelį ir QM tinklelio raiškos didinimo metodą buvo sudarytos ekstremalių poplūdžių prognozės, kurios numato pavienius reiškinius su $274-375 \text{ m}^3/\text{s}$ (Nor2.6, 4.5 ir 8.5 QM) debitu artimoje ateityje ir iki $326 \text{ m}^3/\text{s}$ (Nor2.6QM) – tolimoje ateityje.



5.14 pav. Šventosios ties Ukmergėje vasaros ir rudens poplūdių maksimalių debitų (Q_{max} , m^3/s) prognozės pagal GFDL–CM3 (GFDL), HadGEM–2ES (Had) ir NorESM1–M (Nor) globalaus klimato modelius, tris RCP scenarijus (2.6, 4.5 ir 8.5) ir tris tinklėlio raiškos didinimo metodus (BC, CF ir QM) 2016–2035 ir 2081–2100 m. laikotarpiais

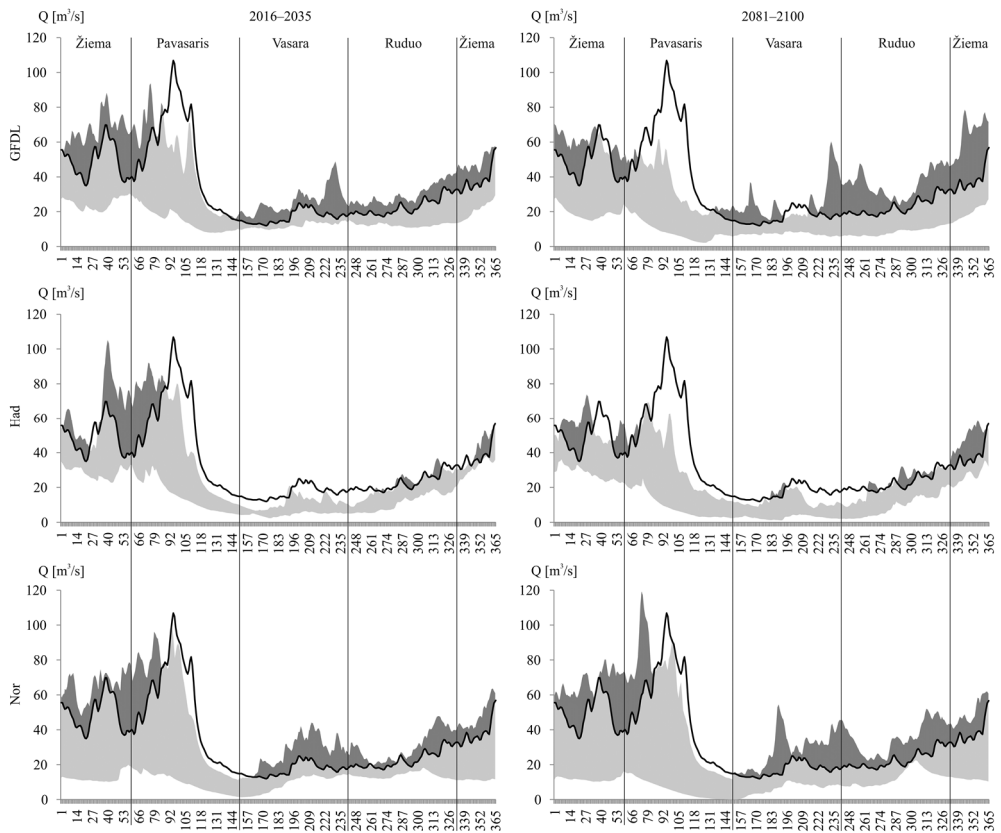
5.4. Lietuvos upių nuotėkio ir potvynių prognozių neapibrėžtumų analizė

Prognozuojant ir vertinant upių ateities nuotėkio kaitos tendencijas, yra svarbu nustatyti galimus neapibrėžtumus, susijusius su prognozių šaltinių parinkimu. Šiame darbe pagrindiniai neapibrėžtumo šaltiniai susideda iš globalaus klimato modelių, klimato scenarijų ir tinklelio raiškos didinimo metodų parinkimo. Įvairios šių trijų dedamųjų kombinacijos pateikia plataus diapazono ateities nuotėkio prognozes (5.15–5.17 pav.). Minijoje ties Kartena (Vakarų Lietuvos hidrologinis rajonas) metinio nuotėkio hidrografas įgauna pjūklo formą, nes dominuoja lietaus maitinimas, kuris lemia greitą upės nuotėkio reakciją į iškritusį kritulių kiekį ir sukelia dažnus poplūdžius. Ateities nuotėkio prognozių amplitudė Minijos upėje keičiasi priklausomai nuo sezono ir GCM (5.15 pav.). Visi modeliai prognozuoja išaugusią amplitudę žiemos sezonu, o GFDL ir Nor modeliai numato plačią prognozių variaciją rudens sezonu. Žemesnes už foninio laikotarpio normą prognozes vasaros sezonui numato dauguma GCM, o Had modelis pateikia nuo vidutinių, iki labai žemų nuotėkio prognozių XXI a. pabaigoje.



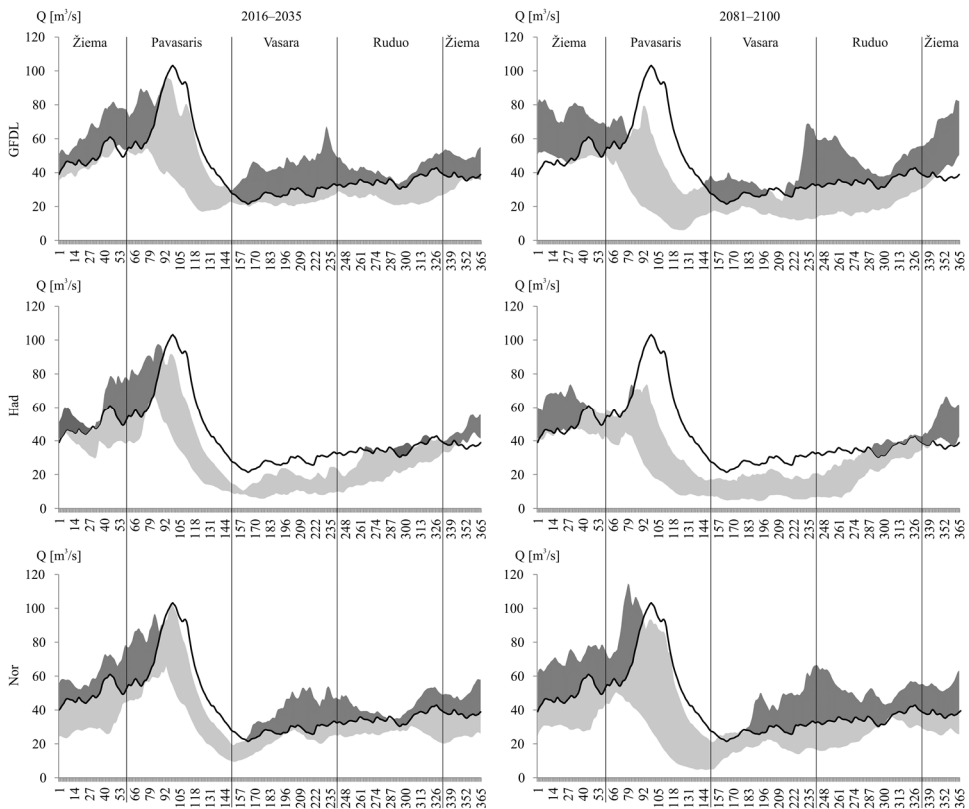
5.15 pav. Minijos ties Kartena vidutinio metinio nuotėkio prognozių neapibrėžtumai (šviesiai pilka – mažesnės nuotėkio prognozės, tamsiai pilka – didesnės nuotėkio prognozės lyginant su foninio laikotarpio norma – juoda linija) pagal GFDL–CM3 (GFDL), HadGEM–2ES (Had) ir NorESM1–M (Nor) globalaus klimato modelių visus scenarijus 2016–2035 ir 2081–2100 m. laikotarpiais

Nevēžio, patenkančio į Vidurio Lietuvos hidrologinį rajoną, nuotėkis ties Dasiūnų VMS labai jautriai reaguoja į skirtingus nuotėkio scenarijus, o atskirais sezonais nuotėkio prognozės svyruoja plačia amplitude (5.16 pav.). 2016–2035 m. žiema ir pavasaris buvo išskirtiniai sezonai, kadangi jų prognozės kito nuo ekstremaliai žemų reikšmių pagal vienus scenarijus, iki reikšmių, viršijančių foninio laikotarpio normą. Antruoju laikotarpiu minėtų sezonų prognozių amplitudė sumažėjo nuo labai žemų, iki foninio laikotarpio normos, tik pagal Nor modelį yra scenarijų, prognozuojančių didesnes nuotėkio reikšmes žiemos sezonu ir pavasario pradžioje. Akivaizdu, kad didžiausia galimų pokyčių amplitudė Nevėžio upei numatoma pavasarį, kai prognozės įgauna labai didelius neapibrėžtumus. Tai parodo pavasario potvynių pažeidžiamumą klimato kaitos sąlygomis, kadangi dėl kylančios oro temperatūros trumpėja arba atskirais metais visiškai išnyksta sniego akumuliacijos laikotarpis ir nepakankamai susikaupia vandens atsargų sniege, kurios yra vienas iš potvynių dydį lemiančiųjų veiksnių.



5.16 pav. Nevėžio ties Dasiūnais vidutinio metinio nuotėkio prognozių neapibrėžtumai (šviesiai pilka – mažesnės nuotėkio prognozės, tamsiai pilka – didesnės nuotėkio prognozės lyginant su foninio laikotarpio norma – juoda linija) pagal GFDL–CM3 (GFDL), HadGEM–2ES (Had) ir NorESM1–M (Nor) globalaus klimato modelių visus scenarijus 2016–2035 ir 2081–2100 m. laikotarpiais

Į Pietryčių Lietuvos hidrologinį rajoną patenkančios Šventosios upės 1986–2005 m. vidutinis hidrografas buvo tolygiausias lyginant su prieš tai analizuotomis upėmis (5.17 pav.). Tokią hidrografo formą šiame rajone lemia vyraujantis požeminis upių maitinimo tipas, kuris tolygiai paskirsto upės baseino vandens perteklių per metus, t.y. sniego tirpsmo ar gausių kritulių nuotėkį akumuliuoja į požeminius vandenis (mažėja ekstremalių reiškinių), kurie savo ruožtu maitina upes vasaros nuosėdkio laikotarpiu (padidina ir padaro nuotėkį tolygesniu). Pagal skirtingus globalaus klimato modelius sudarytos Šventosios ties Ukmergėje nuotėkio prognozės buvo plačios amplitudės (5.17 pav.). Ryškiausi nuotėkio pasikeitimai užfiksuoti pavasario ir žiemos sezonais, kai nustatyta pavasario potvynių mažėjimą lydi ankstyvesni pavasario pikai. Pagal atskirus scenarijus buvo prognozuotas žiemos nuotėkio padidėjimas pavasario potvynio sąskaita. Vasaros sezonu taip pat buvo nustatyta plati prognozių amplitudė pagal GFDL ir Had modelius. Remiantis jų prognozėmis, nuotėkis gali keistis nuo itin mažų debitų, iki dvigubai viršijančių foninio laikotarpio normą. Tik Had modelio visos prognozės numato mažesnę debitą.



5.17 pav. Šventosios ties Ukmergėje vidutinio metinio nuotėkio prognozių neapibrėžtumai (šviesiai pilka – mažesnės nuotėkio prognozės, tamsiai pilka – didesnės nuotėkio prognozės lyginant su foninio laikotarpio norma – juoda linija) pagal GFDL–CM3 (GFDL), HadGEM–2ES (Had) ir NorESM1–M (Nor) globalaus klimato modelių visus scenarijus 2016–2035 ir 2081–2100 m. laikotarpiais

5.4.1. Vidutinio metinio nuotėkio prognozių neapibrėžtumų analizė

Vidutinio metinio nuotėkio prognozių neapibrėžtumai buvo įvertinti pagal šiame darbe naudotus neapibrėžtumo šaltinius, kuriuos sudaro globalaus klimato modeliai (GCM), klimato scenarijai (RCP) ir tinklelio raiškos didinimo metodai (SD). Tai pat procentais buvo įvertinti tie neapibrėžtumo šaltiniai, kurie darė didžiausią įtaką plačiai prognozių sklaidai Minijos, Nevėžio ir Šventosios upėse (5.5 lent.). Artimoje ir tolimoje ateityje didžiausią įtaką Minijos ties Kartena nuotėkio prognozių neapibrėžtumui turėjo globalaus klimato modelio parinkimas, kuris artimoje ateityje sudarė 44,5 %, o tolimoje ateityje – 41,0 %. Taip pat reikšmingos įtakos turėjo ir SD metodai, nes nuo jų priklausė 38,8 % (2016–2035 m.) ir 34,7 % (2081–2100 m.) neapibrėžtumų. Mažiausia rezultatų sklaida buvo susijusi su RCP scenarijais, tačiau XXI a. pab. jų įtaka išauga 7,5 % lyginant su artima ateitimi.

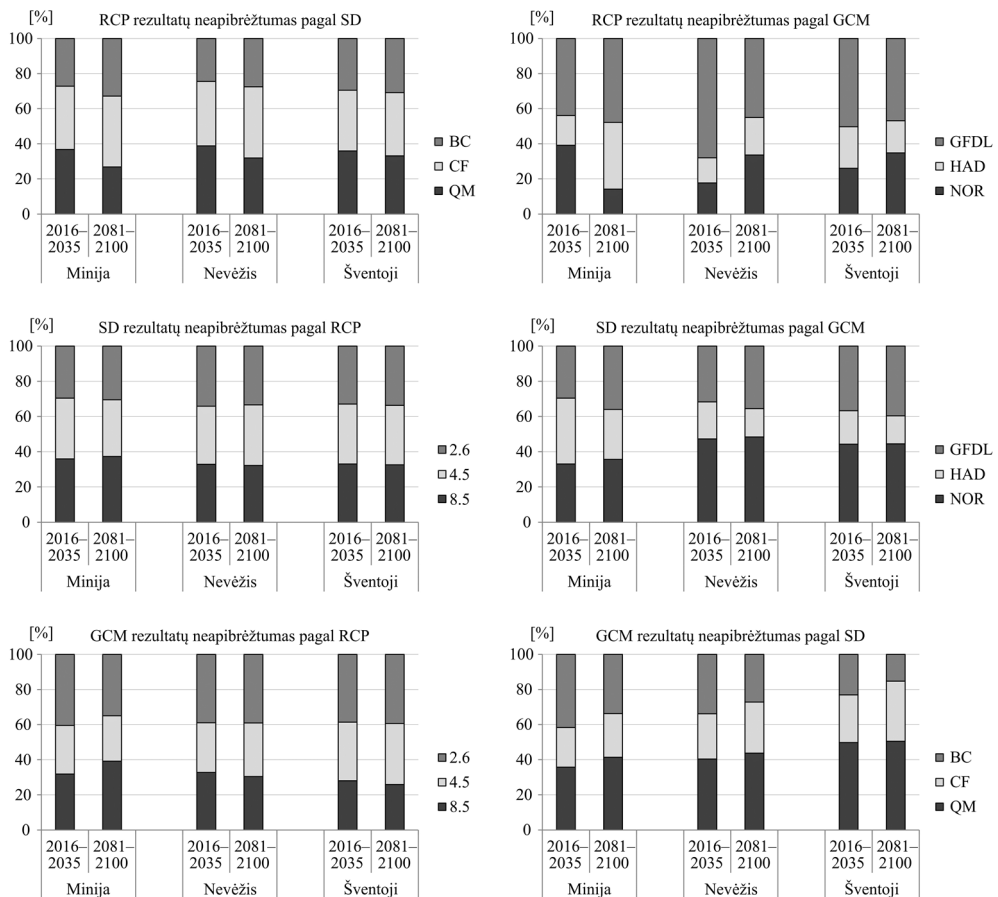
Nevėžyje ties Dasiūnais artimos ateities vidutinio metinio nuotėkio prognozės net 60,9 % priklausė nuo tinklelio raiškos didinimo metodų, o RCP klimato scenarijų įtaka sudarė vos 11,2 % (5.5 lent.). 2081–2100 m. laikotarpiu situacija keitėsi, kai SD prognozių neapibrėžtumai sumažėjo iki 51,3 %, o RCP išaugo iki 24,4 %. Nevėžio vidutinio metinio nuotėkio prognozių neapibrėžtumai daugiau nei 50 % priklausė nuo tinklelio raiškos didinimo metodų. Neapibrėžtumai, susiję su globalaus klimato modelių parinkimu, sudarė 27,9 % artimoje ateityje ir 24,3 % – tolimoje ateityje. Šventosios upėje vidutinio metinio nuotėkio prognozių sklaida 2016–2035 m. laikotarpiu priklausė 46,2 % nuo SD metodų, 38,1 % nuo GCM parinkimo ir tik 15,7 % nuo RCP scenarijų (5.5 lent.). Antruoju laikotarpiu RCP klimato scenarijų įtaka galimiems nuotėkio prognozių neapibrėžtumams padidėja dvigubai iki 31,5 % ir 2,4 % punktais viršija GCM sukeltus neapibrėžtumus. Kaip ir pirmuoju laikotarpiu, tolimoje ateityje didžiausia sklaida buvo susijusi su SD metodais. Remiantis tirtų upių pavyzdžiu, sudarinėjant ateities vidutinio metinio nuotėkio prognozes, labai svarbu kruopščiai atrinkti globalaus klimato modelius ir tinklelio raiškos didinimo metodus, nes su jais susiję didžiausi prognozių neapibrėžtumai.

5.5 lentelė. Minijos, Nevėžio ir Šventosios vidutinio metinio nuotėkio prognozių neapibrėžtumai (%) pagal skirtingus neapibrėžtumo šaltinius (RCP, SD ir GCM) 2016–2035 ir 2081–2100 m. laikotarpiais

	Minija		Nevėžis		Šventoji	
	2016–2035	2081–2100	2016–2035	2081–2100	2016–2035	2081–2100
RCP	16,7	24,3	11,2	24,4	15,7	31,5
SD	38,8	34,7	60,9	51,3	46,2	39,4
GCM	44,5	41,0	27,9	24,3	38,1	29,1

Vertinant vidutinio metinio nuotėkio neapibrėžtumus tarp pačių neapibrėžtumo šaltinių, buvo sudarytos jų tarpusavio sąveikos stulpelių pavidalo schemos, apibūdinančios kiekvieno iš kintamųjų įtaką, išreikštą procentais (5.18 pav.). Prognozuojant pagal RCP klimato scenarijus, didesni neapibrėžtumai pirmuoju

laikotarpiu buvo susiję su QM metodo taikymu, o tolumoje ateityje didesni neapibrėžtumai nulemti CF metodo, kuris, priklausomai nuo pasirinktos upės, turėjo nuo 0 iki 13,6 % didesnę neapibrėžtumą lyginant su BC ir QM metodais. SD metodų neapibrėžtumai susiję su skirtingais RCP scenarijais buvo nereikšmingi ir tolygiai pasiskirstė tarp 2.6, 4.5 ir 8.5 scenarijų. Minijoje GCM didžiausius neapibrėžtumus prognozavo kartu su BC ir QM metodais, o Nevėžyje ir Šventojoje – QM. Tinklelio raiškos didinimo metodais paremtų prognozių neapibrėžtumų mažiausia sklaida, priklausomai nuo GCM klimato modelių, buvo pagal Had modelį, o GFDL ir Nor modelių prognozių neapibrėžtumai buvo panašūs. GCM rezultatų neapibrėžtumai pagal skirtingus RCP scenarijus buvo pakankamai tolygūs ir nebuvo nustatyta vieno dominuojančio scenarijaus įtaka. Tačiau RCP scenarijų rezultatai, priklausomai nuo pasirinkto GCM, parodė kitokius neapibrėžtumus, kadangi didžiausi RCP rezultatų nuokrypiai nustatyti pagal GFDL klimato modelį, o mažiausi RCP neapibrėžtumai buvo taikant Had modelį.



5.18 pav. Minijos, Nevėžio ir Šventosios vidutinio metinio nuotėkio prognozių neapibrėžtumai (%) tarp skirtingų neapibrėžtumo šaltinių (RCP, SD ir GCM) 2016–2035 ir 2081–2100 m. laikotarpiais

5.4.2. Pavasario potvynių maksimalių debitų prognozių neapibrėžtumų analizė

Pavasario potvynių maksimalaus debito (Q_{max}) prognozių neapibrėžtumai, susiję su jų kilmės šaltiniais (GCM, RCP ir SD), buvo įvertinti Minijos, Nevėžio ir Šventosios upėse bei nustatyta procentinė kiekvieno šaltinio dalis į prognozių neapibrėžtumą (5.6 lent.). Minijoje ties Kartena didžiausius pavasario potvynių Q_{max} neapibrėžtumus lėmė tinklelio raiškos didinimo metodai, nes 2016–2035 m. laikotarpiu jų sukelti neapibrėžtumai sudarė 42,5 %, o 2081–2100 m. padidėjo iki 48,7 %. RCP ir GCM įtaka maksimalių debitų prognozėms Minijos upėje buvo nežymi, tik tolimoje ateityje GCM neapibrėžtumai sumažėjo 5 % punktais lyginant su artima ateitimi. Nevėžyje, kaip ir vidutinio metinio nuotėkio atveju, didžiausius pavasario potvynių maksimalių debitų neapibrėžtumus lėmė SD metodai ir artimoje ateityje jie sudarė 56,2 % įvertinus visus neapibrėžtumo šaltinius. Tolimoje ateityje jų įtaka sumažėjo iki 46,3 %, o globalaus klimato modelių neapibrėžtumai tarp analizuojamų laikotarpių skyrėsi vos pora procentinių punktų. Neapibrėžtumai, susiję su RCP klimato scenarijais, 2016–2035 m. laikotarpiu sudarė 17 %, o XXI a. pabaigoje padidėjo iki 28,8 % ir jų įtaka GCM atžvilgiu išaugo.

Šventojoje ties Ukmerge prognozuotoms pavasario potvynių maksimalių debitų reikšmėms 2016–2035 m. laikotarpiu didžiausius neapibrėžtumus lėmė tinklelio raiškos didinimo metodai ir jie siekė 41,4 % (5.6 lent.). Tuo tarpu RCP ir GCM neapibrėžtumai atitinkamai sudarė 27,9 ir 30,7 %. Tolimoje ateityje situacija pasikeitė, nes didžiausius Šventosios pavasario potvynių prognozių neapibrėžtumus (41,4 %) sukėlė RCP scenarijai. SD metodų neapibrėžtumai siekė 30,8 %, o GCM sukėlė 27,8 % Q_{max} prognozių neapibrėžtumus Šventojoje ties Ukmerge.

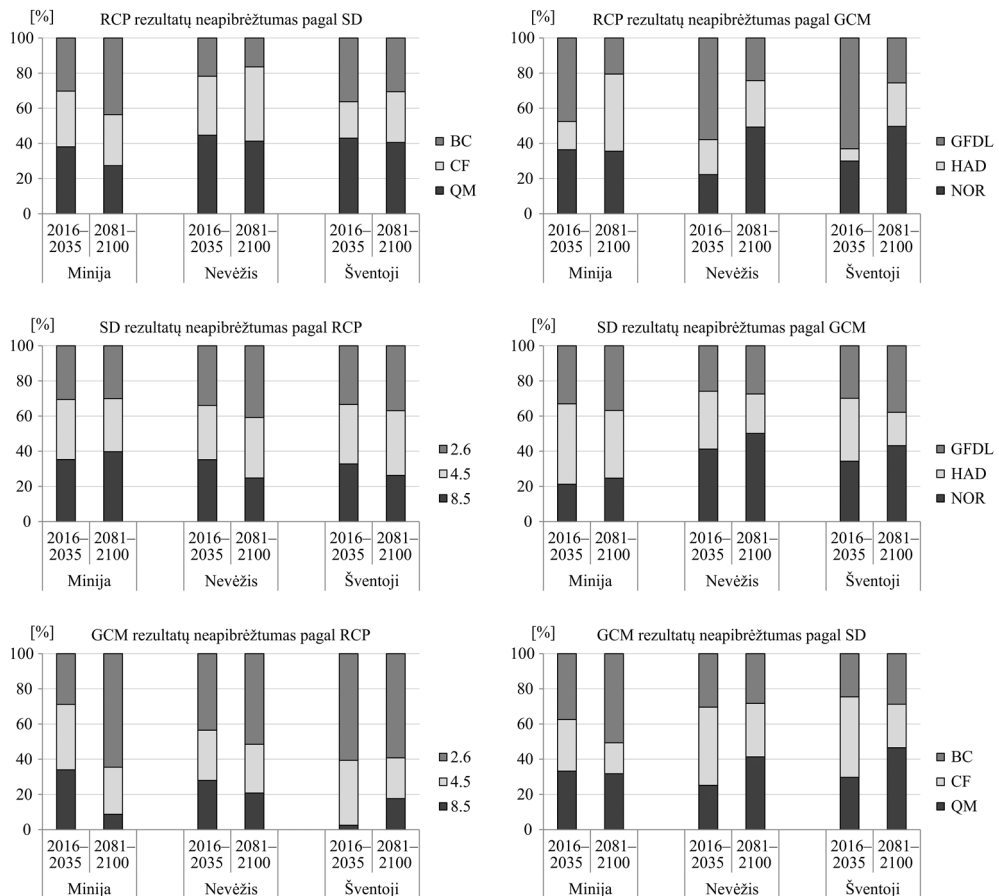
Išanalizavus trijų upių pavasario potvynių maksimalių debitų neapibrėžtumus matyti, kad kiekvienoje upėje susiformuoja specifinės sąlygos, kurios lemia skirtingus neapibrėžtumo šaltinių indėlius prognozuojant ekstremalius reiškinius; Minijoje ir Nevėžyje abiem laikotarpiais, o Šventosios upėje artimoje ateityje, didžiausius neapibrėžtumus lėmė tinklelio raiškos didinimo metodai, tačiau Šventosios pavasario potvynius tolimoje ateityje su didžiausia maksimalių debitų sklaida daugiausiai lėmė RCP scenarijai (5.6 lent.).

5.6 lentelė. Minijos, Nevėžio ir Šventosios pavasario potvynių maksimalių debitų prognozių neapibrėžtumai (%) pagal skirtingus neapibrėžtumo šaltinius (RCP, SD ir GCM) 2016–2035 ir 2081–2100 m. laikotarpiais

	Minija		Nevėžis		Šventoji	
	2016–2035	2081–2100	2016–2035	2081–2100	2016–2035	2081–2100
RCP	29,8	28,6	17,0	28,8	27,9	41,4
SD	42,5	48,7	56,2	46,3	41,4	30,8
GCM	27,7	22,7	26,8	24,9	30,7	27,8

Siekiant nustatyti pavasario potvynių maksimalių debitų neapibrėžtumus tarp skirtingų neapibrėžtumo kilmės šaltinių (RCP, SD ir GCM), buvo sudarytos jų sąveikos stulpelių pavidalo diagramos, rodančios tarpusavio neapibrėžtumus (5.19 pav.). Mažiausi skirtumai tarp neapibrėžtumo šaltinių buvo nustatyti tarp RCP

klimato scenarijų ir SD metodų, kadangi tiek RCP pagal skirtingus SD metodus, tiek SD pagal skirtingus RCP, neturėjo vieno ar keleto itin reikšmingų arba dominuojančių kintamųjų. Tačiau artimoje ateityje RCP rezultatų neapibrėžtumuose pagal GCM išsiskyrė Had modelis dėl labai mažų neapibrėžtumų artimoje ateityje ir jau padidėjusių – tolimoje. Reikšmingas priklausomybes nustatė GCM prognozuoti potvynių rezultatai pagal skirtingus RCP, nes didžiausius prognozių neapibrėžtumus lėmė RCP2.6, o mažiausia rezultatų sklaida buvo pagal RCP8.5 klimato scenarijų. Vertinant SD rezultatus pagal GCM galima nustatyti, kuris modelis jautriausiai reaguoja į tinklelio raiškos didinimo metodų parinkimą. Nustatyta, kad Minijos upėje, prognozuojant pavasario potvynius, didžiausi neapibrėžtumai buvo susiję su SD metodais, taikant Had klimato modelį, o Nevėžyje ir Šventojoje – Nor modelį. Vertinant GCM rezultatų neapibrėžtumus pagal skirtingus SD, Minijos upėje didžiausia rezultatų sklaida buvo pagal BC metodą. Nevėžyje ir Šventojoje didžiausi neapibrėžtumai buvo susiję su GCM prognozėmis artimoje ateityje pagal CF metodą, o tolimoje ateityje – pagal QM tinklelio raiškos didinimo metodą.



5.19 pav. Minijos, Nevėžio ir Šventosios pavasario potvynių maksimalių debitų prognozių neapibrėžtumai (%) tarp skirtingų neapibrėžtumo šaltinių (RCP, SD ir GCM) 2016–2035 ir 2081–2100 m. laikotarpiais

5.4.3. Vasaros ir rudens poplūdžių maksimalių debitų prognozių neapibrėžtumų analizė

Vasaros ir rudens poplūdžiai yra glaudžiai susiję su užsitęsusiomis liūtimis arba gausiais krituliais, iškritusiais per trumpą laiką, todėl jie jautriai reaguoja į meteorologinių sąlygų pasikeitimus. Prognozuojant šių ekstremalių hidrologinių reiškinių kaitos dėsninumus ateityje, ypač svarbu nustatyti galimų neapibrėžtumo šaltinių įtaką galutinėms prognozėms. Minijos, Nevėžio ir Šventosios upių pavyzdžiu buvo įvertinti šiltojo sezono poplūdžių maksimalių debitų neapibrėžtumai, susiję su klimato scenarijų, tinklelio raiškos didinimo metodų ir globalaus klimato modelių parinkimu (5.7 lent.). Minijos upėje 2016–2035 m. laikotarpiu didžiausi poplūdžių prognozių neapibrėžtumai buvo sukelti tinklelio raiškos didinimo metodų ir tai sudarė 51 % tarp visų neapibrėžtumo šaltinių. Tolimoje ateityje SD metodų sukelti neapibrėžtumai sumažėjo iki 47,5 %, tačiau padidėjo GCM įtaka, išaugusi iki 31,6 %. Nevėžio šiltojo sezono poplūdžių maksimalių debitų prognozėms artimoje ateityje didžiausią įtaką turėjo SD metodai, kurie lėmė 43,9 % visų neapibrėžtumų. Tolimoje ateityje SD metodų įtaka galutinėms prognozėms dar smarkiau išaugo ir jų sukelti neapibrėžtumai sudarė jau 56,5 %. Prognozuojant Nevėžio pavasario potvynius, RCP scenarijų neapibrėžtumai didėjo 2081–2100 m. laikotarpiu, nors šiltojo sezono poplūdžių prognozių neapibrėžtumai, susiję su RCP scenarijais tolimoje ateityje, buvo mažesni negu 2016–2035 m.

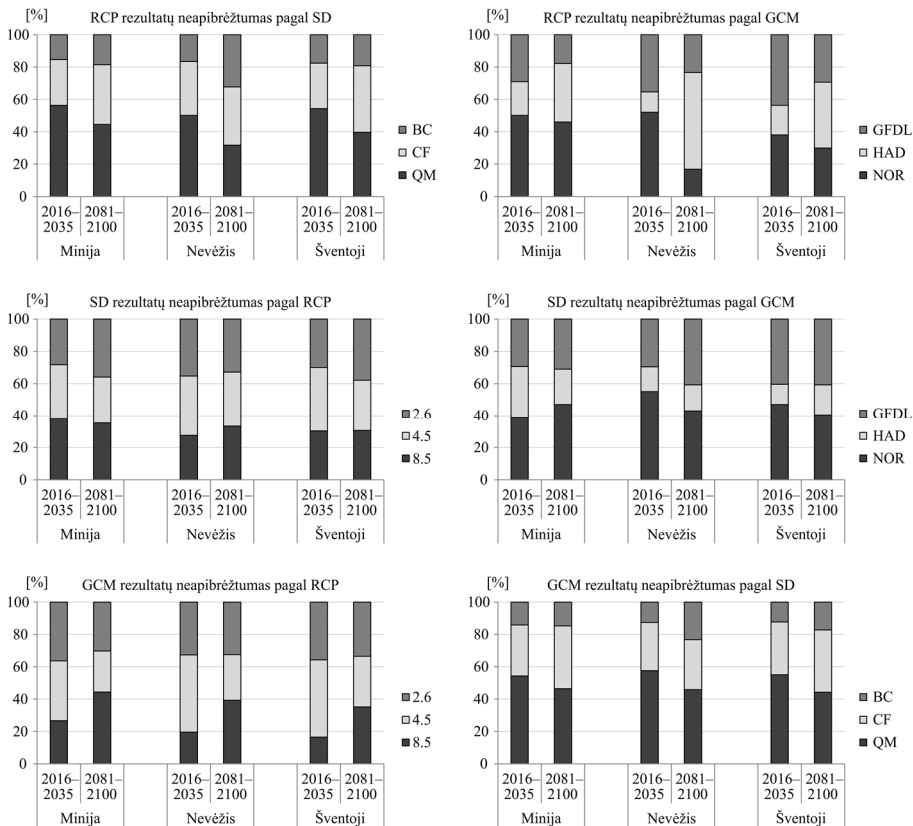
Vertinant poplūdžių prognozių neapibrėžtumus Šventosios upėje buvo nustatyta, kad artimoje ateityje neapibrėžtumų pasiskirstymo dėsninumai, pagal jų kilmės šaltinius, buvo labai panašūs į užfiksuotuosius Nevėžyje. Artimoje ateityje didžiausius neapibrėžtumus (43 %) taip pat sukėlė SD metodai, o tolimoje ateityje neapibrėžtumai buvo linkę didėti ir pasiekė 50,7 % (5.7 lent.). Nors RCP klimato scenarijų neapibrėžtumai liko nepakitę lyginant 2016–2035 m. (23,3 %) ir 2081–2100 m. (23,6 %) laikotarpius, tačiau GCM sukelti neapibrėžtumai tolimoje ateityje sumažėjo bei sudarė 25,7 %.

5.7 lentelė. Minijos, Nevėžio ir Šventosios vasaros ir rudens poplūdžių maksimalių debitų prognozių neapibrėžtumai (%) pagal skirtingus neapibrėžtumo šaltinius (RCP, SD ir GCM) 2016–2035 ir 2081–2100 m. laikotarpiais

	Minija		Nevėžis		Šventoji	
	2016–2035	2081–2100	2016–2035	2081–2100	2016–2035	2081–2100
RCP	23,8	20,9	22,3	16,2	23,3	23,6
SD	51,0	47,5	43,9	56,5	43,0	50,7
GCM	25,3	31,6	33,8	27,3	33,7	25,7

Vertinant vasaros ir rudens poplūdžių maksimalių debitų neapibrėžtumus tarp klimato scenarijų, tinklelio raiškos didinimo metodų ir globalaus klimato modelių, buvo sudarytos jų tarpusavio sąveikos stulpelių pavidalo diagramos (5.20 pav.). Minėtosios diagramos parodo, kokią įtaką turi kiekvieno neapibrėžtumo šaltinio sudedamosios dalys. RCP klimato scenarijų prognozių neapibrėžtumai pagal

skirtingus SD metodus rodo mažiausią sklaidą pagal BC metodą, o QM metodo neapibrėžtumai yra didžiausi. SD rezultatų neapibrėžtumai pagal skirtingus RCP klimato scenarijus neturi tokių ryškių pasiskirstymo dėsningumų. Vertinant RCP klimato scenarijų neapibrėžtumus, susijusius su skirtingais GCM nustatyta, kad pirmuoju laikotarpiu mažiausi neapibrėžtumai buvo pagal Had modelį, tačiau antruoju laikotarpiu Had modelio neapibrėžtumai smarkiai išauga, kas rodo šio modelio išvesties rezultatų nepastovumą prognozuojant šiltojo sezono poplūdžius. SD metodų rezultatų mažiausi neapibrėžtumai susiję su Had klimato modeliu, kuris smarkiai skiriasi nuo GFDL ir Nor, nes pastarųjų neapibrėžtumai yra panašių verčių. Globalaus klimato modelių prognozuojamų poplūdžių didžiausi neapibrėžtumai artimoje ateityje susiję su RCP4.5, o tolimoje ateityje su RCP8.5 scenarijais. GCM prognozių neapibrėžtumų analizė pagal skirtingus tinklelio raiškos didinimo metodus parodė, kad didžiausius neapibrėžtumus sukėlė QM metodas, o mažiausius – BC. Nors BC tinklelio raiškos didinimo metodas ir sukelia mažiausius neapibrėžtumus kitų SD metodų atžvilgiu, tačiau prieš tai atlikti tyrimai (5.3.1. ir 5.3.2. skyriai) parodė, kad prognozės, paremtos BC metodo korekcijomis, numato itin mažas ir realių hidrologinių sąlygų neatitinkančias poplūdžių reikšmes.



5.20 pav. Minijos, Nevėžio ir Šventosios vasaros ir rudens poplūdžių maksimalių debitų prognozių neapibrėžtumai (%) tarp skirtingų neapibrėžtumo šaltinių (RCP, SD ir GCM) 2016–2035 ir 2081–2100 m. laikotarpiais

6. REKOMENDACIJOS IR PASIŪLYMAI VANDENS TELKINIŲ IŠTEKLIŲ APSAUGOS IR VALDYMO DOKUMENTAMS RUOŠTI

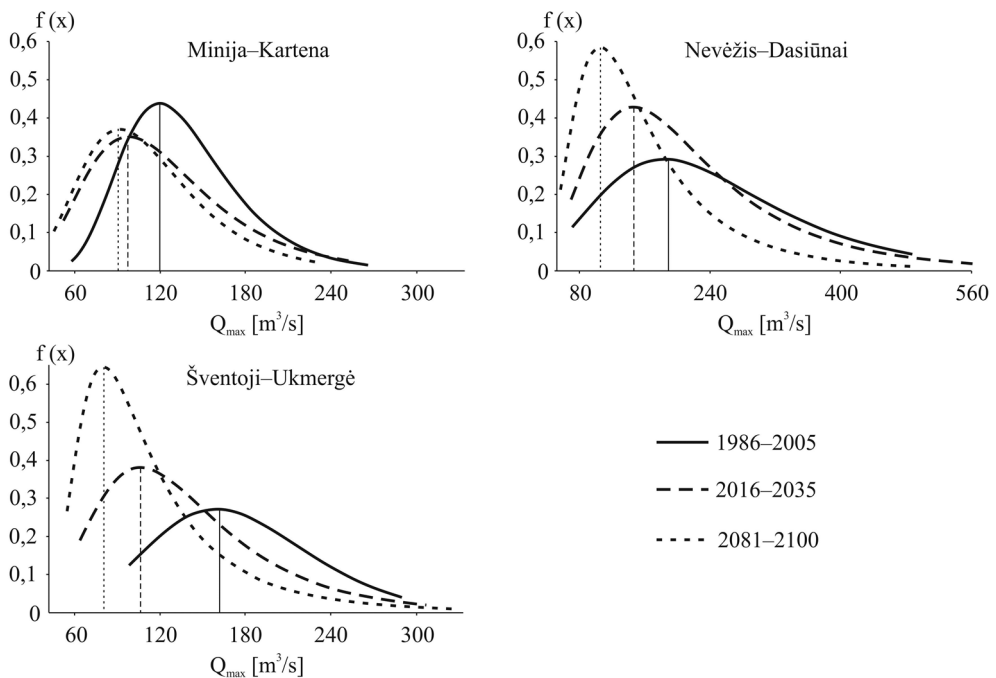
Nors Lietuva įgyvendina 2007 metų ES Potvynių Direktyvos (2007/60/EB) reikalavimus, tačiau hidrotechnikos statinių (HTS) projektavimo ir eksploatacijos praktika rodo, kad teisės aktuose yra nepakankamai vertinama jų griūties pavojaus rizika. Labiausiai grėsmingos pasekmės žmonėms, infrastruktūrai, gamtai tikėtinos susidarius ekstremaliai situacijai dėl techninio pobūdžio priežasčių (pvz. užtvankų griūties). Pagal Civilinės saugos įstatymą (VIII-971, Žin., 1998, Nr. 115-3230), prie pavojingų objektų yra priskirti hidrotechniniai įrenginiai, tačiau kituose dokumentuose hidrotechniniai įrenginiai ir jų keliamas pavojus neapibrėžiami. Minėto įstatymo tekste reglamentuoti civilinės saugos veiksmai ir viename iš punktų paminima damba, kaip pavojingo objekto dalis. 1998 m. LR aplinkos ministras įsakymu (Nr. 207, Žin., 1998, Nr. 98-2729) patvirtino potencialiai pavojingų HTS sąrašą, tačiau nuo 2007 m. kovo 28 d. šis įsakymas negalioja.

Virš 1200 užtvankų suprojektuotos ir pastatytos pagal Tarybų Sąjungos statybinių normų ir taisyklių reikalavimus. Pagal šio normatyvinio dokumento principus parengtos ir įteisintos Lietuvoje hidrotechninių statinių nuostatos (STR 2.02.06:2004 „Hidrotechnikos statiniai. Pagrindinės nuostatos“, Žin., 2004, Nr. 154-5624). Šis reglamentas yra pasenęs ir atspindi XX a. požiūrį į HTS riziką. Hidrotechniniai statiniai, visame pasaulyje yra priskiriami pavojingiems statiniams ir skirstomi į pasekmių klases (angl. *CC – consequence class*) pagal naudojimo galimus sutrikimus (Reglamento 1 priedo 2 lent.). 2013 metais Aplinkos ministro buvo patvirtinta „Preliminari potvynių pavojaus rizikos vertinimo ataskaita“, nuo to laiko nebuvo keičiami STR 2.02.06:2004 „Hidrotechnikos statiniai. Pagrindinės nuostatos“ reikalavimai hidroelektrinėms, jų užtvankoms bei griūties pasekmėms. Deja, pirmiausia buvo pabrėžti materialiai nuostoliai, o ne žmonių žūties rizika.

Galiojantis STR 2.02.06:2004 (Hidrotechniniai statiniai. Pagrindinės nuostatos) 26 punktas nepakeistas iki šiol ir pateikia klaidinančią ypatingų hidrotechnikos statinių sąvoką. Žmonių žūties rizika norminiame dokumente neegzistuoja. Tai didžiausias galiojančio dokumento trūkumas, kaip ir „potencialiai pavojingų statinių“ sąvokos vengimas. Kol neįteisinti visi europinę (EN, Eurokodas) arba pasaulinę (ISO) sistemą sudarantys dokumentai, Lietuvos Respublikoje, paveldėjusioje iš Tarybų Sąjungos statybos normas ir taisykles bei pagal jas pastatytus HTS, naudojami pasenę Statybos techniniai reglamentai (STR). Galima klimato kaita, vedanti prie neabejotino vandens telkinių režimo pasikeitimo ateityje, yra pagrindinė priežastis kuo skubiau vertinti potvynių ir sausmečio pavojaus riziką. Tiek nauji, tiek rekonstruoti hidrotechniniai statiniai pirmiausiai privalo būti saugūs ir juos statant turi būti įvertintos pasekmės ir žala žmonėms bei jų sveikatai. Šiuo metu užtvankos iki 35 m patvankos aukščio priskirtos CC2 pasekmių klasei, o užtvankos iki 15 m patvankos – CC1 klasei. Šios užtvankos griūties atveju sukeltų pavojingas žmonėms katastrofinės bangas. Normatyvas leidžia šių statinių pasekmių klasę padidinti vienetu, jeigu jų griūtis gali sukelti katastrofinius padarinius žemiau esantiems miestams, stambioms pramonės įmonėms, hidromazgams, automagistralėms ir kt. Tuo tarpu Švedijoje (Swedish Guidelines for Design Flood

Determination for Dams, 2007) net vieno žmogaus žūtis dėl užtvankos griūties reikalauja iki minimumo sumažinti pavojaus riziką, išskiriant tokius hidrotechninius statinius į atskirą, svarbiausią pavojingų statinių kategoriją. Techniniai ir ekonominiai pavojingų HTS aspektai nagrinėjami tik tuo atveju, jeigu žmonių žūtis rizika pašalinama.

Ši aplinkybė labai svarbi klimato kaitos sąlygomis, kadangi hidrotechniniai statiniai statomi 100, 150 arba 200 metų laikotarpiui (STR 1.12.06:2002 „Statinio naudojimo paskirtis ir gyvavimo trukmė“ Žin., 2002, Nr. 109-4837). Todėl HTS pasekmių klasėms nurodoma, kaip pasirinkti ekstremalių debitų tikimybes, kai pati tikimybė vertinama pagal daugiamečius duomenis, neįvertinant galimų klimato kaitos tendencijų (STR 2.05.19:2005 „Inžinerinė hidrologija. Pagrindiniai skaičiavimų reikalavimai“, Žin., 2005, Nr. 116-4215). Eksploatuojant ir projektuojant hidrotechninius statinius svarbu žinoti, ne tik koks buvo upių hidrologinis režimas praetyje, bet ir kaip jis gali keistis ateityje. Todėl, remiantis šiame darbe apibendrintais 27 skirtingų ateities klimato scenarijų kombinacijų rezultatais, buvo nustatytos esminės pavasario potvynių kaitos tendencijos artimoje ir tolimoje ateityje, kai trijose tirtose upėse labiausiai tikėtina prognozuojamo maksimalaus debito reikšmė mažėjo, tačiau ypač ekstremalių debitų reikšmės išaugo Nevėžio ir Šventosios upėse (6.1 pav.).



6.1 pav. Minijos, Nevėžio ir Šventosios pavasario potvynių maksimalių debitų tikimybinis pasiskirstymas 1986–2005, 2016–2035 ir 2081–2100 m. laikotarpiais

STR 2.02.06:2004 normatyvo 2 priedo 2 lentelėje normaliomis eksploatacijos sąlygomis numatyta potvynio pasikartojimo tikimybė (CC1 ir CC2 statinių klasėms) atitinkamai 5 ir 3 % pagal daugiamečius stebėjimų duomenis, t.y. šių maksimalių debitų pasikartojimas atitinkamai vyktų kas 20 ir 33 metus. Šios klasės hidrotechninių statinių pastovumo kontrolinis skaičiavimas vykdomas maksimaliems debitams, pasikartojantiems 1 kartą per 100 (CC1) arba 200 metų (6.1 lent.). Ekstremalių debitų tikimybė tenkina minimalios rizikos sąlygas tiek CC1, tiek CC2 klasei priskiriamiems statiniams, tačiau įvertinus tos pačios tikimybės potvynių maksimalių debitų pokyčius klimato kaitos sąlygomis, nustatyti skirtumai parodė ribinių debitų (1 % ir 0,5 % tikimybės) augimą artimoje ateityje (6–25 %) ir 6–35 % augimą tolimoje ateityje lyginant su 1986–2005 m. laikotarpio reikšmėmis (6.1 lent.). Tik Nevėžio upėje tolimos ateities laikotarpiu nustatytas neženklus analizuotų tikimybių debitų mažėjimas.

6.1 lentelė. Pasekmių klasėms priskiriamos ekstremalių debitų tikimybės (P , %) ir jas atitinkančių maksimalių debitų nuokrypiai (ΔQ_{max} , %) artimoje ir tolimoje ateityje lyginant su 1986–2005 m. laikotarpiu

HTS pasekmių klasė		CC1	CC2	CC3	CC4	
Pagrindinė tikimybė (P , %)		5,0	3,0	1,0	0,1	
ΔQ_{max} %	Minija	2016–2035	6	9	15	28
		2081–2100	-10	-7	0	23
	Nevėžis	2016–2035	-5	-2	6	28
		2081–2100	-28	-24	-13	19
	Šventoji	2016–2035	-3	3	16	49
		2081–2100	-10	0	20	76
Kontrolinė tikimybė (P , %)		1,0	0,5	0,1	0,01*	
ΔQ_{max} %	Minija	2016–2035	15	19	28	-
		2081–2100	0	6	23	-
	Nevėžis	2016–2035	6	12	28	-
		2081–2100	-13	-5	19	-
	Šventoji	2016–2035	16	25	49	-
		2081–2100	20	35	76	-

*Turi būti įvertinta garantinė pataisa, kuri nėra vertinama jeigu turimos duomenų eilutės metų skaičius $n \leq 50$

Šiame darbe įvertinus tirtų ekstremalių hidrologinių reiškinių prognozes, jų neapibrėžtumus ir galimas paklaidas per ilgus hidrotechninio statinio gyvavimo metus, yra siūloma nekeisti STR taikomų reikalavimų hidrotechniniams statiniams. Tačiau atsižvelgiant į ateityje išaugusius retų pasikartojimo tikimybių ekstremalius debitus, statybos techninio reglamento dokumentų rengimo bei peržiūros procesuose siūloma įtraukti ekstremalių debitų tikimybinį vertinimą, prognozuojant juos klimato kaitos sąlygomis artimai (2021–2040 m.) ir tolimai (2081–2100 m.) ateičiai. Toks vertinimas turi būti atliktas taikant ne mažiau kaip du globalaus klimato modelius iš CMIP5 projekto, du RCP klimato scenarijus bei du tinklelio raiškos didinimo

metodus (6.2 lent.). Taip pat svarbu periodiškai atnaujinti STR ir kitus dokumentus, pasirodžius naujiems klimato scenarijams ir patobulėjus globalaus klimato modeliams. Toks sprendimas padėtų nuodugniai ir objektyviai įvertinti visas galimas grėsmes žmonių gyvybei, susijusias su hidrotechninių statinių eksploatacija per visą jų tarnavimo laikotarpį.

6.2 lentelė. Rekomendacijos ir pasiūlymai ruošiant vandens telkinių išteklių apsaugos ir valdymo dokumentus

Nr.	Dokumentas	Dabartinė situacija	Siūlomi sprendimai
1.	Statybos techninis reglamentas (STR)	Dokumentuose nurodoma, kaip pagal HTS pasekmių klases pasirinkti ekstremalių debitų tikimybes, o tikimybinis vertinimas atliekamas pagal daugiamečius stebėjimų duomenis	Siūloma palikti dabartines nuostatas, pridėdant ekstremalių debitų tikimybinį vertinimą klimato kaitos sąlygomis artimos ir tolimes ateities laikotarpiais bei taikyti scenarijus, sudarytus ne mažiau kaip dviejų globalaus klimato modelių iš CMIP5 projekto, dviejų RCP klimato scenarijų bei dviejų tinklelio raiškos didinimo metodų
2.	Potvynių grėsmės ir rizikos žemėlapiai	Žemėlapiai sudaryti pagal ekstremalių debitų tikimybes, remiantis daugiamečiais stebėjimų duomenis	Siūloma įtraukti ekstremalių debitų prognozes artimos ateities laikotarpiui ir taikyti scenarijus, sudarytus ne mažiau kaip dviejų globalaus klimato modelių iš CMIP5 projekto, dviejų RCP klimato scenarijų bei dviejų tinklelio raiškos didinimo metodų
3.	Potvynių rizikos upių baseinų rajonų (UBR) valdymo planas	Tik potvynių rizikos valdymo plano projekte prognozuotas Nemuno baseino upių nuotėkis pagal SRES grupės (2000 m.) du klimato scenarijus (A1B ir B1) ir vieną regioninio klimato modelį (CCLM) 2021–2050 m. laikotarpiu	Potvynių rizikos valdymo plane siūloma atlikti ekstremalių debitų prognozes artimai ateičiai (2021–2040 m.) ir taikyti scenarijus, sudarytus ne mažiau kaip dviejų globalaus klimato modelių iš CMIP5 projekto, dviejų RCP klimato scenarijų bei dviejų tinklelio raiškos didinimo metodų
4.	Upių baseinų rajonų (UBR) valdymo planai	Nuotėkio prognozės buvo atliktos pagal SRES grupės (2000 m.) tris klimato scenarijus (A1, A2 ir B1) ir du senos kartos globalaus klimato modelius (ECHAM5 ir HadCM3) 2011–2020 m. laikotarpiu	Siūloma prognozuoti artimos ateities (2021–2040 m.) nuotėkį taikant ne mažiau kaip du naujausius RCP klimato scenarijus, du globalaus klimato modelius iš CMIP5 projekto ir du tinklelio raiškos didinimo metodus

Upių potvyniai yra vienas dažniausiai pasikartojančių gamtos reiškinių, keliančių reikšmingą neigiamą poveikį aplinkai, žmonėms, kultūros paveldui, ūkinei veiklai (Aplinkos apsaugos agentūra, 2017b). Bendros Europos Sąjungos valstybių pastangos sukurti potvynių rizikos vertinimo ir valdymo sistemą prasidėjo 2007 metais, priėmus Potvynių direktyvą (2007/60/EB), pagal kurią iki 2013 m. gruodžio 22 d. buvo parengti Lietuvos vandens telkinių potvynių grėsmės ir Potvynių rizikos žemėlapiai, o 2014 m. rugpjūčio 19 d. buvo parengtas ir viešai paskelbtas potvynių rizikos valdymo plano projektas, kuris, atsižvelgiant į gautus pasiūlymus ir pastabas, buvo atnaujintas ir papildytas 2015 m. liepos 24 d. Galiausiai 2017 m. gegužės 26 d. buvo parengtas „Potvynių rizikos Nemuno, Lielupės, Ventos ir Dauguvos upių baseinų rajonuose valdymo planas“. Peržvelgus šiuos dokumentus pastebėta, kad skirtas nepakankamas dėmesys galimiems klimato kaitos padariniams įvertinti.

Besikeičiantis klimatas ir ūkinė veikla yra vieni svarbiausių veiksnių, lemiančių potvynių pasekmes Baltijos jūros ir upių krantų teritorijose, kurių bendras plotas apima daugiau nei 5 % Lietuvos teritorijos ir sudaro 351 tūkst. ha (*Preliminarus potvynių rizikos vertinimo ataskaita*, patvirtinta LR aplinkos ministro 2012 m. sausio 11 d. įsakymu Nr. D1-23 (Žin., 2012, Nr. 9-348). 2007/60/EB direktyvos 12-tas punktas nurodo būtinybę sudaryti potvynių grėsmės rizikos žemėlapius, nurodančius galimą žalą. Lietuva yra įvykdžiusi šį reikalavimą, sukurdamą interaktyvų „Potvynių grėsmės ir rizikos žemėlapi“ (<http://potvyniai.aplinka.lt/potvyniai/>), kuriame yra nurodytos teritorijos, kurios būtų paveiktos 0,1, 1 ir 10 % tikimybių potvynio (pagal daugiamečius stebėjimų duomenis). Prieš tai minėtosios direktyvos 14-tas punktas reikalauja, kad šalių politikai ir atsakingi už sprendimų priėmimą asmenys, vertindami būsimų potvynių riziką, atsižvelgtų į vandens telkinių išteklių pokyčius, susijusius su klimato kaita. Jie siūlo reguliariai taikyti naujos kartos klimato scenarijus bei juos nuolatos atnaujinti. Todėl vadovaujantis šiuo punktu, potvynių direktyvos 14 str. 4 dalimi ir šiame tyrime nustatytais 1 % ir 0,1 % pasikartojimo tikimybės maksimalių debitų pokyčiais artimoje ateityje (6.1 lent.), siūloma įtraukti ateities ekstremalių debitų prognozes ir jas perkelti į žemėlapius artimos ateities laikotarpiui (2021–2040 m.) taikant ne mažiau kaip du globalaus klimato modelius iš CMIP5 projekto, du RCP klimato scenarijus bei du tinklelio raiškos didinimo metodus (6.2 lent.), nes pagal 2007/60/EB direktyvos 14 str. 2 dalį iki 2019 m. gruodžio 22 d. potvynių grėsmės ir rizikos žemėlapiai turi būti peržiūrėti ir prireikus atnaujinti, po to peržiūra turėtų būti vykdoma kas šešerius metus.

Šiuo metu sudaryti Nemuno, Lielupės, Ventos ir Dauguvos upių baseinų rajonų potvynių rizikos vertinimo planai vertina potvynių rizikos valdymo aspektus, daugiausiai dėmesio skiriant prevencinėms priemonėms, inžinerinės apsaugos priemonėms rekonstruojant ar statant naujus infrastruktūros objektus, atstatymo priemonėms ir pasirengimui apsaugoti nuo neigiamų pasekmių prognozuojant potvynius ir iš anksto informuojant bei perspėjant visuomenę apie artėjantį potvynį (Aplinkos apsaugos agentūra, 2017a). Tačiau klimato kaitos poveikis įvertintas tik Potvynių rizikos valdymo plano projekte (Aplinkos apsaugos politikos centras, 2015). Šiame projekte buvo prognozuotas Nemuno baseino upių nuotėkis pagal senuosius SRES grupės A1B ir B1 klimato scenarijus, kurie pasirodė 2000 m. ir

tiriant klimato kaitos įtaką tapo nebeaktualūs po RCP scenarijų pasirodymo 2013 m. Pačios prognozės buvo sudarytos 2021–2050 m. laikotarpiui taikant vandens balanso modelį WatBal. Pagrindiniai ateities nuotėkio prognozių įvesties duomenys buvo paimti iš CCLM (angl. *COSMO – Climate Limited-area Model*) regioninio klimato modelio, o apie meteorologinių parametrų korekcijas, taikant tinklelio raiškos didinimo metodus, nebuvo užsiminta. Pagal 2007/60/EB direktyvos 14 str. 3 ir 4 dalis, potvynių rizikos valdymo planai turi būti peržiūrėti atsižvelgiant į tikėtiną klimato kaitos poveikį potvynių dydžiui ir prireikus atnaujinti juos iki 2021 m. gruodžio 22 d., o po to kas 6 metus. Atsižvelgus į visus prognozių sudarymo principus Potvynių rizikos valdymo plano projekte, Potvynių rizikos valdymo planuose siūloma prognozuoti potvynius artimos ateities laikotarpiui (2021–2040 m.) paros intervalu (6.2 lent.). Potvynių prognozėms sudaryti turi būti taikomi ne mažiau kaip dviejų globalaus klimato modelių išvesties duomenys, bent du RCP klimato scenarijai ir du tinklelio raiškos didinimo metodai.

Direktyva 2000/60/EB, nustatanti Europos Bendrijos veiksmų vandens politikos srityje pagrindus, numato, kad upių baseinų rajonų (UBR) valdymo planai turi būti paruošti, patikslinti ir, esant reikalui, atnaujinami ne vėliau kaip po 15 metų nuo šios direktyvos įsigaliojimo dienos. Lietuva sėkmingai įvykdė išsikeltus susitarimo tikslus bei paruošė UBR valdymo planus (Aplinkos apsaugos agentūra, 2015). Peržvelgus šiuo metu paruoštus upių baseinų rajonų valdymo planus, buvo įvertinta metodika ir principai, kuriais remiantis sudarytos ateities nuotėkio prognozės ir įvertintas klimato kaitos poveikis paviršiniams vandens telkiniams. Upių baseinų rajonų valdymo planuose klimato kaita buvo įvertinta taikant senos kartos SRES grupės (2000 m.) tris klimato scenarijus – A1, A2 ir B1 2011–2020 m. laikotarpiu, kuris jau artėja prie pabaigos. Taip pat buvo panaudoti dviejų globalaus klimato modelių (ECHAM5 ir HadCM3) išvesties duomenys. Pastarieji modeliai taip pat turi atnaujintas versijas, kurios yra įtrauktos į CMIP5 projektą. Be to, 2000/60/EB direktyvos 13 str. 7 dalį bendrijos narės įsipareigoja kas šešerius metus peržiūrėti UBR ir juos atnaujinti. Kita peržiūra numatyta 2021 m., todėl atnaujintose upių baseinų rajonų valdymo planų versijose siūloma ateities nuotėkio prognozes atlikti pagal du naujausius RCP klimato scenarijus, du globalaus klimato modelius iš CMIP5 projekto ir du tinklelio raiškos didinimo metodus (6.2 lent.). Net pačiame Nemuno UBR valdymo plane teigiama, kad 2011–2020 m. laikotarpis yra pernelyg trumpas, kad būtų nustatyti ryškūs nuotėkio pasikeitimai, todėl atnaujinant dokumentus yra siūloma naudoti dvigubai ilgesnį – artimos ateities (2021–2040 m.) laikotarpį.

Visos pateiktos rekomendacijos yra pagrįstos disertaciniame darbe taikytais metodais ir darbo rengimo laikotarpiu aktualia informacija. Ateityje, pasirodžius naujiems klimato scenarijams (2021 m. TKKK planuoja išleisti šeštąją ataskaitą), patobulėjus globalaus arba regioninio klimato modeliams bei pasikeitus prognozavimo laikotarpiais, rekomendacijos turi būti tikslinamos ir pritaikytos ateities situacijai.

IŠVADOS

Disertaciniame darbe buvo įvertinti potvynių kaitos dėsningumai praityje ir pagal pasiūlytą originalią potvynių prognozavimo metodiką buvo sudarytos jų prognozės artimai (2016–2035 m.) ir tolimai (2081–2100 m.) ateičiai.

1. Įvertinus potvynių kaitos dėsningumus praityje, nustatyta, kad 1941–2013 m. laikotarpiu reikšmingi neigiami pavasario potvynių maksimalių debitų (Q_{max}) trendai buvo 12 iš 14 vandens matavimo stočių (VMS), o reikšmingi neigiami vasaros ir rudens sezonų poplūdžių Q_{max} trendai aptikti vos trijose VMS. 1961–2013 m. laikotarpiu pagal 31 VMS duomenis, reikšmingi neigiami pavasario potvynių Q_{max} trendai nustatyti 32 % VMS, neigiami trendai – 26 %, o 42 % VMS – jokių trendų. Vertinant 1961–2013 m. šiltojo sezono poplūdžių Q_{max} trendus, tik 2 iš 31 VMS buvo nustatyti reikšmingi neigiami, o likusiose VMS trendai nenustatyti. Paskutiniaisiais dešimtmečiais aiškių potvynių ir poplūdžių Q_{max} tendencijų neaptikta.
2. Svarbiausias pavasario potvynių dydį lemiantis veiksnys yra prieš pat potvynį susikaupusios maksimalios vandens atsargos sniege. Tikimybinį skirstinį analizė parodė, kad Vidurio ir Pietryčių Lietuvos hidrologiniuose rajonuose pavasario potvynių dydžio mažėjimas glaudžiai susijęs su maksimalių vandens atsargų sniege sumažėjimu.
3. Prognozuojant maksimalius debitus (Q_{max}) pagal naujausius klimato scenarijus, nustatytas pavasario potvynių Q_{max} mažėjimas bei jų sezoninis persiskirstymas, kai dalis pavasario potvynių vyks žiemą. Nors ateityje nustatytas pavasario potvynių vidutinio Q_{max} mažėjimas, kuris sudarys nuo -9,1 % iki -32,4 % lyginant su foninio laikotarpio norma, tačiau atskirais metais didės retos tikimybės ekstremalių potvynių Q_{max} . Pagal sudarytas trijų upių vasaros ir rudens sezonų poplūdžių prognozes, ateityje numatomas vidutinio Q_{max} augimas (1,3–16,2 %) bei išauga ekstremalių debitų tikimybė.
4. Vertinant ateities maksimalių debitų prognozių neapibrėžtumus, susijusius su trimis pasirinktais neapibrėžtumo šaltiniais (globalaus klimato modeliai, RCP klimato scenarijai ir tinklelio raiškos didinimo metodai), nustatyta, kad tinklelio raiškos didinimo metodai turi didžiausią įtaką (41,4–56,5 %) pavasario potvynių ir šiltojo sezono poplūdžių prognozių neapibrėžtumui.
5. Taikant šio darbo rezultatus, buvo paruoštos rekomendacijos vandens telkinių išteklių apsaugos ir valdymo dokumentams rengti. Prognozuojant potvynius ir vertinant pavojaus riziką, susijusią su galimais klimato kaitos padariniais, siūloma naudoti ne mažiau kaip du globalaus klimato modelius, du RCP klimato scenarijus ir du tinklelio raiškos didinimo metodus.
6. Sukurta originali pavasario potvynių bei vasaros ir rudens sezonų poplūdžių prognozavimo metodika artimai ir tolimai ateičiai. Ši metodika gali būti pritaikyta pietryčių Baltijos jūros regiono upių baseinams, turintiems panašias fizines–geografines ir klimatinės sąlygas, kaip ir šiame darbe tirti upių baseinai.

LITERATŪRA

1. ABIDA, H., and M. ELLOUZE. Probability distribution of flood flows in Tunisia. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2008, 12, 703-714. ISSN 1027-5606.
2. ALCAMO, J., et al. An evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios. In: *Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge, 1995. pp. 247-304.
3. ALFIERI, L., et al. Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2015, 19(5), 2247-2260. ISSN 1027-5606.
4. ANDERSON, K., and D. A. DARLING. Asymptotic theory of certain „goodness-of-fit“ criteria based on stochastic processes. *Annals of Mathematical Statistics*. 1952, 23 (2), 193-212. ISSN 0003-4851.
5. APLINKOS APSAUGOS AGENTŪRA. *UBR valdymo planai ir priemonių programos* [interaktyvus]. 2015. [žiūrėta 2018-07-24]. Prieiga per internetą: <http://vanduo.gamta.lt/cms/index?rubricId=7b119b35-84ac-4d02-8967-287b9918e5c4>
6. APLINKOS APSAUGOS AGENTŪRA. *Potvynių rizikos Nemuno, Lielupės, Ventos ir Dauguvos upių baseinų rajonuose valdymo planas* [interaktyvus]. 2017a. [žiūrėta 2018-07-24]. Prieiga per internetą: http://vanduo.gamta.lt/files/LT_Flood_Risk_Management_Plan_whole_territory19.pdf
7. APLINKOS APSAUGOS AGENTŪRA. *Potvynių direktyvos įgyvendinimas* [interaktyvus]. 2017b. [žiūrėta 2018-07-24]. Prieiga per internetą: <http://vanduo.gamta.lt/cms/index?rubricId=6d87deab-3ecc-412a-9b66-7fd6361f26ba>
8. APLINKOS APSAUGOS POLITIKOS CENTRAS. *Nemuno, Lielupės, Ventos ir Dauguvos upių baseinų rajonų potvynių rizikos valdymo plano projektas* [interaktyvus]. 2015. [žiūrėta 2018-07-24]. Prieiga per internetą: http://vanduo.gamta.lt/files/PLANOPR1_6.pdf
9. ASCILA, R., et al. Hydrological aspects of flooding of the Nemunas river delta. *Transactions of the Lithuanian University of Agriculture and Lithuanian Institute for Water Management*. 2002, 18(40), 3-12.
10. BALDASSARRE, G., and A. MONTANARI. Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2009, 13(6), 913-921. ISSN 1027-5606.
11. BARREDO, J. I. Normalized flood losses in Europe: 1970-2006. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2009, 9(1), 97-104. ISSN 1561-8633.
12. BENTSEN, M., et al. The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M – Part 1: Description and basic evaluation of the physical climate. *Geoscientific Model Development*. 2013, 6(3), p. 687-720. ISSN 1991-959X.
13. BERGSTROM, S., et al. Climate change impacts on runoff in Sweden – assessments by global climate models, dynamical downscaling and hydrological modelling. *Climate Research*. 2001, 16, 101-112. ISSN 0936-577X.
14. BLAZKOVA, S., and K. BEVEN. Flood frequency estimation by continuous simulation for a catchment treated as ungauged (with uncertainty). *Water Resources Research*. 2002, 38(8), 1139, pp. 14. ISSN 0043-1397.
15. BLÖSCHL, G., and R. MERZ. Estimating flood risk in Austria. *Slovak Journal of Civil Engineering*. 2008, 3, 13-20. ISSN 1338-3973.
16. BLÖSCHL, G., et al. The June 2013 flood in the Upper Danube Basin, and comparisons with the 2002, 1954 and 1899 floods. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2013, 17(12), 5197-5212. ISSN 1027-5606.
17. BOOIJ, M. J. Appropriate hydrological modelling of climate change impacts on river flooding. In: Integrated assessment and decision support. In *First Biennial Meeting of the*

- International Environmental Modelling and Software Society, June 24-27, 2002, Lugano, Switzerland. Lugano: Switzerland, 2002. pp. 446-451.*
18. BRYAN, K., et al. (1975). A Global Ocean-Atmosphere Climate Model. Part II. The Oceanic Circulation. *Journal of Physical Oceanography*. 1975, 5(1), 30-46. ISSN 0022-3670.
19. BURR, I. W. Cumulative frequency functions. *Annals of Mathematical Statistics*. 1942, 13(2), 215-232. ISSN 0003-4851.
20. CASANUEVA, A., et al. Evaluation and projection of daily temperature percentiles from statistical and dynamical downscaling methods. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2013, 13(8), 2089-2099. ISSN 1561-8633.
21. CASTELLARIN, A., and A. PISTOCCHI. An analysis of change in alpine annual maximum discharges: implications for the selection of design discharges. *Hydrological Processes*. 2012, 26(10), 1517-1526. ISSN 0885-6087.
22. CHAKRAVARTI, I., LAHA, R., and J. ROY. *Handbook of Methods of Applied Statistics*. John Wiley & Sons, New York, 1967.
23. CHEN, Z., and S. E. GRASBY. Impact of decadal and century-scale oscillations on hydroclimate trend analyses. *Journal of Hydrology*. 2009, 365(1-2), 122-133. ISSN 0022-1694.
24. CHEN, J., et al. Overall uncertainty study of the hydrological impacts of climate change for a Canadian watershed. *Water Resources Research*. 2011a, 47(12), W12509, pp. 16. ISSN 0043-1397.
25. CHEN, J., BRISSETTE, F. P. and R. LECONTE. Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *Journal of Hydrology*. 2011b. 401(3-4), 190-202. ISSN 0022-1694.
26. CHEN, J. Impacts of weighting climate models for hydro-meteorological climate change studies. *Journal of Hydrology*. 2017, 549, 534-546. ISSN 0022-1694.
27. CLARKE, L. E., et al. *Scenarios of greenhouse gas emissions and atmospheric concentrations*. Sub-report 2.1a of Synthesis and Assessment Product 2.1. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, Washington DC, 2007.
28. CLAUSSEN, M., et al. Earth system models of intermediate complexity: Closing the gap in the spectrum of climate system models. *Climate Dynamics*. 2002, 18(7), 579-586. ISSN 0930-7575.
29. DANNEBERG, J. Changes in runoff time series in Thuringia, Germany – Mann-Kendall trend test and extreme value analysis. *Advances in Geosciences*. 2012, 31, 49-56. ISSN 1680-7359.
30. DAVIE, J. C. S., et al. Comparing projections of future changes in runoff from hydrological and biome models in ISI-MIP. *Earth System Dynamics*. 2013, 4(2), 359-374. ISSN 2190-4979.
31. DENIS, B., et al. Downscaling ability of one-way nested regional climate models: The Big Brother Experiment. *Climate Dynamics*. 2002 18(8), 627-646. ISSN 0930-7575.
32. DONNER, L. J., et al. The dynamical core, physical parameterizations, and basic simulation characteristics of the atmospheric component AM3 of the GFDL Global Coupled Model CM3. *Journal of Climate*. 2011, 24(13), 3484-3519. ISSN 0894-8755.
33. DOSIO, A., and P. PARUOLO. Bias correction of the ENSEMBLES high-resolution climate change projections for use by impact models: Evaluation on the present climate. *Journal of Geophysical Research*. 2011, 116(D16), D16106 pp. 22. ISSN 0148-0227.
34. DUMBRAUSKAS, A. and P. PUNYS. Character of floods of the Nemunas River delta. In *International conference "Towards natural flood reduction strategies"*, September 6-13, 2003, Warsaw, Poland. 2003.

35. DUMBRAUSKAS, A., et al. Trend detection in hydrological series of main Lithuanian rivers. In *The 7th International conference "Environmental engineering", May 22-23, 2008, Vilnius, Lithuania*. 2008. pp. 508-514.
36. EDWARDS, P. N. *A Vast Machine: Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming*. Cambridge. 2010, MA: MIT Press, 2010.
37. EEA. *Disasters in Europe: more frequent and causing more damage* [interaktyvus]. 2011. [žiūrėta 2018-07-24]. Prieiga per internetą: <https://www.eea.europa.eu/highlights/natural-hazards-and-technological-accidents>
38. ENGELAND, K., et al. Evaluation of statistical models for forecast errors from the HBV model. *Journal of Hydrology*. 2010, 384(1-2), 142-155. ISSN 0022-1694.
39. FLATO, G. Earth system models: an overview. *Wiley Interdisciplinary Reviews, Climate Change*. 2011, 2(6), 783-800. ISSN 1757-7780.
40. FIEDLER, F. R. Simple, Practical Method for Determining Station Weights Using Thiessen Polygons and Isohyetal Maps. *Journal of Hydrologic Engineering*. 2003, 8(4), 219-221. ISSN 1084-0699.
41. *Flood Studies Report* (5 Volumes + maps). Natural Environment Research Council. London, UK, 1975.
42. FORBES, C., et al. *Statistical Distributions*. John Wiley & Sons, New York, 2011.
43. FOWLER, H. J., BLENKINSOP, S., and C. TEBALDI. Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*. 2007, 27(12), 1547-1578. ISSN 0899-8418.
44. FRÜH, B., et al. Determination of precipitation return values in complex terrain and their evaluation. *Journal of Climate*. 2010, 23, 2257-2274. ISSN 0894-8755.
45. GAILIUŠIS, B., JABLONSKIS, J., ir M. KOVALENKOVIENĖ. *Lietuvos upės. Hidrografija ir nuotėkis*. Kaunas: Lietuvos energetikos institutas, 2001.
46. GALVONAITĖ, A., MISIŪNIENĖ, M., VALIUKAS, D., and M. S. BUITKUVIENĖ. *Lietuvos klimatas*. Kaunas: ARX Baltica, 2007.
47. *Global Carbon Atlas* [interaktyvus]. 2019. [žiūrėta 2019-03-12]. Prieiga per internetą: <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>
48. GOLDBERG, P. M., and V. N. PLUZHNIKOV. The Vileyka-Minsk water system. *Hydrotechnical Construction*. 1976, 10(12), 1218-1222.
49. GRANIER, C., et al. Evolution of anthropogenic and biomass burning emissions at global and regional scales during the 1980-2010 period. *Climatic Change*. 2011, 109(1-2), 163-190. ISSN 0165-0009.
50. GUDMUNDSSON, L., et al. Comparing Large-Scale Hydrological Model Simulations to Observed Runoff Percentiles in Europe. *Journal of Hydrometeorology*. 2012a, 13(2), 604-620. ISSN 1525-755X.
51. GUDMUNDSSON, L., et al. Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations – a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2012b, 16(9), 3383-3390. ISSN 1027-5606.
52. HALL, J, et al. Understanding flood regime changes in Europe: a state-of-the-art assessment. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2014, 18(7), 2735-2772. ISSN 1027-5606.
53. HANDMER, J. Improving flood warnings in Europe: a research and policy agenda. *Environmental Hazards*. 2001, 3(1), 19-28. ISSN 1747-7891.
54. HANEL, M., et al. Evaluation of Simple Statistical Downscaling Methods for Monthly Regional Climate Model Simulations with Respect to the Estimated Changes in Runoff in the Czech Republic. *Water Resources Management*. 2013, 27(15), 5261-5279. ISSN 0920-4741.

55. HANNAFORD, J., and T. J. HANNAFORD. High flow and flood trends in a network of undisturbed catchments in the UK. *International Journal of Climatology*. 2008, 28(10), 1325-1338. ISSN 0899-8418.
56. HAWKINS, E., et al. Calibration and bias correction of climate projections for crop modelling: An idealised case study over Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2013, 170, 19-31. ISSN 0168-1923.
57. HIGGINS, J. *The Radical Statistician: A Beginners Guide to Unleashing the Power of Applied Statistics in the Real World*. Jim Higgins Publishing, California, 2005.
58. HISDAL, H., et al. Climate change signals in streamflow data in the Nordic and Baltic region. In *Third international conference on climate and water, September 3-6, Helsinki, Finland*. Helsinki. Finnish Environment Institute SYKE, 2007. pp. 182-187.
59. HO, C. K., et al. Calibration strategies: a source of additional uncertainty in climate change projections. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2012, 93(1), 21-26. ISSN 0003-0007.
60. HOLDER, R. L. *Multiple regression in hydrology*. Institute of Hydrology. Wallingford, U.K., 1985.
61. HOUGHTON, J. T., et al. (eds.) (1995). *Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge, 339 pp.
62. HULME, M. *The International Encyclopedia of Geography: Climate Change, Concept of*. John Wiley & Sons, New York, 2017.
63. HURTT, G., et al. Harmonization of land-use scenarios for the period 1500-2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands. *Climatic Change*. 2011, 109(1), 117-161. ISSN 0165-0009.
64. HWANG, Y., et al. Use of daily precipitation uncertainties in streamflow simulation and forecast. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2011, 25(7), 1-16.
65. *Integrated Hydrological Modelling System*. Manual. Version 5.8. SMHI, 2005.
66. IPCC. *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*. World Meteorological Organization / United Nation Environment Programme / Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Jenkins G.J. and Ephraums J.J.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, New York, NY, USA and Melbourne, Australia, 1990.
67. IPCC. *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., et al.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1996.
68. IPCC. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001.
69. IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
70. IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.
71. YUE, S., and C. WANG. The Mann-Kendall Test Modified by Effective Sample Size to Detect Trend in Serially Correlated Hydrological Series. *Water Resources Management*. 2004, 18(3), 201-218. ISSN 0920-4741.

72. YUE, S., KUNDZEWICH, Z. W., and L. WANG, *Detection of Changes*. In Kundzewicz Z. W. (Ed.). *Changes in Flood Risk in Europe*. Chapter 22. IAHS Press, 2012.
73. JABLONSKIS, J. *Upių pavasario potvynių didžiausių stebėtų debitų pasiskirstymas Lietuvos ir Kaliningrado srities teritorijoje*. Statyba ir architektūra, 8 t. Vilnius: Mintis, 1969. pp. 55-60.
74. JABLONSKIS, J. Didžiausių debitų pasikartojimo tikimybė Lietuvos upėse. Lietuvos TSR vandens išteklių ir jų apsauga nuo išsekimo ir užteršimo. *Moksl.-techn. konf., 1971 10 26-27 tezės*. Vilnius, 1971. pp. 25-32.
75. JABLONSKIS, J., ir M. LASINSKAS. Nemuno stacionariams hidrometriniams tyrimams 200 metų. 2011, 57(1), 34-43.
76. JAKIMAVIČIUS, D., and J. KRIAUCIŪNIENĖ. The climate change impact on the water balance of the Curonian Lagoon. *Water Resources*. 2013, 40(2), 120-132. ISSN 0097-8078.
77. JAKIMAVIČIUS, D., KRIAUCIŪNIENĖ, J., and D. ŠARAUSKIENĖ. Impact of climate change on the Curonian Lagoon water balance components, salinity and water temperature in the 21 st century. *Oceanologia*. 2018, 60(3), 378-389. ISSN 0078-3234.
78. JOHNSON, N. I., KOTZ, S., and N. BALAKRISHNAN. *Continuous Univariate Distributions*. John Wiley & Sons, New York, 1994.
79. JUOZOKAITĖ, L. *Potvynių rizika Lietuvoje: Kauno ir Vilniaus gatvės dar gali būti užlietos* [interaktyvus]. 2011. [žiūrėta 2018-07-23]. Prieiga per internetą: <https://www.delfi.lt/grynas/aplinka/potvyniu-rizika-lietuvoje-kauno-ir-vilniaus-gatves-dar-gali-buti-uzlietos.d?id=48156525>
80. KERŠYTĖ, D., RIMKUS, E., and J. KAŽYS. Klimato rodiklių scenarijai Lietuvos teritorijoje XXI a. *Geologija. Geografija*. 2015, 1(1), 22-35. ISSN 2351-7549.
81. KIDSON, R., and K. S. RICHARDS. Flood frequency analysis: assumptions and alternatives. *Progress in Physical Geography*. 2005, 29(3), 392-410. ISSN 0309-1333.
82. KILKUS, K., et al. Changes in water balance structure of Lithuanian rivers under different climate change scenarios. *Environmental Research, Engineering and Management*. 2006, 3(26), 3-10. ISSN 1392-1649.
83. KJELDSSEN, T. R., et al. Regional flood frequency analysis in the KwaZulu-Natal province, South Africa, using the index flood method. *Journal of Hydrology*. 2002, 255(1-4), 194-211. ISSN 0022-1694.
84. KNUTTI, R. and J. SEDLÁČEK. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*. 2013, 3, 369-373. ISSN 1758-678X.
85. KOIRALA, S., et al. Global assessment of agreement among stream flow projections using CMIP5 model outputs. *Environmental Research Letters*. 2014, 9(6), 11 pp. ISSN 1748-9326.
86. KOLUPAILA, S. Naujos formulės Lietuvos upių maksimaliam debitui skaičiuoti. *Žemėtvarka ir melioracija*. 1934, 2, 3-27.
87. KORHONEN, J., and E. KUUSISTO. Long term changes in the discharge regime in Finland. *Hydrology Research*. 2010, 41(3-4), 253-268. ISSN 0029-1277.
88. KRIAUCIŪNIENĖ, J., et al. Climate change impact on hydrological processes in Lithuanian Nemunas river basin. *Baltica*. 2008, 21(1-2), 51-61. ISSN 0067-3064.
89. KRIAUCIŪNIENĖ, J., ŠARAUSKIENĖ, D., and B. GAILIUSIS. Estimation of Uncertainty in Catchment-Scale Modelling of Climate Change Impact (Case of the Merkys River, Lithuania). *Environmental Research, Engineering and Management*. 2009, 47(1), 30-39. ISSN 1392-1649.
90. KRIAUCIŪNIENĖ, J., et al. Variability in temperature, precipitation and river discharge in Baltic States. *Boreal Environment Research*. 2012, 17, 150-162. ISSN 1797-2469.

91. KRIAUCIŪNIENĖ, J., et al. Estimation of uncertainty sources in the projections of Lithuanian river runoff. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2013, 27(4), 769-784. ISSN 1436-3240.
92. KUNDZEWICZ, Z. W., et al. Trend detection in river flow series: 1. Annual maximum flow. *Hydrological Sciences Journal*. 2005, 50(5), 797-810. ISSN 0262-6667.
93. KUNDZEWICZ, Z. W., PINSKWAR, I., and G. R. BRAKENRIDGE. Large floods in Europe, 1985-2009. *Hydrological Sciences Journal*. 2013, 58(1), 1-7. ISSN 0262-6667.
94. KUNDZEWICZ, Z. W., et al. Differences in flood hazard projections in Europe – their causes and consequences for decision making. *Hydrological Sciences Journal*. 2017, 62(1), 1-14. ISSN 0262-6667.
95. KUNDZEWICZ, Z. W., et al. Uncertainty in climate change impacts on water resources. *Environmental Science and Policy*. 2018, 79, 1-8. ISSN 1462-9011.
96. KUNZ, M., et al. Assessment of extreme wind speeds from regional climate models – Part 1: Estimation of return values and their evaluation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2010, 10(4), 907-922. ISSN 1561-8633.
97. LAMARQUE, J. F., et al. Global and regional evolution of short-lived radiatively-active gases and aerosols in the Representative Concentration Pathways. *Climatic Change*. 2011, 109(1), 191-212. ISSN 0165-0009.
98. LANG, M., et al. A national study on trends and variations of French floods and droughts. In *Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, November 2006*. IAHS Publication, 2006, pp. 514-519.
99. LANG, M., et al. *Data-Based Comparison of Frequency Analysis Approaches: Methodological Framework and Application to Rainfall*. Runoff Data in France American Geophysical Union, Fall Meeting, 2010.
100. LASINSKAS, M. Apie maksimalių debitų skaičiavimo metodiką. *Mokslas ir technika*. 1963, 2, 36-37.
101. LATIF, M. Uncertainty in climate change projections. *Journal of Geochemical Exploration*. 2011, 110(1), 1-7. ISSN 0375-6742.
102. LAWRENCE, D., and I. HADDELAND. Uncertainty in hydrological modelling of climate change impacts in four Norwegian catchments. *Hydrology Research*. 2011, 42(6), 457-471. ISSN 0029-1277.
103. LEANDER, R., and T. A. BUIHAND. Resampling Of Regional Climate Model Output For The Simulation Of Extreme River Flows. *Journal of Hydrology*. 2006, 332(3-4), 487-496. ISSN 0022-1694.
104. LEANDER, R., et al. Estimated Changes In Flood Quantiles Of The River Meuse From Resampling Of Regional Climate Model Output. *Journal of Hydrology*. 2008, 351(3-4), 331-343. ISSN 0022-1694.
105. LEGGETT, J., PEPPER, W. J., and R. SWART. *Emissions scenarios for IPCC: An update*. In: *Climate Change 1992*. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment [Houghton, J.T., B.A. Calalnder, and S.K. Varney (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1992.
106. LO, J. C., YANG, Z., and R. A. PIELKE. Assessment of three dynamical climate downscaling methods using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. *Journal of Geophysical Research*. 2008, 113, D09112, pp. 16. ISSN 0148-0227.
107. LÖW, P. *Natural catastrophes in 2012 dominated by U.S. weather extremes* [interaktyvus]. 2013. [žiūrėta 2018-07-23]. Prieiga per internetą: <http://www.worldwatch.org/natural-catastrophes-2012-dominated-us-weather-extremes-0>
108. MACEVIČIUS, J. and J. ŽILEVIČIUS. *Lietuvos TSR upių maksimalių pavasario potvynių debitų nustatymas*. Kauno Politechnikos instituto darbai. IV t. Vilnius: Valst. politinės ir mokslinės literatūros leidykla, 1955. pp. 139-160.

109. MACEVIČIUS, J., and A. ŽILĖNAS. *Lietuvos upių pavasario potvynio tūris ir maksimalus debitas*. Statybinės medžiagos ir konstrukcijos. Vilnius: Mintis, 1965. pp. 65-69.
110. MAIDMENT, D. R. *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill: 1993.
111. MANABE, S., et al. A Global Ocean-Atmosphere Climate Model: Part I. The Atmospheric Circulation. *Journal of Physical Oceanography*. 1975, 5(1), 3-29. ISSN 0022-3670.
112. MARAUN, D., et al. Precipitation downscaling under climate change. Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*. 2010, 48(3), RG3003 pp. 34. ISSN 1944-9208.
113. MEDIERO, L., and A. JIMÉNEZ. Regional analysis for frequency estimation of annual flood peaks in ungauged basins of Spain. *Geophysical Research Abstracts*. 2007, 9, 03251. ISSN 1029-7006.
114. MEILUTYTĖ-BARAUSKIENĖ, D., and M. KOVALENKOVIENĖ. Change of spring flood parameters in Lithuanian rivers. *Energetika*. 2007, 53(2), 26-33. ISSN 0235-7208.
115. MEILUTYTĖ-BARAUSKIENĖ, D., KRIAUCIŪNIENĖ, J., and M. KOVALENKOVIENĖ. *Impact of climate change on runoff of the Lithuanian rivers. Modern climate change models, statistical methods and hydrological modelling*. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2010.
116. MEINSHAUSEN, M., et al. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*. 2011, 109(1-2), 213-241. ISSN 0165-0009.
117. MELO, M., et al. Use of historical sources in a study of the 1895 floods on the Danube River and its tributaries. *Geographica Pannonica*. 2014, 18(4), 108-116. ISSN 0354-8724.
118. MITOSEK, H. T., et al. Three procedures for selection of annual flood peak distribution. *Journal of Hydrology*. 2006, 323(1-4), 57-73. ISSN 0022-1694.
119. MOSS, R. H., et al. Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies. In: *IPCC Expert Meeting Report: Towards New Scenarios. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 2008*. 132 pp.
120. MOSS, R. H., et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*. 2010, 463(7282), 747-756. ISSN 0028-0836.
121. NAKIĆENOVIĆ, N., SWART, R. (eds.). *Special Report on Emissions Scenarios*. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2000.
122. NEFF, B. P., and J. R. NICHOLAS. *Uncertainty in the Great Lakes Water Balance*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2004-5100, 2005 42 p.
123. NOAA. *The First Climate Model* [interaktyvus]. 2012. [žiūrėta 2016-11-23]. Prieiga per: http://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/welcome.html
124. ØYGARDEN, L., et al. Climate change and the potential effects on runoff and nitrogen losses in the Nordic-Baltic region. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2014, 198, 114-126. ISSN 0167-8809.
125. PARRY, M. Scenarios for climate impact and adaptation assessment. *Global Environmental Change*. 2002, 12, 149-153. ISSN 0959-3780.
126. PEEL, M. C., et al. The utility of L-moment ratio diagrams for selecting a regional probability distribution. *Hydrological Sciences Journal*. 2001, 46(1), 147-155. ISSN 0262-6667.
127. PETOUKHOV, V., et al. EMIC Intercomparison Project (EMIP-CO2): Comparative analysis of EMIC simulations of climate, and of equilibrium and transient responses to atmospheric CO2 doubling. *Climate Dynamics*. 2005, 25(4), 363-385. ISSN 0930-7575.
128. PIANI, C., HAERTER, J. O., and E. COPPOLA. Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theoretical and Applied Climatology*. 2010, 99(1), 187-192. ISSN 0177-798X.

129. POŠKA, A. Maksimalių vandens debitų skaičiavimo klausimai Lietuvos TSR. *LŽŪA Aštuntosios dėstytojų mokslinės konferencijos tezės*. Kaunas, 1962. pp. 63-64.
130. PRIMOŽIČ, M., et al. The implementation of the HBV model on the Sava River Basin. In *XXIVth Conference of the Danubian Countries: Earth and Environmental Science, June 2-4, Bled, Slovenia*. 2008. pp. 1-11.
131. PRUDHOMME, C., REYNARD, N., and S. CROOKS. Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: where are we now? *Hydrological Processes*. 2002, 16(6), 1137-1150. ISSN 0885-6087.
132. REIHAN, A., et al. Temporal variation of spring flood in rivers of the Baltic States. *Hydrology Research*. 2012, 43(4), 301-314. ISSN 0029-1277.
133. RIAHI, K, GRÜBLER, A, NAKICENOVIC, N. Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change*. 2007, 74(7), 887-935. ISSN 0040-1625.
134. ROMANOWICZ, R. J., et al. Climate Change Impact on Hydrological Extremes: Preliminary Results from the Polish-Norwegian Project. *Acta Geophysica*. 2016, 64(2), 477-509. ISSN 1895-7455.
135. ROUDIER, P., et al. Projections of future floods and hydrological droughts in Europe under a +2°C global warming. *Climatic Change*. 2016, 135(2), 341-355. ISSN 0165-0009.
136. SATTARY, J., et al. The Impact of Measurement Uncertainty on the Water Balance. *Water and Environment Journal*. 2002, 16(3), 218-222. ISSN 1747-6585.
137. SAUER, N. Russia reviews ratification of Paris Agreement. *Climate Home News*. [interaktyvus]. 2019. [žiūrėta 2019-03-13]. Prieiga per internetą <https://www.climatechangenews.com/2019/02/06/russia-reviews-ratification-paris-agreement/>
138. SHADMANI, M., MAROFI, S., and M. ROKNIAN. Trend analysis in reference evapo-transpiration using Mann-Kendall and Spearman's Rho tests arid regions of Iran. *Water Resource Management*. 2012, 26, 211-224. ISSN 0920-4741.
139. SHEN, M. Estimating uncertainty and its temporal variation related to global climate models in quantifying climate change impacts on hydrology. *Journal of Hydrology*. 2018, 556, 10-24. ISSN 0022-1694.
140. SIMAITYTĖ, J., et al. Kaunas hydropower system management. *Management of natural resources, sustainable development and ecological hazards*. 2007, 99, 493-502.
141. SMITH, S. J., and T. M. L. WIGLEY. Multi Gas forcing stabilization with minicam. *The Energy Journal Special Issue*. 2006, 27, 373-391.
142. SMHI. *HBV Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning* [interaktyvus]. 2015. [žiūrėta 2018-07-24]. Prieiga per internetą <https://www.smhi.se/en/research/research-departments/hydrology/hbv-1.90007>
143. STANKŪNAVIČIUS, G., et al. Meteorological features behind spring runoff formation in the Nemunas River. *Boreal Environment Research*. 2007, 12(6), 643-651. ISSN 1797-2469.
144. STEDINGER, J. R., and V. W. GRIFFIS. Flood Frequency Analysis in the United States: Time to Update. *Journal of Hydrologic Engineering*. 2008, 13(4), 199-204. ISSN 1084-0699.
145. STONEVIČIUS, E., et al. Climate change impact on the Nemunas River basin hydrology in the 21st century. *Boreal Environment Research*. 2017, 22(1), 49-65. ISSN 1797-2469.
146. SUNYER, M. A., MADSEN, H., and P. H. ANG. A comparison of different regional climate models and statistical downscaling methods for extreme rainfall estimation under climate change. *Atmospheric Research*. 2012, 103, 119-128. ISSN 0169-8095.

147. SUNYER, M. A., et al. Inter-comparison of statistical downscaling methods for projection of extreme precipitation in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2015, 19(4), 1827-1847. ISSN 1027-5606.
148. SVENSSON, C., et al. Trend detection in river flow series: 2. Flood and low-flow index series. *Hydrological Science Journal*. 2005, 50(5), 811-824. ISSN 0262-6667.
149. *Swedish Guidelines for Design Flood Determination for Dams. New edition*. Swedenergy, Svenska Kraftnät and SveMin, 2007.
150. ŠARAUSKIENĖ, D., and J. KRIAUCIŪNIENĖ. Flood frequency analysis of Lithuanian rivers. In *Environmental engineering: 8th international conference, May 19-20, 2011, Vilnius, Lithuania*. Vilnius: VGTU Press „Technika“, 2011. pp. 666-671.
151. ŠARAUSKIENĖ, D., et al. Flood pattern changes in the rivers of the Baltic countries. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. 2014, 23(1), 28-38. ISSN 1648-6897.
152. SCHNEIDER, S. H. Editorial for the first issue of climatic change. *Climatic Change*. 1977, 1(1), 3-4. ISSN 0165-0009.
153. ŠIKŠNYS, A., and J. JARMAKAITĖ. Kauno HE įtaka Nemuno upės potvynių maksimaliems vandens debitams. *Vandens ūkio inžinerija*. 2012, 40(60), 46-53. ISSN 1392-1134.
154. TENG, J., et al. (2014). How does bias correction of RCM precipitation affect modelled runoff? *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 2014, 11(9), 10683-10724. ISSN 1812-2116.
155. TEUTSCHBEIN, C., and J. SEIBERT. Is bias correction of regional climate model (RCM) simulations possible for non-stationary conditions? *Hydrology and Earth System Sciences*. 2013, 17(12), 5061-5077. ISSN 1027-5606.
156. The HadGEM2 Development Team: MARTIN, G. M., et al. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. *Geoscientific Model Development*. 2011, 4(3), 723-757. ISSN 1991-959X.
157. UN General Assembly. *Transforming our world : the 2030 Agenda for Sustainable Development* [interaktyvus]. 2015. [žiūrėta 2019-03-13]. Prieiga per internetą http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E
158. VALIUŠKEVIČIUS, G., et al. Nemuno nuotėkio prognozavimas HBV modeliu. *Geografijos metraštis*. 2004, 37(1-2), 27-34. ISSN 2335-8610.
159. VAN VUUREN, D. P., et al. Long-Term Multi-Gas Scenarios to Stabilise Radiative Forcing — Exploring Costs and Benefits Within an Integrated Assessment Framework. *The Energy Journal*. 2006, 27, 201-233. ISSN 0195-6574.
160. VAN VUUREN, D. P., et al. (2007). Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change*. 2007, 81(2), 119-159. ISSN 0165-0009.
161. VAN VUUREN, D. P., et al. The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*. 2011, 109(1), 5-31. ISSN 0165-0009.
162. VEIJALAINEN, N., et al. National scale assessment of climate change impacts on flooding in Finland. *Journal of Hydrology*. 2010, 393(1), 333-350. ISSN 0022-1694.
163. VELPURI, N. M., and S. G. SENAY. Analysis of long-term trends (1950-2009) in precipitation, runoff and runoff coefficient in major urban watersheds in the United States. *Environmental Research Letters*. 2013, 8(2), 024020, pp. 6. ISSN 1748-9326.
164. VOGEL, R. M., et al. Floodflow frequency model selection in Australia. *Journal of Hydrology*. 1993, 146, 421-449. ISSN 0022-1694.
165. VOGEL, R. M., and I. WILSON. Probability distribution of annual maximum, mean, and minimum streamflows in the United States. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1996, 1(2), 69-76. ISSN 0733-9429.

166. WHITE HOUSE of USA. *Statement by President Trump on the Paris Climate Accord* [interaktyvus]. 2017. [žiūrėta 2019-03-13]. Prieiga per internetą: <https://www.whitehouse.gov/briefings-statements/statement-president-trump-paris-climate-accord/>
167. WILBY, R. L., and T. M. L. WIGLEY. (1997). Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography*. 1997, 21(4), 530-548. ISSN 0309-1333.
168. WILSON, D., HISDAL, H., and D. LAWRENCE. Has streamflow changed in the Nordic countries? *Journal of Hydrology*. 2010, 394(3-4), 334-346. ISSN 0022-1694.
169. WINTER, T. C. Uncertainties in estimating the water balance of lakes. *Journal of the American Water Resources Association*. 1981, 17(1), 82-115. ISSN 1093-474X.
170. WISE, M., et al. Implications of limiting CO₂ concentrations for land use and energy. *Science*. 2009, 324(5931), 1183-1186. ISSN 0036-8075.

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

Straipsniai „Clarivate Analytics“ duomenų bazėje „Web of Science Core Collection“ referuojamuose leidiniuose

1. MEILUTYTĖ-LUKAUSKIENĖ, D., AKSTINAS, V., KRIAUCIŪNIENĖ, J., ŠARAUSKIENĖ, D. and A. JURGELĖNAITĖ. Insight into variability of spring and flash flood events in Lithuania. *Acta Geophysica*. 2017, 65(1), 89-102. ISSN 1895-7455. DOI:10.1007/s11600-017-0009-x.
2. ŠARAUSKIENĖ, D., AKSTINAS, V., KRIAUCIŪNIENĖ, J., JAKIMAVIČIUS, D., BUKANTIS, A., KAŽYS, J., POVILAITIS, A., LOŽYS, L., KESMINAS, V., VIRBICKAS, T. and V. PLIURAITĖ. Projection of Lithuanian river runoff, temperature and their extremes under climate change. *Hydrology Research*. 2018, 49(2), 344-362. ISSN 0029-1277. DOI:10.2166/nh.2017.007.
3. AKSTINAS, V., MEILUTYTĖ-LUKAUSKIENĖ, D. and J. KRIAUCIŪNIENĖ. Consequence of meteorological factors on flood formation in selected river catchments of Lithuania. *Meteorological Applications*. 2019, xx(x), xx-xx. ISSN 1469-8080. DOI:10.1002/met.1757. (Priimtas)

Straipsniai mokslo leidiniuose, registruotuose tarptautinėse mokslinės informacijos duomenų bazėse

1. KRIAUCIŪNIENĖ, J., GAILIUŠIS, B., ŠARAUSKIENĖ, D., JAKIMAVIČIUS, D., JURGELĖNAITĖ, A., MEILUTYTĖ-LUKAUSKIENĖ, D., AKSTINAS, V., TOMKEVIČIENĖ, A. and V. IRBINSKAS. Klimato kaitos įtakos Lietuvos vandens ištekliams tyrimai. *Energetika*. 2016, 62(3), 87-101. ISSN 0235-7208. DOI:10.6001/energetika.v62i3.3348.

Straipsniai tarptautinių konferencijų pranešimų medžiagoje

1. AKSTINAS, V., ŠARAUSKIENĖ, D. and J. KRIAUCIŪNIENĖ. Flood pattern changes in the Lithuanian rivers. *Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата, May 5-8, 2015, Minsk, Belarus*. Minsk: BSU, 2015. pp. 175-177. ISBN 978-985-553-278-2.
2. AKSTINAS, V. Low flow projections of the south-eastern Lithuanian rivers in 21st century. *13th Annual international conference of young scientists on energy issues (CYSENI 2016), Kaunas, Lithuania, May 26-27, 2016*. Kaunas: LEI, 2016. pp. 317-325. ISSN 1822-7554.
3. AKSTINAS, V. Cohesion of statistical downscaling methods and projections of meteorological parameters over Lithuania. *The 14th International Conference of Young Scientists on energy Issues (CYSENI 2017), Kaunas, Lithuania, May 25-26, 2017*. Kaunas: LEI, 2017. pp. 368-377. ISSN 1822-7554.

Pranešimai tarptautinėse konferencijose

1. **AKSTINAS, V.** Review of hydrological extremes research in Lithuanian rivers. *The 12th International Conference of Young Scientists on Energy Issues (CYSENI 2015), Kaunas, Lithuania, May 27-28, 2015.* Kaunas: LEI, 2015. ISSN 1822-7554.
2. **AKSTINAS, V.** and D. MEILUTYTĖ-LUKAUSKIENĖ. Impact of meteorological parameters on formation of hydrological extremes in the Lithuanian rivers. *Nordic Water 2016, XXIX Nordic Hydrological Conference, Kaunas, Lithuania, August 8-10, 2016.* Kaunas: ASU Leidybos centras, 2016. pp. 21. ISSN 0650-8610.
3. ŠARAUSKIENĖ, D., KRIAUCIŪNIENĖ, J., JAKIMAVIČIUS, D., **AKSTINAS, V.**, BUKANTIS, A., KAŽYS, J., LOŽYS, L., KESMINAS, V., VIRBICKAS, T., PLIURAITĖ, V. and A. POVILAITIS. Projections of Lithuanian rivers runoff, temperature and their extreme values under climate change. *Nordic Water 2016, XXIX Nordic Hydrological Conference, Kaunas, Lithuania, August 8-10, 2016.* Kaunas: ASU Leidybos centras, 2016. pp. 92. ISSN 0650-8610.
4. **AKSTINAS, V.** Variability of projections of maximum discharges in the Lithuanian rivers. *The 15th International Conference of Young Scientists on Energy Issues (CYSENI 2018), Kaunas, Lithuania, May 23-25, 2018.* Kaunas: LEI, 2018. pp. 482. ISSN 1822-7554.
5. **AKSTINAS, V.**, JAKIMAVIČIUS, D., KRIAUCIŪNIENĖ, J., MEILUTYTĖ-LUKAUSKIENĖ, D. and D. ŠARAUSKIENĖ. Uncertainty of runoff projections in Lithuanian rivers. *Hydrology and Water Resources management in a Changing World. XXX Nordic Hydrological Conference 2018, Bergen, Norway, August 13-15, 2018.* Oslo: Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE), 2018. pp. 15. ISSN 1501-2832.

PADĖKA

Autorius dėkoja visiems Lietuvos energetikos instituto Hidrologijos laboratorijos darbuotojams už visokeriopą pagalbą rengiant disertacinį darbą. Ypač esu dėkingas darbo vadovei dr. J. Kriaučiūnienei ne tik už vertingas mokslines konsultacijas, bet ir už rūpestį doktorantūros studijų laikotarpiu. Autorius taip pat dėkingas tėvams ir artimiausiems žmonėms už palaikymą disertacijos rengimo metu.

SL344. 2019-03-22, 15,25 leidyb. apsk. I. Tiražas 14 egz. Užsakymas 71.
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas