

LIETUVOS ENERGETIKOS INSTITUTAS

GINTARAS ADŽGAUSKAS

LIETUVOS UPIŲ HIDROENERGETINIŲ
IŠTEKLIŲ PROGNOZĖ VERTINANT
KLIMATO KAITĄ

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, Aplinkos inžinerija (T 004)

Kaunas, 2023

Disertacija rengta 2018–2022 m. Lietuvos energetikos instituto Hidrologijos laboratorijoje.

Doktorantūros teisė Kauno technologijos universitetui suteikta kartu su Lietuvos energetikos institutu ir Vytauto Didžiojo universitetu.

Mokslinis vadovas

dr. Darius JAKIMAVIČIUS (Lietuvos energetikos institutas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija, T 004).

Redagavo: anglų kalbos redaktorė Asta Buckiūnaitė (UAB „BELLA VERBA“), lietuvių kalbos redaktorė Irma Urbonavičienė (Nr. 670485).

Aplinkos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

prof. dr. Žaneta STASIŠKIENĖ (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija, T 004) – **pirmininkė**;

dr. Vytautas AKSTINAS (Lietuvos energetikos institutas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija, T 004);

prof. dr. Agrita BRIEDE (Latvijos universitetas, Latvija, gamtos mokslai, fizinė geografija, P 006);

prof. dr. Jolanta DVARIONIENĖ (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija, T 004);

prof. dr. Arvydas POVILAITIS (Vytauto Didžiojo universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija, T 004).

Disertacija bus ginama viešame Aplinkos inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2023 m. gegužės 31 d. 13 val. Lietuvos energetikos instituto posėdžių salėje.

Adresas: Breslaujos g. 3-202, Kaunas, LT-44403, Lietuva

Tel. (+370) 608 28 527; el. paštas doktorantura@ktu.lt

Disertacija išsiųsta 2023 m. balandžio 28 d.

Su disertacija galima susipažinti interneto svetainėje <http://ktu.edu> Kauno technologijos universiteto (K. Donelaičio g. 20, Kaunas, LT-44239, Lietuva), Lietuvos energetikos instituto (Breslaujos g. 3, Kaunas, LT-44403, Lietuva) ir Vytauto Didžiojo universiteto (K. Donelaičio g. 52, Kaunas, LT-44244, Lietuva) bibliotekose.

© G. Adzgauskas, 2023

LITHUANIAN ENERGY INSTITUTE

GINTARAS ADŽGAUSKAS

PROJECTION OF HYDROPOWER
RESOURCES OF LITHUANIAN RIVERS IN
THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE

Doctoral Thesis
Technological Sciences, Environmental Engineering (T 004)

Kaunas, 2023

Doctoral thesis has been prepared at the Lithuanian Energy Institute during 2018–2022 at Laboratory of Hydrology.

The doctoral right has been granted to Kaunas University of Technology together with Lithuanian Energy Institute and Vytautas Magnus University.

Scientific Supervisor:

Dr. Darius JAKIMAVIČIUS (Lithuanian Energy Institute, Technological Sciences, Environmental Engineering, T 004).

Edited by: English language editor Asta Buckiūnaitė (UAB „BELLA VERBA“), Lithuanian language editor Irma Urbonavičienė (No. 670485).

Dissertation Defense Board of Environmental Engineering Field:

Prof. dr. Žaneta STASIŠKIENĖ (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Environmental Engineering, T 004) – **chairperson**;

Dr. Vytautas AKSTINAS (Lithuanian Energy Institute, Technological Sciences, Environmental Engineering, T 004);

Prof. dr. Agrita BRIEDE (University of Latvia, Latvia, Natural Sciences, Physical geography, N 006);

Prof. dr. Jolanta DVARIONIENĖ (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Environmental Engineering, T 004);

Prof. dr. Arvydas POVILAITIS (Vytautas Magnus University, Technological Sciences, Environmental Engineering, T 004).

The public defense of the dissertation will be held at 1 p.m. on 31 May, 2023 at the public meeting of Dissertation Defense Board of Environmental Engineering Field in Conference Hall at Lithuanian Energy Institute.

Address: Breslaujos 3-202, Kaunas, LT-44403, Lithuania

Phone: (+370) 608 28 527; e-mail doktorantura@ktu.lt

The doctoral dissertation was sent out on 28 April, 2023.

The doctoral dissertation is available on the internet <http://ktu.edu> and at the library of Lithuanian Energy Institute (Breslaujos 3, Kaunas, LT-44403, Lithuania), Kaunas University of Technology (K. Donelaičio 20, Kaunas, LT-44239, Lithuania) and Vytautas Magnus University (K. Donelaičio g. 52, Kaunas, LT-44244, Lithuania).

TURINYS

SANTRUMPOS IR MATAVIMO VIENETAI	8
IVADAS	13
1. LITERATŪROS APŽVALGA	16
1.1. Hidroenergetinių išteklių samprata	16
1.2. Hidropotencinės energijos išteklių tyrimai Lietuvoje ir užsienyje	17
1.3. Hidrokinetinės energijos išteklių tyrimai Lietuvoje ir užsienyje	22
1.4. Klimato kaitos scenarijų ir modelių tinklelio raiškos didinimo metodų analizė	24
1.4.1 Klimato modeliai	24
1.4.2. Klimato modelių tinklelio raiškos didinimo metodai	26
1.5. Matematinų modelių taikymas hidrologijoje	29
1.5.1. Matematinų modelių taikymas Lietuvoje	32
1.6. Upių hidroenergetinių išteklių prognozavimas klimato kaitos sąlygomis	33
1.7. Upių hidroenergetinių išteklių prognozių neapibrėžtumai	35
1.8. Autoriaus indėlis į nagrinėjamą tematiką	36
2. METODIKA	37
2.1. Lietuvos upių hidroenergijos įvertinimas naudojant istorinius duomenis	38
2.1.1. Lietuvos upių hidrokinetinės energijos įvertinimas	38
2.1.2. Lietuvos upių hidropotencinės energijos įvertinimas	39
2.2. Upių hidrokinetinės ir hidropotencinės energijos prognozavimas taikant regioninio klimato modelių išvesties duomenis	39
2.2.1. HBV modelio taikymas upių nuotėkio prognozavimui	39
2.2.2. Regioninio klimato modelių išvesties duomenų paruošimas upių nuotėkio modeliavimui	43
2.2.3. Neištirtų upių nuotėkio prognozė XXI a.	44
2.3. Upių hidroenergetinių išteklių prognozės neapibrėžtumų įvertinimas	44
2.4. Mažų hidroelektrinių poveikio upių hidrologiniam režimui įvertinimas	45
3. HIDROMETEOROLOGINIŲ DUOMENŲ BAZĖS SUDARYMAS	48

3.1. Tyrimų objektas ir naudoti duomenys	48
4. TYRIMŲ REZULTAI	50
4.1. Lietuvos upių hidroenergijos įvertinimas naudojant istorinius duomenis	50
4.1.1. Hidrokinetinės energijos išteklių kaita	50
4.1.2. Hidropotencinės energijos išteklių panaudojimas Lietuvoje	51
4.2. Lietuvos upių hidroenergetinių išteklių prognozavimas XXI a. pagal klimato scenarijus	53
4.2.1. Lietuvos upių hidrologinių modelių kalibravimas ir validavimas	53
4.2.2. Izolinių kartografavimo metodo verifikavimas	54
4.2.3. Upių nuotėkio prognozės tirtuose ir netirtuose upių baseinuose	55
4.2.3.1. Upių nuotėkio prognozė tirtuose baseinuose	55
4.2.3.2. Upių nuotėkio prognozė netirtuose baseinuose	57
4.2.4. Upių hidrokinetinės energijos išteklių kaita ateityje	59
4.2.5. Upių hidropotencinės energijos išteklių kaita ateityje	61
4.2.6. Upių nuotėkio bei hidroenergetinių išteklių prognozių apibendrinimas	63
4.2.7. Upių hidroenergetinių išteklių prognozių neapibrėžtumai	64
4.3. Mažųjų hidroelektrinių poveikis upių hidrologiniam režimui	65
4.3.1. Mažųjų hidroelektrinių parinkimas IHA analizei	65
4.3.2. IHA analizės rezultatai	65
4.3.2.1. Mėnesio debito režimo kaita	66
4.3.2.2. Kasmetinių ekstremalių debito sąlygų dydis ir trukmė	67
4.3.2.3. Ekstremalių metinių debitų susidarymo laikas	68
4.3.2.4. Aukštų ir žemų pulsacijų dažnis ir trukmė	69
4.3.2.5. Hidrologinių pokyčių greitis ir dažnis	70
4.3.2.6. Bendri parametrų grupės pokyčiai	71
4.3.2.7. Kintamumo intervalo metodo taikymas IHA rezultatų analizei	71
4.3.2.8. Hidroelektrinių ir tvenkinių savybių įtaka upių hidrologiniams pokyčiams	74
5. REKOMENDACIJOS TVARIAM HIDROENERGETINIŲ IŠTEKLIŲ NAUDOJIMUI KLIMATO KAITOS FONE	76
IŠVADOS	77
LITERATŪRA	78
MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	92

PRIEDAI	93
AUTORIAUS INFORMACIJA	99
SUMMARY	100

SANTRUMPOS IR MATAVIMO VIENETAI

A	upės baseino plotas, km ²
A1, A2, A1B A1F1, A1T, B1, B2	SRES emisijų scenarijų grupės
Accdiff	sumodeliuoto ir nustatyto pagal matavimo duomenis nuotėkių skirtumas
ACMO	regioninio klimato modelis
A _D	įrenginio darbo rato apibrėžiamas plotas, m ²
AEI	atsinaujinantys energijos ištekliai
AIM	modelis, naudotas RCP6.0 klimato scenarijui sukurti
alfa	netiesiškumo koeficientas
AOGCM	atmosferos–vandenyno bendrosios cirkuliacijos klimato modelis
AR4	Tarpvyriausybės klimato kaitos komisijos 4-oji ataskaita
AR5	Tarpvyriausybės klimato kaitos komisijos 5-oji ataskaita
Athorn	Thornthwaite lygties koeficientas, mm/diena °C
B	skaičiuojamas upės kanalo plotis, kuris yra mažesnis už upės vagos plotį ir kuriame gylis yra didesnis už turbinos diametrą, m
BETA	empirinis koeficientas, apibūdinantis nuotėkio susiformavimą iš dirvožemio
BASINS	vandens kokybės tyrimo modelis
C	koeficientas, upės debito perskaičiavimui į nuotėkį
CCLM	regioninio klimato modelis
cflux	drėgmės judėjimo dirvožemio kapiliarais greitis, mm/parą
cfmax	sniego tirpimo greitis, mm/°C per dieną
CMIP3	Jungtinio klimato modelių palyginimo projektas, rengiant AR4 ataskaitą (angl. <i>CMIP3 – Coupled Model Intercomparison Project</i>)
CMIP5	Jungtinio klimato modelių palyginimo projektas, panaudotas AR5 ataskaitoje (angl. <i>CMIP5 – Coupled Model Intercomparison Project</i>)
CNRM	globalaus klimato modelis
CORDEX	koordinuotas regioninio klimato modeliavimo eksperimentas
D	hidrologinio pakitimo laipsnis, atsižvelgiant į kiekvienos IHA grupės didžiausią ir vidutinę pakitimo laipsnio vertę
D _i	IHA hidrologinių pokyčių matas (%)
D _m	kiekvienos vidutinės IHA rodiklių grupės pakitimo laipsnio vertė

$D_{\max}$	kiekvienos didžiausios IHA rodiklių grupės pakitimo laipsnio vertė
dtm	sniego tirpimo temperatūra, °C
ECDF ^{Obs-1}	išmatuoto meteorologinio rodiklio empirinė kumuliacinė pasiskirstymo funkcija
ECDF ^{CM RP}	klimato modelio prognozuojamas meteorologinis rodiklis klimato normos laikotarpiui
ESD	empirinis-statistinis raiškos didinimo modeliavimas
ESM	žemės sistemos klimato modelis (angl. <i>ESM – Earth System Model</i>)
ESWAT	Belgijos mokslininkų modifikuotas SWAT modelis
E_p	hidropotencinė energija, kWh
E_{TK}	hidrokinetinė energija, Wh
EURO-CORDEX	Europinis koordinuotas regioninio klimato modeliavimo eksperimentas
η	įrenginio naudingumo koeficientas
FAR	Tarpvyriausybės klimato kaitos komisijos 1-oji ataskaita
F_i	Kiekvieno IHA parametro nuokrypio koeficientas (%)
FC	maksimalus drėgmės atsargų dirvožemyje sluoksnis, mm
Fyris NP	vandens kokybės modelis N ir P pernešimui nustatyti
GCAM	globalaus klimato pokyčių vertinimo modelis (angl. <i>GCAM – Global Change Assessment Model</i>), naudotas RCP4.5 klimato scenarijui sukurti
GCM	Globalaus klimato modelis (angl. <i>GCM – Global Climate Model</i>)
h	vagos gylis, lygus įrenginio turbinos diametrui, m
ΔH	užtvankos patvankos aukštis, m
HBV	kritulių-nuotėkio modelis, skirtas upės baseino hidrologiniams procesams modeliuoti
HE	hidroelektrinė
HIRHAM	regioninio klimato modelis
hq	apskaičiuojamas koeficientas
I	vagos nuolydis
IEA	Tarptautinė energetikos agentūra
ICHEC-EC-EARTH-SMHI-RCA4	regioninio klimato modelio, sukurto Švedijos meteorologijos ir hidrologijos instituto Rossby centre, kombinacija su globalaus klimato modeliu, sukurtu Airijos superkompiuterių centre
IHA	Tarptautinė hidroenergetikos asociacija
IHA	Hidrologinių pokyčių rodiklių programa (angl. <i>Indicators of Hydrologic Alteration, IHA</i>)

IMAGE	modelis, naudotas RCP2.6 klimato scenarijui sukurti
IS92(IS92a, IS92b, IS92c, IS92d, IS92e, IS92f)	Tarpvyriausybinių klimato kaitos komisijos 1-osios ataskaitos scenarijai
k	aukštutinio baseino recesijos koeficientas
$k = \frac{Q_i}{\bar{Q}}$	debito modulis
khq	gruntinio vandens baseino recesijos koeficientas, esant didžiausiam filtracijos greičiui
k4	požeminio vandens baseino recesijos koeficientas
L	upės segmento ilgis, m
LP	potencialaus garavimo iš dirvožemio riba, mm
LZ	vandens kiekis, patenkantis į upę iš požeminio baseino, mm
MATSALU	modelis, skirtas Matsalu baseino Estijoje tyrimams
MESSAGE	modelis, naudotas RCP8.5 klimato scenarijui sukurti
MHQ	vidutinis didžiausias nuotėkis
MIKE SHE, Mike11, Mike21 Mike3 MIKE 21NSW	hidrodinaminiai modeliai, sukurti Danijos hidraulikos institute ir skirti vandens telkinių hidrodinaminiam modeliavimui
MOHC-HadGEM2-ES-SMHI-RCA4	regioninio klimato modelio, sukurto Švedijos meteorologijos ir hidrologijos instituto Rossby centre, kombinacija su globalaus klimato modeliu, sukurtu Hadley meteorologijos tarnybos klimato mokslo centre, Didžiojoje Britanijoje
MPI-M-MPI-ESM-LR-SMHI-RCA4	Regioninio klimato modelio, sukurto Švedijos meteorologijos ir hidrologijos instituto Rossby centre, kombinacija su globalaus klimato modeliu, sukurtu Makso Planko meteorologijos institute, Vokietijoje
M _{post}	IHA vidutinė vertė po poveikio
M _{pre}	IHA vidutinė vertė prieš poveikį
MQ	vidutinis nuotėkis, m ³ /s
MS	meteorologijos stotis
N	įrenginių skaičius
N _{exp}	metų, kuriais tikimasi, kad IHA vertė pateks į tikslinį intervalą, skaičius
N _{obs}	metų, kuriais stebėta IHA hidrologinio parametro vertė pateko į tikslinį intervalą, skaičius
NSE	Nasho-Sutcliffe'o efektyvumo kriterijus

PC–LAKE	modelis, skirtas tirti eutrofikacijos procesus sekliuose ežeruose ir tvenkiniuose
pcorr	bendras visam baseinui kritulių pataisos koeficientas, reiškiantis sisteminę kritulių matavimo paklaidą
PERC	filtracijos iš gruntinio vandens baseino į požeminio vandens baseiną, greitis, mm/dieną
P _p	hidropotencinė galia, kW
PRUDENCE, ENSEMBLES, RMIP, AMMA	pirmieji klimato modelių lyginamieji projektai, kuriuose buvo panaudota daug bendrosios cirkuliacijos (GCM) ir regioninio klimato modelių (RCM) matricių
PTK	techninė hidrokinetinė galia, W
$\bar{Q}$	vidutinis metinis debitas, m ³ /s
Q _c	upės modeliuotas debitas
Q _i	debitas, m ³ /s
Q _{gamt}	gamtosauginis debitas, m ³ /s
Q _{Hmin}	hidroelektrinės minimalus debitas, m ³ /s
Q _{inst} /Q _{ma}	įrengto elektrinės debito ir daugiamečio upės debito santykis
Q _R	upės stebėjimų debitas
Q _{Rmean}	vidutinis upės stebėjimų debitas per modeliavimo laikotarpį
QUAL	vandens kokybės tyrimo modelis
Q _o	vandens pritekėjimas į upę
$\Delta Q/\Delta P$	upės debito ir kritulių santykis – nuotėkio koeficientas
q	hidromodulis, l/s×km ²
R	koreliacijos koeficientas
RCM	regioninio klimato modelis (angl. <i>RCM – Regional Climate Model</i>)
RCP(2.6, 4.5, 6.0, 8.5)	RCP klimato scenarijai (angl. <i>RCP – Representative Concentration Pathways</i>)
RegCM3	regioninio klimato modelis
RE	skirtumas tarp išmatuoto ir sumodeliuoto debito
REMO	regioninio klimato modelis
RF	prognozuojamas suminis įvairių aplinkos veiksnių energinis poveikis (angl. <i>radiation forcing</i> , W/m ²)
RF	krituliai lietaus pavidalu, mm
r _{fcf}	kritulių kiekio pataisos koeficientas
RVA	kintamumo diapazono metodas (angl. <i>Range of Variability Approach, RVA</i>)
SA 90(A,B,C,D)	Tarpvyriausybės klimato kaitos komisijos 1-osios ataskaitos scenarijai
SAR	Tarpvyriausybės klimato kaitos komisijos 2-oji ataskaita
SDS	Jungtinių Tautų darnios plėtros scenarijus
SF	krituliai sniego pavidalu, mm
s _{fcf}	sniego kiekio pataisos koeficientas

SIMGRO	požeminio vandens tyrimams skirtas modelis
SMHI	Švedijos meteorologijos ir hidrologijos institutas
SRES	TKKK specialioji ataskaita apie emisijų scenarijus
St^{Obs}	išmatuotas meteorologinis rodiklis
$St^{CM Fut}$	klimato modelio prognozuojamas meteorologinis rodiklis ateičiai
SWAT	dirvožemio ir vandens kokybės įvertinimo modelis
SWAT-G	modifikuotas SWAT modelis
SWIM	Vokietijoje sukurta modifikuota SWAT modelio versija
SWRRBWQ	JAV žemės ūkio departamente sukurtas vandens kokybės tyrimo modelis
ρ	skysčio tankis, kg/m^3
t	modeliavimo laikotarpis
TAR	Tarpvyriausybinės klimato kaitos komisijos 3-oji ataskaita
tt	perėjimo per nulį temperatūra, $^{\circ}C$
t_{ti}	pradinė šlapdrubos temperatūra, $^{\circ}C$
t_{TK}	hidrokinetinių įrenginių darbo laikas, valandos
TKKK	Tarpvyriausybinė klimato kaitos komisija
TUM	Miuncheno technikos universitetas (angl. <i>Technical university of Munich</i>)
UZ	vandens, patenkančio į upę iš paviršinio baseino, kiekis, mm
VMS	vandens matavimo stotis
v	srovės greitis, m/s
$\mathbf{v}$	vidutinis tėkmės greitis skerspjūvyje, m/s
WASP	vandens kokybės tyrimo modelis
WATFLOOD	potvynių debitams prognozuoti skirtas modelis
WCRP	pasaulio klimato tyrimų programa
WEPP	vandens sukeltos erozijos nustatymo modelis
2001/77/EB	Europos Sąjungos direktyva, įpareigojanti šalis nares gaminti elektros energiją, naudojant atsinaujinančius energijos išteklius

IVADAS

Dėl augančių energijos poreikių tenkinimo, naudojant iškastinius energijos išteklius, į aplinką išskiriama vis daugiau šiltnamio efektą sukeliančių dujų. Dėl to kyla vidutinė aplinkos temperatūra – vienas globalios klimato kaitos padarinių. Pasaulio šalių vyriausybės ir mokslininkai sutarė, kad klimato kaitos poveikį galima švelninti naudojant daugiau atsinaujinančių energijos išteklių ir nustatė, koku mastu tai turėtų būti daroma. Lietuvos atsinaujinančių išteklių energijos naudojimo įsipareigojimus nustato Nacionalinis energetikos ir klimato planas, kuris numato užduotis visoms ES narėms iki 2030 m., kaip sustabdyti klimato kaitos pokyčius. Siekti sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas 40 %, lyginant su 1990 m., pagerinti energijos vartojimo efektyvumą bent 32,5 % bei padidinti atsinaujinančių energijos išteklių dalį visoje energetikoje iki 32 % (Lietuvos Respublikos Seimas, 2018a). Hidroenergija yra viena iš atsinaujinančių energijos rūšių. Ji yra skirstoma į hidropotencinę (patvankinę) ir hidrokinetinę (nepatvankinę). Pasaulyje tradicinių patvankinių hidroelektrinių (HE) pagaminta hidroenergija sudaro didžiausią atsinaujinančių išteklių elektros energijos dalį. Todėl yra būtina įvertinti Lietuvos hidropotencinės ir hidrokinetinės energijos išteklius. Kadangi šiuo metu patvankinių HE plėtra Lietuvoje yra apribota įstatymų, hidrokinetinių elektrinių atsiradimas ir hidrokinetinės energijos išteklių naudojimas galėtų papildyti atsinaujinančių išteklių dalį bendroje šalies elektros energijos gamyboje. Lietuvos upių hidrologinį režimą veikia klimato kaita, dėl to keičiasi upių nuotėkis. Kintantis upių nuotėkis lemia upių hidroenergetinių išteklių (potencinių ir hidrokinetinių) kaitą. Kyla klausimas, kaip vykstanti klimato kaita paveiks Lietuvos upių hidropotencinės ir hidrokinetinės energijos išteklius? Ar mažosios HE galės dirbti tokiomis sąlygomis, kai dėl vykstančio upių nuotėkio persiskirstymo tarp sezonų, ypač sumažėja vasaros sausmečio laikotarpio upių debitas? Kaip pasikeis mažųjų HE įtaka upių hidrologiniam režimui? Iki šiol buvo gana gerai ištirti Lietuvos upių potencinės hidroenergijos ištekliai, o hidrokinetinių išteklių tyrimų yra nedaug atlikta. Koks yra teorinis hidrokinetinių HE elektros energijos gamybos potencialas Lietuvoje ir kaip jis pasikeis dėl klimato kaitos? Be to, nėra atlikta XXI a. Lietuvos upių hidroenergijos išteklių prognozė pagal RCP klimato scenarijus.

Šiame darbe yra nagrinėjama, kaip dėl vykstančios klimato kaitos keisis Lietuvos upių nuotėkis, kuris nulems upių kinetinės ir potencinės hidroenergijos pokyčius. Svarbu nustatyti tikslingą tyrimo metodiką, kuri atsakytų į iškeltus klausimus. Didėjant pasaulinės klimato kaitos poveikiui, kurio įtaka juntama ir Lietuvoje, hidrologinės prognozės atlieka vis svarbesnį vaidmenį moksliniuose tyrimuose. Norint įvertinti Lietuvos upių nuotėkio prognozę, reikia ištirti, kaip jis kito praeityje. Naudojant skirtingus klimato modelius ir klimato scenarijus, būtina atlikti upių nuotėkio, nuo kurio tiesiogiai priklauso upių hidroenergetiniai ištekliai, prognozę.

Hidroenergetika neabejotinai yra viena iš plačiai naudojamų atsinaujinančios energijos rūšių, dėl jos teikiamų privalumų – užtvankų, sudarančių sąlygas vandens tiekimui, drėkinimui, potvynių kontrolei, rekreacijai, laivybai ir t. t., bet elektros energijos gamyba hidroelektrinėse taip pat yra susijusi su neigiamu poveikiu aplinkai,

pvz. upių hidrologinio režimo pokyčiai dėl hidroelektrinių veiklos. Todėl yra būtina nustatyti, kaip mažųjų HE darbas paveikė upių hidrologinį režimą. Įvertinus HE poveikį upių hidrologiniam režimui, galima teikti rekomendacijas efektyviam hidroenergijos naudojimui ateityje, atsižvelgiant į gamtosauginius reikalavimus.

Įvertinus tai, kad hidropotencinių elektrinių plėtra Lietuvoje yra sustabdyta teisės aktais, taip pat įvertinus šių HE poveikį upių hidrologiniam režimui, bus galima parengti rekomendacijas įstatymų leidėjams sukurti reikalingus įstatymus nepatvankinių hidrokinetinių HE plėtrai Lietuvoje. Tai sudarytų prielaidas naujos atsinaujinančių išteklių energetikos rūšies Lietuvoje atsiradimui arba galėtų padidinti hidroenergetikos indėlį į bendrą Lietuvos elektros energijos gamybą.

Darbo aktualumas

Pastaraisiais dešimtmečiais stebimi klimato kaitos reiškiniai (kylanti oro temperatūra ir didesnis garavimas, pasikeitęs ekstremalių klimato reiškinių pasikartojimo dažnis) keičia upių nuotėkį. Ateityje galimi dar didesni upių nuotėkio pokyčiai, ypač sausuoju ir drėgnuoju metu. Upių vandeningumas lemia hidroenergetinius išteklius, kuriuos sudaro upių tėkmės (hidrokinetinė) ir patvankos (potencinė) energija. Galimi upių vandeningumo pokyčiai turės įtakos energijos gamybos apimčiai ir sąlygoms. Lietuvoje dar nėra atliktos hidroenergetinių išteklių prognozės (2021–2040 m.) ir (2081–2100 m.) laikotarpiais, todėl sudėtinga planuoti efektyvų šių išteklių panaudojimą, įvertinus pasikeitusias gamtines sąlygas ateityje.

Darbo objektas

Nemuno, Ventos ir Lielupės upių baseinų rajonų upių (Nemunas, Merkys, Neris, Šventoji, Žeimenė, Nevėžis, Šušvė, Dubysa, Šešupė, Jūra, Šešuvis, Minija, Bartuva, Venta, Mūša ir Lėvuo) hidropotencinės ir hidrokinetinės energijos ištekliai.

Darbo tikslas

Įvertinti Lietuvos upių hidroenergetinių išteklių kaitą praeityje (1961–2020 m.) bei artimoje (2021–2040 m.) ir tolimoje (2081–2100 m.) ateityje, ištiriant mažųjų HE poveikį upių hidrologiniam režimui, ir parengti rekomendacijas efektyviam hidroenergetinių išteklių panaudojimui gamtosauginiu požiūriu.

Darbo uždaviniai

1. Sukurti Lietuvos upių hidrologinius modelius, taikant juos bei hidromodulio kartografavimo metodą, atlikti tirtų ir netirtų upių nuotėkio prognozavimą pagal klimato scenarijus.
2. Remiantis upių nuotėkio prognozėmis atlikti hidrokinetinių ir hidropotencinių išteklių prognozavimą XXI a. bei įvertinti šių prognozių neapibrėžtumus.
3. Įvertinti mažų hidroelektrinių poveikį upių hidrologiniam režimui.
4. Įvertinus gamtosauginius reikalavimus, parengti rekomendacijas efektyviam hidroenergijos naudojimui ateityje.

Ginama disertacijos hipotezė

Ateityje dėl klimato kaitos įvyksiantys Lietuvos upių nuotėkio pokyčiai nulems hidroenergetinių išteklių sumažėjimą.

Ginamieji disertacijos teiginiai

- Dėl kintančio klimato ateityje ne tik sumažės tiek kinetiniai, tiek ir potenciniai upių hidroenergetiniai ištekliai, bet ir bus stebimas persiskirstymas tarp sezonų: didėjimas žiemos metu ir mažėjimas pavasarį;
- Klimato modeliai turi didesnę įtaką hidroenergetinių išteklių prognozių neapibrėžtumui nei klimato scenarijai;
- Hidroelektrinių veikla lemia reikšmingus upių hidrologinio režimo pokyčius.

Darbo naujumas ir pritaikomumas

Darbe parengta metodika, pagal kurią pirmą kartą atliktas tirtų ir netirtų Lietuvos upių hidrokinetinės ir hidropotencinės energijos išteklių prognozavimas artimoje (2021–2040 m.) ir tolimoje (2081–2100 m.) ateityje, panaudojant hidromodulio ($q, l/s \times km^2$) kartografavimo metodą, regioninio klimato modelius ir RCP klimato scenarijus. Siekiant įvertinti prognozių tikslumą, atliktas hidroenergetinių išteklių prognozių neapibrėžtumo vertinimas bei nustatytas mažų hidroelektrinių poveikis upių hidrologiniam režimui. Gautos naujos žinios apie Lietuvos upių energijos išteklių kaitą XXI amžiuje leido parengti geros gamybos praktikos rekomendacijas įstatymų leidėjams, aplinkosaugos institucijoms ir hidroelektrinių savininkams, kaip racionaliai naudoti pakitusius vandens išteklius.

Publikacijos

Disertacinio darbo tematika yra publikuoti 2 straipsniai mokslo leidiniuose su citavimo indeksu „Clarivate Analytics“ bei 3 pranešimai tarptautinių mokslinių konferencijų medžiagoje.

Disertacijos struktūra

Disertacijos apimtis – 118 puslapių. Disertaciją sudaro įvadas, šeši skyriai, 35 paveikslai, 7 lentelės bei 5 išvados. Literatūros sąrašą pateikti 222 literatūros šaltiniai.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Hidroenergetinių išteklių samprata

Tam tikros teritorijos paviršinio upių nuotėkio energiją priimta vadinti **hidroenergetiniais ištekliais**, kurie, savo ruožtu, skirstomi į hidropotencinius ir hidrokinetinius. Vandens sukaupą energiją, kurią galima panaudoti darbui atlikti, vadiname hidropotencine energija (Jablonskis ir Lasinskas, 1962). **Hidroenergijos potencialas** skirstomas į bendrąjį teorinį potencialą, techninį potencialą, ekonomiškai įmanomą potencialą ir išnaudojamą potencialą (Lehner ir kt., 2005; Hoes ir kt., 2017). **Bendrasis teorinis potencialas** išreiškia bendrą elektros energijos kiekį, kuris galėtų būti pagamintas panaudojus visus turimus vandens išteklius. **Techninis potencialas** parodo techniškai išnaudojamą hidroenergijos galią, kuri yra lengvai prieinama naudojant esamas technologijas. **Ekonomiškai įmanomas potencialas** parodo hidroenergijos gamybos pajėgumus, kurie galėtų būti pastatyti konkrečioje vietoje, atlikus ekonominę galimybių studiją ir gavus teigiamą rezultatą. **Išnaudojamas potencialas** gaunamas įvertinus aplinkosauginius ir kitus reikalavimus, keliamus konkrečiai vietai ir būsimos elektrinės darbo režimui (Lehner ir kt., 2005).

Upių hidropotencinė energija – tai energija sukaupiama dėl patvankos susidarančio aukščių skirtumo tarp apatinio ištekančio vandens lygio ir viršutinio baseino paviršiaus lygmens bei per turbinas praleidžiamo vandens kiekio arba upės debito. Upių hidropotencinę hidroenergiją panaudojančios elektrinės būna pikinės, kurių tvenkinyje sukaupiamas vandens kiekis ir jis išleidžiamas didžiausio energijos poreikio metu. Pulsuojančios hidroelektrinės veikia pulsuojančiu darbo režimu. Jos paleidžiamos, kai tvenkinys prisipildo ir stabdomos, pasiekus žemiausią, nustatytą upės tvenkinio lygį. Natūralios prietakos hidroelektrinės (angl. *run-of-river*) turi neaukštą užtvanką ir visada veikia pastoviu režimu, jose per turbinas išleidžiamas vandens debitas yra lygus natūraliai vandens prietakai (US fish and wildlife service, 2020). **Upių hidrokinetinė energija** sudaro tekančios upės vandens srovės hidrokinetinė energija, kuri elektromechaniniais energijos konverteriais (generatoriais) yra paverčiama į naudingą energijos formą, dažniausiai – elektros energiją (Khan ir kt., 2008).

Klaipėdos krašte pirmasis vandens malūnas ant Danės upės buvo pastatytas 1256 m. (Stankus ir kt., 1982), todėl tikėtina, kad Lietuvoje malūnai galėjo atsirasti XII–XIII a. Kai Lietuvoje upių energija pradėta naudota ekonominėje veikloje, daugiausia vandens malūnuose, atsiranda poreikis įvertinti ir aprašyti upių energijos panaudojimą. Vandens malūnų veikla Lietuvoje pradedama reguliuoti 1529 m. pirmajame Lietuvos statute (Bilys, 2010). Neries vandens hidrokinetinės galios panaudojimas plūduriuojančiame vandens malūne buvo užfiksuotas 1581 m. Vilniaus miesto plane (Bilys ir kt., 2017). Pirmoji Lietuvoje hidroelektrinė buvo pastatyta 1890 m. ant Dupulčio upelio, Kretingos dvaro vandens malūne sumontavus elektros generatorių, gaminusį elektros energiją (Bilys, 2010). Upių energija pradėta naudoti elektros energijos gamybai ir elektros energija imta gaminti ir tiekti viešiesiems poreikiams tenkinti.

1.2. Hidropotencinės energijos išteklių tyrimai Lietuvoje ir užsienyje

Pirmą kartą nuodugniau Lietuvos hidroenergijos išteklius ir jų panaudojimo galimybes tyrė Rusijos komisijos vandens jėgoms tirti pirmininkas Peterburgo kelių instituto profesorius H. Merčingas, 1909 m. pateikęs pasiūlymą pastatyti Birštono kilpos elektrinę (Bilys, 2010). Išsamiai Lietuvos hidroenergijos išteklius ir potencialias jų panaudojimo galimybes, planuojant pastatyti hidroelektrines ant didžiųjų upių, ištyrė prof. Steponas Kolupaila (Kolupaila, 1922; 1929). Profesorius skaičiavimais didesnių upių vidutinė galia sudarė 199,5 MW, o minimali – 119 MW. Prof. S. Kolupaila (1929) nurodė, kad prieš statant hidroelektrines yra būtina atlikti išsamius hidrologinius tyrimus, o to neatlikus, pavasario potvynio vanduo gali sugriauti hidroelektrinių užtvankas, kaip įvyko 1923 m. Tauragės HE ant Jūros upės ir Marijampolės HE ant Šešupės. Elektrines ant didžiųjų upių siūlė statyti inžinierius J. Smilgevičius (Smilgevičius, 1934). 1936 m. įsteigto Lietuvos energijos komiteto Vandens jėgų komisija, vadovaujama prof. S. Kolupailos, kompleksiskai ištyrė upių hidroenergijos išteklius. 1939 m. buvo atlikti 24 Lietuvos upių hidroenergijos skaičiavimai, pagal kuriuos teorinė upių galia per vidutinio vandeningumo metų 6 mėnesius sudarė 199,5 MW, o per 9 mėnesius – 150 MW (Kolupaila, 1939). Remiantis statistikos duomenimis, 1926 m. Lietuvoje veikė 616 hidroelektrinių, bendra galia – 5966 kW, 1939 m. – 640 hidroelektrinių, kurių galia buvo 8660 kW. 1938 m. hidroenergija sudarė 2 %, vietiniai ištekliai – 28 %, o importiniai – 70 % elektros gamybos (Lasinskas, 1991). M. Lasinsko surinktais duomenimis, Lietuvoje 1948 m. buvo 355 hidrojėgainės, bendra galia $1,2 \times 10^4$ kW, iš kurių 85 HE su įdiegta 4000 kW galia. J. Burneikio (1958) duomenimis, bendra galia – 1×10^4 kW, 111 HE, iš kurių 11 neveikė (457 kW). 1945–1958 m. mažųjų HE gamyba išaugo daugiau kaip 4,5 karto ir sudarė 2×10^4 kWh/metai. Mažųjų HE plėtrai buvo tiriami hidroenergijos ištekliai, išmatuoti upių baseinų plotai, sudaryti išilginiai upių profiliai, atliekamas laiptavimas ir nurodomos galimos vietos hidroelektrinių statybai (Gailiūšis ir kt., 2007). Lietuvoje paleidus Elektrėnų šiluminę ir Kauno hidroelektrinę bei pradėjus šalies elektrifikaciją plečiant elektros tinklus, mažosios hidroelektrinės pasidarė nerentabilios, jų imta atsisakyti, paskutinę sustabdžius 1982 m. (Bilys ir kt., 2017).

Lietuvos energetikos institute hidroenergijos ištekliai pradėti tirti 1947 m., kai grupė mokslininkų ėmė domėtis hidroenergetikos klausimais ir 1957 m. įkuria hidroenergetikos laboratorija, kurioje buvo tęsiami S. Kolupailos tarpukario hidrologijos tyrimai (Gailiūšis ir kt., 2007). M. Lasinskas tyrė ir nagrinėjo Lietuvos mažųjų upių energetinius rodiklius, tipinio hidrografo sudarymą, upių nuotėkio pasiskirstymą (Lasinskas, 1955). Plečiant vandens išteklių tyrimus, 1961 m. įkuria Hidrologijos laboratorija, kuriai vadovavo LMA narys korespondentas M. Lasinskas (Gailiūšis ir kt., 2007). 1962 m. paskelbto fundamentalaus 3 dalių Lietuvos upių kadastro (Jablonskis ir Lasinskas, 1962) trečioji dalis buvo skirta upių debitams, nuolydžiams ir galioms. Nustatytas Lietuvos upių ir žemės šlaitų tėkmių teorinės hidropotencinės 689 MW galios ir 6 TWh metinės hidroenergijos potencialas (Jablonskis ir Lasinskas, 1962). Lietuvos energetikos instituto mokslininkų tyrimų rezultatais buvo remtasi nustatant tinkamiausias vietas Ignalinos atominėi elektrinei ir Kruonio hidroakumuliacinei elektrinei statyti. Buvo tiriamos atominės elektrinės

aušinimo tvenkinio galimybės. Ištirti tėkmės pokyčiai dirbant Kruonio HAE naudojant modelio MIKE 21 hidrodinaminį modulį (Gailiusis, ir kt., 2003).

Lietuvai atgavus nepriklausomybę, atsinaujinančiųjų išteklių energetika sulaukė didelio dėmesio. Hidroenergetika turėjo prisidėti prie Lietuvos energetinės nepriklausomybės, todėl hidroenergetikų, mokslininkų ir verslininkų pastangomis buvo atstatomos ir naujai pastatytos beveik 100 mažųjų hidroelektrinių (Bilys ir kt., 2017). Hidroenergetikos plėtra paspartėjo Lietuvai 2004 m. įstojus į Europos Sąjungą, kai šalis įsipareigojo įgyvendinti AEI direktyvos 2001/77/EB reikalavimus naudoti atsinaujinančių išteklių energiją, taip pat ir hidroenergiją, elektros energijos gamyboje (Europos Parlamentas ir Europos Taryba, 2001). Įvertinus aplinkosaugos draudimus, kurių paskutinis įvestas 2003 m., upių hidropotencinės hidroenergijos ištekliai sumažėjo nuo $6,18 \times 10^5$ MWh iki $1,25 \times 10^5$ MWh, o galia iki 28,7 MW (Jablonskis ir Tomkevičienė, 2004). Lietuvos upių hidropotencinę energiją tyrė Lietuvos energetikos instituto mokslininkai (Jablonskis ir Tomkevičienė, 2004; Jablonskis, 2005).

Vieni pirmųjų šiuolaikinės hidroenergetikos mokslo tyrimų buvo aprašyti prancūzų mokslininko Bernard Forest de Belinde 1750 m. išleistoje 4 dalių knygoje „Architecture hydraulique“, kurioje buvo išstudijuotos vertikalios ir horizontalios ašies hidraulinės turbinos (Felix, 2012). 1878 m. Anglijoje, Nortumberlando vietovėje, buvo paleista pirmoji pasaulyje hidroelektrinė, generavusi elektros energiją vienai elektros lemputei viename iš *Cragside* kaimo namų (IHA, 2019).

Žmonijos populiacijos augimas, ekonomikos vystymasis, susirūpinimas klimato kaita ir augantis elektros energijos poreikis, paskatino atsinaujinančių išteklių energetikos, tai – hidroenergetikos, vėjo energetikos ir saulės energetikos, plėtrą. Prognozuojama, kad iki 2030 m. pasauliniai hidroenergetikos pajėgumai išaugs 73 % ir pasieks 1700 GW (Zarfl ir kt., 2015; WMO, 2019). Pagal Jungtinių Tautų darnios plėtros scenarijų, hidroenergetikos metinis augimas sudarytų 2,5 % iki 2030 m. arba siektų 2013 m. augimo lygį (IEA, Eenergy outlook. 2018). British Petroleum prognozuoja lėtesnius hidroenergetikos plėtros tempus iki 2040 m. – 1,3 % per metus, o paskutinių 20 metų spartesnis augimas vyko remiamas Kinijos hidroenergetikos subsidijomis. Tačiau ateityje augimas plačiau apims Aziją, Lotynų Ameriką ir Afriką (BP Energy Outlook, 2019), pasaulio regionus, pasižyminčius dideliu nepanaudotu hidroenergijos potencialu, (1.1 lent.).

1.1 lentelė. Pasaulio hidroenergijos išteklių potencialas ir jo panaudojimas (pagal IHA, 2018 a; Lehner ir kt., 2005)

Regionas	Instaliuota galia, įskaitant hidro-akumuliacines elektrines (MW)	Naujai statomų hidroelektrinių galia (MW)	Hidro-akumuliacinės elektrinės (MW)	Elektros energijos gamyba (TWh per metus)	Bendrasis teorinis hidroenergijos potencialas (TWh per metus)
Afrika	35 339	1 924	3 376	131	1 255
Centrinė ir Pietų Azija	144 710	3 264	7 451	456	3 440
Europa	248 564	2 307	51 769	599	3 274

Pietų Amerika	166 959	4 069	1 004	716	2 480
Šiaurės Amerika	203 053	506	22 986	783	2 440
Rytų Azija ir Ramiojo vandenyno regionas	468 331	9 778	66 454	1 501	3 850
Iš viso pasaulyje	1 266 955	21 848	153 041	4 185	52 500

Tarptautinės didelių užtvankų komisijos duomenimis (angl. *ICLD–The International Commission on Large Dams*), yra panaudojami tik 22 % techniškai įgyvendinamo pasaulio hidroenergetikos potencialo (15,6 mln. GWh/metai) (ICLD, 2011). Teorinis apskaičiuotas pasaulinis hidroenergijos potencialas yra 52 PWh/metai ir sudaro 33 % pasaulinio metinio energijos poreikio, tačiau hidroelektrinių pagaminta elektros energija patenkina tik 3% pasaulinio energijos poreikio (Hoes ir kt., 2017). Elektros sistemoje daugėjant nestabilių saulės ir vėjo elektrinių, hidroenergetikos šaltiniai, įprastai tiekę pigią bazinę elektros energiją, dabar vis dažniau įsijungia patenkindami sunkiai prognozuojamus pikinius poreikius ir atlikdami jų balansavimą. Viena svarbiausių hidroenergetikos teikiamų galimybių – tai kaupti elektros energiją vandens saugyklose. Yra apskaičiuota, kad 99 % pasaulinių energijos kaupimo pajėgumų yra hidroenergija (IEA, 2014). Hidroenergetika tiekia patikimą elektros energiją bei teikia paslaugas, užtikrinančias elektros energetikos sistemos stabilumą, t. y. „juodojo starto“ galimybę, dažnio reguliavimą, inercijos reakciją, karštąjį rezervą, rezervą ir įtampos palaikymą (WEC, 2015).

Nors apskaičiuotas Europos bendrasis teorinis potencialas yra 3274 TWh (Lehner ir kt., 2005), tačiau beveik visas techninis ir ekonomiškai įmanomas potencialas jau yra išnaudotas, o kituose upių ruožuose statyba ribojama dėl urbanistinių, aplinkosauginių, paveldo ir kitų reikalavimų. Naujų hidroelektrinių statyba yra numatoma Kroatijoje, Portugalijoje ir Turkijoje, o Norvegijoje, Rumunijoje, Šveicarijoje, Austrijoje, Lenkijoje bus modernizuojamos seniau pastatytos hidroelektrinės, siekiant jų efektyvumo ir galios padidinimo (IEA, 2021).

Šiaurės Amerikos žemyne geriausiai hidroenergetikos potencialą išnaudoja Kanada, kur statomos 3 naujos, didesnės nei 500 MW hidroelektrinės. Tai lemia palankios hidroenergetikos plėtrai geografinės sąlygos ir skatinamasis reguliavimas. Jungtinėse Amerikos Valstijose hidroenergijos potencialas jau beveik išnaudotas ir hidroenergetikos plėtra vyksta išimtinai modernizuojant senas hidroelektrines bei statant naujas hidroakumuliacines elektrines (IEA, 2021). Rytų Azijos ir Ramiojo vandenyno regione sparčia hidroenergetikos plėtra išsiskiria Kinija, kuri, esnant palankiai valstybės rėmimo politikai, pirmąją pasaulyje pagal naujai pastatomas elektrines (IEA, 2021). Pietų Amerikoje sparčiausia hidroenergetikos plėtra išsiskiria Brazilija, pagal naujai pastatytų hidroelektrinių pajėgumus užimanti antrąją vietą pasaulyje po Kinijos (IEA, 2021). Labiausiai hidroenergetikos potencialas yra išnaudotas Šiaurės Amerikoje ir Europoje, o mažiausiai – Afrikoje (IHA, 2018).

Išsivysčiusiose pasaulio valstybėse pradėta daugiau dėmesio skirti aplinkai – sugriežinti reikalavimai hidroelektrinėms, pradėtas vertinti jų poveikis aplinkai, todėl nuo 1970-ųjų naujos didelės užtvankos nebeatomos (Moran ir kt., 2018). Tai paskatino susidomėjimą mažąja hidroenergetika, turinčia daug privalumų ir darančia galimai mažesnę poveikį aplinkai, nei didelės hidroelektrinės (Abbasi ir Abbasi, 2011). Tačiau kitos studijos atkreipė dėmesį į mažųjų hidroelektrinių, ypač tų, išsidėsčiusių kaskadoje, daromą žalą aplinkai (Başkaya ir kt., 2011; Mayor ir kt., 2017; Kelly-Richards ir kt., 2017), o tai pristabdė mažosios hidroenergetikos plėtrą. Mokslininkai ieško hidroturbinų technologijų, darančių minimalų poveikį aplinkai. Naujausių mažų hidroelektrinių TUM technologijų analizė (Lucchetti, 2013; Yao, 2018) bei DIVE hidroturbinų (DIVE, 2020) duomenys rodo, kad šios technologijos turi minimalų poveikį žuvims ir kitai biotai, užtikrina nešmenų pernešimą ir sukelia minimalią upės vagos eroziją. Mažosios hidroelektrinės gali būti kaip viena iš galimybių elektrifikuojant nutolusias gyvenvietes (Izadyar, 2016; Zhang, 2016). Europos šalyse, kuriose mažoji hidroenergetika yra išvystyta, mažosios hidroenergetikos objektuose sukuriami daug darbo vietų, pvz. Prancūzijoje – 12 000, Jungtinėje Karalystėje – 4 526, Italijoje – 3 000 (Manzano–Agugliaro, 2017).

XX a. pradžioje Vakarų Europoje hidroenergetika vystėsi sparčiai. Vokietijoje, Šveicarijoje, Prancūzijoje ir Austrijoje sparčiai statomoms hidroelektrinėms su pramoniniais centrais sujungti buvo nutiesti elektros tinklai, inicijavę Europos elektros tinklo sukūrimą. Šiai hidroenergetikos plėtrai pagrįsti buvo pradėti išsamiai tirti upių hidroenergetiniai ištekliai, nustatyti upių sezoniskumo, sausrų pokyčiai. Skandinavijos šalyse pastatytų hidroelektrinių elektros energijai į kontinentinę Europą perduoti taip pat reikėjo elektros tinklo (Lagendijk, 2008). Europos valstybių hidroenergetikos parametrai pateikti 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė. Europos valstybių hidroenergetikos parametrai (pagal World Energy Council. World Energy Resources. Hydropower. 2016)

Valstybė	Hidroelektrinių galia (MW)	Hidroakumuliacinių elektrinių galia (MW)	Hidroelektrinių galia be hidroakumuliacijos (MW)	Hidroenergijos gamyba (GWh)
Norvegija	30566	1351	29215	139000
Prancūzija	25397	6985	18412	57300
Italija	21880	7555	14325	44751
Ispanija	18561	5268	13293	32010
Švedija	16184	99	16320	73927
Šveicarija	15635	1817	13818	39000
Austrija	14100	8400	5700	39528
Vokietija	11258	6806	4452	24494
Rumunija	6705	92	6613	14482
Portugalija	5902	1343	4559	9784
JK	4443	2744	1699	8648
Suomija	3198	–	3198	16538
Lenkija	2351	1782	569	2361
Čekija	2259	1172	1087	3070

Islandija	1986	–	1986	13647
Latvija	1576	–	1576	3175
Belgija	1427	1307	120	336
Liuksemburgas	1134	1100	34	92
Lietuva	1027	900	127	508
Estija	8	–	8	27

Daugiausia elektros energijos (iki 95 %), naudodama didžiausius Europoje hidroenergijos išteklius, iš savo upių hidroenergijos pasigamina Norvegija (Pitorac ir kt., 2020). Šalis turi idealias geografines ir hidrometeorologines sąlygas hidroenergetikos plėtrai – šalies pakrante tekanti Golfo srovė nulemia didelį metinį kritulių kiekį – nuo 2000 mm, o kartais siekiantį 5000 mm, susikaupiantį kalnuose esančiuose ežeruose, tarnaujančiuose hidroelektrinių tvenkiniais. Hidroenergetikos tyrimai Norvegijoje pradėti 1917 m. įkūrus Norvegijos technikos universiteto hidroenergetikos laboratoriją. Pradėtos kurti išskirtinėms Norvegijos sąlygoms pritaikytos hidroturbinos, esant aukštoms patvankoms, viršijančioms 1000 m ir daugiau. Norvegai yra pripažinti pasaulyje hidroturbinų kūrėjai, todėl jų sukurtos hidroturbinos yra sumontuotos didžiausioje pasaulyje Trijų tarpeklių hidroelektrinėje Kinijoje. Šalies hidroelektrinių galia per 1955–1990 m. laikotarpį išaugo nuo 6000 MW iki 27000 MW (Brekke, 2015).

Švedijos hidroelektrinės per metus pagamina 73 927 GWh elektros energijos (1.3 lent.) – 41 % šalies elektros energijos kiekio. Hidroelektrinės atlieka ir kitą svarbią funkciją – elektros balansavimą. Dauguma Švedijos hidroelektrinių atlieka paros trukmės balansavimą. Bet yra hidroelektrinių, turinčių didelius tvenkinius, leidžiančius atlikti sezoninį vasaros ir žiemos laikotarpių balansavimą. Didžiausia Švedijoje Suorvos užtvankos saugykla, leidžianti sukaupti vandens atsargas tarpsezoniniam balansavimui. Švedijos tarpsezoninių vandens saugyklų talpa siekia 33,7 TWh, kartu su kitomis Skandinavijos valstybėmis, daugiausia Norvegijos, turima vandens saugyklų talpa sudaro 120 TWh (Byman, 2016).

Šveicarija hidroelektrinėse pasigamina 57 % elektros energijos. Šalies geografinės sąlygos yra palankios hidroenergetikai vystyti, pvz., *Biedron* hidroelektrinėje yra pasiekta net 1886 metrų patvanka (Brekke, 2015), viena didžiausių pasaulyje, leidžianti efektyviai išnaudoti vandens išteklius. Didelė vandens tvenkinių talpa yra svarbi visos Vakarų Europos energetinės sistemos mastu, leidžianti atlikti ne tik paros, bet ir sezoninį vasaros ir žiemos elektros energijos poreikio reguliavimą (Swiss Federal Office of Energy, 2020).

Austrijos užimama topografija Alpėse, tankus upių tinklas ir didelis kritulių kiekis sąlygoja didelius šalies hidroenergijos išteklius ir išvystytą hidroenergetiką, kuriai tenka 56 % instaliuotos elektrinių galios. Būtent nuo hidroenergetikos 1884 m. prasidėjo šalies energetikos plėtra. Po pirmojo pasaulinio karo šaliai netekus anglies kasyklų, buvo sparčiai statomos hidroelektrinės, kurios patenkino augančius šalies energijos poreikius. Turima 8400 MW hidroakumuliacinių ir 5700 MW patvankinių hidroelektrinių galia yra labai svarbi užtikrinant kontinentinės Europos elektros energetikos sistemos stabilumą (IHA, 2018 b).

1.3. Hidrokinetinės energijos išteklių tyrimai Lietuvoje ir užsienyje

Hidrokinetinė energija sudaro upių tekančios srovės hidrokinetinė energija, kuri elektromechaniniais energijos konverteriais (generatoriais) yra paverčiama į naudingą energijos formą, dažniausiai – elektros energiją (Khan ir kt., 2008). Upės tėkmės greitis yra pagrindinis rodiklis, charakterizuojantis upės tėkmės hidrokinetinę galią ir jis turėtų viršyti 0,5 m/s (Johnson ir Pride, 2010; Lalander, 2013). Tačiau upių hidrokinetinė energija efektyvumu ženkliai nusileidžia hidropotencinei energijai. Ištyrus Neries upę, santykinės hidropotencinės ir hidrokinetinės energijos santykis yra 1:137 (Jablonskis ir Meilutytė-Lukauskienė, 2015). Nepaisant mažesnio hidrokinetinės energijos efektyvumo, lyginant ją su hidropotencine, apie jos panaudojimą Lietuvoje 1581 m. liudija Neryje veikęs plūduriuojantis vandens malūnas (Bilys ir kt., 2017). Pirmąją Lietuvoje hidrokinetinę energiją panaudojančią elektrinę ant Merkio upės buvo įrengęs išradėjas J. Jakaitis (Punys ir Vaišvila, 2012). Nemuno ir Neries tėkmių hidrokinetinę energiją bandė įvertinti mokslininkai (Punys ir kt., 2013a; Punys ir kt., 2013b), nustatę Neries vidutinį galios tankį tėkmės skerspjūvyje – $0,30 \text{ kW/m}^2$ ir vidutinę 39 kW galią bei Nemuno vidutinį galios tankį ties Druskininkais, Nemajūnais ir Smalininkais, atitinkamai – $0,3 \text{ kW/m}^2$; $0,33 \text{ kW/m}^2$; $0,15 \text{ kW/m}^2$.

Lietuvos upių techniškai išgaunamus hidrokinetinius išteklius ištyrė (Jakimavičius ir kt., 2014; Gailiusis ir kt., 2017), hidrokinetinėms technologijoms pritaikomuose upių vagų ruožuose, kur gylis didesnis nei 0,5 m ir vidutinis tėkmės greitis didesnis už 0,4 m/s. Jie apskaičiavo, kad potencialiai panaudojamų upių segmentų ilgis beveik 2000 km. Santykinė hidrokinetinė galia pasiskirsčiusi taip: 54,9 % šio ilgio upių ruožų turi mažesnę galią nei 50 kW/km, 31 % turi 50–100 kW/km galią, 10,2 % – 100–150 kW/km, 3,9 % – daugiau nei 150 kW/km. Buvo iširta Neries upės hidroenergija (Jablonskis ir Meilutytė-Lukauskienė, 2015), kurią sudaro hidropotencinė ir hidrokinetinė hidroenergija ir nustatyta, kad lyginamoji hidropotencinė energija yra 273,3 kW/km, o hidrokinetinė energija – 2 kW/km. Lietuvos upėse galima nustatyti ruožus, kur hidrokinetinės energijos potencialas yra pakankamai didelis nepatvankinėms turbinoms įrengti. Vystantis nepatvankinėms technologijoms, upių hidrokinetinės energijos panaudojimo reikšmė ateityje didės, tačiau jos nepakeis tradicinės patvankinės technologijos.

Tradicinis upių patvankos hidropotencinės energijos naudojimas yra efektyviausias hidroenergijos elektrai generuoti metodas, nulėmęs jo visuotinį panaudojimą, tačiau darantis didelį poveikį aplinkai (Moran ir kt., 2018), todėl pradėta ieškoti nepatvankinių hidroenergijos panaudojimo metodų, pradedant naudoti hidrokinetinę energiją. Tai tapo įmanoma, sukūrus hidrokinetines turbinas, panaudojančias upės tėkmės energiją.

Upių hidrokinetinės energijos ištekliai JAV pradėti tyrinėti 1986 m. įvertinus juos šalies mastu (Miller ir kt., 1986) ir laikomi perspektyviais atsinaujinančios energijos ištekliais, siūlančiais alternatyvų tradicinei hidropotencinei energijai panaudojimo būdą, darantį mažesnę įtaką aplinkai, nes nereikalauja užtvankos bei hidroturbinų modulinio panaudojimo galimybes (Ridgill ir kt., 2021). Hidrokinetinės energijos technologijos, panaudojant upių hidroenergijos išteklius, sudaro galimybę tiekti bazinę elektros energiją tolimose vietovėse (Woods, 2017). Hidrokinetinės

energetikos technologijos kol kas dar ankstyvoje kūrimo stadijoje, panašiai kaip ir vėjo energetika prieš 15–20 metų (Johnson ir Pride, 2010). Hidrokinetinės energijos technologijos nėra pasiekusios pasaulinio brandumo dėl jų didelės įvairovės, iš kurių daugiau nei 50 % sudaro ašinio srauto turbinos. Turbinos skirstomos į vertikalių ašies (generatorius viršuje; generatorius panardintas), horizontalios ašies (Darrieus, Gorlovo sraigtinė, Savonius, horizontalios ašies paviršinė) ir skersasrautes. Dažniausiai upėse yra pritaikomos jau išbandytos potvynių ir jūros srovių hidrokinetinių turbinų konstrukcijos (Laws ir Epps, 2016). Hidrokinetinės elektrinės užima nedidelę rinkos dalį, iki 0,4 GW (Punys ir kt., 2015) palyginus su 1308 GW instaliuota tradicinių hidropotencinių elektrinių galia (IHA, 2021). Pirmą kartą apskaičiuoti pasauliniai upių hidrokinetinės energijos ištekliai sudaro 58400 ± 109 TWh (galia $6660 \pm 0,012$ TW), didžiausius šios energijos išteklius turi Kinija, Rusija ir Brazilija (Ridgill ir kt., 2021). Aktyviausiai kuriant hidrokinetinės energijos turbinas dalyvauja Jungtinė Karalystė, Airija, Prancūzija, Ispanija, Kinija, Japonija, Pietų Korėja, Kanada ir JAV (Laws ir Epps, 2016 ; Flambard, 2019). JAV pavyzdys rodo, kad upių hidrokinetinės energijos apskaičiuotas potencialas, kuris pateiktas 1.3 lentelėje, gali sudaryti ženklų elektros energijos poreikio dalį.

1.3 lentelė. Apskaičiuoti hidrokinetinės energijos ištekliai JAV (Laws ir Epps, 2016)

Hidrokinetinės energijos rūšis	Upių, TWh/metai	Potvynių, TWh/metai	Bangų, TWh/metai
Teoriniai ištekliai	1 433	445	163
Techniniai ištekliai	120	250	Nėra duomenų

Kanados upių hidrokinetinių išteklių tyrimų metodikos ir upėse naudojamos turbinos yra apžvelgtos ataskaitoje (Canada's Hydrokinetic Potential, 2010). Kanados teoriniai hidrokinetinės energijos ištekliai yra įvertinti 15000MW galia (Hydro Quebec, 2015). Hidrokinetinių turbinų komercinis panaudojimas upėse yra įmanomas jas jungiant į didesnius masyvus, pasaulyje pirmasis didesnis masyvas buvo suplanuotas įrengti 2017 m. Kanadoje, Šv. Lauryno (St. Lawrence) upėje (Laws ir Epps, 2016). Hidrokinetinės elektrinės turi privalumų, palyginti su tradicinėmis patvankinėmis elektrinėmis, kurie išdėstyti 1.4 lentelėje.

1.4 lentelė. Hidrokinetinių elektrinių privalumai ir poveikis aplinkai pagal (Cada ir kt., 2007; Canada assessment, 2010; Whitaker ir kt, 2010; Ortega-Anchury ir kt., 2010)

Privalumai	Poveikio apibūdinimas	Poveikio švelninimas
Nereikalinga užtvankos statyba. Tai yra pagrindinis aplinkosauginis privalumas	Įtaka upių gyvūnijos buveinėms dėl turbinų įrengimo	Konstrukcijos tobulinimas
Elektrinės įrengimui galima pritaikyti esančias tiltų ir kitas konstrukcijas	Nuosėdų ir teršalų kaupimasis	Konstrukcijos tobulinimas
Elektrinė gali būti montuojama ir eksploatuojama palaipsniui, nes kiekviena turbina gali	Sedimentacijos procesų pakeitimas	Konstrukcijos tobulinimas

veikti kaip nepriklausomas technologinis vienetas. Tai didelis modulinės konstrukcijos privalumas		
Dažniausiai sumontuojama po vandeniu, todėl nedarko kraštovaizdžio ir priimtinesnė vietos gyventojų bendruomenėms (NIMBY efektas)	Hidrologinių režimų pasikeitimas	Konstrukcijos tobulinimas
Žymiai mažesnė įtaka vandens augmenijai ir gyvūnijai, sedimentacijos procesams, laivybai ir rekreacijai, negu tradicinių hidroelektrinių atveju	Pavojus patirti smūgį į besisukančias dalis, korpusus ir apsauginius ekranus	Elektroninių baidyklių taikymas
	Skleidžiamų elektromagnetinių laukų poveikis	Konstrukcijos tobulinimas
	Naudojamų dažų ir kitų cheminių medžiagų toksiškumas	Konstrukcijos tobulinimas
	Triukšmas	Konstrukcijos tobulinimas
	Aukščiau išvardintų poveikių sustiprėjimas dėl grupės turbinų įrengimo	

Pagrindinis hidrokinetinių elektrinių aplinkosauginis privalumas, kuris kartu yra ir ekonominis, – joms nereikia užtvankos.

1.4. Klimato kaitos scenarijų ir modelių tinklėlio raiškos didinimo metodų analizė

1.4.1 Klimato modeliai

Vienas pirmųjų *klimato kaitos* (angl. *Climatic change*) terminą, ieškodamas daugiametės vidutinės oro temperatūros kilimo priežasčių, pavartojo J. Murray Mitchell (Mitchell, 1953). Oficialiame klimato kaitos apibrėžime ji priskirta prie antropogeninių globalios atmosferos sudėties pokyčių, stebimų per palyginamąjį laikotarpį (UNFCCC, 1992).

Siekiant pasauliniu mastu teikti mokslinę informaciją apie klimato kaitą ir galimas atsakomąsias priemones, 1988 m. buvo įsteigta Tarpvyriausybinė klimato kaitos komisija TKKK (angl. *IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change*). TKKK rengia ataskaitas, apimančias mokslinę, techninę ir socialinę-ekonominę informaciją apie antropogeninės klimato kaitos riziką ir priemones prisitaikyti bei jai švelninti. Buvo parengtos penkios ataskaitos (1990 m., 1995 m., 2001 m., 2007 m., 2013 m.) ir šiuo metu yra rengiama šeštoji (Hayhoe ir kt., 2017).

Pirmojoje TKKK ataskaitoje (angl. *FAR – First Assessment Report*) pirmą kartą buvo įvardinta, kad dėl antropogeninės veiklos didėja šiltnamio efektą sukeliančių dujų koncentracijos, todėl vyksta pasaulinis klimato atšilimas. Padariniams įvertinti, taikant įvairias poveikio priemones, ateities klimato projekcijų modeliavimui buvo sukurti SA90 grupės 4 scenarijai (A, B, C, D). Pagal šiuos

scenarijus oro temperatūra kils nuo 0,3 °C (A) iki 0,1 °C (C) per dešimtmetį. Rengiant FAR ataskaitą buvo naudojami trijų dimensijų matematiniai klimato sistemos bendrosios cirkuliacijos modeliai (atmosferos–vandenynų–ledynų–žemės), neįvertinantys šiltnamio dujų grįžtamojo ryšio, horizontalioji raiška tesiekė ~ 500 km (Houghton ir kt., 1991).

Antrojoje TKKK ataskaitoje (angl. *SAR – Second Assessment Report*) įvertinamas gyventojų skaičiaus augimas, politiniai ir ekonominiai pokyčiai buvusioje Sovietų Sąjungoje, Rytų Europoje ir Vidurio Rytuose (Legget ir kt., 1992). Klimato modeliavime kaip įvesties duomenys buvo panaudoti naujai sukurti šeši IS92 grupės scenarijai (IS92a, IS92b, IS92c, IS92d, IS92e, IS92f), kuriuose pirmą kartą buvo įvertinta visa šiltnamio dujų sudėtis (Nakicenovic ir kt., 2000). SAR ataskaitoje buvo naudojami tobulesni klimato modeliai, kurių horizontalioji raiška siekė ~ 250 km ir buvo įtraukti atmosferos aerolių modeliai (Houghton ir kt., 1995).

Trečiojoje TKKK ataskaitoje (angl. *TAR – Third Assessment Report*) buvo panaudoti SRES (angl. *SRES – Special Report on Emissions Scenarios*) emisijų scenarijai, kurių pasitelkiant tapo įmanoma įvertinti ŠES dujų padarinius klimatui ir aplinkai bei įvertinti klimato kaitos švelninimo bei adaptavimosi strategijas (Nakicenovic ir kt., 2000), nors pačios priemonės nebuvo įtrauktos. TAR panaudojami tobulesni AOGCM klimato modeliai, papildyti interaktyviosios augmenijos modeliu (angl. *dynamical vegetation*) bei anglies ciklo modeliu. Pagerinta horizontalioji modelio tinklėlio raiška iki ~ 180 km (Watson ir kt., 2001).

Ketvirtosios TKKK ataskaitos (angl. *AR4 – Fourth Assessment Report*) ateities klimato projekcijos buvo pagrįstos SRES emisijų scenarijais ir CMIP3 modeliavimu (angl. *CMIP3 – Coupled Model Intercomparison Project3*) (Rogelj ir kt., 2012). Kartu su AOGCM modeliais panaudoti pirmieji Žemės sistemos klimato modeliai (angl. *ESM – Earth System Model*). Kai kurių modelių tinklėlio horizontalioji raiška pasiekia 50 km (Delwort ir kt., 2012).

TKKK AR5 ataskaita (angl. *AR5 – Fifth Assessment Report*) grindžiama CMIP5 projekto rezultatais (angl. *CMIP5 – Coupled Model Intercomparison Project*), sukuriama nauji RCP klimato scenarijai (angl. *Representative Concentration Pathways*) (Rogelj ir kt., 2012), pakeitę SRES scenarijus, besiremiantys tikėtinomis žmonijos ekonominės ir socialinės raidos perspektyvomis, įvertinamas klimato kaitos švelninimo poveikis ir adaptavimasis prie klimato kaitos. Įvertinamas žemės naudojimo intensyvumo mastas ir paklotės pasikeitimai (Moss ir kt., 2010), papildyta biogeocheminių ciklų (anglies, sieros) modeliais, ozono kaitos procesais, atmosferos chemijos bei žemynų ledynų modeliais (Flato ir kt., 2013). CMIP5 projekte buvo atliktas modeliavimas su 50 GCM modelių, kurių horizontaliųjų matmenų erdvinė raiška siekia 50–300 km (Hayhoe ir kt., 2017).

Pirmą kartą buvo sukurtas emisijų scenarijus, įvertinantis klimato kaitos švelninimą ir adaptavimąsi, kai vidutinė paviršiaus temperatūra neviršija 2 °C, lyginant su ikipramoniniu laikotarpiu (Moss ir kt., 2010). Naudojant modelį IMAGE, buvo sukurtas RCP2.6 scenarijus, pagal kurį prognozuojamas suminis įvairių aplinkos veiksnių energinis poveikis (angl. *RF – radiation forcing*) klimato sistemai, XXI a. viduryje pasiekęs 3 W/m², po to ima mažėti (Van Vuuren ir kt., 2006; 2007). RCP4.5 klimato scenarijaus modeliavimui naudojant modelį GCAM, RF kyla iki 2100 m. ir

pasiekęs $\sim 4,5 \text{ W/m}^2$ lygį stabilizuojasi (Smith ir Wigley, 2006; Clarke ir kt., 2007), Modeliuojant RCP6.0 klimato scenarijų su modeliu AIM, RF kyla iki 2100 m. ir pasiekusi $\sim 6 \text{ W/m}^2$ stabilizuojasi (Fujino ir kt., 2006; Hijioka ir kt., 2008). RCP8.5 klimato scenarijaus modeliavimui naudojant modelį MESSAGE, RF 2100 m. viršija $8,5 \text{ W/m}^2$ lygį ir toliau kyla (Rao ir Riahi, 2006), (Riahi ir kt., 2007). TKKK, remdama didesnio integruotumo klimato modelių kūrimą, nuolat skatina mokslo bendruomenę kurti naujus scenarijus, atitinkančius mokslo tyrimų pažangą ir naujausius duomenis, (IPCC-DDC, 2019).

Kadangi dėl mažos raiškos buvo sudėtinga globalaus klimato modelius panaudoti konkrečiam regiono klimatui modeliuoti, atsirado regioninio klimato modelių sukūrimo idėja. Pirmą pasaulyje regioninio klimato modelį XXI a. aštuntojo dešimtmečio pabaigoje sukūrė tyrėjų grupė, vadovaujama R. Dickinsono, Jungtinių Amerikos Valstijų Nacionaliniame atmosferos tyrimų centre, bandydama sumodeliuoti kritulių pokyčius branduolinių atliekų saugykloje, esančioje Jukos kalnuose (Yucca Mountain) (Giorgi, 2019). Pirmasis pasaulyje regioninio klimato modelis turėjo 60 km raišką (Dickinson ir kt., 1989). Siekiant sumažinti regioninio klimato modeliavimo neapibrėžtumus, pirmieji klimato modelių lyginamieji projektai, tokie kaip PRUDENCE, ENSEMBLES, RMIP, AMMA ir kt., naudojo daugelio bendrosios cirkuliacijos (GCM) ir regioninio klimato modelių (RCM) matricas (Giorgi, 2019). Nors per daugelį metų buvo įgyvendinta daug regioninio klimato modelių (RCM) ir empirinio-statistinio raiškos didinimo modeliavimo (ESD) lyginamųjų projektų, tačiau nesant bendram protokolui, mokslininkų bendradarbiavimas ir naujausios klimato informacijos sklaida buvo sudėtingi. Tai tapo įmanoma sukūrus CORDEX (angl. *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*) sistemą (Gutowski ir kt., 2016). Pasaulio klimato tyrimų programoje (angl. *WCRP*) 2009 m. šių regioninio klimato modeliavimo lyginamųjų uždavinių sprendimui buvo inicijuotas projektas CORDEX (Giorgi, 2019). CORDEX turėjo padėti (Jacob ir kt., 2020): 1) geriau suprasti svarbius regioninio klimato reiškinius, jų kintamumą ir pokyčius, tam padidinus modelio raišką, 2) įvertinti ir tobulinti regioninio klimato modelius ir raiškos didinimo metodus, 3) parengti viso pasaulio regioninių prognozių rinkinius ir 4) skatinti bendravimą bei keitimąsi žiniomis su regioninės klimatinės informacijos vartotojais (Jacob ir kt., 2020). Pasaulio klimato tyrimų programoje 2009 m. atsirado europinė iniciatyva EURO-CORDEX, turėjusi plėtoti modeliavimo mokslą Europoje.

1.4.2. Klimato modelių tinklelio raiškos didinimo metodai

Tinklelio raiškos didinimo procedūros yra taikomos, kai, naudojant didelio mastelio globalaus klimato modelių (GCM) duomenis, reikia prognozuoti modelio parametrus smulkiame mastelyje vietiniu mastu. Rummukainen (1997) išskiria įprastinius, statistinius, stochastinius, dinامينius ir sudėtinius raiškos didinimo metodus. Pagal metodų taikymo dažnumą raiškos didinimo metodai skirstomi į dvi pagrindines grupes, tai – dinaminiai ir statistiniai raiškos didinimo metodai.

Dinaminis raiškos didinimas (angl. *Dynamical downscaling*) yra didelių skaičiavimo resursų reikalaujantis procesas, kuris dažniausiai yra atliekamas specializuotuose klimato tyrimų centruose asimiliuojant globalaus klimato modelio

duomenis kartu su regioninio masto parametrus atitinkančiais rodikliais, tokiais kaip sausumos ir jūros kontrastas, augalijos danga ir t. t. (Laflamme ir kt., 2015). **Statistinis tinklelio raiškos didinimas** (angl. *Statistical downscaling*) yra procesas, kurio metu nustatomi statistiniai ryšiai tarp smulkesnio mastelio vietinių klimato kintamųjų ir stambaus mastelio prognozuojamų kintamųjų bei šie ryšiai yra panaudojami didelio mastelio rezultatuose, siekiant sumodeliuoti vietinio klimato charakteristikas (Laflamme ir kt., 2015; Sunyer ir kt., 2015). Šis metodas naudojamas dėl mažesnių, nei dinaminis raiškos didinimas, skaičiavimo resursų (Laflamme ir kt., 2015; Sarr ir kt., 2015; Nover ir kt., 2016) bei įgalina modeliuoti vienu metu keletą emisijų scenarijų ir bendros cirkuliacijos klimato modelių rinkinių. Šie metodai varijuoja nuo paprastų iki sudėtingų, yra lankstūs ir pritaikomi konkrečioms tikslams, priklauso nuo klimato stebėjimų duomenų, kaip pagrindo ateities prognozėms (Trzaska ir Schnarr, 2014; Nover ir kt., 2016). Statistinis tinklelio raiškos didinimo metodas per dvidešimtmetį buvo dažniausiai naudojamas taikant didelio mastelio globalaus klimato modelių duomenis ateities prognozėms kurti (Osman ir Abdellatif, 2016). Toliau yra pateikiami keli dažniausiai taikomi statistiniai tinklelio raiškos didinimo metodai.

Pokyčio metodas (angl. *Delta change*) yra vienas iš paprasčiausių. Jis pagrįstas principu, kad yra atrenkamos klimato modelių suprognozuotos anomalijos (iš suprognozuoto scenarijaus atimami bazinio periodo stebėjimų duomenys) ir jos panaudojamos bazinio periodo stebėjimo duomenų korekcijai. Paprastai korekcija atliekama mėnesio žingsniu, naudojant daugiklį krituliams ir papildomą dydį temperatūros korekcijai (Deutschbein ir Seibert, 2012). Pokyčio metodas yra pakankamai dažnai naudojamas atliekant hidrologinį modeliavimą pagal klimato modelių išvesties duomenis (CIIA, 2015).

Paklaidos korekcijos metodas (angl. *Bias correction*) koreguoja klimato modelio rezultatus pagal stebėjimų duomenis (Trzaska ir Schnarr, 2014). Turimų duomenų kokybė ir bendrosios charakteristikos tiesiogiai lemia duomenų charakterį. Norint gauti patikimesnius rezultatus, yra tikslinga analizuoti skirtingus tiriamos vietos duomenų rinkinius, iš kurių pasirinkti patikimiausią (CIIA, 2015). Paklaidų korekcijos metodai dar yra skirstomi į dvi grupes. Tai **vidurkio paklaidos korekcija** (angl. *Bias correction of mean*), kuri pašalina sisteminę paros kritulių vidurkio klaidą, bei **vidurkio paklaidos korekcija, kai kartu įvertinama ir jo dispersija** (angl. *Bias correction of mean and variance*), kuri yra labiau išvystytas ir praplėstas vidurkio paklaidos korekcijos variantas (Sunyer ir kt., 2015). Paklaidos korekcijos metodai yra grindžiami stacionarumo prielaida, t. y. stebėjimų ir sumodeliuotų duomenų paklaidos yra nekintamos ir todėl baziniu laikotarpiu nepriklausomos (CIIA, 2015). Daroma pagrindinė prielaida, būdinga visiems statistiniams tinklelio raiškos didinimo metodams, kad toks pats korekcijos algoritmas yra naudojamas tiek dabartinėms, tiek ir ateities klimato sąlygoms (CIIA, 2015).

Kvantilių priskyrimo metodą (angl. *Quantile mapping*) pasiūlė Gudmundsson ir kt., (2012). Tai neparametrinis empirinis kvantilių pasiskirstymo metodas, kurį taikant yra pašalinamos sistemingos klimato modelio duomenų paklaidos. Pagrindinis šio metodo tikslas yra priskirti kiekvienam dabarties laiko serijos kvantiliui jos atitinkamą ateities kvantilio reikšmę (Beyer ir kt., 2019). Kvantilių priskyrimo

metodas dėl savo efektyvumo ir skaičiavimo resursų tausojimo yra plačiai naudojamas Australijoje (Potter ir kt., 2019), Jungtinėse Amerikos Valstijose (Nover ir kt., 2016; Haugen ir kt., 2019) ir Indijoje (Gupta ir kt., 2019). Jis taip pat dažnai taikomas paleoklimatiniam modeliavimui (Beyer ir kt., 2019). Pokyčio, paklaidos korekcijos ir kvantilių priskyrimo metodai priklauso statistinių modelio tinklėlio raiškos didinimo metodų grupei.

Tobulo prognozavimo PP metodas (angl. *Perfect prognosis*). Statistiniai ryšiai apskaičiuojami tarp stebimų didelio masto laukų (pvz., reanalizės laukų) ir tikslinės didelės skiriamosios gebos tikrinimo stebėjimų (pvz., stoties stebėjimai). Šie ryšiai yra taikomi realiojo laiko sezoninėms prognozėms, kad būtų sukurtos padidintos raiškos prognozės. Tačiau nepakankamai atspindimas tarpmetinis kintamumas, o erdvinis kintamumas atspindimas prastai, nes yra paveldimas pagal modelio išvesties statistiką iš vedančiojo modelio (Maraun ir kt., 2019). Vietinėms prognozėms naudojant PP, didelio masto prognozuojamas kintamasis turi būti tiksliai sumodeliuotas skaitmeniniu modeliu. Praktikoje tai yra sunkiai pasiekama (CIIA, 2015).

Visi šie aptarti tinklėlio raiškos metodai turi tiek teigiamų, tiek ir neigiamų savybių, kurios yra pateiktos 1.5 lentelėje.

1.5 lentelė. Tinklėlio raiškos didinimo metodų palyginimas (pagal Sunyer ir kt., 2015)

Metodas		Teigiamos savybės	Neigiamos savybės
Pokyčio metodas (angl. <i>Delta change</i>)		Lengva pritaikyti ir reikalauja mažai kompiuterinių resursų. Atspindi prognozuojamo klimato elemento skirtingus pokyčius tam tikrais mėnesiais.	Atspindi tik vidutinius prognozuojamo meteorologinio elemento pokyčius, neakcentuojant ekstremalių jo reikšmių.
Paklaidų korekcijos (angl. <i>Bias correction</i>)	Vidurkio paklaidos korekcija	Šis metodas yra lengvai taikomas. Kritulių savikoreliacija tik silpnai veikiama netiesinės transformacijos. Išsaugo sausojo / drėgnojo laikotarpio dienų sekas RCM duomenų eilutėse, todėl gerai atspindi ilgo laikotarpio sausų ir dienų su krituliais prognozuojamus pokyčius. Šis metodas	Remiasi stacionariais transformacijos parametrais, kurie negali būti patikrinti. Netiksliai atspindi sauso ir dienų su krituliais prognozuojamo laikotarpio ilgį. Netiesinė transformacija gali lemti netikėtai dideles kasdienių kritulių sumas.

	Vidurkio paklaidos korekcija, kai kartu įvertinama ir jo dispersija	ypatingai gerai išryškina skirtumus tarp vidutinių ir ekstremalių kritulių.	
Kvantilių priskyrimo“(angl. <i>Quantile mapping</i>)	Lengvai taikomas ir reikalauja mažai kompiuterio resursų. Tobulesnis lyginant su Paklaidų korekcijos metodu. Gaunami didesni skirtumai tarp ekstremalių ir vidutinių kritulių, kas ir yra svarbu taikant šį metodą.	Sunku įvertinti tikslų sausų ir dienų su lietumi skaičių. Šis metodas taikomas tik turint didelį pradinės (išmatuotos) hidrometeorologinės informacijos kiekį. Priešingu atveju perskaičiavimas bus atliktas su dideliais neapibrėžtumais.	
Tobulo prognozavimo (angl. <i>Perfect prognosis – PP</i>)	Temperatūros ir kritulių vidurkis yra gerai atspindimas. Galima naudoti padidintos raiškos prognozėms.	Praktikoje yra sunku tiksliai sumodeliuoti didelio masto prognozuojamą kintamąjį. Sunku pritaikyti vietinėms prognozėms. Erdvinis kintamumas atspindimas prastai, nes yra paveldimas pagal modelio išvesties statistiką iš vedančiojo modelio; Pakartotinės analizės duomenys dažnai neatspindi didelio masto prognozavimo kintamųjų.	

Renkantis konkretų metodą, reikėtų atsižvelgti į tai, kam bus taikomi juo apdoroti duomenys. Sezoninėms prognozėms galima rinktis paprastesnius metodus, tokius kaip pokyčio metodas (angl. *Delta change*), tačiau didesnės apimties darbams, kur bus atliekamas nuotėkio modeliavimas paros žingsniu, tikslinga būtų naudoti kvantilių priskyrimo metodą (angl. *Quantile mapping*).

1.5. Matematinų modelių taikymas hidrologijoje

Įvairiems hidrologiniams uždaviniams spręsti ir upių nuotėkiui įvertinti yra naudojami hidrologiniai modeliai. Hidrologinis modeliavimas buvo pradėtas naudoti XIX a. antroje pusėje projektuojant miestų nuotekų ir melioracijos sistemas bei hidrostatinius. (Streeter ir Phelps, 1925) vandens kokybės tyrimui pradeda naudoti matematinį modelį ir, matematiškai aprašę organinių medžiagų irimo procesus upės vagoje, sudarė pirmąjį deguonies balanso upėje modelį. Įsivyrąja tiesiniai vienos krypties modeliai, kurių sprendimui naudojami analitiniai būdai. Sherman (1932) pristatė vienetinio hidrografo koncepciją, pagrįstą superpozicijos principu. Tai buvo

vienas plačiausiai taikomų praeityje ir tebenaudojamas dabar hidrologinio modeliavimo metodų, skirtas prognozuoti hidrologinių baseinų nuotėkiui, susidarančiam iš iškritusių kritulių. Daroma prielaida, kad efektyvaus kritulių kiekio vienetas per laiko vienetą visada lemia konkretaus dydžio baseino nuotėkį. Pagrindiniai vienetinio hidrografo principai yra stacionariškumas, tiesiškumas ir susidariusio nuotėkio superpozicija (Schulz ir kt., 2018).

Hidrologiniam modeliavimui naudojami deterministiniai ir statistiniai modeliai – dvi hidrologinių modelių grupės (Farmer ir Vogel, 2016). Deterministiniai modeliai yra paremti fizikinių reiškinių tyrimu ir vertinimu, o statistiniai modeliai – kokio nors reiškinio išmatuotų duomenų analize, iš dalies ignoruojant jo fizikinę prigimtį. Praėjusio amžiaus penktajame dešimtmetyje hidrologiniame modeliavime pradėti taikyti statistinės analizės metodai. Vėliau, atsiradus kompiuteriams, modelių sprendimui imami taikyti skaitmeniniai būdai, leidę didesne apimtimi panaudoti fizikiniais procesais paremtus funkcinius ryšius (Singh, 2018).

Nuo 1970 m. buvo kuriami modeliai, įvertinantys aplinkos užterštumo būklę bei potvynius. Įvairiose šalyse aplinkos apsaugai ir vandens kokybei imamas skirti didelis vyriausybės dėmesys. JAV aplinkos apsaugos agentūra kuria modelius **QUAL**, **WASP**, **BASINS** (Ambrose ir kt., 2009) ir kt., o JAV žemės ūkio departamentas – **SWRRBWQ**, **SWAT**, **WEPP** ir kt., Danijos hidrologijos institutas kuria modelį **MIKE** ir jo versijas (Sandu ir Virsta, 2015), naudojamas hidrologinių režimų modeliavime.

JAV Žemės ūkio departamento (USDA) sukurtas modelis **SWRRBWQ** (angl. *Simulator for Water Resources in Rural Basins, Water Quality*) skirtas prognozuoti (Williams ir kt., 1985), kokią įtaką tiek mažiems uždariems vandens baseinams, tiek dideliems baseinams, užimantiems keletą tūkstančių kvadratinį kilometrų plotą, daro priimami vandens ūkio valdymo sprendimai vandens kokybei ir nuosėdų kaupimuisi. Taip pat modelis buvo naudojamas ištirti pesticidų, maistinių medžiagų, fosforo kaupimąsi vandenyje ir dirvožemyje (HMD, 1993). Modeliavimas atliekamas nuotėkio paros žingsniu bei įvertinamas nuotėkio pikas.

1990 m. pasirodė pirmoji Jungtinių Amerikos Valstijų Žemės ūkio departamento (USDA) sukurto dirvožemio ir vandens įvertinimo modelio **SWAT** versija 94.2. 1993 m. mokslinėje literatūroje (Engel ir kt., 1993) pirmą kartą aprašytas modelio panaudojimas, taip pat aprašytas modelio integravimas su geografinė informacinė sistema (GIS). Modelis **SWAT** buvo sukurtas patobulinus modelį **SWRRBWQ**. Modelis **SWAT** veikia paros žingsniu ir yra sukurtas pakankamu tikslumu prognozuoti žemės naudojimo ir valdymo poveikį vandeniui, nuosėdų sankaupoms ir žemės ūkio chemikalų kaupimąsi vandens baseinuose, kuriuose neatliekami matavimai. Modelis **SWAT** plačiai naudojamas pasaulyje (Thavhana ir kt., 2018; Das ir kt., 2019; Abu-Zreig ir Hani, 2021; Beharry ir kt., 2021). **SWAT** buvo modifikuotas ir Europoje dažnai taikomas (Gassman ir kt., 2007).

WEPP modelio kūrimą inicijavo JAV Žemės ūkio departamentas 1985 m., o veikiantis modelis (**WEPP**, 2007), kuriuo modeliuojama vandens sukeliama erozija, buvo pristatytas 1995 metais. Modelis veikia paros žingsniu, kuriuo prognozuojami dirvos išplovimai ir sankaupos šlaite (**WEPP**, 1995).

MIKE SHE modelis skirtas paviršinio ir požeminio vandens tėkmėms modeliuoti, jis sukurtas Danijos hidraulikos institute 1993 m. Tai yra dinamiškas modeliavimo įrankis, skirtas analizuoti, planuoti ir valdyti įvairius vandens išteklius ir aplinkos problemas, susijusias su paviršiniu vandeniu ir požeminiu vandeniu, ypač kai reikia įvertinti antropogeninį poveikį (Sakalauskienė ir kt., 2014; MIKE SHE user's guide, 2017). Modelį naudojo 150 vartotojų iš įvairių Europos valstybių (Sandu ir Virsta, 2015; Clilverd ir kt., 2016; Paparrizos ir Maris, 2017).

Modelis **PC-LAKE** (buvęs PCLOOS) yra sukurtas Nyderlanduose 1992 m. Vandenų ir geriamo vandens tyrimų laboratorijoje (LWD). Modelis yra skirtas tirti eutrofikacijos procesus sekliuose ežeruose ir tvenkiniuose (Janssen, 2019), jis modeliuoja paros žingsniu, yra santykinai sudėtingas, susidedantis iš būklės kintamųjų > 100 ir parametų > 300 .

Modelis **SIMGRO** (angl. *SIMulation of GROundwater*) (Querner ir Van Bakel, 1989) buvo sukurtas 1989 m. Nyderlandų Winand Staring tyrimų centre. SIMGRO yra fizikinis hidrologinis modelis, veikiantis paros žingsniu. Jis modeliuoja regioninį požeminio vandens srautą, faktinę evapotranspiraciją, drėkinimą, nuotėkį, požeminio ir paviršinio vandens lygius, reaguojantis į erdvėje ir laike paskirstytus kritulius, potencialią evapotranspiraciją ir požeminio vandens paėmimą (Vernooij ir kt., 2011).

Vandens balanso modelį **WatBal** sukūrė (Kaczmarek, 1993) kaip integruotą įrankį, įvertinantį potencialią evapotranspiraciją, leidžiantį sumodeliuoti upių baseinų reagavimą į galimą klimato kaitą. Modeliui, kuris veikia mėnesio laiko žingsniu, buvo pritaikyta skaičiuoklė „MS Excel“ (Yates, 1994).

Modelis **WATFLOOD** (Waterlo universitetas, Kanada) buvo pradėtas kurti 1972 m. Ontario Gamtos išteklių ministerijoje (Kouwen, 1988). Modelis veikia valandos laiko žingsniu ir skirtas prognozuoti upių baseinų potvynių debitus. Modelis skirtas ilgalaikiam hidrologiniam prognozavimui, kai reakcijos laikas yra nuo vienos valandos iki kelių savaičių. Modeliui naudojami temperatūros, kritulių bei realaus laiko meteorologinių radarų duomenys (Kouwen ir kt., 1993; Kouwen ir Mousavi, 2002; WATFLOOD / CHARM User's Manual, 2018).

Vandens kokybės modelis **Fyris NP** buvo sukurtas Švedijos žemės ūkio mokslų universitete 1996 m., kai reikėjo sumodeliuoti N ir P pernešimą Fyriso upės baseine, centrinėje Švedijoje (Kvarnas, 1996; The FyrisNP model Version 3.1, a user's manual, 2008).

HBV modelį (Hidrologijos biuro vandens balanso modelis) sukūrė Švedijos meteorologijos ir hidrologijos instituto (SMHI) mokslininkas S. Bergstromas (Bergstrom, 1976). Tai conceptualus upės baseino modelis, turintis keletą parametų ir reikalaujantis minimalių įvesties duomenų, paprastai paros oro temperatūros ir paros kritulių kiekio. Modelis veikia paros žingsniu. Yra įvertinamas sniego akumuliacijavimas ir jo tirpimas bei paviršinio ir požeminio nuotėkio susidarymas. Modelis plačiai naudojamas pasaulyje upių nuotėkiui modeliuoti (Seibert, 2000), hidrologinių pokyčių nustatymo studijose (Seibert ir McDonnell, 2010), N ir P, nuosėdų pernešimui upėse modeliuoti (Lidén, 2000; Liden ir kt., 2001). Atliekant mokslinius tyrimus, klimato kaita dažniausiai yra įvertinama kaip temperatūros T ir kritulių P pokyčiai, kurie lemia hidrologinį ciklą, o tuo pačiu ir upių nuotėkį.

1.5.1. Matematinų modelių taikymas Lietuvoje

Dvidešimt pirmajame amžiuje Lietuvoje vandens **kiekybiniais tyrimams**, t. y. nuotėkio modeliavimui, buvo pradėti taikyti matematiniai modeliai (Gailiusis ir kt., 2003, 2006). Hidrologiniam modeliavimui Lietuvoje taikyti įvairūs hidrologiniai modeliai. Modelis WEPP buvo pritaikytas poplūdžių nuotėkio ir dirvožemio erozijos dirbamoje žemėje procesų modeliavimui Rytų Lietuvoje (Povilaitis ir kt., 1995; Povilaitis, 1997). Lietuvoje modelis *WatBal* taikytas upių nuotėkio analizei (Štaras, 2002), upių vandens balanso (Štaras, 2005; Kilkus ir kt., 2006), dirvožemio drėgmės režimų (Stonevičius, Štaras, Valiuškevičius, 2008) ir kitiems pokyčiams dėl klimato kaitos prognozuoti. Panaudojant modelį SIMGRO buvo pateiktos rekomendacijos Dovinės upės vandens tvarkymo koregavimui, siekiant pagerinti į Žuvinto ežerą įtekančio vandens kokybę, kaip to reikalavo ES Vandens direktyva (Gulbinas ir kt., 2007). Siekiant nustatyti reguliavimo poveikį požeminio vandens režimui Žuvinto ir Amalvos pelkių komplekse (Povilaitis ir Querner, 2008), šiuo modeliu buvo sumodeliuotas Dovinės upės baseinas, taip pat įvertinti upės hidrologinio režimo pagerinimo metodai (Povilaitis ir Querner, 2009), palyginti išmatuoti ir sumodeliuoti upės baseino nuotėkiai. Modelis užsirekomendavo, kaip naudinga priemonė požeminio ir paviršinio vandens judėjimo sąveikai prognozuoti (Povilaitis ir Querner, 2010). Modelis MESAW panaudotas Merkio upės baseinui N, P ir organinių medžiagų apkrovai įvertinti (Povilaitis, 2008), maisto medžiagų sulaikymui Merkio, Mūšos, Nevėžio ir Žeimenos upių baseinuose tirti (Povilaitis, 2011; Povilaitis ir kt., 2012). Pasitelkus modelį *Mike She* sumodeliuotas drenažo poveikis Lapienės upės baseino hidrologiniam režimui Vidurio Lietuvos hidrologiniame rajone (Dumbrasas ir kt., 1998). Modelis MIKE 21 NSW skirtas modeliuoti priekrantės bangas, juo sumodeliuoti Baltijos jūros bangų energetiniai ištekliai Lietuvos priekrantėje (Kasiulis, 2015; Jakimavičius ir kt., 2018 a). Naudojant modelį FYRIS buvo įvertintas maistinių medžiagų apkrovos pokytis Lietuvos upėse ir ežeruose, atsižvelgiant į klimato kaitos poveikį (Povilaitis ir kt., 2018). Modelis SWAT buvo naudojamas sudarant Nemuno baseino upių hidrologinius modelius, biogeninių medžiagų patekimo į Lietuvą iš Baltarusijos, Rusijos ir Lenkijos tyrimui (Čerkasova ir kt., 2018), 1999–2014 m. laikotarpiu Akmenos-Danės ir Eketės upėse buvo ištirtas ir nustatytas azoto bei fosforo koncentracijų sumažėjimas (Bučienė ir kt., 2019). Buvo įvertinta 26 Lietuvos ežerų ir 10 tvenkinių antropogeninė apkrova dėl taršos azotu ir fosforu (Česonienė ir kt., 2021). Su modeliu SWAT buvo atlikti geriausios valdymo praktikos taikymo, kai mažinama maistinių medžiagų apkrova į paviršinius vandens telkinius Lietuvoje, prognozė (Plungė ir kt., 2022a) bei maistinių medžiagų apkrovos Lietuvos paviršinio vandens telkiniuose nustatymas, įvertinant klimato kaitą (Plungė ir kt., 2022b).

HBV modelis Lietuvoje yra plačiai naudojamas. Buvo įvertintos HBV modelio galimybės pritaikyti jį Nemuno nuotėkio prognozavimui (Valiuškevičius ir kt., 2005). Buvo prognozuojama klimato kaitos įtaka Lietuvos upių nuotėkiui (Kriaučiūnienė ir kt., 2008; Šarauskienė ir kt., 2018), taip pat kaip klimato kaita pagal 3 klimato modelius ir 4 RCP klimato scenarijus paveiks žuvų buveines Lietuvos upėse (Kriaučiūnienė ir kt., 2019), kaip ateityje pakis vandens balanso Kuršių mariose komponentės, vandens druskingumas ir vandens temperatūra (Jakimavičius ir kt.,

2018 b), buvo atlikta maistinių medžiagų (N ir P) apkrovos prognozė Žeimenos, Minijos, Nevėžio ir Šventosios upių baseinuose (Povilaitis ir kt., 2018). HBV modelis buvo panaudotas ištiriant meteorologinių faktorių įtaką potvynių formavimuisi Ventos, Šešuvio, Mūšos, Merkio ir Žeimenos upių baseinuose (Akstinas ir kt., 2019). Atlikus hidrologinių modelių taikymo Lietuvos sąlygomis apžvalgą, nustatyta, jog HBV modelis yra tinkamiausias Lietuvos upių nuotėkiui prognozuoti.

1.6. Upių hidroenergetinių išteklių prognozavimas klimato kaitos sąlygomis

Hidroenergija yra atsinaujinantis energijos išteklius, kuris visą laiką kinta, nes tiesiogiai priklauso nuo vandens išteklių ir hidrologinio ciklo. Prognozuojant ateities hidroenergijos išteklius, svarbu įvertinti klimato kaitos įtaką, panaudojant naujausius klimato modelius. Šalyse, kuriose hidroenergija sudaro reikšmingą elektros energijos gamybos dalį, pavyzdžiui, Norvegijoje – 95 % (Pitorac ir kt., 2020), Kanadoje – 60 % (IEA, Canada, 2022), Švedijoje – 40 % (IEA, Sweden, 2019) ir Jungtinėse Amerikos Valstijose – 6,7 % (IEA, United States, 2019), hidroenergijos potencialo prognozavimas laikomas nacionalinės svarbos uždaviniu.

Specialioji Vokietijos aplinkos patariamiosios tarybos ataskaita (German report, 2011) skelbia, kad hidroenergetikos elektros gamybos potencialas Vokietijoje yra ribotas – apie 28 TWh/metai. Vėlesnėje studijoje pateikiama, kad, lyginant su 1981–2010 m. laikotarpiu, Vokietijos hidroenergijos gamybos potencialas iki 2060 m. dėl mažėjančio upių nuotėkio sumažės (Koch ir kt., 2015). Jungtinėse Amerikos Valstijose, kur hidroenergija užima didžiausią visos atsinaujinančiosios energijos dalį – 2019 m. pagaminta 274 TWh elektros energijos, sudarančios 38 % šalies atsinaujinančių išteklių sugeneruotos elektros energijos (U.S. Hydropower Market Report, 2021). Kongreso nurodymu Energetikos departamentas atliko antrąjį penkerių metų vertinimą (US Congress report 2, 2017), kuriame nagrinėjami galimi pasaulinės klimato kaitos padariniai ir rizika šalies hidroelektrinių veiklai, susijusi su vandens išteklių pokyčiais. Naudojant TKKK AR5 ataskaitos globalaus klimato modelius ir RCP8.5 klimato scenarijų, artimoje ateityje (2011–2030 m.) prognozuojamas hidroelektrinių gamybos sumažėjimas 2,5 %, o dar vėliau (2031–2050 m.) – 5 % padidėjimas, palyginus su 1966–2005 m. laikotarpiu. Prognozuojama, kad hidroelektrinių gamyba artimoje ateityje sumažės vasarą ir rudenį, atitinkamai 7 % ir 4 %, žiemą gamyba išliks nepakitusi, o pavasarį išaugs 8 %. 2031–2050 m. laikotarpiu hidroelektrinių gamybos tendencijos išliks – žiemą ir pavasarį vidutiniškai padidės 9 % ir 13 %, o vasarą ir rudenį sumažės atitinkamai 5 % ir 4 %. Norvegijos vandens išteklių ir energetikos direktoratas parengė išsamią ateities hidroenergijos išteklių ataskaitą (Koestler ir kt., 2019), kurioje nurodyta, kad dėl prognozuojamo didesnio kritulių kiekio padidės upių debitas. Prognozavimui buvo panaudotas 10-ies globalaus klimato modelių GCM (CNRM, EC-EARTH, MPI) ir regioninio RCM (CCLM, HIRHAM, ACMO) derinys pagal RCP4.5 ir RCP8.5 klimato scenarijus. Labiausiai upių debitas padidės žiemą ir tuo pačiu metu laukiama šiek tiek mažesnių sniego tirpsmo potvynių. Iki šimtmečio pabaigos (2071–2100 m.) pagal RCP8.5 klimato scenarijų bendra hidroenergijos gamyba Norvegijoje išaugs 8 %, tačiau sumažės hidroenergijos gamyba vasaros mėnesiais, taip pat 80 % sumažės ledynai (palyginti su 1961–1990 m.). Apskaičiuota, kad Alpių regione 2031–2050 m. vidutinis metinis

elektros energijos gamybos kiekis upių baseino elektrinėse (palyginti su 1961–1990 m.) sumažės pagal visus nagrinėtus klimato scenarijus iki 8 % (Wagner ir kt., 2017).

Pasauliniu ir Europiniu mastu atliktos hidroenergijos išteklių prognozės, naudojant klimato modelius, dėl klimato kaitos numato skirtingą hidroenergijos išteklių prieaugį arba nuosmukį įvairiuose pasaulio regionuose. Lehner ir kt. (2005), naudodami pasaulinį integruotą hidrologinį modelį WaterGAP ir ECHAM4 bei klimato modelius HadCM3, nustatė, kad visoje Europoje iki 2070 m. bendrasis hidroenergijos potencialas sumažės apie 6 % lyginant su foniniu 1961–1990 m. laikotarpiu. Tačiau tam tikruose regionuose prognozuojami dideli pokyčiai: Šiaurės ir Rytų Europoje hidroenergijos gamyba padidės nuo 15 % iki 30 %, bet Viduržemio jūros regione sumažės nuo 20 % iki 50 % lyginant su foniniu 1961–1990 m. laikotarpiu. TKKK specialiojoje ataskaitoje „Atsinaujinantys energijos šaltiniai ir klimato kaitos švelninimas“, kuri buvo rengiama pagal duomenis, gautus naudojant klimato modelius GCM ir emisijų scenarijų SRES A1B (Kumar ir kt., 2011), teigiama, kad klimato kaitos poveikis hidroenergijos gamybai pasauliniu mastu tikriausiai bus nedidelis. Klimato kaitos poveikis ateities hidroenergijos ištekliams yra gerai ištirtas Europos Alpių regione. Hamududu ir Killingtveit (2012), naudodami 12 skirtingų klimato modelių ir A1B emisijų scenarijų, prognozavo, jog iki 2050 m. hidroenergijos gamyba pasaulyje pasikeis labai nedaug (0,46 TWh, t. y. mažiau nei 1 % 2005 m. gamybos lygio). Tačiau didesni pokyčiai įvyks skirtinguose regionuose. Hidroenergijos gamyba išaugs Šiaurės Amerikoje (Kanadoje iki +25 %), Skandinavijoje (Norvegijoje iki +15 %), Azijoje (Rusijoje iki +15 %), tačiau sumažės Centrinėje Amerikoje (iki -5 %), Lotynų Amerikoje (Argentinoje iki -5 %). Finger ir kt., 2012, naudodami 7 regioninio klimato modelius RCM su vienu A1B emisijų scenarijumi, prognozavo hidroenergijos išteklių sumažėjimą Šveicarijos Alpėse XXI a. viduryje ir pabaigoje. Gaudard ir kt., (2013), naudodami regioninio klimato modelius REMO ir RegCM3, prognozavo, kad 2031–2050 m. laikotarpiu hidroenergijos gamyba Toce upės baseine padidės +15 %, tačiau hidroenergijos gamyba sumažės Aostos slėnyje, šiaurės vakarų Italijoje -18 %, ir -10 % Aukštutinio Reino baseine. Turner ir kt., (2017) teigimu, priklausomai nuo naudojamo bendrosios cirkuliacijos modelio (panaudojus 16 klimato modelių, kurie buvo naudojami TKKK AR5 ataskaitai ir RCP8.5 bei RCP4.5 klimato scenarijus), grynosios hidroenergijos gamybos pokytis pasaulyje iki šimtmečio pabaigos pagal RCP8.5 bus nuo 8 % mažiau iki 5 % daugiau lyginant su foniniu laikotarpiu. Daroma prielaida, kad Latvijoje 2071–2100 m. laikotarpiu prognozuojamas vidutinio metinio upių nuotėkio sumažėjimas bus nuo 2 % iki 24 %, lyginant su foniniu 1961–1990 m. laikotarpiu (Apsite ir kt., 2011), ir tai atneš neigiamų pokyčių hidroenergijos gamybai, o Estijos šiaurėje klimato kaitos poveikis hidroenergijos potencialui greičiausiai bus teigiamas dėl prognozuojamo nuo 15 % iki 55 % išaugsiančio upių vidutinio metinio nuotėkio 2071–2100 m. laikotarpiu, lyginant su foniniu 1971–2000 m. laikotarpiu (Tamm ir kt., 2016), panašiai kaip Norvegijoje, kur vidutinė metinė hidroenergijos gamyba 2071–2100 m. laikotarpiu prognozuojama 8 % didesnė, palyginti su foniniu 1961–1990 m. laikotarpiu (Koestler ir kt., 2019).

1.7. Upių hidroenergetinių išteklių prognozių neapibrėžtumai

Didėjant visuotinės klimato kaitos poveikiui, hidrologinių prognozių pateikimas užima vis svarbesnį vaidmenį moksliniuose tyrimuose. Neatsiejama šių tyrimų dalis yra pateikiamų prognozių patikimumo įvertinimas nustatant atliktų prognozių neapibrėžtumą ir jo šaltinius. Mokslininkai, atliekantys hidrologinius tyrimus, identifikuoja keletą pagrindinių neapibrėžtumų šaltinių (Kriaučiūnienė ir kt., 2013), tai neapibrėžtumai, kylantys dėl nepakankamų hidrologinių stebėjimų įvedimo duomenų, naudojamo matematinio modelio parametrų neapibrėžtumai dėl netikslaus kalibravimo, hidrologinių modelių struktūriniai neapibrėžtumai dėl modelių nesugebėjimo tiksliai imituoti fizikinius procesus, vykstančius kritulių transformacijoje į upės nuotėkį ir klimato kaitos poveikio hidrologiniams procesams modeliavimo neapibrėžtumai (klimato scenarijų, globalaus ir regioninio klimato modelių bei statistinių raiškos didinimo metodų sukeliama neapibrėžtumai). Pirmajai grupei priklauso įvesties duomenų sukeliama neapibrėžtumai. Yra atlikta daug tyrimų, kuriuose buvo išskirti neapibrėžtumai, kylantys dėl nepakankamų įvesties duomenų (Bergstrom ir kt., 2002), neapibrėžtumai dėl meteorologinių taškinių ir netiesioginių stebėjimų duomenų (radarų, palydovų ir kt.) (Gotzinger ir Bardossy, 2008) bei kritulių duomenų, gautų iš interpoliavimo modelių, derinimo (Hwang ir kt., 2011). Antros grupės neapibrėžtumai buvo nulemti parametrų neapibrėžtumų, atsiradusių dėl netinkamo hidrologinių modelių kalibravimo. Ieškodami sisteminių neapibrėžtumų sumažinimo būdų, Kavetski ir kt., (2006) nustatė, kad svarbu atlikti patikimą modelių kalibravimą, kai neapibrėžtumus nulemiantys, dažniausiai įvesties duomenys, yra nepakankamai patikimi. Kalibruodami HBV modelį, (Lawrence ir Haddeland, 2011) nustatė, kad jis turėtų būti taikomas atitinkamoms geografinėms ir klimato sąlygoms, kurioms buvo sukurtas. Jeigu parametrų neapibrėžties intervalas tarp bazinio ir ateities laikotarpio padidėja, tai gali kvestionuoti sukalibruoto HBV modelio patikimumą (Lawrence ir Haddeland, 2011). Samadi ir kt., (2017), panaudoję keletą neapibrėžtumų nustatymo algoritmų, atskleidė parametrų neapibrėžtumų priklausomybę nuo hidrologinio modelio SWAT kalibravimo.

Trečiai neapibrėžtumų grupei priklauso hidrologinių modelių struktūriniai neapibrėžtumai dėl modelių nesugebėjimo tiksliai imituoti fizikinius procesus, vykstančius kritulių transformacijoje į upės nuotėkį. Bergstrom ir kt., (2002) teigė, kad dėl supaprastintos ir netiksliai atkartojančios gamtinę sistemą hidrologinio modelio struktūros, modeliuojant neišvengsime tai sukeliančių neapibrėžtumų, pavyzdžiui, suskirsčius kraštovaizdį į poligonus arba rastrą, nes realūs procesai vyksta daug mažesniu masteliu (Gotzinger ir Bardossy, 2008). Tirdami parametrų perkeliamumą į skirtingas laiko ir erdvės skiriamąsias gebas su kintamo infiltracijos pajėgumo modeliu *VIC (Variable Infiltration Capacity)*, Melsen ir kt. (2016) atliko tyrimą Šveicarijos Turo upės baseine ir nustatė, kad didelės apimties modelių erdvinis kintamumas nėra pakankamai įvertintas ir didina modeliavimo rezultatų neapibrėžtumą.

Ketvirtai neapibrėžtumų šaltinių grupei priklauso klimato kaitos poveikio hidrologiniams procesams modeliavimo neapibrėžtumai. Prognozuodami Nemuno nuotėkį, Kriaučiūnienė ir kt., (2008) nustatė, kad emisijų scenarijai turi daug didesnę įtaką prognozei nei globalaus klimato modeliai. Kadangi modeliavimas buvo atliktas naudojant vienodus emisijų scenarijus, globalaus klimato modelius, laikotarpius,

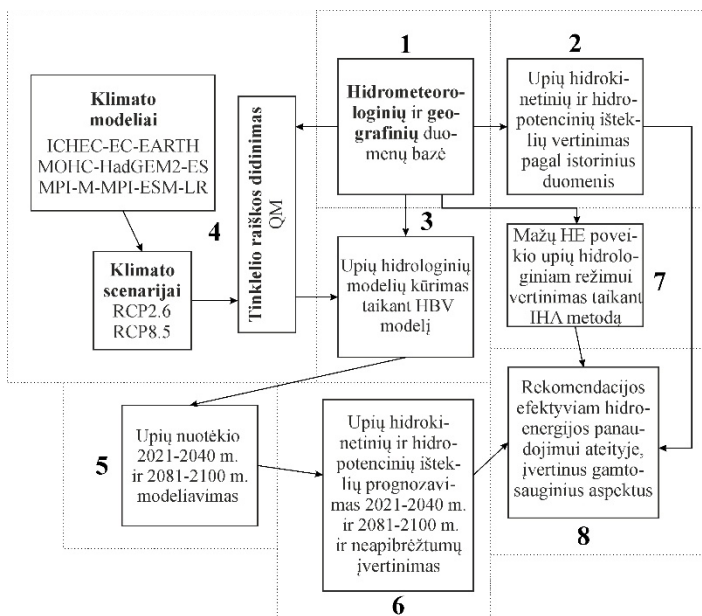
hidrologinį modelį, tai leido palyginti gautus rezultatus su kitomis Baltijos jūros upių baseinų prognozėmis ir sumažinti upių nuotėkio pokyčių vertinimo neapibrėžtumą. Todėl XXI a. Vidurio ir Pietryčių Lietuvos hidrologinių rajonų upių nuotėkio pokyčiai gali būti tokie patys, kaip ir sumodeliuoti Nemuno nuotėkio pokyčiai pagal klimato scenarijus. Keturių Norvegijos upių baseinų, pasižyminčių skirtingu nuotėkio sezoniniu pasiskirstymu, nuotėkio prognozė parodė, kad neapibrėžtumų šaltiniai yra susiję su naudojamais klimato scenarijais, klimato modelių pasirinkimu ir hidrologinių modelių parametru parinkimu, o dominuojantys neapibrėžtumų šaltiniai buvo susiję su klimato scenarijais ir klimato modelių rezultatų pritaikymu prie vietos sąlygų, t. y. su gardelės raiškos didinimu (Lawrence ir Haddeland, 2011). Kriaučiūnienė ir kt., (2013) Merkio ir Neries upių baseinuose nustatė didžiausius neapibrėžtumus, susijusius su nuotėkio prognozėse naudojamais klimato scenarijais A1B, A2 ir B1. Modeliuodami klimato kaitos poveikį trijų Lietuvos hidrologinių rajonų upėms, Akstinas ir kt., (2020) nustatė, kad globalaus klimato modelis GFDL-CM3 buvo didžiausias neapibrėžtumo šaltinis Vakarų Lietuvos hidrologinio rajono upės Minijos nuotėkio prognozėse, siekiantis 41–44,5 %. Nevėžio ir Šventosios upių, priklausančių Vidurio ir Pietryčių Lietuvos hidrologiniams rajonams, nuotėkio prognozių neapibrėžtumai buvo susiję su statistiniais raiškos didinimo metodais ir sudarė atitinkamai 51,3–60,9 % bei 39,4–46,2 %.

1.8. Autoriaus indėlis į nagrinėjamą tematiką

XXI a. pasaulio mastu yra atlikta gausybė upių hidroenergijos išteklių tyrimų ir tų išteklių ateities prognozių, naudojant klimato modelius pagal RCP klimato scenarijus, tačiau Lietuvoje tokių tyrimų atlikta vos keletas. Mažai yra tyrimų, įvertinančių upių ateities hidroenergijos išteklių prognozę visos šalies mastu, kai kompleksiskai vertinama upių tėkmės (hidrokinetinė) bei patvankos (hidropotencinė) energija. Atliekant šį darbą, pirmą kartą buvo sukurta metodika ilgalaikiam upių hidroenergijos (hidrokinetinės ir hidropotencinės) prognozavimui, naudojant RCP klimato scenarijus ir tris regioninio klimato modelio kombinacijas su globalaus klimato modeliais. Klimato modelių išvesties duomenims (temperatūros ir kritulių) pritaikyti Lietuvos geografinėms sąlygoms buvo naudojamas kvantilių priskyrimo QM tinklelio raiškos didinimo metodas. Buvo įvertintas trijų regioninio klimato modelio kombinacijų su globalaus klimato modeliais bei RCP klimato scenarijais naudojimo upių hidroenergijos išteklių prognozavimui, neapibrėžtumas.. Įvertintas atrinktų hidroelektrinių, reprezentuojančių visą Lietuvos teritoriją, sukeltas poveikis hidrologiniam upių režimui pagal vidutiniškai 17 metų trukmės laikotarpius iki hidroelektrinės pastatymo ir po jos paleidimo. Šio tyrimo rezultatus interpoliaavus visoms Lietuvos hidroelektrinėms ir įvertinus hidroenergijos išteklių kaitą ateityje, buvo pateiktos geros gamybos praktikos rekomendacijos hidroelektrinių savininkams ir aplinkosaugos institucijoms, kaip tvariai naudoti pakitusius vandens išteklius, darant mažiausią poveikį hidrologiniam upių režimui.

2. METODIKA

Rengiant šią disertaciją tyrimai atlikti 8 etapais (2.1 pav.). Pirmame etape sudarytos hidrometeorologinių (debito Q , m^3/s , oro temperatūros T , $^{\circ}\text{C}$ ir kritulių P , mm) bei geografinių (informacija apie upių baseinų plotus, miškingumą, ežeringumą, vietovės aukštį virš jūros lygio) duomenų bazės, kurių duomenys buvo panaudoti atliktame tyrime. Antrame etape, naudojant hidrologinių stebėjimų duomenis, apskaičiuoti upių hidrokinetinės ir hidropotencinės energijos ištekliai 1961–2020 m. laikotarpiu. Trečiame etape, naudojant 1986–2005 m. laikotarpio debito, oro temperatūros ir kritulių duomenis bei HBV modelio programinę įrangą, sukurti 15 Lietuvos upių (Nemuno, Merkio, Neries, Šventosios, Žeimenos, Nevėžio, Šušvės, Dubysos, Šešupės, Jūros, Minijos, Bartuvos, Ventos, Mūšos ir Lėvens) baseinų hidrologiniai modeliai. Ketvirtame etape trijų klimato modelių oro temperatūros ir kritulių duomenys pagal du RCP klimato scenarijus taikant istorinių stebėjimų duomenis bei QM metodą buvo adaptuoti Lietuvos teritorijai. Penktame etape, panaudojus sukurtus hidrologinius modelius, hidromodulio kartografavimo metodą bei klimato modelių duomenis, adaptuotus Lietuvos teritorijai, atliktas tiriamų upių nuotėkio artimoje (2021–2040 m.) bei tolimoje (2081–2100 m.) ateityje modeliavimas. Šeštame etape, naudojant nuotėkio prognozes, apskaičiuoti upių hidrokinetinės ir hidropotencinės energijos ištekliai artimoje bei tolimoje ateityje ir įvertinti prognozių neapibrėžtumai. Septintame etape, taikant IHA metodiką, atliktas mažų hidroelektrinių poveikio upių hidrologiniam režimui vertinimas. Ir galiausiai aštuntame etape, taikant šiame tyrime gautus rezultatus ir įvertinus gamtosauginius aspektus, parengtos rekomendacijos efektyviam hidroenergijos naudojimui ateityje. Detaliau kiekvienas iš tyrimų etapų yra aprašytas kitame skyriuje.



2.1 pav. Darbo principinė schema

2.1. Lietuvos upių hidroenergijos įvertinimas naudojant istorinius duomenis

2.1.1. Lietuvos upių hidrokinetinės energijos įvertinimas

Tyrimui atlikti buvo pasirinkta 15 Lietuvos upių (Nemunas, Merkys, Neris, Šventoji, Žeimenė, Nevėžis, Šušvė, Dubysa, Šešupė, Jūra, Minija, Bartuva, Venta, Mūša ir Lėvuo). Upių hidrokinetinių išteklių vertinimo metodika jau buvo ankščiau taikyta kitų mokslininkų (Jakimavičius ir kt., 2014; Gailiusis ir kt., 2017), tačiau atliktuose darbuose nebuvo įvertinti šie tam tikrų dešimtmečių bei sezonų ištekliai. Taigi kiekvieno laikotarpio techninių hidrokinetinių išteklių (tėkmės techninės galios, gautos iš hidrokinetinio įrenginio) įvertinimas buvo atliktas naudojant lygtį (Gailiusis ir kt., 2017):

$$P_{TK} = \eta \frac{\rho}{2} v^3 A_D N \quad (1)$$

čia P_{TK} – techninė hidrokinetinė galia, W; η – naudingumo koeficientas (vidutiniškai 0,30 pagal Lalander, 2010), ρ – skysčio tankis, kg/m^3 , v – tėkmės greitis, m/s, A_D – įrenginio (turbinos) plotas, m^2 , N – įrenginių skaičius.

Upės atkarpos techninė hidrokinetinė galia priklauso nuo instaliuotų įrenginių (N) skaičiaus. Turbinų skaičius upės segmento ilgyje L (m), apskaičiuojamas pagal (Gailiusis ir kt., 2017):

$$N = \frac{B}{2D} \frac{L}{10D} = \frac{BL}{20h^2} \quad (2)$$

$$E_{TK} = P_{TK} t_{TK} \quad (3)$$

čia N – įrenginių skaičius, L – upės segmento ilgis, m, B – skaičiuojamas upės kanalo plotis, kuris yra mažesnis už upės vagos plotį ir kuriame gylis yra didesnis už turbino diametrą, kitaip dar naudingas vagos plotis, m, h – vagos gylis, lygus turbino diametrui, m, E_{TK} – hidrokinetinė energija, Wh, t_{TK} – hidrokinetinių įrenginių darbo laikas, valandos.

Kitame šio skaičiavimo etape buvo nustatyti tirtų upių ruožai, kuriuose galima gaminti hidrokinetinę energiją. Šiame tyrime naudoti parametrai: h – upės vagos gylis, m, B – kanalo plotis, m ir v – tėkmės greitis (v, m/s), nulemia konkretaus ruožo tinkamumą hidrokinetinės energijos gamybai. Hidrokinetinės energijos išteklių įvertinimas buvo atliktas upių ruožuose, turinčiuose minimalų 0,5 m gylį ir tėkmės greitį, siekiantį 0,4 m/s.

Norint nustatyti vagos gylį h , plotį B ir tėkmės greitį v pasirinktame upės ruože, buvo panaudota hidromorfologinių ryšių priklausomybė tarp pagrindinių tėkmės parametrų ir jų formavimosi veiksnių. Ši priklausomybė buvo nustatyta mažoms ir vidutinėms Lietuvos upėms, atlikus 1540 debito matavimus 86 upėse (Gailiusis 1986):

$$h = 0.29 \bar{Q}^{0.45} k^{0.39} I^{0.2} \quad (4)$$

$$B = 8 \bar{Q}^{0.30} k^{0.08} I^{0.2} \quad (5)$$

$$v = 0.43 \bar{Q}^{0.25} k^{0.53} I^{0.4} \quad (6)$$

čia h – vidutinis vagos gylis, m, B – naudingas vagos plotis, m, v – tėkmės greitis, m/s, $\bar{Q}$ – vidutinis metinis debitas, m^3/s , I – vagos nuolydis, $k = \frac{Q_i}{\bar{Q}}$ debito modulis, Q_i – debitas.

Kaip matyti iš 4–6 lygčių, pagrindinis rodiklis, reikalingas įvertinti hidrokinetinius upių išteklius, yra debitas, Q (m^3/s). Naudojant istorinių stebėjimų duomenis buvo apskaičiuoti vidutiniai mėnesiniai atskirų laikotarpių tiriamų upių debitai nuo 1961 m. iki šių dienų (plačiau 3.1. skyriuje „Tyrimų objektas ir naudoti duomenys“).

2.1.2. Lietuvos upių hidropotencinės energijos įvertinimas

Įvertinti jau veikiančių hidroelektrinių hidropotenciniai ištekliai, neplanuojant jų skaičiaus augimo ateityje. Šiuo metu yra 97 veikiančios hidroelektrinės, kurios pastatytos ant 57 Lietuvos upių (3.1 pav.). Tačiau hidrologiniai stebėjimai yra vykdyti ne visose upėse. Dėl šios priežasties netirtų upių nuotėkiui nustatyti buvo pasirinktas hidromodulio q , ($\text{l/s} \times \text{km}^2$) kartografavimo metodas, pagal kurį sukurti Lietuvos upių hidromodulio izolinijų žemėlapiai. Šis tyrimas atliktas taip:

1) Apskaičiuojamas šių laikotarpių kiekvieno mėnesio vidutinis tirtų upių debitas: 1961–1970 m., 1971–1980 m., 1981–1990 m., 1991–2000 m., 2001–2010 m., 2011–2020 m., 1961–2020 m.;

2) Debitas (Q , m^3/s) perskaičiuojamas į hidromodulį (q , $\text{l/s} \times \text{km}^2$) pagal (Gailiusis ir kt., 2001):

$$q = \frac{1000 \times Q}{A} \quad (7)$$

čia q – hidromodulis, $\text{l/s} \times \text{km}^2$, Q – debitas, m^3/s , A – upės baseino plotas perskaičiuojamoje vietoje, km^2 ;

3) Taikant GIS bei interpoliacijos metodą (*Spline*), sudaromi mėnesio, sezono ir metinio hidromodulio q izolinijų žemėlapiai visoje Lietuvos teritorijoje pasirinktiems laikotarpiams;

4) Netirtų upių baseinuose hidromodulis q yra apskaičiuotas pagal hidroelektrinių vietos koordinates iš sudarytų izolinijų žemėlapių;

5) Netirtų upių, ant kurių pastatytos hidroelektrinės, hidromodulis (q , $\text{l/s} \times \text{km}^2$) perskaičiuojamas į debitą (Q , m^3/s) (Gailiusis ir kt., 2001):

$$Q = \frac{q \times A}{1000} \quad (8)$$

Nustačius upių debitą HE vietose, hidropotenciniai ištekliai buvo įvertinti pagal formules (Punys ir kt., 2019):

$$P_p = 7 \Delta H Q \quad (9)$$

$$E_p = P_p t_p \quad (10)$$

čia P_p – hidropotencinė galia, kW, E_p – hidropotencinė energija, kWh, ΔH – užtvankos patvankos aukštis, m, Q – mėnesio debitas (m^3/s), t_p – hidroelektrinės darbo laikas, valandos (Lietuvoje vidutiniškai 4000 val./metai (Punys ir kt., 2019)).

2.2. Upių hidrokinetinės ir hidropotencinės energijos prognozavimas taikant regioninio klimato modelių išvesties duomenis

2.2.1 HBV modelio taikymas upių nuotėkiui prognozuoti

Kaip jau anksčiau nustatėme, pagrindinis rodiklis, reikalingas hidroenergetiniams ištekliams įvertinti, yra debitas. Todėl norėdami pateikti šių

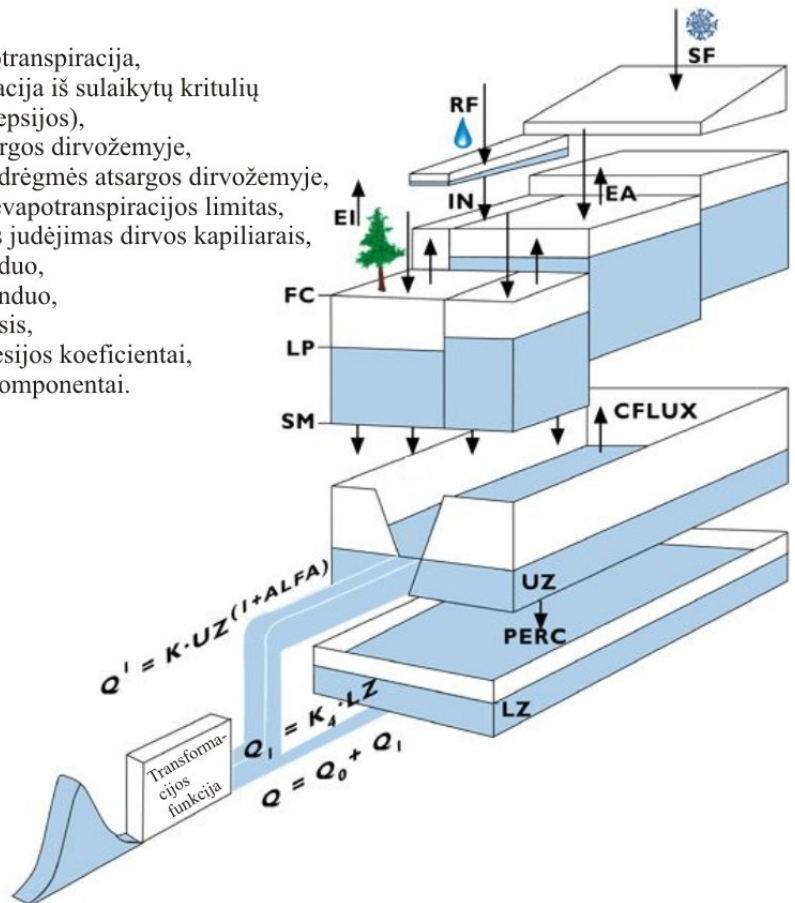
išteklių prognozes XXI a., iš pradžių reikia atlikti Lietuvos upių nuotėkio prognozavimą. Tam buvo taikytas HBV modelis. Šis modelis buvo sukurtas praėjusio amžiaus 7-ajame dešimtmetyje Švedijos hidrometeorologijos institute. Šio kritulių-nuotėkio modelio, skaičiuojančio modeliuojamo baseino vandens balansą, lygtis užrašoma (Integrated Hydrological Modelling System, 2005) taip:

$$P - E - Q = \frac{d}{dt} [SP + SM + UZ + LZ + V] \quad (11)$$

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

HBV modeliu atliekamų skaičiavimų schema parodyta 2.2 paveiksle. Jie atliekami tokia seka: 1. suskaičiuojamas iškritusių kritulių kiekis; 2. įvertinamas šlaitinis nuotėkis; 3. suskaičiuojamas vaginis nuotėkis bei įvertinama nuotėkio transformacija.

SF – sniegas,
 RF – lietus,
 IN – infiltracija,
 EA – faktinė evapotranspiracija,
 EI – evapotranspiracija iš sulaikytų kritulių
 (t.y. dėl intercepsijos),
 SM – drėgmės atsargos dirvožemyje,
 FC – maksimalios drėgmės atsargos dirvožemyje,
 LP – potencialios evapotranspiracijos limitas,
 CFLUX – drėgmės judėjimas dirvos kapiliarais,
 UZ – gruntinis vanduo,
 LZ – požeminis vanduo,
 PERC – filtravimasis,
 k, k₄, ALFA – recesijos koeficientai,
 Q₀, Q₁ – nuotėkio komponentai.



2.2 pav. HBV principinė schema (Integrated Hydrological Modelling System, 2005)

Žemės paviršių pasiekiančių kritulių kiekio skaičiavimas. Krituliai, iškritę modeliuojamame baseine, skaičiuojami atsižvelgiant į aukščio altitudę ir augmeniją upės baseine. Kritulių fazės kaitos temperatūra t_t lemia jų būvį (lietus ar sniegas). Iškritusių kritulių (lietaus ir sniego) kiekis RF ir SF modelyje yra skaičiuojamas:

$$RF = p_{corr} \cdot r_{fcf} \cdot P, \text{ jei } T > t_t, \quad (12)$$

$$SF = p_{corr} \cdot s_{fcf} \cdot P, \text{ jei } T < t_t, \quad (13)$$

čia P – krituliai (mm), T – temperatūra (°C), t_t – perėjimo per nulį temperatūra (°C), r_{fcf} – kritulių kiekio pataisos koeficientas, s_{fcf} – sniego kiekio pataisos koeficientas, p_{corr} – bendras visam baseinui kritulių pataisos koeficientas, reiškiantis sisteminę kritulių matavimo paklaidą.

Dirvos drėgmės skaičiavimas. Upės nuotėkio dydis priklauso nuo susikaupusios drėgmės kiekio dirvožemyje. Skaičiuojamąją drėgmę SM (mm) dirvožemyje lemia 3 parametrai: $BETA$ – empirinis koeficientas, apibūdinantis nuotėkio susiformavimą iš dirvožemio, LP – potencialaus garavimo iš dirvožemio riba, FC – maksimalus drėgmės atsargų dirvožemyje sluoksnis. Upės debito ir kritulių santykis ($\Delta Q/\Delta P$) yra vadinamas nuotėkio koeficientu. Dirvos drėgmės skaičiavimo lygtis:

$$\Delta Q/\Delta P = (SM/FC)^{BETA} \quad (14)$$

Kuo didesnis dirvos drėgnumas, tuo į upės vagą patenka daugiau vandens.

Upės nuotėkio skaičiavimas. Vienas iš upės nuotėkio sudedamųjų yra drėgmės sluoksnis dirvoje, kuris transformuojasi į upės vagą. Kita nuotėkio sudedamoji yra iš kritulių, patenkančių į vandens telkinį, bet sumažėjusi dėl garavimo nuo vandens paviršių nuostolių. Vandens pritekėjimas į upę Q_0 iš paviršinės baseino dalies UZ apskaičiuojamas:

$$Q_0 = k \cdot UZ^{(1+\alpha)} \quad (15)$$

čia UZ – vandens, patenkančio į upę iš paviršinio baseino, kiekis (mm), k – aukštutinio baseino recesijos koeficientas, α – netiesiškumo koeficientas.

Vandens pritekėjimas į upę Q_1 iš požeminio baseino LZ apskaičiuojamas:

$$Q_1 = k_4 \cdot LZ^{(1+\alpha)} \quad (16)$$

čia LZ – vandens kiekis, patenkantis į upę iš požeminio baseino (mm), k_4 – požeminio baseino recesijos koeficientas, α – netiesiškumo koeficientas.

Bendras upės nuotėkis:

$$Q = Q_0 + Q_1 \quad (17)$$

Hidrologinio modelio kalibravimui yra naudojami duomenys, kurie rekomenduojami HBV modelio kūrėjų (Integrated Hydrological Modelling System, 2005), priklauso nuo vietos geografinių sąlygų (2.1 lent.). Kiekvienas modeliuojamas upės baseinas ar pabaseinis kalibruojami atskirai.

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

Kalibravimo parametras		Rekomenduojama reikšmė
Nuotėkio tūrio parametrai		
Kritulių pataisa, naudojama nehomogeniškomis eilutėmis	p_{corr}	0,8–1,2

Lietaus pataisa	rfcf	0,9–1,3
Sniego pataisa	sfcf	0,8–1,4
Dirvožemio drėgmės atsargos, (mm)	FC	100–1500
Sniego akumuliacijos ir tirpimo parametrai		
Sniego tirpimo temperatūra, (°C)	dtm	-2°–2°
Sniego tirpimo greitis, (mm/°C per dieną)	cfmax	3,02–4,5
Kritulių fazės kaitos temperatūra, (°C)	tt	-2–2
Pradinė šlapdrubos temperatūra, (°C)	tti	0°–2,5°
Dirvožemio drėgmės parametrai		
Potencialaus garavimo riba, (mm)	LP	<=1
Nuotėkio iš dirvožemio koeficientas	BETA	1–4
Drėgmės judėjimo dirvožemio kapiliarais greitis, (mm/parą)	cflux	0–2
Thornthwaito lygties koeficientas, mm/diena (°C)	Athorn	0,2–0,3
Modelio reakcijos parametrai		
Požeminio vandens baseino recesijos koeficientas	k4	0,001–0,1
Filtracijos iš gruntinio vandens baseino į požeminio vandens baseiną, greitis (mm/dieną)	PERC	0,01–6
Gruntinio vandens baseino recesijos koeficientas, esant didžiausiam filtracijos greičiui	khq	0,005–0,2
Netiesiškumo koeficientas	alfa	0,5–1,1

Modelis yra kalibruojamas 5 etapais, atsižvelgiant į metodinius nurodymus, (Integrated Hydrological Modelling System, 2005):

1. **Parentkami nuotėkio tūrio parametrai**, kuriuos nusako pcorr, sfcf ir rfcf. Pcorr – kritulių laiko eilučių homogeniškumo pataisa, kurios dydis nustatomas kaip pradinė sąlyga ir neturi būti kalibruojama. Keičiant sfcf parametro reikšmes, kalibruojamas pavasario potvynio tūris. Šis parametras kalibruojamas tol, kol realaus ir modeliavimo pavasario nuotėkio kreivės sutampa. Sumodeliavus pavasario potvynį, kai jis labiausiai sutampa su realiu, pradedamas kalibruoti likusio laikotarpio nuotėkio tūris. Toliau kalibruojamas rfcf parametras. Būtina siekti rfcf reikšmių diapazone tarp 0,9 ir 1,3, bet neturėtų viršyti 1,5. Pradedamas kalibruoti FC, nes jis lemia bendrą nuotėkio tūrį ir galutinai bus sumodeliuotas vėlesniame etape.

2. **Parentkami sniego parametrai**. Kalibruojami sniego ir sniego tirpsmo parametrai (tt, dtm, tti ir cfmax). Parametrai tt ir dtm apsprendžia iškritusių kritulių fazę, sniego ar lietaus pavidalą ir nurodo, nuo kada prasideda sniego tirpsmas. Parametras tti apibūdina kritulius kaip šlapdrubą. Cfmax įvertina sniego tirpsmo greitį.

3. **Parentkami dirvožemio parametrai**. Šiame etape kalibruojami šie keturi parametrai – FC, LP, BETA ir athorn. FC, LP, BETA skirti vasaros ir rudens laikotarpių debitui sukalibruoti. FC parametras apibūdina maksimalias drėgmės atsargas dirvožemyje ir jis kinta priklausomai nuo regiono – nuo 100 iki 1500. LP parodo potencinio drėgmės išgaravimo iš dirvožemio ribą ir yra nuotėkio, susiformuojančio iš gruntinio vandens, eksponentės rodiklis. Athorn – išgaravimo, skaičiuojamo pagal Thornthwaito lygtį, koeficientas. Cflux parametras apibūdina drėgmės judėjimą dirvos kapiliarais.

4. **Parentkami reakcijos parametrai**. PERC, k4, khq, hq ir alfa parametrai, paskirstantys apskaičiuotą debitą laike ir keičiantys tik hidrografo formą, bet

nekeičiantys bendro nuotėkio tūrio. Pagrindinis nuotėkio srautas reguliuojamas kalibruojant k_4 , PERC ir khq . Tai recesijos koeficientai. Hq yra apskaičiuojamas kaip $(MQ \cdot MHQ)^{1/2} \times 86,4/(\text{ploto km}^2)$, arba kaip $MHQ/2 \times 86,4/(\text{ploto km}^2)$. Čia MQ – vidutinis nuotėkis, o MHQ – vidutinis didžiausias nuotėkis. Alfa yra netiesiškumo koeficientas.

5. Parenkami „prislopinimo“ parametrai. Šiame paskutiniame etape kalibruojami „prislopinimo“ parametrai. Svarbiausias iš jų yra maxbaz parametras, kintantis nuo 1 iki 5.

Šie etapai turi būti kartojami tol, kol koreliacijos koeficientas R bus didesnis kaip 0,8, o suminis nuokrypis mažiausias. Atsižvelgus į TKKK AR5 rekomendacijas, pasirinkti 1986–2005 m. bazinį laikotarpį (IPCC, 2013) hidrologiniam modeliui sudaryti naudojami šio laikotarpio hidrometeorologiniai duomenys. Modelis kalibruojamas 1986–1995 m. laikotarpiu, o validuojamas 1996–2005 m. laikotarpiu. Anot HBV modelio kūrėjų rekomendacijų, tokios trukmės laikotarpių visiškai pakanka.

HBV modelio kalibravimo rezultatai vertinami trimis etapais (Integrated Hydrological Modelling System, 2005):

1. Vizualiai vertinama, kaip sutampa sumodeliuoti ir stebėjimų hidrografai;
2. Vertinamas upės sumodeliuoto ir stebėjimų nuotėkių skirtumas. Teisingai sumodeliavus, šis skirtumas turi artėti prie nulio.

$$Accdiff = \Sigma(Q_c - Q_R) \cdot C_t; \quad (18)$$

čia Q_c – upės modeliuotas debitas, Q_R – upės stebėjimų debitas, C – koeficientas, upės debito perskaičiavimui į nuotėkį, t – modeliavimo laikotarpis.

3. Apskaičiuojamas koreliacijos koeficientas.

$$R^2 = \frac{\Sigma(Q_R - Q_{Rmean})^2 - \Sigma(Q_c - Q_R)^2}{\Sigma(Q_R - Q_{Rmean})^2} \quad (19)$$

čia Q_R – upės stebėjimų debitas, Q_c – sumodeliuotas upės debitas, Q_{Rmean} – vidutinis upės stebėjimų debitas per modeliavimo laikotarpį.

Pagal HBV modelio kūrėjų rekomendacijas modelis yra sukalibruotas, jeigu koreliacijos koeficientas $R^2 \geq 0,8$.

2.2.2. Regioninio klimato modelių išvesties duomenų paruošimas upių nuotėkiui modeliuoti

Vieno regioninio klimato modelio (SMHI RCA4, gardelės dydis 11×11 km), kombinacijų su trimis globalaus klimato modeliais (ICHEC-EC-EARTH, MOHC-HadGEM2-ES, MPI-M-MPI-ESM-LR) išvesties duomenys buvo panaudoti ateities upių nuotėkiui modeliuoti. Oro temperatūros ir kritulių prognozės buvo parengtos pagal du RCP klimato scenarijus (optimistinį – RCP2.6 ir pesimistinį RCP8.5). Klimato modelių duomenų (oro temperatūros ir kritulių) pritaikymas Lietuvos teritorijai atliktas naudojant kvantilių priskyrimo metodą, kuris eliminuoja sisteminės

paklaidas klimato modelių duomenyse (Beyer ir kt., 2019). Neparametrinis empirinis kvantilių metodas yra pagrįstas koncepcija, kad transformaciją h galima apibūdinti šia lygtimi (Gudmundsson ir kt., 2012, Sunyer ir kt., 2015):

$$St^{Obs} = ECDF^{OBS-1}(ECDF^{CMRP}(St^{CMFut})) \quad (20)$$

čia St^{Obs} – išmatuotas meteorologinis rodiklis, $ECDF^{Obs-1}$ – išmatuoto meteorologinio rodiklio empirinė kumuliacinė pasiskirstymo funkcija stebėjimų laikotarpiui, $ECDF^{CMRP}$ – klimato modelio prognozuojamas meteorologinis rodiklis klimato normos laikotarpiui, St^{CMFut} – klimato modelio prognozuojamas meteorologinis rodiklis ateičiai. Visi apskaičiuoti rezultatai, laikantis IPCC rekomendacijų, lyginami su bazinio laikotarpio vertėmis (1986–2005 m.).

2.2.3. Neištirtų upių nuotėkio prognozė XXI a.

Atliekant Lietuvos upių hidroenergetinių išteklių vertinimą netirtose upėse, susiduriama su hidrologinių duomenų trūkumu. Todėl ne visoms upėms buvo galima sukurti hidrologinius modelius, pagrįstus 1985–2006 m. duomenimis, nes dalyje upių stebėjimai vykdyti trumpai arba išvis jų nebuvo. Siekiant išspręsti duomenų trūkumo problemą, buvo panaudotas hidromodulio kartografavimo metodas, kuris plačiau aprašytas 2.1.2 poskyriuje. Vienintelis skirtumas, jog kartografuojami ne istoriniai stebėjimų nuotėkio duomenys, o sumodeliuotas nuotėkis 1986–2005 m. pagal klimato modelių duomenis. Jis yra reikalingas įvertinti nuotėkio pokyčius ateityje – 2021–2040 m. ir 2081–2100 m.

2.3. Upių hidroenergetinių išteklių prognozės neapibrėžtumų įvertinimas

Atliekant šį tyrimą vertinta, kokia įtaka hidroenergijos prognozių neapibrėžtumams kyla dėl klimato modelių kombinacijų ir RCP klimato scenarijų pasirinkimo. Tam buvo pasirinkta po tris upes iš kiekvieno hidrologinio rajono hidrokinetinių išteklių bei po 1–2 hidroelektrines hidropotencinių išteklių prognozavimo neapibrėžtumams įvertinti. Tokiu būdu iš Vakarų Lietuvos hidrologinio rajono pasirinktos Jūros, Minijos ir Bartuvos upės bei Balskų ir Skuodo HE, iš Vidurio Lietuvos hidrologinio rajono – Ventos, Dubysos ir Mūšos upės bei Dvariukų HE, o iš Pietryčių Lietuvos hidrologinio rajono – Šventosios, Žeimenos ir Merkio upės bei Kavarsko HE. Siekiant nustatyti du pagrindinius neapibrėžtumo šaltinius, atsirandančius dėl klimato modelių bei RCP klimato scenarijų pasirinkimo, buvo apskaičiuoti visi galimi neapibrėžtumo šaltinių deriniai. Neapibrėžtumas buvo vertinamas trimis etapais: 1) hidrokinetinė ir hidropotencinė energijos įvertintos atskirai taikant sukurtus upių hidrologinius modelius pagal kiekvieną taikomą klimato modelio kombinaciją bei RCP klimato scenarijų; 2) įvertintas skirtumas tarp mažiausio ir didžiausio hidrokinetinių bei hidropotencinių išteklių rezultato; 3) taikant santykio metodą, įvertintas kiekvieno iš modelių bei scenarijaus indėlis į galutinį rezultatą.

2.4. Mažų hidroelektrinių poveikio upių hidrologiniam režimui įvertinimas

Natūralių ir pakeistų hidrologinių režimų charakteristikoms apskaičiuoti buvo naudojama Hidrologinių pokyčių rodiklių programa (angl. *Indicators of Hydrologic Alteration, IHA*), kurią 1996 m. pasiūlė taikyti Richteris ir kt. IHA metodu apskaičiuoti 33 ekologinių požiūriu svarbūs statistiniai rodikliai yra suskirstyti į penkias pagrindines grupes, pateiktas 2.2 lentelėje (IHA User's Manual, 2009).

2.2 lentelė. Išanalizuoti IHA parametrai ir jų vaidmuo ekosistemoje (IHA User's Manual, 2009)

IHA parametrų grupės	Hidrologiniai parametrai	Ekologinis vaidmuo
1. Mėnesių nuotėkio sąlygos	Kiekvieno mėnesio vidutinis debitas	Vandens organizmų buveinių prieinamumas Dirvožemio drėgmės prieinamumas augalams Vandens prieinamumas sausumos gyvūnams Kailinių žinduolių maisto / priedangos prieinamumas Plėšrūnų prieiga prie lizdų Įtaka vandens temperatūrai, deguonies lygiui, fotosintzei
2. Metinės ekstremalios nuotėkio sąlygos ir jų trukmė	Minimalios metų debito reikšmės: 1, 3, 7, 30 ir 90 dienų vidurkiai Maksimalios metų debito reikšmės: 1, 3, 7, 30 ir 90 dienų vidurkiai	Konkurencingų, ruderalinių ir stresui atsparių organizmų pusiausvyrą Vietų augalų kolonizacijai sukūrimas Abiotinių ir biotinių veiksnių įtaka vandens ekosistemų struktūrai Upės vagų morfologijos ir fizinių buveinių sąlygų struktūra Dirvožemio drėgmės prieinamumas augalams Gyvūnų dehidratacija Anaerobinis stresas augalams Maistinių medžiagų mainai tarp upių ir salpų Stresinių sąlygų (pvz., deguonies trūkumas ir padidėjusi cheminių medžiagų koncentracija) trukmė vandens aplinkoje Augalų bendrijų pasiskirstymas ežeruose, tvenkiniuose, salpose
3. Ekstremalių nuotėkio sąlygų data	Metų maksimalaus ir minimalaus debito data	Suderinamumas su organizmų gyvavimo ciklais Organizmų streso nuspėjamumas / išvengiamumas Specialių buveinių pasiekiamumas dauginimosi metu arba siekiant išvengti plėšrūnų Signalai migruojančių žuvų nerštui

4. Aukštų ir žemų pulsacijų pasikartojimas bei trukmė	Žemų pulsacijų skaičius (per metus) Vidutinė žemų pulsacijų trukmė (d.) Aukštų pulsacijų skaičius (per metus) Vidutinė aukštų pulsacijų trukmė (d.)	Dirvožemio drėgmės kaitos streso augalams dažnis ir dydis Anaerobinio streso augalams dažnis ir trukmė Maistinių ir organinių medžiagų mainai tarp upės ir salpos Dirvožemio mineralų prieinamumas Vandens paukščių maitinimosi, poilsio, dauginimosi vietų pasiekiamumas Įtaka nešmenų pernešimui, dugno nuosėdų tekstūrai
5. Nuotėkio sąlygų kaitos greitis ir dažnis	Debitų didėjimo rodiklis: visų teigiamų skirtumų tarp einančių iš eilės parų debitų vidurkis Debitų mažėjimo rodiklis: visų neigiamų skirtumų tarp einančių iš eilės parų debitų vidurkis Reversų skaičius	Sausros stresas augalams (mažėjant lygiui) Organizmų įstrigimas salose, salpose (svyruojant lygiui) Pavojus išdžiūti organizmams, gyvenantiems vandens / sausumos riboje (kintančioje zonoje)

Pirmajame tyrimo etape, naudojant paros debito duomenis, IHA programine įranga buvo apskaičiuoti visų analizuojamų nuotėkio charakteristikų metiniai vidurkiai ir įvertintas nuokrypis tarp paveikto ir natūralaus režimo. Kiekvieno IHA parametro nuokrypio koeficientas (%) apskaičiuotas pagal šią lygtį (Richter ir kt., 1996):

$$F_i = \frac{M_{post} - M_{pre}}{M_{pre}} \times 100\%, \quad (21)$$

čia M_{post} – IHA vidutinė vertė po poveikio, o M_{pre} – vidutinė vertė prieš poveikį. Teigiamas ženklas rodo, kad IHA vidutinė vertė po poveikio padidėjo, o neigiamas – sumažėjo.

Antrajame etape, siekiant palyginti IHA parametrų kitimą prieš ir po HE pastatymo upėje, buvo taikomas kintamumo diapazono metodas, (angl. *Range of Variability Approach, RVA*)(Richter ir kt., 1997; IHA User's Manual, 2009). Taikant RVA, kaip atskaitos taškas naudojamas natūralus IHA parametrų verčių kitimas iki HE įrengimo, siekiant nustatyti, kiek pakito natūralūs nuotėkio režimai. Šiame tyrime, kaip RVA tikslinis intervalas, buvo pasirinktas ± 1 standartinis nuokrypis nuo vidurkio. Hidrologinių pokyčių matas – tai laipsnis, kuriuo nepasiekiamas RVA tikslinis intervalas (Richter ir kt., 1998). Ši hidrologinių pokyčių matą, išreikštą procentais, galima apskaičiuoti taip:

$$D_i = \frac{N_{obs} - N_{exp}}{N_{exp}} \times 100\%, \quad (22)$$

čia N_{obs} – metų, kuriais stebėta hidrologinio parametro vertė pateko į tikslinį intervalą, skaičius; N_{exp} – metų, kuriais tikimasi, kad vertė pateks į tikslinį intervalą, skaičius.

Hidrologinis pokytis yra lygus nuliui, kai stebėtas metinių verčių, patenkančių į RVA tikslinį intervalą, dažnis po plėtros yra lygus buvusiam numatytam dažniui. Teigiamas nuokrypis rodo, kad metinės vertės į RVA tikslinį intervalą pateko dažniau nei tikėtasi; neigiamos vertės rodo, kad metinės vertės į tikslinį intervalą pateko rečiau nei tikėtasi. Hidrologinio pakitimo laipsnio absoliučiąją vertę (0–100 %) galima suskirstyti į tris kategorijas: mažiau nei 33 % reiškia nedidelį pakitimą arba jokio pakitimo; 33–67 % reiškia vidutinį pakitimą; daugiau nei 67 % reiškia didelį pakitimą.

Hidrologinio pakitimo laipsnis, atsižvelgiant į kiekvienos IHA grupės didžiausią ir vidutinę pakitimo laipsnio vertę, įvertinamas pagal lygtį (Xue ir kt., 2017):

$$D = \sqrt{\frac{D_{max}^2 + D_m^2}{2}}, \quad (23)$$

čia D_{max} ir D_m yra didžiausios ir vidutinės kiekvienos rodiklių grupės pakitimo laipsnio vertės.

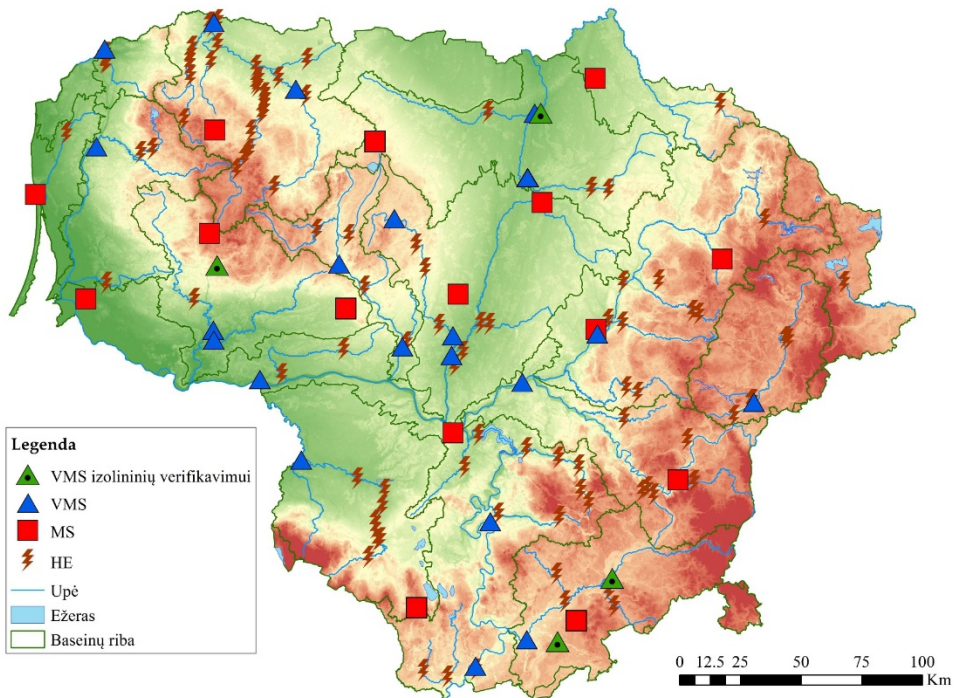
Bendrą hidrologinių pokyčių laipsnį siūloma skirstyti į penkias grupes: nedideli pokyčiai (< 20 %), maži pokyčiai (20–40 %), vidutiniai pokyčiai (40–60 %), dideli pokyčiai (60–80 %) ir sunkūs padariniai (> 80 %). Siekiant nustatyti hidrologinių pakitimų laipsnio ir HE bei jos tvenkinio charakteristikų (baseino ploto, tūrio, užtvankos aukščio, įrengtosios galios ir t. t.) sąsajas, skaičiavimai buvo atliekami dviem etapais. Pirmajame etape buvo apskaičiuoti koreliacijos koeficientai tarp visų abiejų grupių kintamųjų. Antrajame etape buvo atrinkti tik tie hidrologiniai kintamieji, kurie reikšmingai koreliavo su konkrečiomis HE charakteristikomis. Šiame tyrime, atsižvelgiant į duomenų eilučių ilgį, vadovautasi rekomendacijomis (Bujang ir Baharum, 2016): koreliacijos analizei galima naudoti trumpesnes duomenų eilutes, tačiau norint nustatyti reikšmingą ryšį tarp parametrų, reikia didesnio koreliacijos koeficiento. Todėl koreliacijos koeficientas turėtų būti ne mažesnis, nei 0,7. Be to, pasirinktų parametrų grupių ryšiams nustatyti naudota daugialypė regresinė analizė.

3. HIDROMETEOROLOGINIŲ DUOMENŲ BAZĖS SUDARYMAS

3.1. Tyrimų objektas ir naudoti duomenys

Tyrimų objektas – Lietuvos upės (Nemunas, Merkys, Neris, Šventoji, Žeimenė, Nevėžis, Šušvė, Dubysa, Šešupė, Jūra, Šešuvys, Minija, Bartuva, Venta, Mūša ir Lėvuo) bei 97 ant jų įrengtos hidroelektrinės (detalesnė informacija apie hidroelektrines pateikta 1 priede). Šiame tyrime panaudoti 1986–2005 m. paros upių debitai iš 25 VMS bei to paties laikotarpio paros oro temperatūros ir kritulių duomenys iš 15 MS (3.1 pav.).

Paros upių nuotėkio (Q , m^3/s) vertės Lietuvos upių baseinuose iš 25 vandens matavimo stočių (VMS) bei oro temperatūros (T , $^{\circ}C$) ir kritulių (P , mm) vertės iš 15 meteorologijos stočių (MS) (3.1 pav.) buvo panaudotos hidrologiniams modeliams sukurti. Taip pat buvo reikalinga įvairi informacija apie modeliuojamą baseiną: ežerų ir miškų plotai, teritorijos bei VMS ir MS aukštis virš jūros lygio ir t. t. Pagrindiniai HBV modelio išvesties duomenys yra paros žingsnio nuotėkio laiko eilutės modeliuojamuose upių baseinuose.



3.1 pav. Tyrimo objektai

Įvertinti 15 Lietuvos upių, kurių baseinų ribos pažymėtos 3.1 paveiksle, hidrokinetiniai energetiniai ištekliai. Vertinti 97 šiuo metu šalyje veikiančių hidroelektrinių, kurios yra instaliuotos 57 upėse, hidropotencialiniai energetiniai ištekliai. Bendra visose hidroelektrinėse instaliuota galia yra 127,3 MW. Iš jų didžiausia yra Kauno HE (100,8 MW), kitose 4 hidroelektrinėse instaliuota galia

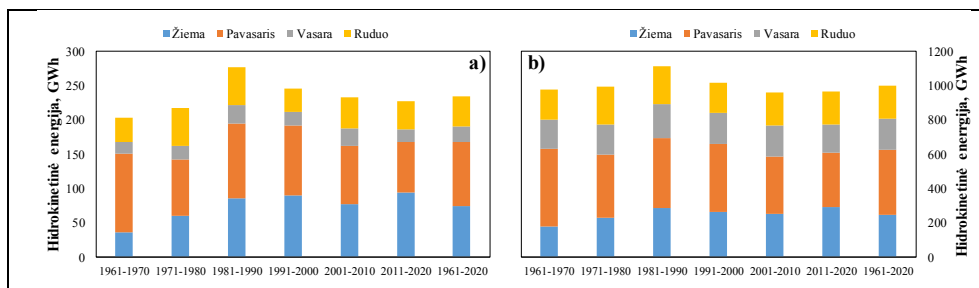
siekia nuo 1 iki 3 MW, o likusiose – mažiau nei 1 MW. Upių hidrokinetiniai ir hidropotenciniai ištekliai artimoje (2021–2040 m.) bei tolimoje (2081–2100 m.) ateityje buvo prognozuoti taikant vieno regioninio klimato modelio (SMHI RCA4, gardelės dydis 11×11 km) kombinacijos su trijų globalaus klimato modelių (ICHEC-EC-EARTH, MOHC-HadGEM2-ES, MPI-M-MPI-ESM-LR) išvesties duomenimis paros žingsniu (oro temperatūra, T °C, kritulių kiekis, P mm). Klimato modelių duomenys buvo gauti iš EURO-CORDEX duomenų bazės (www.euro-cordex.net).

4. TYRIMŲ REZULTAI

4.1. Lietuvos upių hidroenergijos įvertinimas naudojant istorinius duomenis

4.1.1. Hidrokinetinių išteklių kaita

Atliekant šį tyrimą buvo įvertinti mažesnių Lietuvos upių (4.1 pav., a) bei Nemuno ir Neries (4.1 pav., b) hidrokinetinės energijos ištekliai 1961–2020 m. laikotarpiu. Mažesnių Lietuvos upių hidrokinetinės energijos ištekliai 1961–1970 m. laikotarpiu – 202,6 GWh, o 2011–2020 m. laikotarpiu – 227,1 GWh. Per 1961–2020 m. laikotarpį mažesnių Lietuvos upių hidrokinetiniai ištekliai padidėjo 12,1 %. Įvyko tarpsezoninis persiskirstymas: žiemos sezono metu hidrokinetiniai ištekliai išaugo 162,3 %, rudens – 19,1 % ir vasarą – 7,5 %, bet pavasarį sumažėjo 36 %. Didžiausi hidrokinetiniai ištekliai 2011–2020 m. laikotarpiu buvo žiemą, jie sudarė 41,3 % metinio kiekio, o mažiausi buvo vasarą – 8,2 % metinio kiekio. Visose tirtose upėse stebimas hidrokinetinės energijos išteklių sumažėjimas 1981–2020 m. laikotarpiu, kurio tikėtina priežastis – dėl klimato kaitos sumažėjęs upių nuotėkis.



4.1 pav. Mažesnių Lietuvos upių (a) bei Nemuno ir Neries (b) hidrokinetinių išteklių kaita 1961–2020 m.

1961–1970 m. laikotarpiu Vakarų Lietuvos upių apskaičiuoti hidrokinetiniai ištekliai buvo 47,29 GWh. Didžiausi hidrokinetiniai ištekliai buvo apskaičiuoti Jūroje – 23 GWh, toliau seka Minija – 22,1 GWh. Palyginus 1961–1970 m. ir 2011–2020 m. laikotarpius, nustatytas 9,43 GWh hidrokinetinių išteklių padidėjimas. 1961–1970 m. ir 2011–2020 m. laikotarpiu labiausiai padidėjo Minijos upės hidrokinetinės energijos ištekliai – 26,3 %, o mažiausiai – Bartuvos – 12 %. Nors Bartuvos, Minijos, ir Jūros upių neigiamos hidrokinetinės energijos tendencijos tęsiasi jau tris dešimtmečius iš eilės, tačiau šiame regione nustatytas didžiausias hidrokinetinės energijos padidėjimas – 9,43 GWh.

Vidurio Lietuvos hidrologiniame rajone 1961–1970 m. apskaičiuoti hidrokinetinės energijos ištekliai buvo 81,3 GWh. Iš jų didžiausi nustatyti Šešupėje – 20,7 GWh, po to seka Venta – 19,4 GWh, Dubysa – 15,9 GWh, Mūša – 7,8 GWh, Šušvė – 7,1 GWh ir Nevėžis – 7 GWh. Šiame hidrologiniame rajone tyrimo laikotarpiu nustatytas mažiausias hidrokinetinės energijos padidėjimas – 8,2 GWh. Labiausiai per 1961–1970 m. ir 2011–2020 m. laikotarpį padidėjo hidrokinetinės energijos ištekliai Šešupėje – 17,4 %, Ventoje – 10,8 % ir Dubysoje – 10,1 %, o kitose upėse didėjo mažiau: Nevėžyje – 7,2 %, Lėvenyje – 6,1 %, Šušvėje – 2,8 %, o Mūsoje

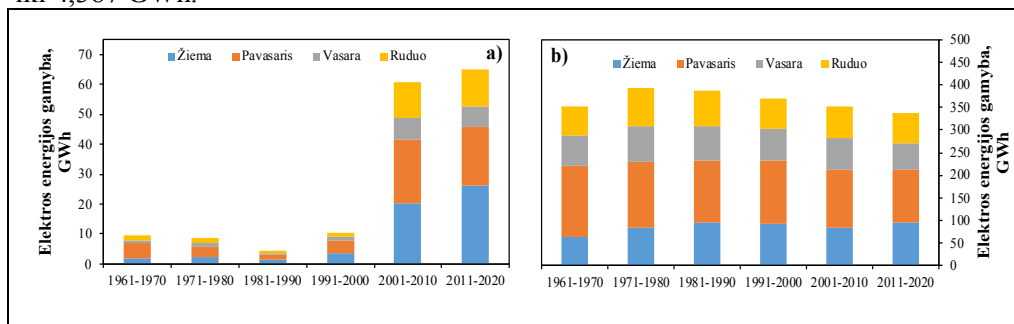
išliko pastovūs. Paskutinius tris dešimtmečius Mūšos, Šešupės, Dubysos, Nevėžio ir Šušvės hidrokinetinės energijos tendencijos išlieka neigiamos.

Pietryčių Lietuvos hidrologiniame rajone 1961–1970 m. apskaičiuoti hidrokinetinės energijos ištekliai – 74,1 GWh. Šio hidrologinio rajono didžiausi Lietuvoje hidrokinetinės energijos ištekliai po Nemuno ir Neries nustatyti Šventosios ir Merkio upėse, atitinkamai 35,6 GWh ir 26 GWh. Žeimenoje apskaičiuoti 12,4 GWh hidrokinetinės energijos ištekliai. Šio hidrologinio rajono upėse 1961–1970 m. ir 2011–2020 m. laikotarpiu hidrokinetinės energijos ištekliai padidėjo 6,8 GWh, iš kurių didžiausias sumažėjimas apskaičiuotas Žeimenoje – 0,1 GWh.

Didžiausi hidrokinetinės energijos ištekliai slypi Nemuno ir Neries upėse (4.1b pav.). Apskaičiuoti Nemuno ir Neries hidrokinetiniai ištekliai 1961–1970 m. laikotarpiu – 976,2 GWh, o 2011–2020 m. laikotarpiu – 963,4 GWh. Per šį laikotarpį nustatytas 12,8 GWh hidrokinetinės energijos išteklių sumažėjimas, tai sudarė 1,3 %. Dėl tarpsezoninio hidrokinetinės energijos išteklių persiskirstymo energija žiemą ir rudenį padidėjo atitinkamai – 64,6 % ir 11,4 %, kai pavasarį ir vasarą sumažėjo atitinkamai – 30,5 % ir 3,6 %. Nemuno ir Neries hidrokinetinės energijos išteklių pasiskirstymas metų laikais buvo tolygesnis nei kitų Lietuvos upių. Didžiausi hidrokinetiniai ištekliai 2011–2020 m. buvo pavasarį, jie sudarė 33 % metinio kiekio, žiemą – 30 %, vasarą – 20 %, o rudenį – 17 % metinio kiekio.

4.1.2. Hidropotencinės energijos išteklių panaudojimas Lietuvoje

Lietuvos mažųjų hidroelektrinių ir Kauno HE apskaičiuota kiekvieno dešimtmečio (1961–1970 m.; 1971–1980 m.; 1981–1990 m.; 1991–2000 m.; 2001–2010 m. ir 2011–2020 m.) gamyba pateikta 4.2 pav. Mažosios hidroelektrinės 1961–1970 m. pagamino 9,587 GWh elektros energijos (4.2 pav., a). Vėliau elektros energijos gamyba mažosiose hidroelektrinėse ėmė mažėti, nes jos pradėtos uždarinėti, dėl to per 1971–1980 m. laikotarpį elektros buvo pagaminta mažiau – 8,807 GWh. Per 1981–1990 m. laikotarpį elektros energijos gamyba vyko tik 5-iose mažosiose hidroelektrinėse, todėl elektros energijos gamyba jose smuko daugiau nei dvigubai – iki 4,387 GWh.

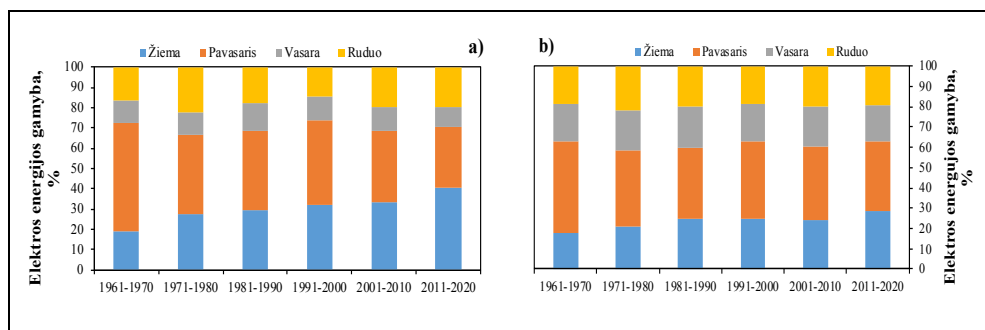


4.2 pav. Mažųjų hidroelektrinių (a) bei Kauno HE (b) elektros energijos gamyba atskirais laikotarpiais

Po nepriklausomybės atkūrimo Lietuvoje pradedamos atstatyti mažosios hidroelektrinės, todėl 1991–2000 m. laikotarpiu yra viršijamas 1961–1970 m. lygis ir elektros energijos pagaminama 10,432 GWh. 2004 m. Lietuvai įstojus į Europos

Sąjungą ir priėmus įsipareigojimus padidinti elektros energijos gamybą iš atsinaujinančių, įskaitant hidroeneriją, išteklių, per 2001–2010 m. ir 2011–2020 m. laikotarpius atstatomos seniau uždarytos ir pastatoma naujų hidroelektrinių. Per šiuos du laikotarpius, padidėjus mažų hidroelektrinių galiai, elektros energijos pagaminama daugiau – atitinkamai 60,580 GWh ir 65,175 GWh. Lietuvos mažų hidroelektrinių elektros energijos gamyba 2000–2020 m. laikotarpiu išaugo 7,6 % (4.2 pav., a). Dėl tarpsezoninio elektros energijos gamybos persiskirstymo (4.2 pav., a) žiemą elektros energijos gamyba išaugo 8,1 %, rudenį – 4,8 %, tačiau sumažėjo 10,9 % pavasarį ir 1,8 % vasarą. Kauno HE 1961–1970 m. buvo vidutiniškai pagaminama 353 GWh elektros energijos per metus (4.2 pav., b). Elektros energijos gamyba didžiausioje šalies hidroelektrinėje augo dėl didėjančio nuotėkio Nemune bei atlikto modernizavimo, kai instaliuota galia buvo nuo 90 MW (projektinė galia), 1975 m. galia padidinta iki 100,8 MW ir 2010 m. po rekonstrukcijos padidintas elektrinės efektyvumas. Daugiausia elektros energijos hidroelektrinė pagamino 1971–1980 m. laikotarpiu – 395 GWh. Vėlesniais laikotarpiais hidroelektrinės gamyba mažėjo ir 2011–2020 m. buvo pagaminta 338 GWh. Tai lėmė mažėjantis Nemuno upės nuotėkis bei griežtėjančios aplinkosauginės normos, ribojančios vandens lygio svyravimą hidroelektrinės tvenkinyje – Kauno mariose. Be to, intensyviau dirbant Kruonio HAE, mažiau elektros energijos pagamina Kauno HE, nes dėl aplinkosauginių reikalavimų yra ribojamas Kauno marių lygis. Nors Kauno HE yra vidutiniškai pagaminama 4 % Lietuvoje suvartojamos elektros energijos (Kauno Algirdo Brazausko hidroelektrinė, 2020), ji yra svarbi Lietuvos energetinei sistemai dėl teikiamų elektros sisteminių paslaugų ir visos Lietuvos elektros energetinės sistemos atkūrimo esant sisteminei avarijai (angl. black start).

Mažųjų hidroelektrinių ir Kauno HE elektros energijos gamybos sezoninis pokytis tam tikrais laikotarpiais pateiktas 4.3 pav.



4.3 pav. Mažųjų hidroelektrinių (a) bei Kauno HE (b) elektros energijos gamybos sezoninis pokytis tam tikrais laikotarpiais

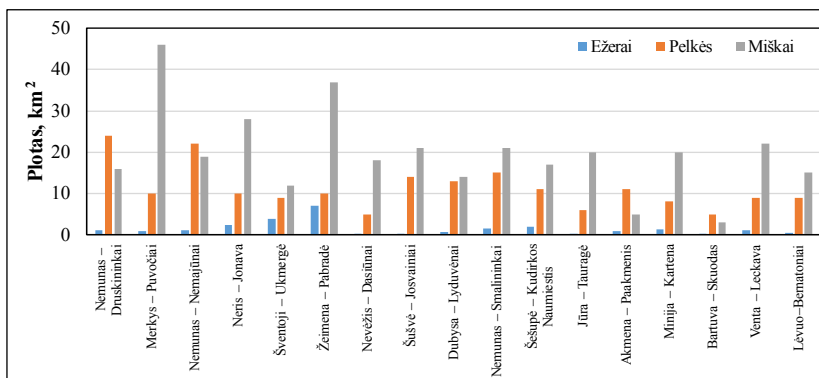
Kauno HE elektros energijos gamyba 2000–2020 m. laikotarpiu sumažėjo 4,5 % (4.3 pav., b), vyko pagamintos elektros energijos persiskirstymas tarp metų laikų (4.3 pav., b): pavasarį sumažėjo 3,8 %, vasarą – 1,5 %, rudenį – 0,4 %, o žiemą ir rudenį padidėjo atitinkamai 4,1 % ir 1,1 %. 2011–2020 m. daugiausia elektros energijos pagaminta pavasarį – 34,5 %, žiemą – 28,6 %, rudenį – 19,5 % ir vasarą – 17,4 %. Kauno HE tarpsezoninis pagamintos elektros energijos pasiskirstymas 1961–2020 m. laikotarpiu išliko gana tolygus (4.3 pav., b), palyginus su mažų hidroelektrinių ryškiai

išreikštu persiskirstymu, kai laikotarpio pradžioje pavasarį pagamintos energijos kiekis buvo trigubai didesnis už žiemos, bet laikotarpio pabaigoje atvirkščiai – žiemos metu elektros energijos santykis ženkliai viršija pavasario (4.3 pav., a). Pagrindinė šio Kauno HE tarpsezoninės elektros energijos gamybos tolygumo priežastis – didelis Kauno marių tvenkinys, galintis sukaupti dideles energijos atsargas ir sureguliuoti tarpsezoninės elektros energijos gamybos apimtį.

4.2. Lietuvos upių hidroenergetinių išteklių prognozavimas XXI a. pagal klimato scenarijus

4.2.1. Lietuvos upių hidrologinių modelių kalibravimas ir validavimas

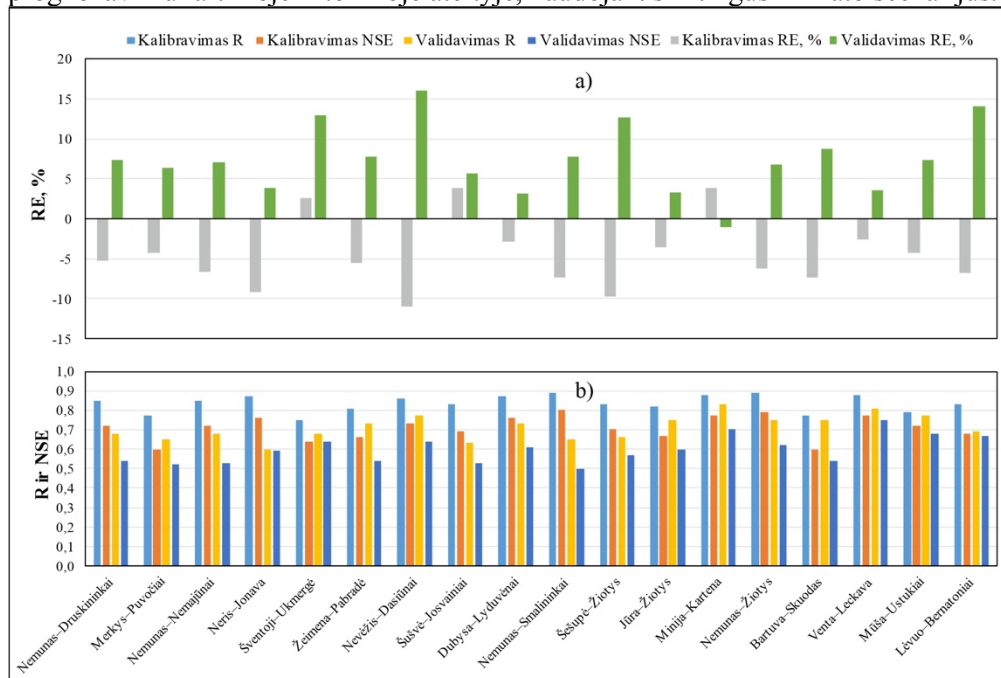
Upių hidrologinių modelių sukūrimui buvo pasirinktos VMS ir MS, kurių surinkti duomenys apibūdina modeliuojamų upių baseinų hidrometeorologinių sąlygų visumą. Buvo surinkta reikalinga geografinė informacija, t. y. upių baseinų plotai, baseinų aukščiai virš jūros lygio, miškingumas, dirbamos žemės plotai, ežeringumas. Surinkta hidrologinė informacija apie upių vidutinius debitus. Pagrindinė geografinė informacija yra pateikta 4.4 pav. (pagal Gailiūsis ir kt., 2001).



4.4 pav. Upių geografinės charakteristikos

Atsižvelgiant į TKKK AR5 rekomendacijas (IPCC, 2013), modeliui sukurti buvo panaudota 1986–2005 m. laikotarpio hidrometeorologinė informacija. Modelio kalibravimui buvo pasirinktas 1986–1995 m. laikotarpis, o validavimui – 1996–2005 m. laikotarpis. Kalibravimo procesas yra atliekamas tol, kol pasiekama didžiausia koreliacijos koeficiento R reikšmė, o bendras nuokrypis yra mažiausias. Pasirinktų upių baseinų R kalibravimo reikšmės kinta nuo 0,75 iki 0,89, o validavimo reikšmės – nuo 0,60 iki 0,83 (4.5 pav.). Taip pat labai svarbūs rodikliai, apibūdinantys kalibravimo bei validavimo tikslumą, yra Nasho-Sutcliffe'o efektyvumo kriterijus NSE bei santykinė tūrio paklaida RE (%). Kalibravimo laikotarpiu NSE kito nuo 0,60 iki 0,80, o validavimo laikotarpiu nuo 0,50 iki 0,75. Tuo tarpu skirtumas tarp išmatuoto ir sumodeliuoto debito RE (%) kalibravimo laikotarpiu dažniausiai buvo teigiamas, o validavimo laikotarpiu – panašiu dydžiu neigiamas (4.5 pav.). Atsižvelgiant į šiuos rezultatus, galima teigti, jog pasirinktų upių hidrologiniai

modeliai sukalibruoti tinkamai ir gali būti taikomi Lietuvos upių nuotėkio prognozavimui artimoje ir tolimoje ateityje, naudojant skirtingus klimato scenarijus.

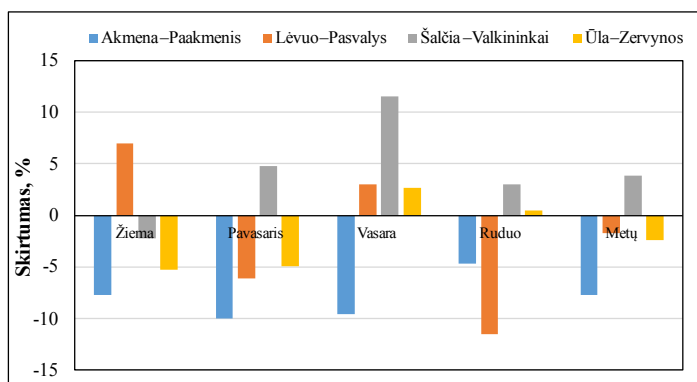


4.5 pav. Hidrologinių modelių kalibravimo ir validavimo rezultatai

4.2.2. Izolinijų kartografavimo metodo verifikavimas

Izolinijų metodas plačiau aprašytas metodikoje. Siekiant įvertinti sudaryto Lietuvos upių hidromodulio izolinijų žemėlapio patikimumą, pasirinktos 4 upės (Akmena, Lėva, Šalčia ir Ūla), kuriose 1986–2005 m. buvo vykdyti nuotėkio stebėjimai ir jų duomenys nebuvo panaudoti nuotėkio žemėlapių sudarymui. Šios upės priklauso skirtingiems Lietuvos hidrologiniams rajonams (Vakarų, Vidurio bei Pietryčių), kuriems yra būdingos savitos nuotėkio formavimosi sąlygos (skirtingas kritulių kiekis, nuolydis, gruntas ir t. t.) (Kriaučiūnienė ir kt., 2012). Todėl atliekant hidromodulio izolinijų žemėlapių verifikavimą būtina patikrinti, kaip pagal stebėjimų duomenis apskaičiuotas 1986–2005 m. laikotarpio pasirinktų upių mėnesių, sezonų bei metinis hidromodulis atitinka nuotėkio reikšmes, gautas iš q izolinijų žemėlapių.

Nustatyta, jog, taikant izolinijų metodą, vidutinis metinis q skiriasi tik -7,7 % – 3,8 % nuo apskaičiuoto q pagal stebėjimo duomenis (4.6 pav.). Hidromodulio skirtumas atskirais sezonais kinta nuo -11,5 iki +11,5 %. Įvertinus tai, jog praktikoje debitas yra nustatomas su 40 % paklaida, mūsų gauti rezultatai yra patikimi ir yra tinkami naudoti tolesniuose tyrimuose (Winter, 1981; Sattary, 2002; Neff ir Nicholas, 2005; McMillan ir kt., 2018).

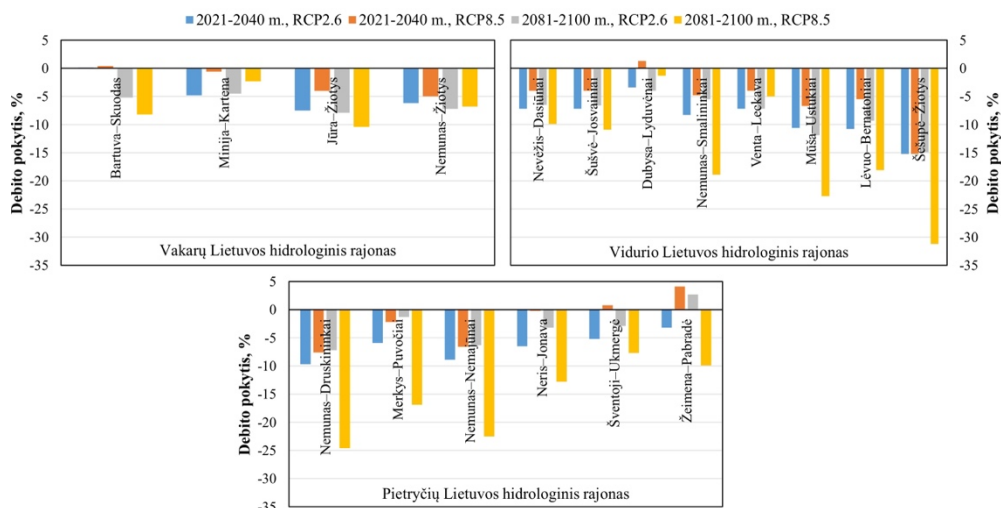


4.6 pav. Skirtumas (%) tarp hidromodulio (q), apskaičiuoto remiantis stebėjimo duomenimis bei taikant izolinių kartografavimo metodą

4.2.3. Upių nuotėkio prognozės tirtuose ir netirtuose upių baseinuose

4.2.3.1. Upių nuotėkio prognozė tirtuose baseinuose

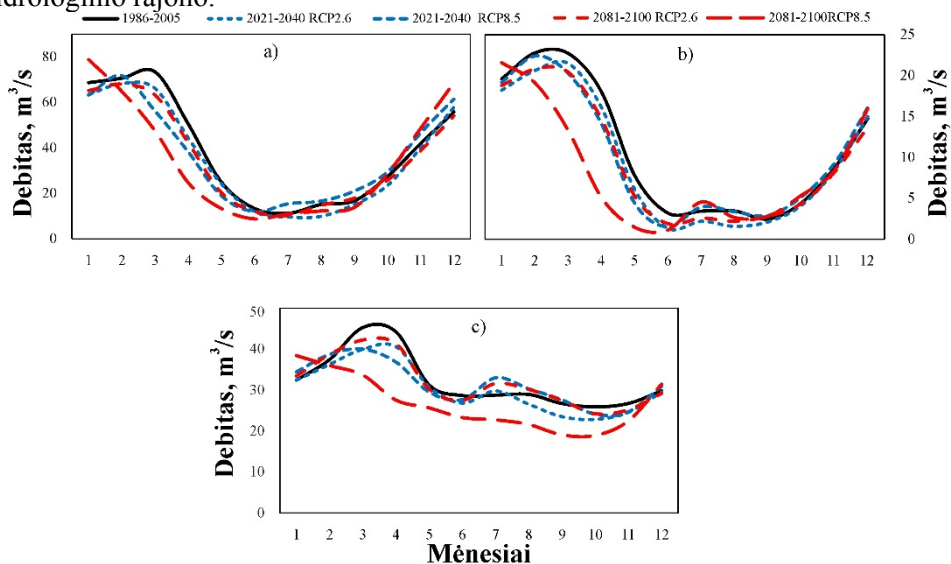
Tirtų upių nuotėkio projekcijos įvertinamos hidrologinio modeliavimo metodu. Bazinio laikotarpio nuotėkis bei jo projekcijos artimoje bei tolimoje ateityje sumodeliuotos pagal trijų klimato modelių ansamblį bei du pasirinktus RCP klimato scenarijus. Vidutinio metinio debito pokyčiai artimoje ir tolimoje ateityje pateikti kaip nuokrypiai (%) nuo bazinio laikotarpio debito (4.7 pav.).



4.7 lentelė. Prognozuojamo debito artimoje ir tolimoje ateityje pokytis (%) nuo bazinio laikotarpio debito

Lietuvoje upės pagal nuotėkio režimus yra suskirstytos į tris hidrologinius rajonus – Vakarų Lietuvos, Vidurio Lietuvos ir Pietryčių Lietuvos. 4.8 paveiksle pateikti upių, reprezentuojančių šiuos hidrologinius rajonus, hidrografai. Iš Vakarų

Lietuvos pasirinkta Jūra, Mūša – iš Vidurio ir Merkys – iš Pietryčių Lietuvos hidrologinio rajono.



4.8 pav. Prognozuojami tiriamų upių nuotėkio pokyčiai 21 amžiuje: a) Jūroje, b) Mūsoje, c) Merkyje.

Vakarų Lietuvos hidrologiniame rajone iškrenta didžiausias Lietuvoje kritulių kiekis, kurio pusė nuteka į upes. Gausiai lyja rudenį ir žiemą, o žiemos poplūdžiai būna analogiško dydžio, o tam tikrais atvejais ir didesni nei pavasario potvynį. Šiam hidrologiniam rajonui būdingi bruožai atsispindi Jūros upės hidrografe (4.8 pav., a). Kaip matyti jame stebimas nuotėkio padidėjimas rudens pabaigoje bei aukštas nuotėkis žiemos sezonu. Jame taip pat nėra stipriai išreikštas pavasario potvynis, o vasaros laikotarpio nuotėkis sudaro trečdalį nuo vidutinio metinio. Artimoje ateityje Jūros debitas sumažės nuo 4 iki 7,5 % lyginant su baziniu laikotarpiu. Dar didesni pokyčiai galimi tolimoje ateityje, kai pagal RCP2.6 klimato scenarijų Jūros debitas sumažės 7,9 %, o pagal RCP8.5 klimato scenarijų – 10,4 % lyginant su baziniu laikotarpiu. Didžiausias nuotėkio persiskirstymas tolimoje ateityje tikėtinas pavasario sezono metu, kuomet debitas sumažės nuo 15,5 % (RCP2.6) iki 42,5 % (RCP8.5), lyginant su baziniu laikotarpiu. Ženkliai mažesni pokyčiai galimi vasaros sezonu, kada debitas pagal tuos pačius scenarijus sumažės nuo 6,2 iki 19,3 %. Tačiau žiemos bei rudens sezonais pagal RCP8.5 prognozuojamas debito padidėjimas atitinkamai 8,8 ir 5,6 % lyginant su baziniu laikotarpiu.

Vidurio Lietuvos hidrologiniame rajone vyrauja nelaidžios vandeniui molingos dirvos, todėl beveik visas sniego tirpsmo vanduo nuteka į upes, nesusigerdamas į gruntą, sukeldamas didelius pavasario potvynius. Vasarą kritulių iškrenta nedaug, kadangi upės nėra maitinamos požeminiu vandeniu, jos labai nusenka. Visi šie požymiai yra būdingi Mūšos nuotėkiui. Artimoje ateityje pagal taikomus emisijų scenarijus debitas Mūsoje sumažės 6,6–10,7 %, o tolimoje ateityje nuo 11,9 % pagal RCP2.6 klimato scenarijų, iki 22,7 % pagal RCP8.5 klimato scenarijų (4.8 pav., b). Didžiausias nuotėkio persiskirstymas tarp sezonų numatomas tolimoje ateityje.

Tikėtina, jog pavasario sezono metu pagal RCP8.5 debitas sumažės 59 % lyginant su baziniu laikotarpiu. Pagal tą patį scenarijų žiemos sezono metu debitas keisis nežymiai – 0,9 %, vasaros sezonu sumažės 17,2 %, o rudens – padidės 6,2 %.

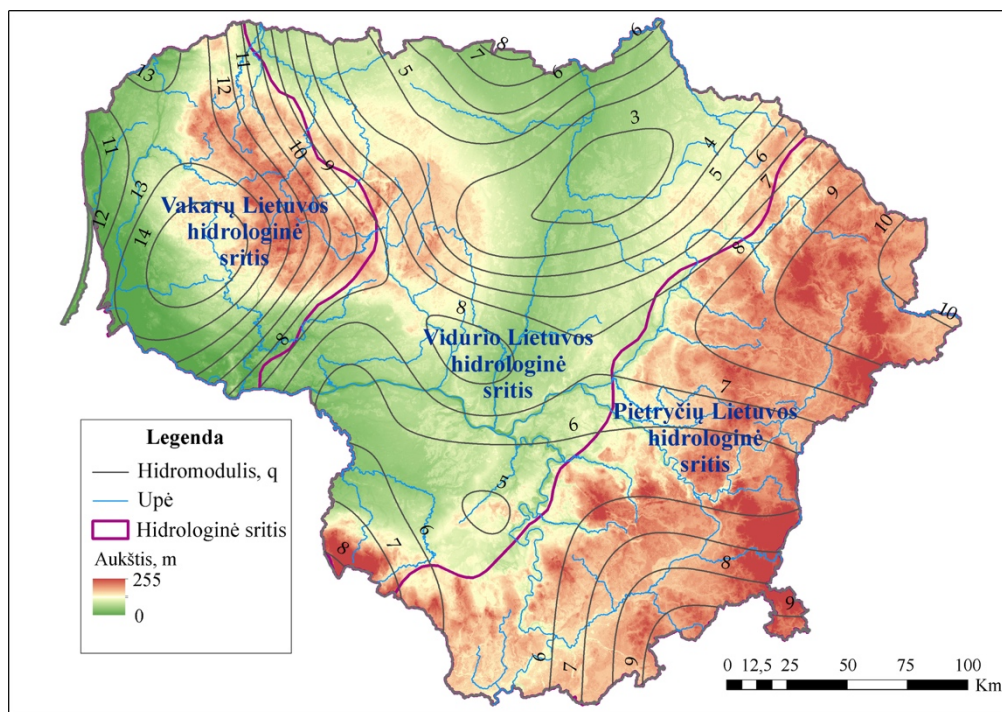
Pietryčių Lietuvos hidrologiniame rajone yra daug ežerų ir miškų, natūraliai reguliuojančių upių nuotėkį. Be to, vyraujantys spygliuočių miškai mažai išgarina vandens. Upės mažiausiai patvinsta pavasarį, nes vanduo susigeria į smėlėtą gruntą. Šios upės yra gausiai maitinamos gruntiniu vandeniu, todėl ir sausą vasarą išlieka vandeningos. Dėl šio hidrologinio rajono fizinių ir geografinių sąlygų bei pasikeisiančio klimato artimoje ateityje Merkyje nuotėkis bus nuo 2,2 % iki 5,8 % mažesnis lyginant su baziniu laikotarpiu. Tačiau tolimoje ateityje nuotėkis keisis ženkliau ir bus nuo 1,2 (RCP2.6) iki 16,9 % (RCP8.5) mažesnis nei baziniu laikotarpiu (4.8 pav., c). Tuo pačiu laikotarpiu Merkyje galimi žymūs sezoniniai nuotėkio pasikeitimai pagal RCP8.5 klimato scenarijų. Žiemos sezono metu nuotėkis padidės iki 6,2%, o pavasario, vasaros ir rudens sumažės atitinkamai – 28,1, 21,7 ir 23,8 %, lyginant su baziniu laikotarpiu.

Tirtų trijų upių (4.8 pav.) nuotėkio kaitos dėsningumai yra būdingi kitoms upėms, esančioms tame pačiame hidrologiniame rajone. Turimais duomenimis mažiausiai upių nuotėkis keisis Vakarų hidrologiniame rajone – tolimoje ateityje pagal RCP 8.5 klimato scenarijų vidutinis upių debitas gali sumažėti iki 10,4 %. Nepalankiausia situacija galima Vidurio Lietuvos hidrologiniame rajone, nes prognozuojamas nuotėkio sumažėjimas gali siekti 31,2 %. Tačiau Pietryčių Lietuvos hidrologiniame rajone galimas nuotėkio sumažėjimas iki 24,6 %. Reikėtų pabrėžti, jog į šį rajoną patenka dvi didelės upės – Nemunas ir Neris, kurių didesnė baseino ploto dalis yra Baltarusijoje. Tad jų nuotėkio kaitą lemia didesnis baseino plotas bei įvairesnės fizinės ir geografinės sąlygos.

4.2.3.2. Upių nuotėkio prognozė netirtuose upių baseinuose

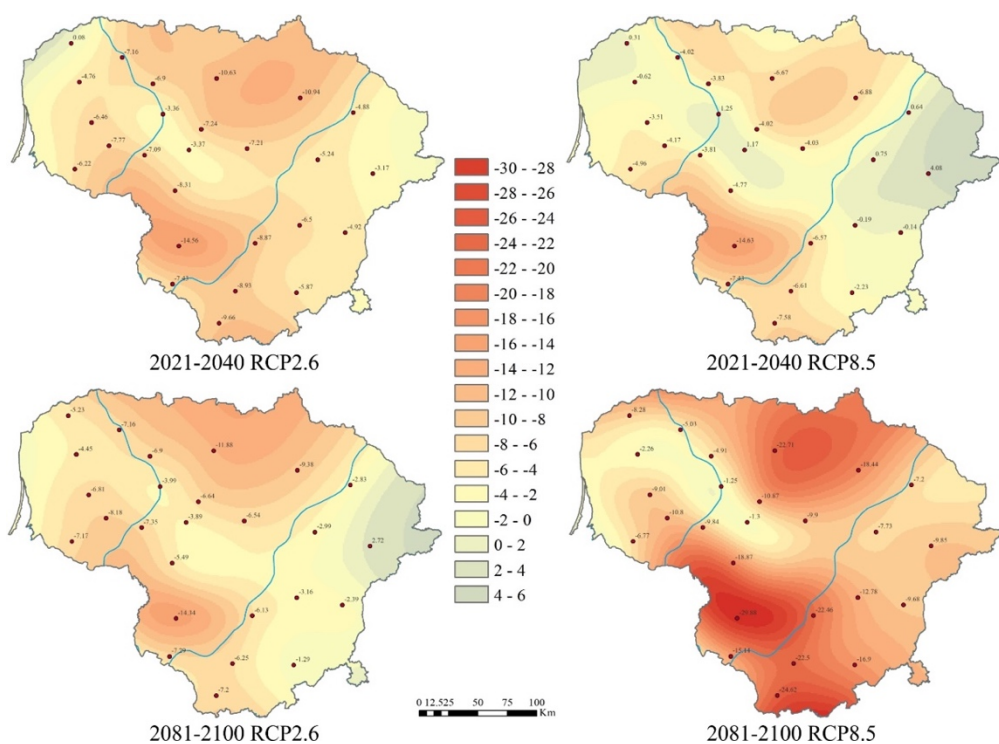
Netirtų upių nuotėkio prognozavimui panaudotas hidromodulio kartografavimo metodas. Vidutinės hidromodulio reikšmės Lietuvos teritorijoje pagal trijų klimato modelių ansamblį baziniu laikotarpiu (1986–2005 m.) yra pateiktos 4.9 paveiksle.

Hidromodulio pasiskirstymas teritorijoje gana įvairus. Lietuvoje jis kinta nuo 3 iki 14 l/s×km² (4.9 pav.). Regioninius skirtumus dar labiau paryškina fizinės ir geografinės teritorijos sąlygos. Vakarų Lietuvos hidrologinėje srityje iškrenta daugiau kritulių, dideli upių nuolydžiai, geresnės sąlygos vandeniui greitai nutekėti, todėl čia q kinta nuo 8 iki 14 l/s×km². Pereinant į Vidurio Lietuvos hidrologinį rajoną q palaipsniui mažėja. Šiame rajone upių nuolydžiai maži, plačiai paplitę vandeniui nelaidūs gruntai, sudarantys palankesnes sąlygas didesniai išgaravimui, todėl šiame rajone q kinta nuo 3 iki 8 l/s×km². Einant į rytus, reljefas aukštėja, didėja teritorijos nuolydžiai, todėl q palaipsniui didėja ir kinta nuo 6 iki 10 l/s×km². Šiame rajone q padidėjimą dar nulemia didesnis nei Vidurio Lietuvos hidrologiniame rajone kritulių kiekis ir gausus požeminis maitinimas. Naudojant hidromodulio žemėlapius, kuriuose q yra pateiktas l/s×km² ir (8) lygtį galime suskaičiuoti Q konkrečioje, mus dominančioje upėje.



4.9 pav. Hidromodulio (q , $l/s \times km^2$) pasiskirstymas Lietuvos teritorijoje pagal trijų klimato modelių ansamblį baziniu laikotarpiu (1986–2005 m.)

Vidutinių metinių hidromodulio projekcijų pokytis (%) nuo bazinio laikotarpio (1986–2005 m.) trijuose hidrologiniuose rajonuose yra pateiktas 4.10 paveiksle. Mažiausi q pokyčiai prognozuojami Vakarų Lietuvos hidrologinėje srityje. Artimoje ateityje, priklausomai nuo taikomo RCP klimato scenarijaus, vidutinis viso rajono q bus nuo 2,2 % iki 4,5 % mažesnis nei baziniu laikotarpiu. Nedideli q pokyčiai tikėtini ir tolimoje ateityje. Priklausomai nuo RCP klimato scenarijaus, hidrologinio rajono q sumažės nuo 5,5 % (RCP2.6) iki 5,9 % (RCP8.5) lyginant su baziniu periodu. Didesni pokyčiai galimi Pietryčių Lietuvos hidrologinėje srityje, kada artimoje ateityje vidutinis rajono q priklausomai nuo RCP klimato scenarijaus sumažės nuo 0,7 % iki 5,5 %, o tolimoje ateityje nuo 1,8 % (pagal RCP2.6) iki 13,3 % (pagal RCP8.5) lyginant su baziniu laikotarpiu. Patys didžiausi pokyčiai prognozuojami Vidurio Lietuvos hidrologinėje srityje. Artimoje ateityje vidutinis rajono q sumažės 5,8 % – 9,1 %, o tolimoje ateityje – 8,7 % (RCP2.6) – 16,6 % (RCP8.5) lyginant su baziniu laikotarpiu. Tame pačiame hidrologiniame rajone esančios upės gali turėti skirtingus hidromodulio q pokyčius, kuriuos lemia ne tik vietinės fizinės ir geografinės sąlygos, kurios yra nevienalytės tam tikruose hidrologiniuose rajonuose, bet ir mikroklimatiniai ypatumai.

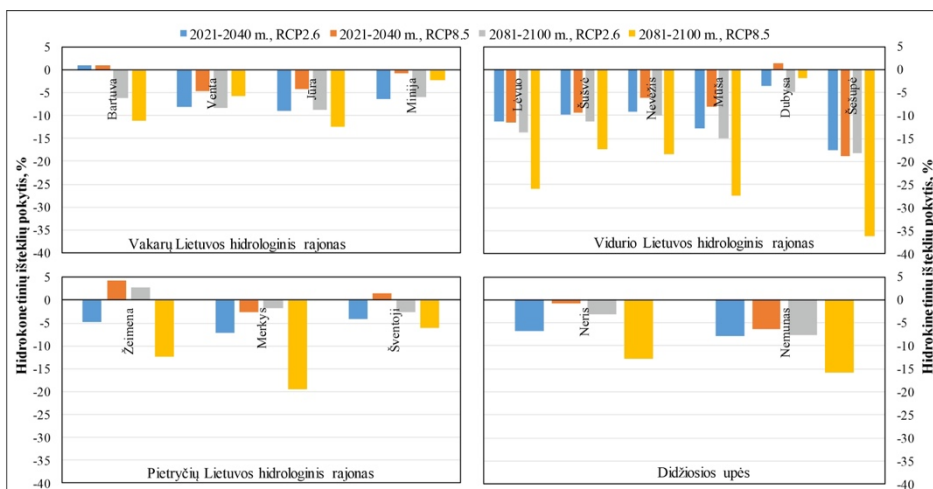


4.10 pav. Lietuvos upių baseinų hidromodulio pokyčiai (Δq , %) XXI a. lyginant su 1986–2005 m.

4.2.4. Upių hidrokinetinės energijos išteklių kaita ateityje

Lietuvos upių hidrokinetinių išteklių vertinimas yra atliktas taikant techninius apribojimus, pagal kuriuos upės vagos gylis turi būti didesnis nei 0,5 m ir tėkmės greitis viršyti 0,4 m/s. Šios dvi minimalios sąlygos turi būti išpildytos tam, kad tiriamų upių ruožuose būtų galima įrengti hidrokinetines turbinas – įrenginius, konvertuojančius upių hidrokinetinę energiją į elektros energiją. Atliekant šį tyrimą buvo įvertinti Lietuvos upių (be didžiųjų upių Nemuno ir Neris) hidrokinetinės energijos ištekliai, kurie baziniu laikotarpiu sudarė 242 GWh/metai (4.11 pav.).

Ateityje Vakarų Lietuvos hidrologiniame rajone (4.11 pav.) upių hidrokinetinės energijos ištekliai sumažės mažiausiai. Artimoje ateityje, lyginant su baziniu laikotarpiu, Bartuvos upėje hidrokinetiniai ištekliai padidės neženkiai tiek pagal RCP2.6, tiek pagal RCP8.5 scenarijus, atitinkamai 1,0 ir 1,1 %. Kitose šios srities upėse tikėtinas išteklių sumažėjimas iki 9 % pagal RCP2.6 scenarijų. Tolimoje ateityje pagal RCP8.5 scenarijų hidrokinetiniai ištekliai sumažės iki 12 %.

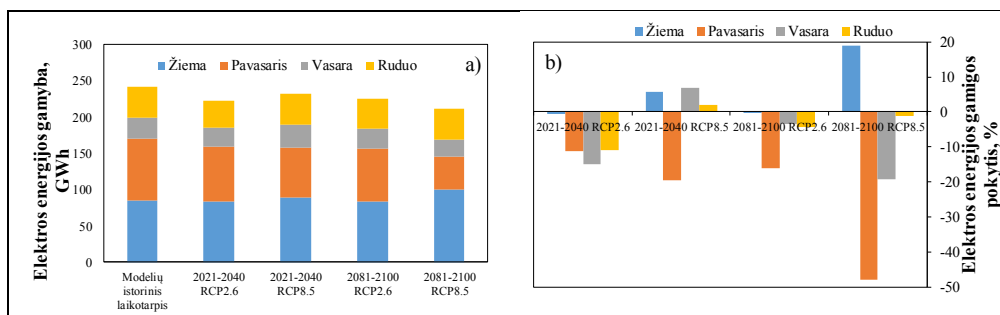


4.11 pav. Kitų Lietuvos upių hidrokinetiniai ištekliai (E_{KT} , GWh) ir jų pokyčių prognozė (%) artimoje bei tolimoje ateityje lyginant su 1986–2005 m.

Vidurio Lietuvos hidrologiniame rajone upių hidrokinetinės energijos ištekliai sumažės daugiausiai. Mažesni hidroenergijos pokyčiai prognozuojami artimiausioje ateityje, kai hidrokinetinė energija pagal RCP8.5 scenarijų sumažės iki 19 %. Tolimoje ateityje labai ženkliai gali sumažėti Lėvens, Mūšos ir Šešupės upių ištekliai – RCP8.5 klimato scenarijaus atveju atitinkamai 25,9 %, 27,4 % bei 36,2 % lyginant su baziniu laikotarpiu.

Artimoje ateityje Pietryčių Lietuvos hidrologiniame rajone nustatyti tiek teigiami (iki 4,3% pagal RCP8.5 scenarijų), tiek ir neigiami (iki 4,5% pagal RCP2.6 scenarijų) hidrokinetinių išteklių projekcijų pokyčiai. Tačiau tolimoje ateityje, RCP8.5 klimato scenarijaus atveju, galimas šios energijos sumažėjimas nuo 6 % Šventojėje, iki 19 % Merkyje, lyginant su baziniu laikotarpiu.

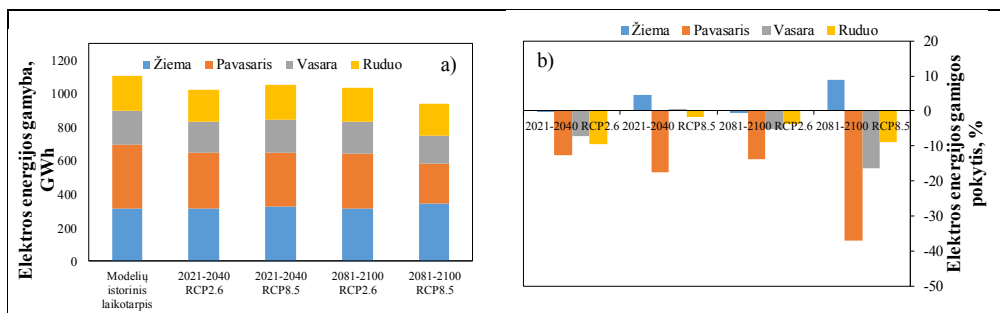
Vertinant sumines Lietuvos upių (be Nemuno ir Neris) hidrokinetinės energijos išteklių projekcijas artimoje ateityje, nustatytas išteklių sumažėjimas 3,8–7,9 %, o tolimoje ateityje – nuo 6,9 % RCP2.6 klimato scenarijaus atveju iki 12,8 % RCP8.5 klimato scenarijaus atveju, palyginus su baziniu laikotarpiu (4.12 pav., a). Prognozuojami ne tik metiniai, bet ir sezoniniai hidrokinetinių išteklių pokyčiai. Artimoje ir tolimoje ateityje pagal abu RCP klimato scenarijus hidrokinetiniai ištekliai sumažės (nuo 11,3 % iki 47,9 %) pavasario sezono metu, tačiau padidės žiemos sezono metu (iki 19,1 %) (4.12 pav., b). Taip pat tikėtinas išteklių sumažėjimas vasaros sezono metu dėl sumažėjusių upių tėkmės greičių ir gylis. Šias hidrokinetinių išteklių kaitos tendencijas lemia upių nuotėkio persiskirstymas tarp sezonų ateityje.



4.12 pav. Lietuvos upių (išskyrus Nemuną ir Nerį) hidrokinetinių išteklių prognozė artimoje ir tolimoje ateityje sezonų metu (a) bei jos pokytis lyginant su 1986–2005 m. (b)

Dvi didžiausios Lietuvos upės – Nemunas ir Neris – turi geras sąlygas hidrokinetinės energijos gamybai dėl didelio tėkmės greičio ir gylio. Jei hidrokinetinės turbinos būtų įrengtos per visą upių ilgį, tai būtų galima pagaminti 1109 GWh/metai. Artimoje ateityje prognozuojamas suminių Nemuno ir Neries upių hidrokinetinių išteklių sumažėjimas nuo 5 iki 7,5 %, priklausomai nuo pasirinkto RCP klimato scenarijaus, o tolimoje ateityje pokyčiai bus dar ženklėsi – nuo 6,6 % (RCP2.6) iki 15,1 % (RCP8.5), palyginti su baziniu laikotarpiu (4.13 pav., a). Analizuojant sezoninę hidrokinetinių išteklių kaitą, nustatytos panašios tendencijos kaip ir mažesnėse upėse (4.13 pav., b).

Kadangi hidroelektrinių, naudojančių upių hidropotencinę – patvankos energiją, plėtra yra apribota dėl aplinkosauginių ribojimų, hidrokinetinių bepatvankinių hidroelektrinių įrengimas ateityje galėtų būti tam alternatyva.

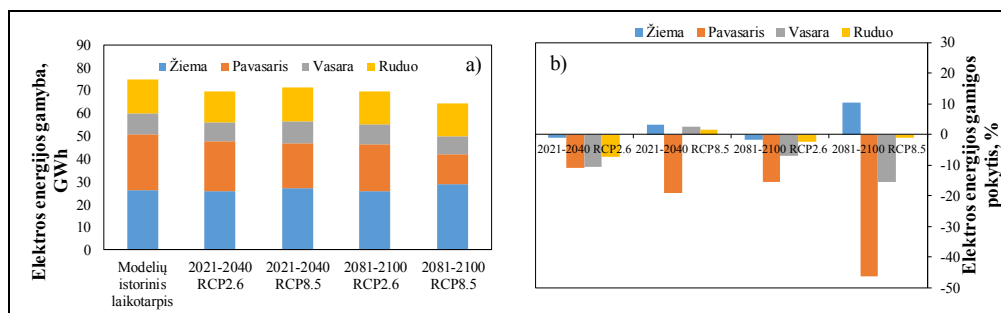


4.13 pav. Nemuno ir Neries hidrokinetinių išteklių prognozė artimoje ir tolimoje ateityje atskirais sezonais (a) bei jos pokytis lyginant su 1986–2005 m. (b)

4.2.5. Upių hidropotencinės energijos išteklių kaita ateityje

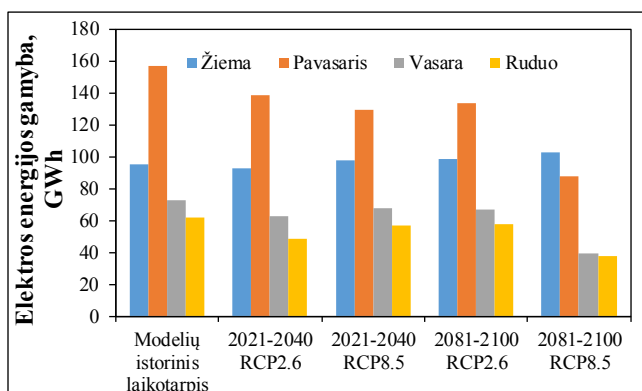
97 mažosios HE ant Lietuvos upių pagamino 75 GWh/metai elektros energijos per bazinį laikotarpį. Prognozuojamas mažųjų hidroelektrinių hidroenergijos gamybos sumažėjimas artimoje ateityje, priklausomai nuo RCP klimato scenarijaus – nuo 4,5 % iki 8,6 % lyginant su baziniu laikotarpiu. Tolimoje ateityje tikėtinas didesnis hidroenergijos sumažėjimas – nuo 7,1 % (RCP2.6) iki 13,7 % (RCP8.5 klimato scenarijus) (4.14 pav, a). Analizuojant energijos gamybą hidroelektrinėse,

svarbu žinoti ne tik kaip keisis metinė gamyba, bet ir kaip ji pasiskirstys kiekvieno sezono metu ateityje. Didžiausi energijos gamybos pokyčiai prognozuojami pavasario ir vasaros sezonais (4.14 pav., b). Pagal taikomus scenarijus artimoje ateityje pavasario sezono metu energijos gamyba sumažės iki 19,3 %, o vasaros – iki 10,8 %. Tolimoje ateityje, lyginant su baziniu laikotarpiu, didžiausi pokyčiai galimi pagal RCP8.5 klimato scenarijų, kai žiemos sezono metu energijos gamyba padidės 10,4 %, pavasario ir vasaros sumažės atitinkamai 46,4 % ir 15,4 %, o rudens sezono metu keisis nedaug.



4.14 pav. Energijos gamybos mažosiose Lietuvos HE prognozė artimoje ir tolimoje ateityje kiekvieną sezoną (a) bei jos pokytis lyginant su 1986–2005 m. (b)

Didžiausia Lietuvoje – Kauno HE. Ji yra reikšminga Lietuvos energetinei sistemai ne tiek pagaminamos elektros energijos kiekiu, kiek teikiamomis sisteminėmis paslaugomis ir savo indėliu užtikrinant sistemos stabilumą. Tai yra vienintelė elektrinė galinti atkurti elektros energetikos sistemą avarijos atveju (angl. *black start*). Kauno HE baziniu laikotarpiu pagamino 386 GWh/metai elektros energijos. Prognozuojama, jog Kauno HE hidroenergijos gamyba artimoje ateityje sumažės nuo 6,9 % iki – 11,4 % (4.15 pav.).



4.15 pav. Kauno HE Energijos gamybos prognozė artimoje ir tolimoje ateityje

Tolimoje ateityje tikėtinas hidroenergijos gamybos sumažėjimo nuo 7,4 % RCP2.6 scenarijaus atveju, iki 30,6 % RCP8.5 klimato scenarijaus atveju. Šis elektros gamybos sumažėjimas 1,6 karto viršija visų mažų hidroelektrinių metinę elektros

gamybą ir yra reikšmingas Lietuvos hidroenergijos gamybai. Kaip matyti iš 4.15 paveikslą, palaipsniui mažės elektros energijos gamyba pavasario metu (iki 44 %) ir neženkliai didės žiemos sezono metu (8 %). Tokius pokyčius lems pakitęs Nemuno nuotėkis. Galima daryti prielaidą, kad Nemuno nuotėkis ženkliai sumažės dėl pakilusios oro temperatūros ir dėl to padidėjusio garavimo. Dėl sumažėjusio nuotėkio kris hidroenergijos gamyba.

4.2.6. Upių nuotėkio bei hidroenergetinių išteklių prognozių apibendrinimas

Klimato kaitos poveikis upių hidrologiniam režimui yra gerai ištirtas daugelio mokslininkų. Dėl pasikeitusios oro temperatūros ir kritulių kiekio Baltijos jūros regione yra fiksuojamas metinio nuotėkio sumažėjimas bei persiskirstymas tarp sezonų – didėjimas žiemą ir mažėjimas pavasarį (Kriaučiūnienė ir kt., 2008; Jakimavičius ir kt., 2018b; Aktinas ir kt., 2020). Tačiau skirtinguose Žemės regionuose nuotėkio prognozės gali skirtis dėl gamtinių sąlygų skirtumų (Štefunková ir kt., 2013; Devkota ir Gyawali, 2015; Villarini, 2016). Šioje disertacijoje nustatyta, kad net ir skirtinguose Lietuvos hidrologiniuose rajonuose upių nuotėkio prognozės ganėtinai skiriasi. Reikšmingiausi nuotėkio pokyčiai prognozuojami pagal RCP8.5 scenarijų XXI amžiaus pabaigoje. Vakarų Lietuvos hidrologinio rajono upėse nuotėkis sumažės nuo 4,5 (RCP2.6) iki 10,4 % (RCP8.5), vidurio Lietuvos nuo 4 (RCP2.6) iki 31,2 % (RCP8.5) ir pietryčių Lietuvos nuo 1,3 (RCP2.6) iki 24,6 % (RCP8.5), palyginus su 1986–2005 m. laikotarpiu. Pasak Turnerio ir kt. (2017), iki XXI a. pabaigos, priklausomai nuo taikomo klimato modelio, prognozuojamas pasaulinės hidroenergijos gamybos pokytis pagal RCP8.5 svyruos nuo -8 % iki +5 %. Tačiau regioniniai skirtumai bus dar didesni. Štai Koestler ir kt. (2019) nustatė, kad bendra hidroenergijos gamyba Norvegijoje iki amžiaus pabaigos dėl padidėjusio upių nuotėkio pagal RCP8.5 scenarijų išaugs 8 %. Kiek kitokius rezultatus gavo Koch ir kt. (2015), pagal kuriuos Vokietijoje hidroenergijos gamyba XXI a. viduryje pagal RCP8.5 scenarijų sumažės nuo 10 iki 30 % priklausomai nuo regiono.

Apibendrinus šio tyrimo bei kitų mokslininkų gautus rezultatus galima teigti, kad prognozių skirtumus tarp regionų ir juose lemia skirtingos gamtinės sąlygos bei upių reakcijos į klimato kaitą pobūdis.

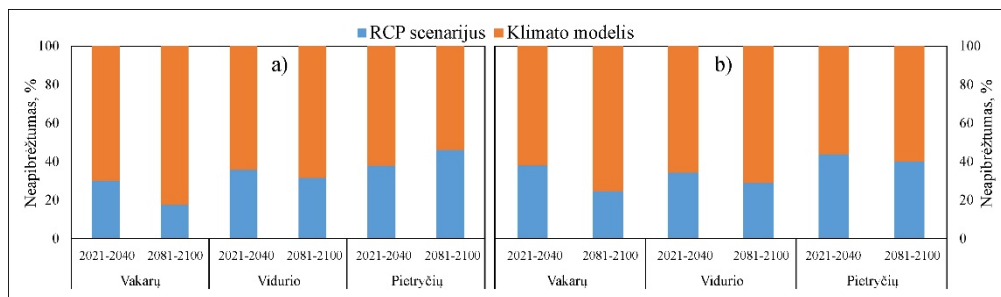
Darbo pradžioje buvo iškelta hipotezė: ateityje dėl klimato kaitos įvyksiantys Lietuvos upių nuotėkio pokyčiai nulems hidroenergetinių išteklių sumažėjimą. Atlikus šį tyrimą hipotezė pasitvirtino, nes nustatyta, kad upių nuotėkis artimoje ateityje sumažės iki 15 %, o tolimoje ateityje iki 31 % lyginant su baziniu laikotarpiu. Dėl nuotėkio sumažėjimo sumažės ir kinetiniai bei potenciniai upių ištekliai: artimoje ateityje atitinkamai iki 19 % ir 11 %, o tolimoje ateityje iki 36 % bei 30 %, lyginant su baziniu laikotarpiu.

Tyrimo rezultatai gali būti naudojami planuojant hidroenergetinių išteklių panaudojimą ateityje. Nustatyta, kad Lietuvos upių kinetiniai ištekliai, įvertinus techninius apribojimus, sudaro 1350 GWh elektros energijos per metus. Tiesa, nebuvo įvertinti aplinkosauginiai bei ekonominiai jų panaudojimo aspektai, tačiau jų mastas verčia svarstyti apie tolesnes studijas, skirtas jų praktiniam pritaikomumui elektros energijos gamyboje.

Atlikus upių potencinių išteklių prognozavimą, nustatyta, kad dėl klimato kaitos artimoje ateityje mažų HE elektros energijos gamyba sumažės iki 7%, o Kauno HE iki 11%. Šie neigiami pokyčiai bus juntami visais sezonais išskyrus žiemą, kai tikėtinas iki 3% elektros energijos gamybos padidėjimas. Todėl šie rezultatai gali būti naudingi HE savininkams, kurie galės įvertinti gamybos sąlygų pokyčius ir artimoje perspektyvoje atlikti HE rekonstrukcijas, pritaikyti jų darbą esant sumažėjusio nuotėkio sąlygoms, kartu užtikrinant tvarų vandens išteklių panaudojimą.

4.2.7. Upių hidroenergetinių išteklių prognozių neapibrėžtumai

Remiantis upių nuotėkio prognozėmis pagal tris klimato modelius ir du RCP klimato scenarijus buvo apskaičiuoti hidrokinetiniai ir hidropotenciniai upių ištekliai. Tada nustatytas klimato modelių ir RCP klimato scenarijų poveikis hidroišteklių prognozėms skirtinguose hidrologiniuose rajonuose. Analizė parodė, kad Vakarų Lietuvos hidrologinio rajono upių hidrokinetinių išteklių prognozių neapibrėžtumą daugiausia lėmė klimato modelio pasirinkimas (70 % neapibrėžtumo artimoje ateityje ir 82 % tolimoje ateityje) (4.16 pav., a). Tuo tarpu mažiausia rezultatų sklaida buvo RCP klimato scenarijų atveju (30 % artimoje ateityje ir 18 % tolimoje ateityje). Vidurio Lietuvoje klimato modelių įtaka sumažėjo iki 64 % artimoje ateityje ir 68 % tolimoje ateityje. Priešingai, RCP klimato scenarijų įtaka buvo 36 % artimoje ateityje ir 32 % tolimoje ateityje. Pietryčių Lietuvos hidrologiniame regione klimato modelių įtaka artimoje ateityje sudarė 62 %, o tolimoje ateityje – 54 %, RCP klimato scenarijaus įtaka atitinkamai 38 % ir 46 %.



4.16 pav. Hidrokinetinės (a) ir hidropotencinės (b) energijos išteklių prognozių neapibrėžtumai artimoje ir tolimoje ateityje hidrologiniuose rajonuose

Nustatyta, jog Vakarų Lietuvos hidrologinio rajono hidropotencinių išteklių prognozės neapibrėžtumas labai priklausė nuo klimato modelių ir svyravo nuo 62 % artimoje ateityje iki 75 % tolimoje ateityje (4.16 pav., b). RCP klimato scenarijų įtaka neapibrėžtumui buvo beveik dvigubai mažesnė nei klimato modelių – 38 % artimoje ateityje ir dar labiau sumažėjo iki 25 % tolimoje ateityje (4.16 pav., b). Vidurio Lietuvos hidrologiniame rajone klimato modelių įtaka hidropotencinių išteklių prognozėms artimoje ateityje sudarė 66 %, o tolimoje ateityje – 71 %. Kitą neapibrėžtumo dalį lėmė scenarijai. Mažiausia klimato modelių įtaka buvo Pietryčių Lietuvos hidrologiniame rajone – 56 % artimoje ateityje ir 60 % tolimoje ateityje.

Scenarijų poveikis buvo didžiausias iš visų hidrologinių rajonų – atitinkamai 44 % ir 40 %. Nustatyta, kad klimato modelių įtaka hidrokinetinių ir hidropotencinių

išteklių prognozių neapibrėžtumui didžiausia Vakarų Lietuvos hidrologiniame rajone, mažesnė Vidurio Lietuvos hidrologiniame rajone, o mažiausia – Pietryčių Lietuvos hidrologiniame rajone. Šių tendencijų priežastis – skirtingos nuotėkio susidarymo sąlygos trijuose hidrologiniuose rajonuose. Vakarų Lietuvos upėse nuotėkio formavimuisi didelę įtaką turi lietus, kuris sudaro iki 62 % nuotėkio, o požeminio vandens maitinimas yra nereikšmingas. Pietryčių hidrologiniame rajone lietaus įtaka nuotėkio formavimuisi mažėja, o požeminio vandens maitinimo indėlis padidėja iki 55 %. Todėl Vakarų Lietuvos hidrologinio rajono upių hidrokinetinių ir hidropotencinių išteklių prognozė, palyginti su kitais dviem hidrologiniais rajonais, yra jautresnė klimato modelių pateikiamiems krituliams.

4.3. Mažųjų hidroelektrinių poveikis upių hidrologiniam režimui

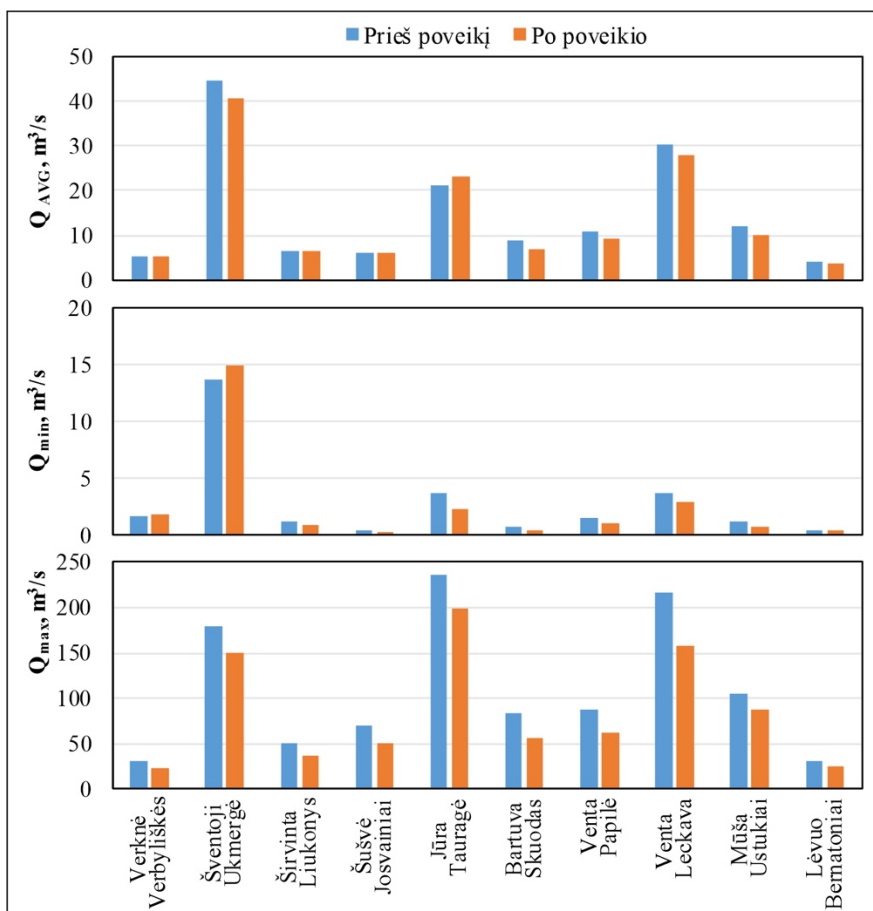
4.3.1. Mažųjų hidroelektrinių parinkimas IHA analizei

Hidrologinio režimo pokyčiams žemiau elektrinių užtvankų analizuoti buvo atrinkta dešimt mažųjų HE (Skuodo HE, Balskų HE, Akmenių HE, Dvariukų HE, Širvintų HE, Angirių HE, Kavarsko HE, Rudikių malūno HE, Kuodžių HE, Aukštadvario HE), kurios pastatytos ant 9 upių. Atrinktos HE yra išsidėsčiusios visoje Lietuvos teritorijoje. Šiam tyrimui buvo parinktos tik tos hidroelektrinės, kurios yra pastatytos ant hidrologiškai ištirtų upių ir žemiau kurių yra įsteigtos vis dar veikiančios vandens matavimo stotys. Duomenų eilučių ilgis pasirinktas atsižvelgiant į hidroelektrinės statybos metus. Pirmiausia buvo pasirinktas laikotarpis po HE pastatymo, kuris prasidėjo hidroelektrinės statybos metais ir baigėsi 2018 m. (t. y. naujausi turimi stebėjimų duomenys). Tada buvo pasirinktas tokios pat trukmės laikotarpis iki HE statybos ir naudotas kaip laikotarpis iki poveikio. Nagrinėtos mažosios HE buvo įrengtos 1999–2005 m. Taigi analizuoti laikotarpiai buvo nuo 14 iki 20 metų (vidutiniškai 17 metų).

4.3.2. IHA analizės rezultatai

Iš pradžių, prieš atliekant išsamų hidrologinio režimo kintamųjų tyrimą IHA metodu, t-testu buvo patikrintas vidutinių, didžiausių ir mažiausių debitų prieš ir po poveikio laikotarpiais (4.17 pav.) statistinis reikšmingumas ($p < 0,05$).

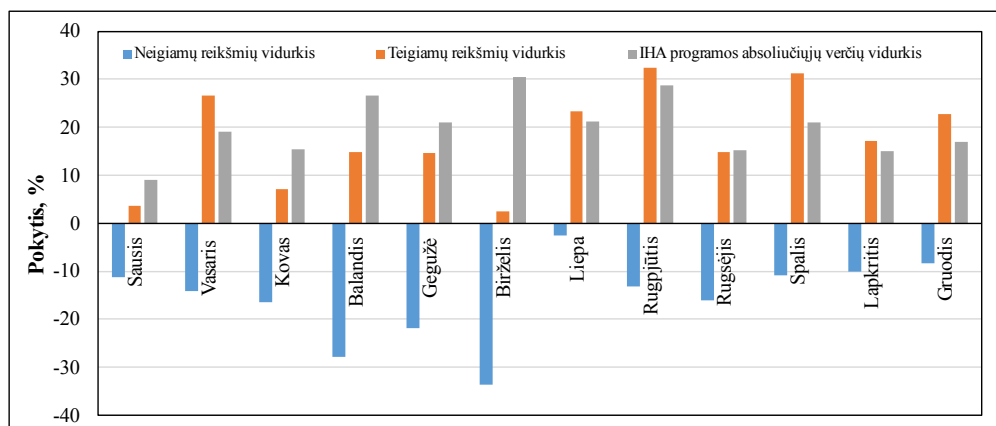
Statistiškai reikšmingų vidutinių nuotėkių pokyčių nenustatyta. Tai patvirtina, kad tirtuose mažųjų HE tvenkiniuose daugiausia reguliuojami paros nuotėkiai ir jie neturi didelės įtakos vidutiniams metiniams nuotėkiams. Tuo tarpu ekstremalių (mažiausių ir didžiausių) debitų kai kuriose upėse žemiau užtvankų t-testo rezultatai parodė reikšmingus pokyčius, rodančius esminius užtvankų sukeltus pokyčius. Didžiausi debitai reikšmingai pakito penkiuose tirtuose upių ruožuose, o mažiausi – keturiuose ruožuose.



4.17 pav. Vandens matavimo stočių charakteristikos prieš poveikį ir po jo

4.3.2.1. Mėnesio debito režimo kaita

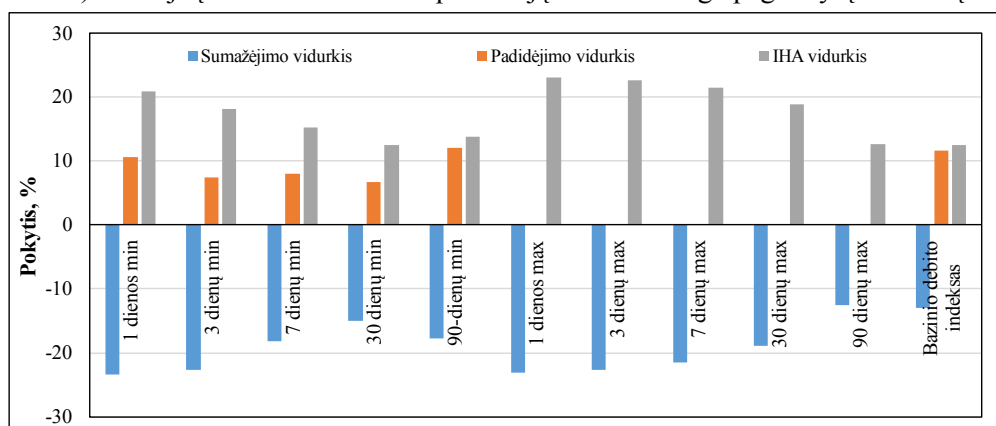
Pirmoji rezultatų, gautų naudojant IHA programą, grupė – nuokrypiai nuo kiekvieno mėnesio debito vidutinių verčių. Tiriamose upėse dėl HE veiklos atsirado skirtingo dydžio neigiamų ir teigiamų ženklų pokyčių. Tik keturiuose VMS visi pokyčiai tarp mėnesio vidurkių po HE ir prieš ją buvo mažesni nei 33 %, t. y. apskaičiuota, kad pokyčiai buvo nedideli arba jų iš viso nebuvo. Likusiose stotyse dideli, didesni nei 33 % nuokrypiai užfiksuoti mažiausiai du mėnesius arba daugiausiai 7 mėnesius per metus. Didžiausias vidutinis sumažėjimas (-33,6 %) nustatytas birželio mėnesio debitui, o didžiausias vidutinis padidėjimas – rugpjūčio mėnesio debitui (32,5 %) (4.18 pav.). Vidutiniškai (atsižvelgiant į absoliutines pokyčių vertes) mažiausi pokyčiai įvyko sausio mėnesį, o didžiausi – birželio mėnesį. Apskritai daugiau neigiamų analizuojamų parametrų reikšmių yra lentelės viršuje (sausio–birželio mėn.), o daugiau teigiamų nuokrypių reikšmių – lentelės apačioje (liepos–gruodžio mėn.). Didžiausias poveikis mėnesio mastu daugiausia pasireiškė balandžio–rugsėjo mėn.



4.18 pav. Vidutinių mėnesio debitų pokytis (%) (IHA parametų 1 grupė)

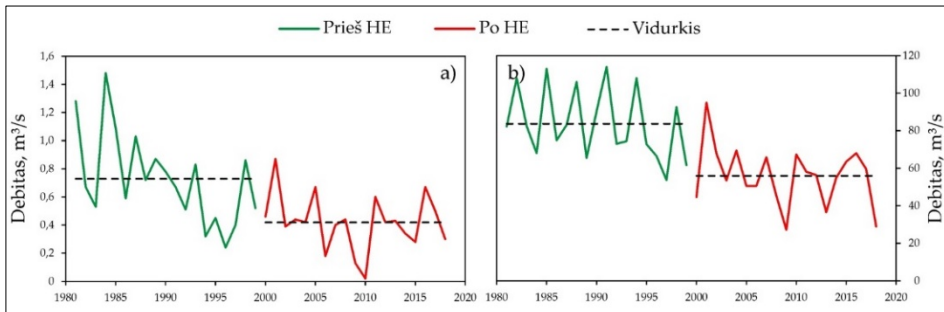
4.3.2.2. Kasmetinių ekstremalių debito sąlygų dydis ir trukmė

Tirtų VMS duomenys parodė, kad metiniai ekstremalūs mažiausi debitai labai kinta – vidutinis pokytis siekė 17,4 % (absoliučiosios vertės). Tačiau apibendrinti šių parametų tendencijas yra sudėtinga. Kai kuriose paveiktose upėse jie gerokai sumažėjo, o kitose jų reikšmės šiek tiek padidėjo arba jų tendencijos buvo nevienareikšmės. Dauguma įvertintų nuokrypių turėjo neigiamą tendenciją. Mažiausių debitų neigiamų nuokrypių vidurkis buvo – 19,4 %, o teigiamų pokyčių – 9 % (4.19 pav.). Labiausiai pakito 1 dienos minimalus debitas – vidutiniškai 20,9 %, ir daugeliu atvejų tai buvo neigiami nuokrypiai. Analizė atskleidė, kad priešingai – visose tirtose upėse skirtingos trukmės didžiausi debitai po poveikio sumažėjo. Labiausiai pasikeitė 1, 3 ir 7 dienų maksimalūs debitai. Šie parametrai vidutiniškai sumažėjo daugiau kaip 20 %. Apskritai trumpesnės trukmės ekstremalūs reiškiniai buvo labiau pakitę. Bazinio debito rodiklio (t. y. 7 dienų mažiausio ir vidutinio metų debito) reakcija į hidroelektrinės eksploataciją buvo skirtinga pagal dydį ir ženklą.



4.19 pav. Kasmetinių ekstremalių debitų dydžio ir trukmės pokytis (%) (2 IHA parametų grupė)

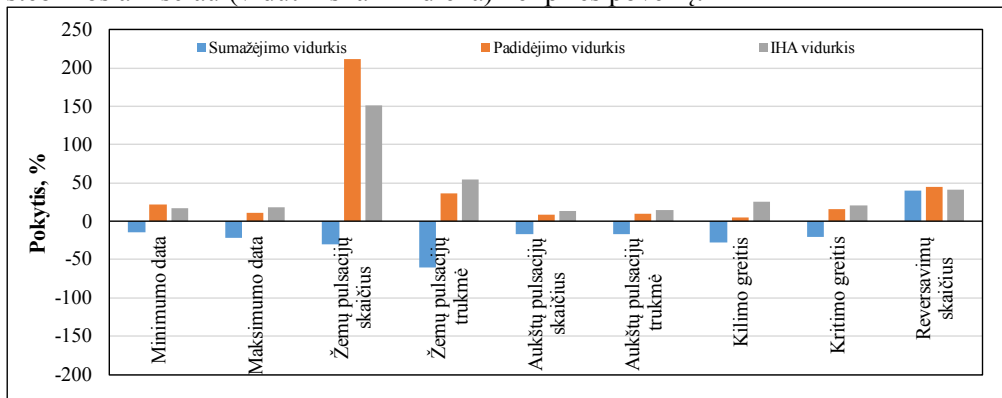
Akivaizdu, kad Bartuvos upės ekstremalioms debito sąlygoms didžiausią poveikį turėjo HE veikla (4.20 pav., a ir b). Šioje upėje visi ekstremalias debito sąlygas rodantys parametrai vidutiniškai sumažėjo 26,5 %, o kai kuriais atvejais net -42,5 % (1 paros minimumas) arba -37 % (3 parų minimumas). Žymūs pokyčiai (ypač ekstremalių minimalių debitų atveju) taip pat užfiksuoti Jūros–Tauragės, Mūšos–Ustukių ir Ventos–Papilės VMS. Šventosios ir Verknės upių atveju visi ekstremalūs minimalūs debitai šiek tiek padidėjo.



4.20 pav. Pokyčiai (m^3/s) ekstremaliomis debito sąlygomis: 1 paros mažiausias debitas (a) ir 1 paros didžiausias debitas (b), užfiksuoti Bartuvos upėje žemiau Skuodo HE

4.3.2.3. Ekstremalių metinių debitų susidarymo laikas

Po poveikio minimalaus 1 dienos debito data pasislinko nuo -25 iki 43 dienų (vidutiniškai 17 dienų), o maksimalaus debito – nuo -67 iki 22 dienų (vidutiniškai 19 dienų) (4.21 pav.). Mažiausio debito laikas buvo ankstesnis šešiose VMS, o penkiose VMS vėlesnis. Dažniau (septyniais atvejais iš 10) didžiausio debito reikšmės buvo stebimos anksčiau (vidutiniškai 21 diena) nei prieš poveikį.

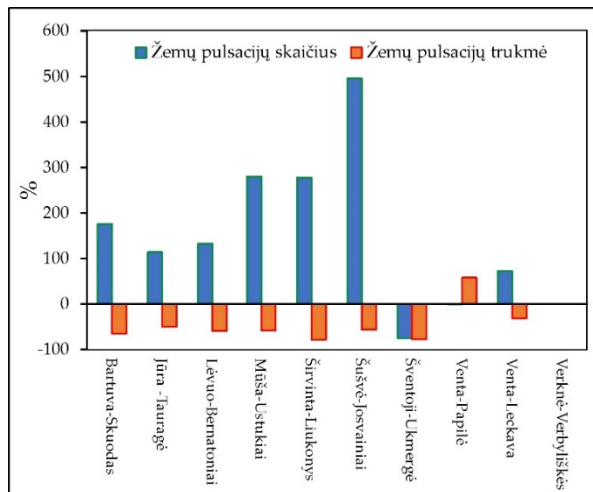


4.21 pav. Kasmetinių ekstremalių debitų laiko vidurkių pokytis (dienomis) (3 IHA parametų grupė), didelių ir mažų pulsacijų dažnio ir trukmės vidurkių pokytis (%) (4 IHA parametų grupė) bei hidrologinių pokyčių greitis ir dažnis (5 IHA parametų grupė)

Dėl reguliavimo didžiausias vidutinio ekstremalių debitų laiko nuokrypis užfiksuotas Šušvės-Josvainių VMS, kur 1 dienos minimalus debitas vidutiniškai vėlavo 43 dienomis, o 1 dienos maksimalus debitas vidutiniškai buvo 66 dienomis (atitinka dviejų mėnesių trukmę) anksčiau. Nežymūs pokyčiai šioje parametų grupėje pastebėti tik Ventos-Leckavos ir Verknės-Verbyliškių VMS. Pastebėti pokyčiai buvo nedideli: mažiausio debito data pasislinko 9 %, o didžiausio – 10 % (absoliučiais dydžiais). Tikėtina, kad metinių ekstremalių debitų laikas yra gana atsitiktinis kintamasis, priklausantis nuo žmogaus (HE valdytojo ar savininko) poreikio tam tikru metu gaminti energiją, o ne nuo pačios HE veikimo.

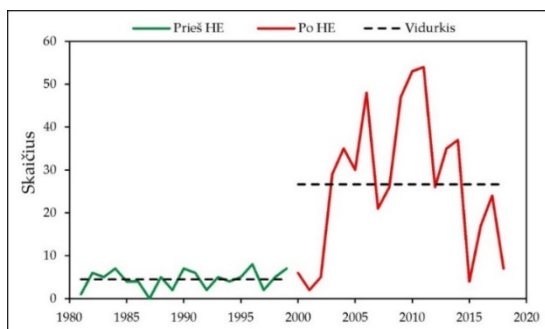
4.3.2.4. Aukštų ir žemų pulsacijų dažnis ir trukmė

4 IHA parametų grupė buvo ypač jautri HE sukeltiems nuotėkio režimo pokyčiams. Šiame tyrime didelėmis ir mažomis pulsacijomis buvo laikomi laikotarpiai, kai paros debitai buvo didesni arba mažesni už vidutinę vertę prieš poveikį plus arba minus 1,0 standartinio nuokrypio. Ypač daug pasikeitė mažų pulsacijų skaičius po poveikio (4.22 pav.).



4.22 pav. Žemų pulsacijų skaičiaus ir trukmės pokyčiai žemiau HE

Vidutiniškai jis nukrypo beveik 151 % (vidutinis padidėjimas siekė 211 %), tam tikrose VMS gautos reikšmės buvo daug didesnės: Šušvė-Josvainiai – 495 %, Mūša-Ustukai ir Širvinta-Liukonys – daugiau kaip 270 %. Šušvėje iki poveikio žemų pulsacijų skaičius svyravo nuo 1 iki 8 kartų per metus, o po poveikio šis parametras tam tikrais metais pasiekė net 53 ar 54 kartais didesnes reikšmes (4.23 pav.).



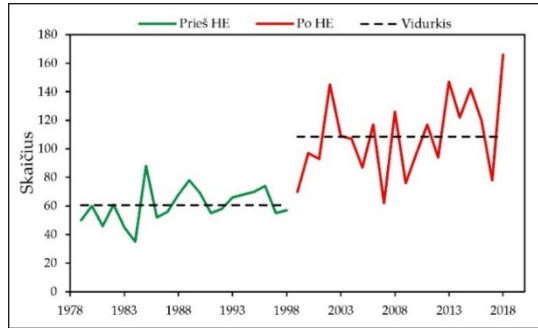
4.23 pav. Žemų pulsacijų skaičius Šušvės-Josvainių VMS prieš ir po Angirių hidroelektrinės pastatymo

Tai didžiausias šiame tyrime įvertintas IHA parametro pokytis. Žemų pulsacijų trukmė buvo antras pagal dydį patirtų pokyčių parametras šioje grupėje ir tarp visų IHA parametrų. Nors ji padidėjo dvejose VMS, kitose stotyse šis parametras pastebimai sumažėjo – vidutiniškai -60 % (4.22 pav.). Aukštų pulsacijų dažnis ir trukmė kito gerokai mažiau (tačiau kai kuriais atvejais vis tiek daugiau nei 20 %); jų požymiai buvo nevienareikšmiai (4.21 pav.), o tai rodo, kad nustatytą ribą viršijantys debitai neturėjo nuoseklių dėšningumų. Penkiose stotyse vidutinis 4 grupės parametrų pokytis buvo didesnis nei 50 %. Šušvės-Josvainių VMS užfiksuotas vidutiniškai 150 % nuokrypis. Likusiose keturiose Širvintos-Liukonių, Mūšos-Ustukių, Bartuvos-Skuodo ir Lėvens-Bernatonių VMS vidutiniai pokyčiai buvo atitinkamai 90,1 %, 89,7 %, 70,2 % ir 54,1 %.

4.3.2.5. Hidrologinių pokyčių greitis ir dažnis

Atliekant IHA analizę, kilimo greičio rodiklis yra visų teigiamų skirtumų tarp iš eilės einančių paros verčių vidurkis; o kritimo rodiklis yra visų neigiamų skirtumų tarp iš eilės einančių paros verčių vidurkis. Reversavimai apskaičiuojami padalijus hidrologinį įrašą į „kilimo“ ir „kritimo“ laikotarpius, kurie atitinka laikotarpius, kai paros debitų pokyčiai yra atitinkamai teigiami arba neigiami. Kilimo ir kritimo rodikliai visose stotyse turėjo tendenciją mažėti vidutiniškai -27 % (4.21 pav.), išskyrus Šušvės-Josvainių stotį, kurioje visi užfiksuoti šios grupės parametrai padidėjo. Didžiausias stebėtas pokytis tarp kilimo rodiklių prieš ir po poveikio siekė -39,7 % (Bartuvoje-Skuode), mažiausias – 5,4 % (Šušvėje-Josvainiuose). Kritimo greičio nuokrypiai svyravo nuo -31,8 % (ties Verkne-Verbyliškėmis) iki 15,3 % (ties Šušve-Josvainiais). Devyniose stotyse reversavimų skaičius padidėjo vidutiniškai 45 %. Reversavimų skaičius buvo vienas iš labiausiai paveiktų IHA parametrų tirtose upėse. Lėvenyje-Bernatoniuose šis kintamasis buvo dirbtinai padidintas 79 % (4.24 pav.).

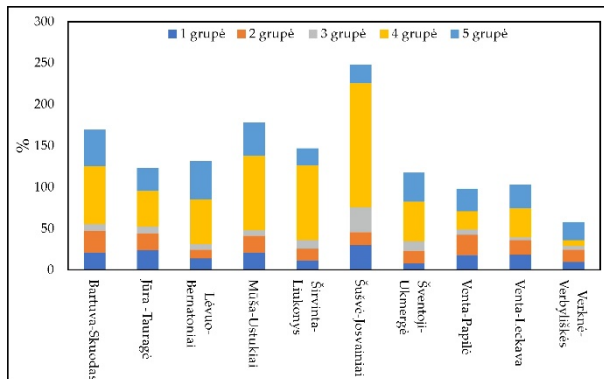
Lėvens-Bernatonių ir Bartuvos-Skuodo stotyse vidutiniškai pasireiškė didžiausi teigiamų ir neigiamų skirtumų tarp iš eilės einančių paros vidurkių ir pasikeitimų / reversų skaičiaus pokyčiai, atitinkamai 45,5 % ir 43,3 %. Angirių hidroelektrinės eksploatavimas sukėlė visų šios grupės parametrų padidėjimą Šušvės upėje.



4.24 pav. Reversavimų skaičius Lėvens-Bernatonių VMS prieš ir po Akmenių HE statybos

4.3.2.6. Bendri parametų grupės pokyčiai

IHA parametų verčių nuokrypių rezultatai pateikti 4.25 paveiksle. Iš jų matyti, kad iš tirtų parametų grupių dramatiškiausi pokyčiai įvyko didelių ir mažų pulsacijų dažnumo ir trukmės srityje, t. y. 4 grupėje. Tuo tarpu IHA parametrai, nurodantys ekstremalių debitų laiką, buvo mažiausiai paveikti hidrologinio kintamojo. Analizė atskleidė labiausiai paveiktas upes žemiau hidroelektrinių: Šušvę, Mūšą ir Bartuvą, kuriose parametų grupių vidurkis viršijo 33 %, o tai rodo vidutinius pokyčius. Gali būti, jog reikšmingiausius IHA parametų pokyčius žemiau Angirių hidroelektrinės Šušvės upėje lemia hidroelektrinėje įrengtos per daug galingos turbinos. Įrengto elektrinės debito ir daugiamečio upės debito santykis (Q_{inst}/Q_{ma}) yra didžiausias tarp tirtų hidroelektrinių – 1,87 (4. pav.). Be to, šioje hidroelektrinėje įrengtos turbinos nėra reguliuojamos ir, išleisdamos didelį kiekį vandens, sukelia hidropikingo reiškinius žemiau esančiame upės ruože.



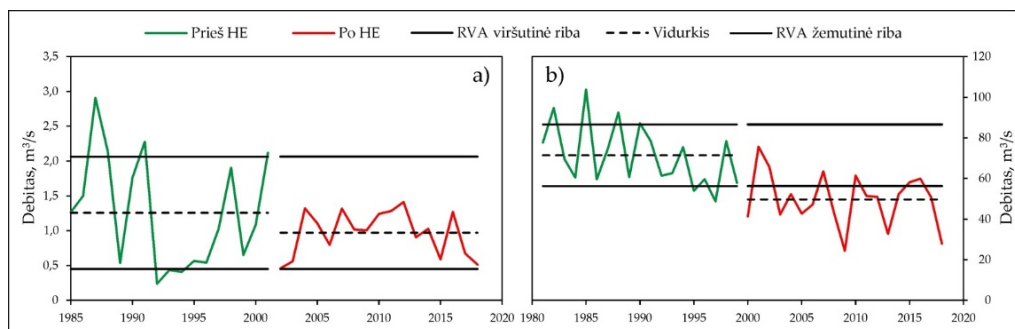
4.25 pav. Vidutiniai IHA parametų grupių pokyčiai tirtose VMS

4.3.2.7. Kintamumo intervalo metodo taikymas IHA rezultatų analizei

Antrajame tyrimo etape, taikant kintamumo intervalo metodą (angl. *range of variability approach RVA*) ir siekiant apskaičiuoti IHA parametų kitimą po HE pastatymo, buvo vertinama, kiek buvo nukrypta nuo nustatyto RVA tikslinio intervalo (± 1

standartinis nuokrypis nuo vidurkio). Po HE pastatymo apskaičiuotas mėnesio debitų (1-oji IHA parametų grupė) metinio svyravimo laipsnis apibrėžtame intervale dažniausiai buvo nedidelis, t. y. dažniausiai atitiko numatomą dažnį. Nustatyti tik nedideli (0–33 %) vasario mėnesio debitų pokyčiai. Sausio, balandžio, liepos, rugpjūčio ir lapkričio mėnesiais įvertinti keli vidutinio dažnio (33–67 %) pakitimų atvejai. Ryškiausi pokyčiai po HE pastatymo mėnesio debituose pastebėti Jūros-Tauragės VMS: 21 % (nuo -36 % iki 36 %) atitinkamai absoliučiujų verčių. Likusiose VMS mėnesio debitas svyravo nuo 12,5 % iki 18,5 %.

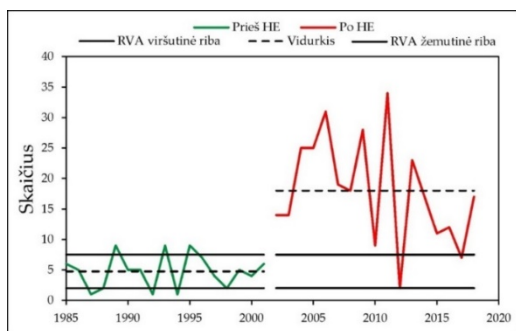
Žymiai didesniu laipsniu pakito ekstremalūs debitai (2-oji IHA parametų grupė). Minimalių debitų dažnumo kaita pasiekdavo vidutinę amplitudę dažniau nei maksimalių debitų trukmės atveju. Didžiausia kaita nustatyta 7 parų trukmės ekstremalių maksimalių debitų grupėje (nuo -56 % iki 44 %) ir 7 parų trukmės ekstremalių minimalių debitų grupėje (nuo -55 % iki 42 %). Mūšos-Ustukių VMS duomenimis, didžiausias teigiamas vidutinis kitimas nustatytas ekstremalių minimalių debitų grupėje (išskyrus 7 parų minimalaus debito, kurio diapazonas kito 70 % didesniu kitimo laipsniu (4.26 pav.). Tuo tarpu Bartuvos-Skuodo VMS buvo nustatyti didžiausi neigiami ekstremalių maksimalių debitų vidutinio diapazono pokyčiai (pvz. 3 parų maksimumo atveju -54 % (4.26b pav.).



4.26 pav. 7 parų minimalaus debito (a) Mūšos-Ustukių VMS ir 3 parų maksimalaus debito (b) Bartuvos-Skuodo VMS hidrologiniai pokyčiai

Daugeliu atvejų 3 parametų grupės, susijusios su 1 dienos mažiausio ir 1 dienos didžiausio debito laiku, pokytis buvo mažiausias (žemo laipsnio). Kai kurių VMS mažiausio debito datos pokytis svyravo nuo -46 % iki 21 %, didžiausio debito datos – nuo -50 % iki 18 %. Vidutinio laipsnio pakitimai didžiausio debito metu (-50 %) nustatyti Bartuvos-Skuodo VMS.

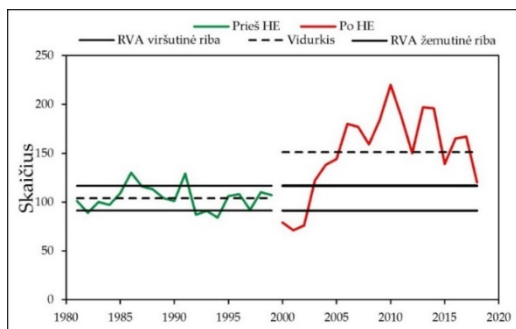
Dideli pokyčiai buvo nustatyti 4 grupės metiniams parametrų po poveikio. Dėl HE veikimo labai sumažėjo žemų pulsacijų dažnis ir jo trukmė, atitinkamai vidutiniškai 33 % ir 30 %. Hidrologinių pokyčių reikšmės kai kuriose VMS svyravo nuo -89 % iki 13 % – žemų pulsacijų skaičius ir nuo -100 % iki 0 % jų trukmės; nuo -47 % iki 33 % aukštų pulsacijų skaičius ir nuo -25 % iki 44 % jų trukmės. Didelis hidrologinis mažų pulsacijų kitimo laipsnis apskaičiuotas Bartuvos-Skuodo (-83 %), Širvintos-Liukonių (4.27 pav.) ir Šušvės-Josvainių (-70 %) VMS.



4.27 pav. Žemų pulsacijų hidrologiniai pokyčiai Širvintos-Liukonių VMS.

Priešingai, mažų pulsacijų skaičiaus Verknės-Verbyliškių VMS, mažų pulsacijų trukmės Jūros-Tauragės, Mūšos-Ustukių ir Verknės-Verbyliškių VMS bei didelio pulsacijų skaičiaus Mūšos-Ustukių ir Šventosios-Ukmergės VMS pokyčiai nebuvo nustatyti. Apskritai, daugiausiai pakitimų nustatyta Širvintos-Liukonių (43 %) ir Bartuvos-Skuodo (42 %) VMS.

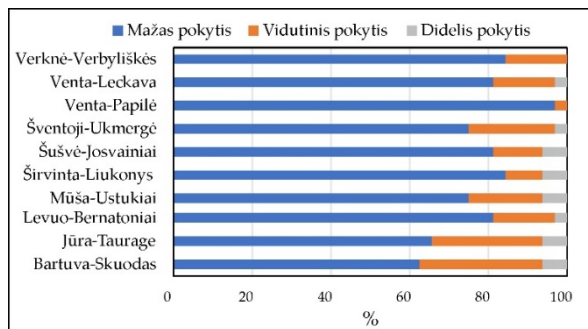
5 grupės parametrai buvo vieni iš labiausiai pakitusių. Kilimo rodiklio reikšmių svyravimas buvo nuo -62 % (Bartuvos-Skuodo VMS) iki 22 % (Mūšos-Ustukių VMS), kritimo rodiklio – nuo -67 % (Verknės-Verbyliškių VMS) iki 8 % (Šušvės-Josvainių VMS), o reversų skaičiaus – nuo -100 % iki 9 %. Reversų skaičiaus reikšmės 90 % metų po HE pastatymo patekdavo už nustatytų RVA intervalų ribų (ties Bartuva-Skuodu, Jūra-Taurage, Širvinta-Liukonimis); visos šios reikšmės svyravo už tikslinio intervalo ribų Mūšos-Ustukių ir Šušvės-Josvainių VMS, t. y. pokytis -100 %, (4.28 pav.). Šiame tyrime reversų skaičius buvo nustatytas kaip rodiklis, rodantis ryškiausią hidrologinio kitimo pokytį. Kilimo ir kritimo greičio reikšmės kito nuo nedidelių iki vidutinių dydžių. Labiausiai 5 grupės parametrai absoliučiomis reikšmėmis pasislinko Bartuvos-Skuodo (65 %), Mūšos-Ustukių (56 %) ir Lėvens-Bernatonių VMS (54 %).



4.28 pav. Hidrologiniai reversavimų skaičiaus pokyčiai Šušvės-Josvainių VMS

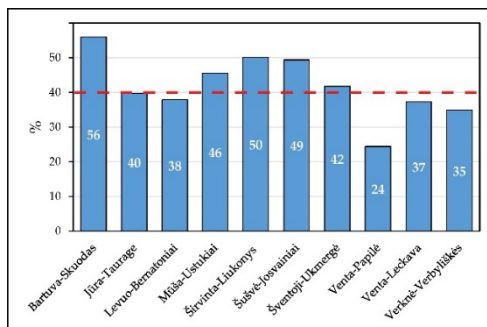
4.29 paveiksle nurodyta hidrologinių rodiklių procentinė dalis kiekvienoje hidrologinių pokyčių kategorijoje: maža, vidutinė ir didelė. Bartuvos ir Jūros upių, esančių žemiau HE, įrašai rodo didžiausią procentinę dalį vidutinio ir didelio pakitimo

debito rodiklių. Trisdešimt vienas hidrologinis rodiklis pateko į mažo ir tik vienas – į vidutinio pakitimo intervalą Ventos-Papilės VMS žemiau HE.



4.29 pav. Hidrologinių rodiklių procentinė dalis kiekvienoje RVA kategorijoje

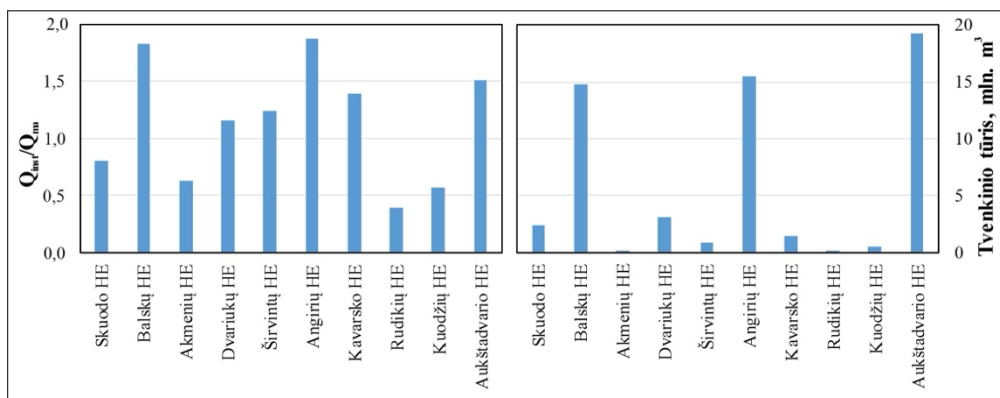
4.30 paveiksle pateikiamas bendras hidrologinių pokyčių laipsnis (%), pagal 23 lygtį), atsižvelgiant į kiekvienos rodiklių grupės vidutines ir didžiausias kitimo laipsnio vertes. Šešiose VMS šis laipsnis įvertintas kaip vidutinis (didesnis nei 40 %), t. y. Bartuvos, Širvintos, Šušvės ir Mūšos upės nustatytos kaip labiausiai hidrologiškai pakitusios dėl HE veiklos. Taikyta hidrologinio kintamumo koncepcija atskleidė, kad Rudikių HE Ventos upę pakeitė mažiausiai.



4.30 pav. Bendras hidrologinių pokyčių laipsnis (%)

4.3.2.8. Hidroelektrinių ir tvenkinių savybių įtaka upių hidrologiniams pokyčiams

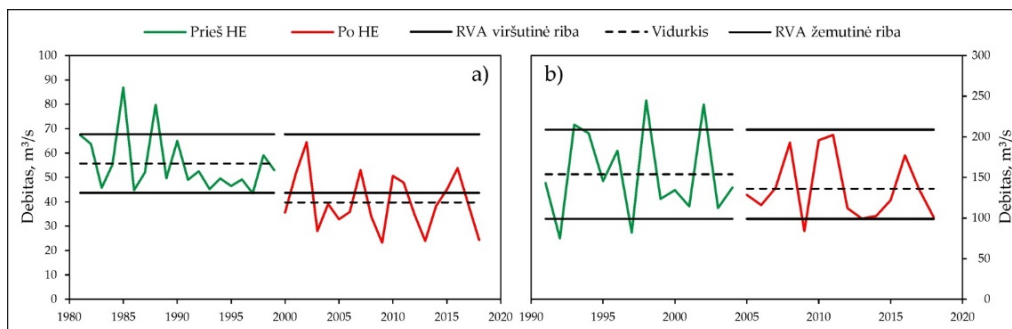
Ankstesniuose skyriuose nustatyta, kad hidrologinio režimo pokyčiai įvyko pastačius hidroelektrines. Svarbu nustatyti, kurios HE ar tvenkinio savybės turėjo didžiausią poveikį žemiau esantiems upės ruožams. Šiai analizei atlikti buvo pasirinktos šios HE ir tvenkinio charakteristikos: paviršiaus plotas, užtvankos aukštis ir HE įrengtoji galia (1 priedas), Q_{inst}/Q_{ma} santykis bei tvenkinio tūris (4.31 pav.).



4.31 pav. Tirtų HE ir tvenkinių charakteristikos

Buvo tiriama, ar yra ryšys tarp minėtų HE charakteristikų ir visų 5 grupių (2.2 lent.) 32 srauto parametrų hidrologinių pokyčių (%) charakteristikų visose 5 grupėse po HE pastatymo. Šiuo tikslu buvo atlikta koreliacijos analizė. Tačiau apskaičiuojant dviejų parametrų grupių ryšius, buvo nustatyti tik keli reikšmingi ryšiai, kai koreliacijos koeficientas buvo lygus arba didesnis nei 0,7.

Nustatyta, kad 7 dienų maksimalių debitų kitimo laipsnis labiausiai priklauso nuo trijų charakteristikų: telkinio tūrio (0,76), paviršiaus ploto (0,74) ir Q_{inst}/Q_{ma} (0,73). Dauguma tirtų HE (7 iš 10) turėjo didelės įtakos hidrologiniams 7 dienų maksimalių debitų pokyčiams, t. y. šių ekstremalių debitų vertės neatitiko natūralaus upės funkcionavimo ribų (4.32 pav., a). Tai reiškia, kad pavasario ar staigių potvynių metu tvenkinys gali sukaupti tam tikrą vandens kiekį ir dėl tokio reguliavimo (HE veikimo) sumažinti didžiausius upių žemupio debitus. Be to, didžiausio debito likimas priklauso nuo santykio Q_{inst}/Q_{ma} . Šie santykiai buvo didžiausi (1,51–1,87) trijose HE, todėl 7 dienų didžiausi debitai kito priešingai (4.32 pav., b), t. y. po poveikio šių debitų vertės buvo linkusios dažniau svyruoti apibrėžtame intervale nei prieš poveikį. Minėti santykiai rodo, kad šiose HE instaliuoti debitai yra didžiausi, palyginti su daugiamečiais debitaais. Be to, šiose trijose HE turbinos nereguliuoja debito ir neprisitaiko prie upės debito. Jos išleidžia didžiausią debitą iš tvenkinio, jo nemažindamos (t. y. neatlieka debito reguliavimo funkcijos).



4.32 pav. Hidrologiniai pokyčiai (m³/s) ekstremaliomis debito sąlygomis (7 dienų maksimumas): Bartuovoje žemiau Skuodo HE (a), Jūroje žemiau Tauragės HE (b)

5. REKOMENDACIJOS TVARIAM HIDROENERGETINIŲ IŠTEKLIŲ NAUDOJIMUI KLIMATO KAITOS FONE

Lietuvos Vyriausybės parengtame 2021–2030 m. nacionaliniame energetikos ir klimato plane (NEKP) Europos Sąjungai įsipareigojama padidinti atsinaujinančiųjų energijos išteklių dalį šalies energetikos balanse iki 45 % (Lietuvos Respublikos Seimas, 2018a.). Lietuvoje upių potenciniai energijos ištekliai sudaro 3,6 % nuo galutinio suvartojimo. Upių kinetinė energija Lietuvoje šiuo metu yra mažai išnaudojama.

Tvariam hidroenergijos išteklių naudojimui siūlomos šios rekomendacijos:

- Sumažėjus upių nuotėkiui praeityje ir ateityje toliau mažėjant, įrengtų hidroelektrinių elektros energijos produkcija taip pat mažės. Naujų hidroelektrinių plėtra Lietuvoje yra apribota įstatymų (Lietuvos Respublikos Seimas, 2018b.). Įvertinus upių kinetinių išteklių realias panaudojimo galimybes, technologijas bei poveikį aplinkai, ateityje reikėtų labiau išnaudoti upių kinetinius išteklius. Tačiau šiuo metu nėra sukurtos įstatymų bazės. Todėl būtų tikslinga parengti teisės aktus, reglamentuojančius Lietuvos upių kinetinės energijos panaudojimo galimybes bei galimą poveikį aplinkai.
- Atlikus mažų hidroelektrinių poveikio upių hidrologiniam režimui analizę, nustatyti hidrologinio režimo pakitimai, susiję su žemų ir aukštų pulsacijų pasikartojimo bei reversavimų skaičiaus padidėjimu. Šie pokyčiai atspindi, kad mažosios hidroelektrinės kai kada dirba hidropikingo režimu. Upės hidrologinį režimą labiausiai pakeitė tos hidroelektrinės, kurių minimalus darbinis debitas (Q_{Hmin}) yra didesnis už nustatytą norminiais teisės aktais upės gamtosauginį debitą (Q_{gamt}). Sausmečiu, kai reikalaujama pro hidroelektrinę praleisti gamtosauginį debitą, šios hidroelektrinės dirbti negali, nes jų minimalus darbinis debitas yra daug didesnis, nei pro hidroelektrinę praleidžiamas gamtosauginis debitas. Rekomenduojama atlikti mažųjų HE rekonstrukcijas, t. y. keisti turbinas, kad jos galėtų gaminti elektros energiją praleisdamos gamtosauginį debitą. Hidroelektrinių minimalus praleidžiamas debitas turi atitikti nustatytą norminiais teisės aktais gamtosauginį debitą. Ši rekomendacija yra aktualiausia toms hidroelektrinėms, kurių $Q_{gamt}/Q_{Tmin} \leq 0,6$.

IŠVADOS

1. Atlikus Lietuvos upių nuotėkio modeliavimą, nustatyta, kad 2021–2040 m. lyginant su 1986–2005 m. laikotarpiu nuotėkis sumažės iki 15,2 %. 2081–2100 m. šie pokyčiai bus ženkliai didesni ir priklausys nuo hidrologinio rajono. Pagal RCP8.5 scenarijų Vakarų Lietuvos hidrologiniame rajone nuotėkis sumažės iki 10,4 %, Vidurio Lietuvos hidrologiniame rajone – iki 31,2 %, o pietryčių Lietuvos hidrologiniame rajone iki 24,6 %, palyginti su 1986–2005 m. laikotarpiu.
2. Nustatyta, kad 2021–2040 m., priklausomai nuo taikomo scenarijaus ir hidrologinio rajono, hidrokinetiniai ištekliai gali būti iki 4,3 % didesni arba iki 18,8 % mažesni, palyginti su 1986–2005 m. Tuo tarpu 2081–2100 m. tik Pietryčių Lietuvos hidrologiniame rajone šie ištekliai keisis nežymiai (pagal RCP2.6 padidės iki 2,7 %), o visuose kituose sumažės nuo 8,8 % iki 36,2 %, palyginti su 1986–2005 m.
3. Tikėtina, kad 2021–2040 m. mažųjų hidroelektrinių hidroenergijos gamyba sumažės iki 8,6 %, o Kauno HE – iki 11,4 %. Didžiausi hidropotencinės energijos pokyčiai galimi 2081–2100 m., kai mažų hidroelektrinių energijos gamyba mažės iki 14 %, o Kauno HE – iki 30 %, palyginti su 1986–2005 m. Didžiausi neigiami energijos gamybos pokyčiai bus juntami pavasario sezonais, kai gamyba sumažės iki 40 %. Tuo tarpu žiemos sezonais dėl nuotėkio persiskirstymų tarp sezonų energijos gamyba gali padidėti iki 10 %.
4. Įvertinus kinetinių ir potencinių išteklių prognozių neapibrėžtumus ateityje, nustatyta, kad klimato modelių įtaka sudarė atitinkamai iki 70 % ir 82 %, o RCP scenarijų atveju – iki 30 % ir 18 %. Didžiausia klimato modelių įtaka neapibrėžtumams buvo Vakarų Lietuvos hidrologiniame rajone, o mažiausia – Pietryčių Lietuvoje. Tai lėmė skirtingos nuotėkio susidarymo sąlygos: Vakarų Lietuvos hidrologiniame rajone didesnę nuotėkio dalį sudaro lietus, o Pietryčių Lietuvoje vyraujantis požeminio vandens maitinimas.
5. Įvertinus mažų hidroelektrinių poveikio upių hidrologiniam režimui taikant IHA metodą, nustatyta, kad po hidroelektrinių pastatymo galimi įvairaus laipsnio hidrologinio režimo pakitimai. Reikšmingiausi pokyčiai įvyko didelių ir mažų pulsacijų dažnumo ir trukmės srityje. Mažų pulsacijų skaičius po hidroelektrinių įrengimo vidutiniškai padidėjo 151 %, o aukštų pulsacijų 14 %. Vieni reikšmingiausių pokyčių nustatyti vertinant nuotėkio sąlygų kaitos greitį ir dažnį. Dešimtyje iš vienuolikos tirtų upių po HE pastatymo reversavimų skaičius vidutiniškai padidėjo 45 %.

LITERATŪRA

1. A renewable energy option. Hydrokinetic power. 2015, Hydro Quebec.
2. ABBASI, T., and S.A. ABBASI. Small hydro and the environmental implications of its extensive utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011, 5, 2134–2143.
3. ABU – ZREIG, M., and L.B. HANI. Assessment of the SWAT model in simulating water sheds in arid regions: Case study of the Yarmouk River Basin (Jordan). *Open Geosciences*, 2021, 13, 377–89.
4. AKSTINAS, V., MEILUTYTĖ-LUKAUSKIENĖ D., and J. KRIAUCIŪNIENĖ. Consequence of meteorological factors on flood formation in selected river catchments of Lithuania. *Meteorological Applications*. 2019, 26, 232–244. <https://doi.org/10.1002/met.1757>
5. AKSTINAS, V., JAKIMAVIČIUS, D., MEILUTYTĖ-LUKAUSKIENĖ, D., KRIAUCIŪNIENĖ, J., and D. ŠARAUSKIENĖ. Uncertainty of annual runoff projections in Lithuanian rivers under a future climate. *Hydrology Research*, 2020, 51(2), 257–271.
6. AMBROSE, R. B., WOOL, T. A., and T. O. BARNWELL. Development of Water Quality Modeling in the United States. *Environmental Engineering Research. Korean Society of Environmental Engineering*. 2009,14(4), 200–210. doi: 10.4491/eer.2009.14.4.200.
7. APSITE, E., BAKUTE, A., ELFERTS, D., KURPNIECE, L., I. PALLO. Climate change impacts on river runoff in Latvia. *Climate Research*. 2011, 48, 57–71.
8. Assessment of Canada's Hydrokinetic Power Potential. Canadian Hydraulics Centre. National Research Council of Canada, 2010.
9. BAŞKAYA, Ş., BAŞKAYA, E., and A.SARI. The principal negative environmental impacts of small hydropower plants in Turkey. *African Journal of Agricultural Research*. 2011, 6, 3284–3290. <http://dx.doi.org/10.5897/AJAR10.786>.
10. BEHARRY, S. L., et al. Use of the SWAT model for estimating reservoir volume in the Upper Navet watershed in Trinidad. *SN Applied Sciences*. 2021, 3(2), 1–13.
11. BERGSTRÖM, S. Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments. *SMHI Reports RHO 7*. Norrköping, 1976.
12. BERGSTROM, S., LINDSTROM, G., and A. PETTERSSON. Multi-variable parameter estimation to increase confidence in hydrological modelling. *Hydrological Processes*. 2002, 16, 413–421. doi:10.1002/hyp.332
13. BEYER, R., KRAPP, M., and A. MANICA. A systematic comparison of bias correction methods for paleoclimate simulations. *Climate of the Past Discussions*. 2019, 11, <https://doi.org/10.5194/cp-2019-11>.
14. BILYS, S., *Hidroelektinių mirazai Lietuvoje 1909–2009*. 2010, Vilnius, 152.
15. BILYS, S., GUŽAUSKAS, R., JAKŠTAS, L., KAIRYS, L., KASIULIS, E., ir P. PUNYS. *Mažoji hidroenergetika*. 2017, Vilnius, Trys žvaigždutės, 208.
16. BP Energy Outlook: 2019 edition. BUČIENĖ, A., POVILAITIS, A., LANGAS, V., BUČAS, M., PETKUVIENĖ, J., VAIČIŪTĖ, D., and S. GUŽYS. Changes in nutrient concentrations of two streams in Western Lithuania with focus on shrinkage of agriculture and effect of climate, drainage runoff and soil factors. *Water*. 2019, 11(8), 1590.
17. BUJANG, M. A., and N. BAHARUM. Sample Size Guideline for Correlation Analysis. *World Journal of Social Science Research*. 2016, 3(1), 37–46. <https://doi.org/10.22158/wjssr.v3n1p37>

18. BURNEIKIS, J. Trumpa Lietuvos TSR mažųjų hidroelektrinių apžvalga. *Energetika*. 1958, 1–2, Kaunas.
19. (CIIA, 2015) *Climate Information and Impact Assessment*. Handbook N°6 Seminar held in Lecce, Italy 9 – 20 March 2015. Downscaling Climate Modelling for High–Resolution Climate Information and Impact Assessment.
20. CLARKE, L., et al. *Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations* (Sub–report 2.1A of Synthesis and Assessment Product 2.1, US Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, Department of Energy, Office of Biological & Environmental Research, Washington DC, 2007.
21. CLILVERD, H. M., et al.. Coupled hydrological/hydraulic modelling of river restoration impacts and floodplain hydrodynamics. *River research and applications*. 2016, 32(9), 1927–1948.
22. ČERKASOVA, N., UMGIESSER, G., and A. ERTÜRK. Development of a hydrology and water quality model for a large transboundary river watershed to investigate the impacts of climate change – A SWAT application. *Ecological Engineering*. 2018, 124, 99–115.
23. ČESONIENĖ, L., ŠILEIKIENĖ, D., MAROZAS, V., and L. ČITEIKĖ. Influence of Anthropogenic Loads on Surface Water Status: A Case Study in Lithuania. *Sustainability*. 2021, 13(8), 4341.
24. DAS, B., et al. Evaluation of multisite performance of SWAT model in the Gomti River Basin, India. *Applied water science*. 2019, 9(134), 1–10.
25. DELWORT, T.L., et al. Simulated climate and climate change in the GFDL CM2.5 High–Resolution Coupled Climate Model. *Climate*. 2012, 25, 2755–2781.
26. DICKINSON, R.E., et al. A regional climate model for the western United States. *Climatic Change*. 1989, 15, 383–422. <https://doi.org/10.1007/BF00240465>
27. DIVE TURBINE. [žiūrėta 2020–08–24]. Prieiga per internetą: <https://dive-turbine.de/hydropower/DIVE-Turbine>
28. DEVKOTA, L.P. ir GYAWALI, D.R. Impacts of climate change on hydrological regime and water resources management of the Koshi River Basin. Nepal. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 2015, 4, 502–515.
29. DUMBRAUSKAS, A., IRITZ, L., LARSSON, R., and A. POVILAITIS. *Environmental effects of agriculture practices – hydrology and nutrient transport*. Part I – Water Cycle. Report No. 3218. Lund university, Sweden, 1998. 62p.
30. MORAN, E.F., LOPEZ, M.C., MOORE, N., MÜLLER, N., and D.W. HYNDMAN. Sustainable hydropower in the 21st century. In *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Nov 2018, 115 (47) 11891–11898; DOI: 10.1073/pnas.1809426115
31. ENGEL, B. A., et al. Nonpoint–source (NPS) pollution modeling using models integrated with geographic information systems (GIS). *Water Science and Technology*. 1993, 28(3–5), 685–690.
32. EUROPOS PARLAMENTAS ir EUROPOS TARYBA. *Dėl elektros energijos, pagamintos iš atsinaujinančiųjų energijos išteklių, skatinimo elektros energijos vidaus rinkoje*. 2001 rugsėjo 27 d., direktyva 2001/77/EB. m. Europos Sąjungos oficialusis leidinys.
33. EUROPEAN COMMISSION, DIRECTORATE GENERAL FOR ENVIRONMENT. *Hydropower generation in the context of the EU water framework directive*. DEVOLDERE, K., et. al. Arcadis, Deloitte, 2013.
34. FARMER, W. H., and R. M. VOGEL On the deterministic and stochastic use of hydrologic models. *Water Resources Research*. 2016, 52, doi:10.1002/2016WR019129.

35. FINGER, D., et al. Projections of future water resources and their uncertainty in a glacierized catchment in the Swiss Alps and the subsequent effects on hydropower production during the 21st century. *Water Resources Research*. 2012, 48, W02521, doi:10.1029/2011WR010733.
36. FLAMBARD, J., et al. River and Estuary Current Power Overview. *Marine Science and Engineering*. 2019, 7, 365. <https://doi.org/10.3390/jmse7100365>
37. FLATO, G.J., et al. *Evaluation of Climate Models*. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge, Cambridge University Press, 2013.
38. FUJINO, J., et al. Multi-gas Mitigation Analysis on Stabilization Scenarios Using Aim Global Model. *The Energy Journal*. 2006, 343–354, <http://www.iaee.org/en/publications/ejarticle.aspx?id=2199>
39. GAILIUŠIS, B., KRIAUCIŪNIENĖ, J., UŠPURAS, E., KALIATKA, A., ir V. VILEINIŠKIS. Kauno HE tvenkinio hidrodinaminio modelio kalibravimas remiantis neapibrėžtumo analize. *Energetika*. 2006, 4, 37–44.
40. GAILIUŠIS, B. *River run-of management in the Lithuanian SSR*. Vilnius Lith. 1986, 156. (In Russian)
41. GAILIUŠIS, B., JABLONSKIS, J., ir M. KOVALENKOVIENĖ. *Lietuvos upės: hidrografija ir nuotėkis*. Kaunas. 2001.
42. GAILIUŠIS, B., JABLONSKIS, J., and A. TOMKEVIČIENĖ. Hidroenergetikos ir hidrologijos mokslų raida. *Mokslas ir technika*, 2007, 1.
43. GAILIUŠIS, B., JAKIMAVIČIUS, D., ŠARAUSKIENĖ, D., and A. JURGELĖNAITĖ. Assessment of hydrokinetic resources of small and medium-size rivers: the Lithuanian case. *Baltica*. 2017, 30 (1), 23–30.
44. GAILIUŠIS, B., KRIAUCIŪNIENĖ, J., and E. RIMAVIČIŪTĖ. Modeling the Effect of Hydroelectric Pumped Storage Power on Regime of the Kaunas Reservoir in Lithuania. *Nordic Hydrology*. 2003, 34, 5, 507–518.
45. GASSMAN, P. W., M. REYES, C. H. GREEN, and J. G. ARNOLD. The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future directions. *Transactions of the ASABE*. 2007, 50(4), 1211–1250.
46. GAUDARD, L., et al. Climate change impacts on hydropower in the Swiss and Italian Alps. *Science of the Total Environment*. 2013, 10, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.012>.
47. GERMAN ADVISORY COUNCIL ON THE ENVIRONMENT. *Pathways towards a 100% Renewable Electricity System; Geschäftsstelle Des Sachverständigenrates Für Umweltfragen (SRU)*: Berlin, Germany, 2011. [žiūrėta 2021–10–1]. Prieiga per internetą: http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/EN/02_Special_Reports/2011_10_Special_Report_Pathways_renewables.pdf?__blob=publicationFile (accessed on 1 October 2021)
48. GIORGI, F. Thirty years of regional climate modeling: Where are we and where are we going next? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2019, 124, 5696–5723. <https://doi.org/10.1029/2018JD030094>.
49. CADA, G., et. al. Potential Impacts of Hydrokinetic and Wave Energy Conversion Technologies on Aquatic Environments. *Fisheries*. 2007, 32, 174–181. 10.1577/1548–8446(2007)32[174:PIOHAW]2.0.CO;2.
50. GOTZINGER, J., and A. BARDOSSY. Generic error model for calibration and uncertainty estimation of hydrological models. *Water Resources Research*. 2008, 11, 44. doi:10.1029/2007WR006691.

51. GUDMUNDSSON, L., BREMNES, J. B., HAUGEN, J. E., and T. ENGEN-SKAUGEN. Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations – a comparison of methods, *Hydrology and Earth System Sciences*. 2012, 16, 3383–3390. doi:10.5194/hess-16-3383-2012.
52. GULBINAS, Z., ZINGSTRA, H., KITNAES, K., QUERNER, E.P., POVILAITIS, A., RAŠOMAVIČIUS, V., and M. PILECKAS. Integrated Water and Biodiversity Management in the Dovinė River Basin. *Journal of Ecology Lithuania*. 2007, 53, (2) 64.
53. GUPTA, R., BHATTARAI, R., and MISHRA, A. Development of Climate Data Bias Corrector (CDBC) Tool and Its Application over the Agro–Ecological Zones of India. *Water*. 2019, 11, 1102; doi:10.3390/w11051102. www.mdpi.com/journal/water.
54. GUTOWSKI, JR. W. J., et al. WCRP COordinated Regional Downscaling EXperiment (CORDEX): a diagnostic MIP for CMIP6. *Geoscientific Model Development*. 2016, 9, 4087–4095. doi:10.5194/gmd-9-4087-2016.
55. HAMUDUDU, B., and A. KILLINGTVEIT. Assessing climate change impacts on global hydropower. *Energies*. 2012, 5, 305–322.
56. HAUGEN, M.A., STEIN, M.L., SRIVER, R.L., and E.J. MOYER. Future climate emulations using quantile regressions on large ensembles. *Advances in Statistical Climatology, Meteorology and Oceanography*. 2019, 5, 37–55. <https://doi.org/10.5194/ascmo-5-37-2019>.
57. HAYHOE, K. J., EDMONDS, R.E., KOPP, A.N., LeGRANDE, B.M., SANDERSON, M.F., WEHNER, and D.J.WUEBBLES, 2017: Climate models, scenarios, and projections. In: *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment*, Volume I [WUEBBLES, D.J., FAHEY, D.W., HIBBARD, K.A., DOKKEN, D.J., STEWART, B.C., and MAYCOCK T.K. (Eds.)]. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 133–160.
58. BREKKE, H. *Hydraulic turbines: Design, Erection and Operation*. Norwegian University of Science and Technology, Norway, 2015, 324.
59. HIJIOKA, Y., MATSUOKA, Y., NISHIMOTO, H., MASUI, T., and M. KAINUMA. Global GHG emission scenarios under GHG concentration stabilization targets. *Global Environmental Engineering*. 2008, 13, 97–108.
60. (HMD, 1993). Proceedings of Federal Interagency workshop on hydrologic modeling demands for the 90's. Federal interagency advisory committee on water data subcommittees on hydrology and water data and information exchange. June 6–9, 1993, Fort Collins, Colorado.
61. HOUGHTON, J.T., JENKINS, G.J., and J.J. EPHRAUMS(Eds). *Climate change, the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, 1991. Pp. 365 + pp.
62. HOUGHTON, J.T., MEIRA FILHO, L.G., CALLANDER, B.A., HARRIS, N., KATTENBERG, A., and K.MASKELL (Eds). *Climate Change, The Science of Climate Change: Contribution of WGI to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. 1995.
63. HWANG, Y., CLARK, MP., and B. RAJAGOPALAN. Use of daily precipitation uncertainties in streamflow simulation and forecast. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2011, 25(7), 1–16. doi:10.1007/s00477-011-0460-1.
64. (ICLD, 2011) INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. 2011, World Register of Dams.
65. IEA, Energy outlook, 2018. [žiūrėta 2019–10–15]. Prieiga per internetą: <https://www.iea.org/tcep/power/renewables/hydropower/>
66. IEA, *Hydropower special market report. Analysis and forecast to 2030*. 2021.
67. IEA, *Technology Roadmap – Energy storage*, 2014

68. IEA (2022), Canada 2022, IEA, Paris. [žiūrėta 2022.02.03] . Prieiga per internetą <https://www.iea.org/reports/canada-2022>
69. IEA (2019), Energy Policies of IEA Countries: Sweden 2019 Review, IEA, Paris. [žiūrėta 2022.02.03]. Prieiga per internetą <https://www.iea.org/reports/energy-policies-of-iea-countries-sweden-2019-review>
70. IEA (2019), Energy Policies of IEA Countries: United States 2019 Review, IEA, Paris. [žiūrėta 2022.02.03]. Prieiga per internetą <https://www.iea.org/reports/energy-policies-of-iea-countries-united-states-2019-review>
71. (IHA, 2018 a) International Hydropower Association. 2018 Hydropower Status Report.
72. (IHA, 2018 b) International Hydropower Association. Country Profiles. Austria. 2018. [žiūrėta 2020.08.10]. Prieiga per internetą <https://www.hydropower.org/country-profiles/austria>.
73. (IHA, 2019) International Hydropower Association. 2019 Hydropower Status Report.
74. (IPCC–DDC, 2019). IPCC Data Distribution Centre. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019 – [žiūrėta 2020.07.21]Prieiga per internetą http://www.ipcc-data.org/ddc/ddc_about.html .
75. (IPCC, 2013) VAN OLDENBORGH, G.J. et al. Annex I: Atlas of Global and Regional Climate Projections. In: *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.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
76. JABLONSKIS, J. Lietuvos upių hidroenergijos balansas. *Energetika*. 2005, 3, 40–46.
77. JABLONSKIS, J., ir M.LASINSKAS. *Lietuvos TSR upių kadastras (debitai, nuolydžiai, galingumas)*. Vilnius, 1962, 640.
78. JABLONSKIS, J., ir D. MEILUTYTĖ-LUKAUSKIENĖ. Neries hidroenergija. *Energetika*. 2015, 61, 3–4, 141–148.
79. JABLONSKIS, J., ir A.TOMKEVIČIENĖ. Lietuvos mažosios hidroenergetikos plėtros galimybės. *Energetika*. 2004, 2, 40–46.
80. JACOB, D., et al. Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO–CORDEX community. *Regional Environmental Change*. 2020, 20, 51. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01606-9>
81. JAKIMAVIČIUS, D., GAILIUŠIS, B., ŠARAUSKIENĖ, D., JURGELĖNAITĖ, A., and D. MEILUTYTĖ-LUKAUSKIENĖ. Assessment of the riverine hydrokinetic energy resources in Lithuania. *Baltica*. 2014, 27 (2), 141–150.
82. JAKIMAVIČIUS, D., KRIAUCIŪNIENĖ, J., and D. ŠARAUSKIENĖ. Assessment of wave climate and energy resources in the Baltic Sea nearshore (Lithuanian territorial water). *Oceanologia*. (2018 a), 60(2), 207–218.
83. JAKIMAVIČIUS, D., KRIAUCIŪNIENĖ, J., and D. ŠARAUSKIENĖ. Impact of climate change on the Curonian Lagoon water balance components, salinity and water temperature in the 21st century. *Oceanologia*. (2018 b), 60, 378–389.
84. JANSSEN, A.B.G., et al. PCLake+: A process–based ecological model to assess the trophic state of stratified and non–stratified freshwater lakes worldwide. *Ecological Modelling*. 2019, 396, 23–32.
85. JOHNSON J.B, and D.J. PRIDE. *River, tidal, and ocean current hydrokinetic energy technologies: status and future opportunities in Alaska*. Technical report. Alaska Center for Energy and Power. 2010.
86. KACZMAREK Z. Water balance model for climate impact analysis. *ACTA Geophysica Polonica*. 1993, 41(4), 1–16.

87. BYMAN, K. *Electricity production in Sweden*. IVA's Electricity Crossroads project. Royal Swedish Academy of Engineering Sciences, Stockholm, 2016.
88. KASIULIS, E. *Jūros bangų energetinių išteklių vertinimas Baltijos jūros priekrantėje ties Klaipėda*. Aleksandro Stulginskio universitetas. Akademija, 2015. Daktaro disertacija.
89. KAUNO ALGIRDO BRAZAUSKO HIDROELEKTRINĖ. [žiūrėta 2020.08.15]. Prieiga per internetą <https://www.ignitisgamyba.lt/veikla/elektros-energijos-gamyba/kauno-algirdo-brazausko-hidroelektrine-khe/137>.
90. KAVETSKI, D., KUCZERA, G., and S.W. FRANKS. Bayesian analysis of input uncertainty in hydrological modeling: 1. Theory. *Water Resources Reserch*. 2006, 42 (03407). doi:10.1029/2005WR004368.
91. FELIX, K.R. *A.N.T.S.– The American National Transportation System*. 2012, iUniverse, 152.
92. KELLY–RICHARDS, S., et al. Governing the transition to renewable energy: A review of impacts and policy issues in the small hydropower boom. *Energy Policy*. 2017, 101, 251–264. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.11.035>.
93. KHAN, M.J., IQBAL, M.T., and J.E. QUAICOE. River current energy conversion systems: progress, prospects and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008, 12(8), 2013–264.
94. KILKUS, K., ŠTARAS, A., RIMKUS, E., and G. VALIUŠKEVIČIUS. Changes in Water Balance Structure of Lithuanian Rivers under Different Climate Change Scenarios. *Environmental research, engineering and management*. 2006, 2(36), 3–10.
95. KOCH, H., et al. The impact of climate change and variability on the generation of electrical power. *Meteorologische Zeitschrift*. 2015, 24, 173–188.
96. KOESTLER, V., ØSTENBY, A., ARNESEN, F., BIRKELAND, C., and I. HADDELAND. *Climate Change Impact on Norwegian Hydro Power*. Report 50–2019, Norwegian Directorate for Water Resources and Energy: Oslo, Norway, 2019; p. 32. (In Norwegian)
97. KOLUPAILA, S. Nemuno kilpa. Lietuvos elektrifikavimo klausimu. *Kosmos*. 1929, 5, 169–200.
98. KOLUPAILA, S. *Mūsų baltieji angliai*. Lietuva. 1922, 102.
99. KOLUPAILA, S. *Preliminarinis Lietuvos vandens jėgos kadastras*. Energijos komiteto darbai. 1939, Kaunas. T. 3, 10–36.
100. KOUWEN, N. WATFLOOD: a Micro–Computer Based Flood Forecasting System Based on Real–Time Weather Radar. *Canadian Water Resources Journal*. 1988, 13(1), 62–77. DOI: 10.4296/cwrj1301062.
101. KOUWEN, N., and S–F. MOUSAVI, WATFLOOD/SPL9 Hydrological Model and Flood Forecasting System, Chapter 15 in *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*, edited by V.P. Singh and D.K. Frevert. Water Resources Publications. 2002, Highlands Research, Colorado. Pp. 649–686.
102. KOUWEN, N., SOULIS, E.D., PIETRONIRO, A., DONALD, J., and R.A. HARRINTON. Grouping Response Unit for Distributed Hydrologic Modelling. *ASCE Journal of Water Resources Management and Planning*. 1993, 119(3), May/June: 289–305.
103. KRIAUCIŪNIENĖ, J., MEILUTYTĖ–BARAUSKIENĖ, D., REIHAN, A., KOLTSOVA, T., LIZUMA, L., and D. ŠARAUSKIENĖ. Variability in temperature, precipitation and river discharge in the Baltic States. *Boreal environment research*. 2012, 17, 150–162.

104. KRIAUCIŪNIENĖ, J., JAKIMAVIČIUS, D., ŠARAUSKIENĖ, D. and T.KALIATKA. Estimation of uncertainty sources in the projections of Lithuanian river runoff. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2013, 27 (4), 769–784. doi:10.1007/s00477-012-0608-7.
105. KRIAUCIŪNIENĖ, J., MEILUTYTĖ–BARAUSKIENĖ, D., RIMKUS, E., KAŽYS, J., and A. VINCEVIČIUS. Climate change impact on hydrological processes in Lithuanian Nemunas river basin. *Baltica*. 2008, Vol. 21 (1–2), 51–61. ISSN 0067–3064.
106. KRIAUCIŪNIENĖ, J., VIRBICKAS, T., ŠARAUSKIENĖ, D., JAKIMAVIČIUS, D., KAŽYS, J., BUKANTIS, A., KESMINAS, V., POVILAITIS, A., DAINYS, J., AKSTINAS, V., JURGELĖNAITĖ, A., MEILUTYTĖ–LUKAUSKIENĖ, D., and A. TOMKEVIČIENĖ. Fish assemblages under climate change in Lithuanian rivers. *Science of the Total Environment*. 2019, 661, 563–574 p.
107. KUMAR, A. et al. Hydropower. In *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*; EDENHOFER, O., et al., Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, 2011; pp. 437–496.
108. KVARNÄS, H. *Modellering av näringsämnen i Fyrisåns avrinningsområde. Källfördelning och retention* (in Swedish). Rapport från Fyrisåns vattenförbund 1996, 31 sid. [Modelling nutrient transport in the Fyris River catchment. Source apportionment and retention (in Swedish). – Report from River Fyris Society for Water Conservation, Uppsala, Sweden.
109. SHERMAN, L.K. Stream Flow from Rainfall by the Unit–Graph Method. *Engineering News Record*. 1932, 108, 501.
110. LAFLAMME, E.M., LINDER, E., and Y. PAN. Statistical downscaling of regional climate model output to achieve projections of precipitation extremes. *Weather and Climate Extremes*. 2015, 12, 15–23.
111. LAGENDIJK, V. C. *Electrifying Europe: the power of Europe in the construction of electricity networks*. 2008. <https://doi.org/10.6100/IR638264>
112. LALANDER, E. *Hydrokinetic resource assessment: Measurements and models*. Acta Universitatis Upsaliensis. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala. Dissertations from the Faculty of Science and Technology. 2013, 1038, 72.
113. LASINSKAS, M. LTSR mažųjų upių energetiniai rodikliai ir nustatymo metodika. *Kauno Politechnikos instituto darbai*. 1955, 4, 161–174.
114. LASINSKAS, M. Hidroenergetika Lietuvoje 1940–1990 metais. *Energetika*. 1991, 4(8), 41–61.
115. LASINSKAS, M., BURNEIKIS, J., ir J. JABLONSKIS. *Lietuvos mažųjų upių hidraulinė energija ir jos panaudojimas*. Lietuvos mokslų akademijos mokslinė ekspertinė studija Nr.38. Lietuvos mokslų akademija, Vilnius, 1994.
116. LAWRENCE, D., and I. HADDELAND. Uncertainty in hydrological modelling of climate change impacts in four Norwegian catchments. *Hydrology Research*. 2011, 42(6), 457–471. doi:10.2166/nh.2011.010
117. LEGGET, J., PEPPER, W., J., SWART, R., J., EDMONDS, J., MEIRA FILHO, L., G., MINTZER, I., WANG, M., X., and WATSON, J. *Emissions Scenarios for the IPCC: an Update*. Climate Change 1992: The Supplementary Report to The IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press, UK, 1992. 68–95.
118. LEHNER, B., CZISCH, G., and S. VASSOLO. The impact of global change on the hydropower potential of Europe: a model–based analysis. *Energy Policy*. 2005, 33, 7, 839–855. [https://EconPapers.repec.org/RePEc:eee:enepol:v:33:y:2005:i:7:p:839–855](https://EconPapers.repec.org/RePEc:eee:enepol:v:33:y:2005:i:7:p:839-855).

119. LIDÉN, R. *Conceptual Runoff Models for Material Transport Estimations*. PhD dissertation, Lund University, Lund, Sweden, 2000.
120. LIDÉN, R., HARLIN, J., KARLSSON, M., and M. RAHMBERG. Hydrological modelling of fine sediments in the Odzi River, Zimbabwe. *Water SA*. 2001, 27, 303–315.
121. LIETUVOS RESPUBLIKOS SEIMAS. Lietuvos Respublikos integruotas nacionalinis energetikos ir klimato srities veiksmų planas 2021–2030 m. , 2018a. [žiūrėta 2022.06.15]. Prieiga per internetą <https://am.lrv.lt/uploads/am/documents/files/KLIMATO%20KAITA/Integruotas%20planas/Final%20NECP.pdf>
122. LIETUVOS RESPUBLIKOS SEIMAS. Lietuvos Respublikos Vandens įstatymo Nr. VIII–474 pakeitimo įstatymas. 2018b. Nr. XIII–1826. Vilnius. [žiūrėta 2022.06.15]. Prieiga per internetą <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/80b2f5500cd511e98a758703636ea610>
123. LUCCHETTI, E., BARBIER, J., and R. ARANEO. Assessment of the technical usable potential of the TUM Shaft Hydro Power plant on the Aurino River, Italy. *Renewable Energy*. 2013, 60, 648–654.
124. THAVHANA, M.P., SAVAGE, M.J., and M.E. MOELETSI. SWAT model uncertainty analysis, calibration and validation for runoff simulation in the Luvuvhu River catchment, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*. 2018, A/B/C, 105, 115–124. ISSN 1474–7065. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.03.012>.
125. MANZANO-AGUGLIARO, F. An overview of research and energy evolution for small hydropower in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, Elsevier, 75(C), 476–489.
126. MARAUN, D., WIDMANN, M., and J.M. GUTIÉRREZ. Statistical downscaling skill under present climate conditions: A synthesis of the VALUE perfect predictor experiment. *International Journal of Climatology*. 2019, 39, 3692–3703. <https://doi.org/10.1002/joc.5877>
127. MAYOR, B., et al. The Role of Large and Small Scale Hydropower for Energy and Water Security in the Spanish Duero Basin. *Sustainability*. 2017, 9(10), 1807. <https://doi.org/10.3390/su9101807>.
128. MCMILLAN, H.K., WESTERBERG, I.K., and T. KRUEGER. Hydrological data uncertainty and its implications. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*. 2018, 5, 1319.
129. MELSEN, L., et al. Representation of spatial and temporal variability in large-domain hydrological models: case study for a mesoscale pre-Alpine basin. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2016, 20(6), 2207–2226.
130. MIKE SHE, Volume 1: User Guide, 2017.
131. MILLER, G., J. FRANCHESCHI, W. LESE, AND J. RICO. *The Allocation of Kinetic Hydroelectric Conversion Systems (KHECS) in USA Drainage Basins: Regional Resource and Potential Power – Final Report*. Department of Applied Science, New York University, NY. August 1986. NYU/DAS 86–151. Report prepared for U.S. Department of Energy.
132. MITCHELL, J. MURRAY JR. On the causes of instrumentally observed secular temperature trends. *Journal of Meteorology*. 1953, 10, 244–261. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1953\)0102.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1953)0102.0.CO;2).
133. MOSS, Richard H., et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*. 2010. 463, 747–756.
134. NAKICENOVIC, N., ALCAMO, J., GRUBLER, A., RIAHI, K., ROEHR, R., A., ROGNER, H–H., and N. Victor. *Special Report on Emissions Scenarios (SRES)*, A

- Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. ISBN 0–521–80493–0.
135. NEFF, B.P., and J.R. NICHOLAS. *Uncertainty in the Great Lakes Water Balance*; U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2004–5100; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 2005, 42.
 136. LAWS, N.D., and B.P. EPPS. Hydrokinetic energy conversion: Technology, research, and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, 57, 1245–1259. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.189>.
 137. POTTER, N.J., et al. Bias in downscaled rainfall characteristics. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2019. <https://doi.org/10.5194/hess-2019-139>.
 138. NIELSEN, A., et al. Effects of climate and nutrient load on the water quality of shallow lakes assessed through ensemble runs by PCLake. *Ecological Applications*. 2014, 24(8), 1926–1944.
 139. NOVER, D.M., et al. The effects of downscaling method on the variability of simulated watershed response to climate change in five us basins. *Earth Interactions*. 2016, 20, 1–27.
 140. OLIVIER, A. C., et al. Systematic high-resolution assessment of global hydropower potential. *PLOS One*. 2017, 12(2): e0171844.
 141. DOI:10.1371/journal.pone.0171844
 142. OSMAN, Y.Z., and M.E. ABDELLATIF. Improving accuracy of downscaling rainfall by combining predictions of different statistical downscale models. *Water Science*. 2016, 30(2), 61–75.
 143. *Overview of the WEPP erosion prediction model*. USDA–Water Erosion Prediction Project. Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. NSERL Report #10, 1995.
 144. PAPARRIZOS, S., and F. MARIS. Hydrological simulation of Sperchios River basin in Central Greece using the MIKE SHE model and geographic information systems. *Applied Water Science*. 2017, 7(2), 591–599.
 145. PITORAC, L., VEREIDE, K., and L. LIA. Technical Review of Existing Norwegian Pumped Storage Plants. *Energies*, 2020, 13, 4918. doi:10.3390/en13184918
 146. PLUNGĖ, S., GUDAS, M., and A. POVILAITIS. Effectiveness of best management practices for non-point source agricultural water pollution control with changing climate – Lithuania’s case. *Agricultural water management*. Amsterdam. Elsevier. 2022a, 267, p. 1–15.
 147. PLUNGĖ, S., GUDAS, M., and A. POVILAITIS. Expected climate change impacts on surface water bodies in Lithuania. *Ecohydrology and Hydrobiology Łomianki. European Regional Centre for Ecohydrology of the Polish Academy of Sciences*. 2022b, 22, p. 246–268.
 148. POVILAITIS, A., ROBICHAUD, P., DUMBRAUSKAS, A., TUMAS, R., RUSECKAS, J., and C. HEATWOLE. Erosion prediction in the republic of Lithuania with the WEPP model. *Water quality modeling: Proceedings of the International Symposium*; 1995 Apr 2–1995 Apr 5; Orlando, Florida, USA. ASAE. 333–340.
 149. POVILAITIS, A. Application of the WEPP profile model to simulate storm runoff and erosion. *Vandens ūkio inžinerija*. 1997, 2(24), p. 72–79.
 150. POVILAITIS, A., AND E. P. QUERNER, Analysis of water management measures in the Dovine River Basin, Lithuania : possibilities to restore a natural water regime: Alterra–rapport 1370. Wageningen : Alterra, 2006. ISSN 1566–7197.
 151. POVILAITIS, A., and E. QUERNER. Possibilities to restore natural water regime in the Žuvintas lake and surrounding wetlands – modelling analysis approach. *Journal*

- of environmental engineering and landscape management. Vilnius. Technika. 2008, 16, (3), p. 105–112.
152. POVILAITIS, A. Source apportionment and retention of nutrients and organic matter in the Merkys river basin in Southern Lithuania. *Journal of environmental engineering and landscape management. Vilnius. Technika.* 2008, 16, (4), p. 195–204.
 153. POVILAITIS, A. Nutrient Retention in Surface Waters of Lithuania. *Polish Journal of Environmental Studies. Olsztyn, HARD Publishing Company.* 2011, 20, (6), p. 1575–1584.
 154. POVILAITIS, A., STÅLNACKE, P., and A. VASSILJEV. Nutrient retention and export to surface waters in Lithuanian and Estonian river basins. *Hydrology Research. London. IWA Publishing.* 2012, 43, (4), p. 359–373.
 155. POVILAITIS, A., and E. QUERNER. Hydrological effects of water management measures in the Dovine River basin, Lithuania. *Hydrological Sciences Journal–Journal Des Sciences Hydrologiques.* 2009, 54, (2), p. 363–374.
 156. POVILAITIS, A., WIDEN-NILSSON, E., ŠARAUSKIENE, D., KRIAUCIŪNIENĖ, J., JAKIMAVIČIUS, D., BUKANTIS, A., KAŽYS, J., LOZYS, L., KESMINAS, V., VIRBICKAS, T., and V. PLIŪRAITĖ. Potential impact of climate change on nutrient loads in Lithuanian rivers. *Environmental engineering and management journal.* 2018, 17, 2229–2240. 10.30638/eemj.2018.221.
 157. PUNYS, P., ADAMONYTĖ, I., KVARACIEJUS, A., MARTINAITIS, E., VYČIENĖ, G. and E. KASIULIS. Riverine hydrokinetic resource assessment. a case study of a lowland river in Lithuania. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2015, 50, 643–652. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.155.
 158. PUNYS, P., et al.. Hydraulic–geometric characteristics of the River Nemunas for the assessment of hydrokinetic resources. *Agricultural Engineering, Research Papers.* 2013 b, 45 (3), 38–50.
 159. PUNYS, P., et al. An assessment of micro–hydropower potential at historic watermill, weir, and non–powered dam sites in selected EU countries. *Renewable Energy.* 2019, 133, 1108–1123.
 160. PUNYS, P., et al. Assessment of the hydrokinetic energy characteristics of the river Neris using a one dimensional numerical HEC RAS 4.1 model. *Water Management Engineering.* 2013 a., 42 (62), 61–71.
 161. PUNYS, P., IR A. VAIŠVILA. Nepatvankinės hidroelektrinės. *Žemėtvarka ir hidrotechnika.* 2012, 4, 48–57.
 162. QUERNER, E.P., and P.J.T. VAN BAKEL. Description of the regional groundwater flow model SIMGRO. 1989, Wageningen, DLO–Staring Centrum, Report 7.
 163. RAO, S., and K. RIAHI. The Role of Non–CO2 Greenhouse Gases in Climate Change Mitigation: Long–term Scenarios for the 21st Century. *The Energy Journal.* 2006, 27, 177–200. <http://www.iaee.org/en/publications/ejarticle.aspx?id=2191>
 164. RIAHI, K., GRÜBLER, A., and N. NAKICENOVIC. Scenarios of long–term socio–economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change.* 2007, 74, 7, 887–935. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.05.026>.
 165. RICHTER, B.D., BAUMGARTNER, J.F., POWELL, J., and D. A. BRAUN. Method for assessing hydrologic alteration with ecosystems. *Conservation Biology.* 1996, 10, 1163–1174. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x>
 166. RICHTER, B.D., BAUMGARTNER, J.V., WIGINGTON, R., and D.P. BRAUN. How much water does a river need? *Freshwater Biology.* 1997, 37(1), 231–249. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.00153.x>

167. RICHTER, B.D., BAUMGARTNER, J.V., BRAUN, D.P., and J. POWELL. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regulated Rivers Research and Management*. 1998, 14, 329–340. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199807/08\)14:4<329::AID-RRR505>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199807/08)14:4<329::AID-RRR505>3.0.CO;2-E)
168. RIDGILL, M., et al. Global riverine theoretical hydrokinetic resource assessment. *Renewable Energy*. 2021, 174, 654–665. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.109>.
169. ROGELJ, J., MEINSHAUSEN, M., and R. KNUTTI, Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. *Nature Climate Change*. 2012, 2, 248–253.
170. RUMMUKAINEN, M. *Methods of statistical downscaling of GCM simulations*. Swedish Meteorological and Hydrological Institute. 1997, Norrköping.
171. SAKALAIUSKIENĖ, G., HANSEN, F.T., and M. RAULINAITIS. Assessment of Hydro Power Plants Effect on River Water Quality. *Environmental research, engineering and management*. 2014, 3(29), 14–20.
172. SAMADI, S., TUFFORD, D. L., and G. J. CARBONE. Assessing Parameter Uncertainty of a Semi-Distributed Hydrology Model for a Shallow Aquifer Dominated Environmental System. *JAWRA – Journal of the American Water Resources Association*. 2017, 53(6), 1368–1389.
173. ORTEGA-ACHURY, S.L., MCANALLY, W.H., DAVIS, T.E., AND J. L. MARTIN. *Hydrokinetic power review*. Civil and Environmental Engineering. James Worth Bagley College of Engineering Mississippi State University, 2010.
174. SANDU, M-A., and A. VIRSTA. Applicability of MIKE SHE to Simulate Hydrology in Argesel River Catchment. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2015, 6, 517–524, <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.08.135>.
175. SARR, M.A., SEIDOU, O., TRAMBLAY, Y., and S. EL ADLOUNI. Comparison of downscaling methods for mean and extreme precipitation in Senegal. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2015, 4, 369–385.
176. SATTARY, J., JUDEH, W.A., and S. WARREN, The impact of measurement uncertainty on the water balance. *Water and Environment Journal*. 2002, 16, 218–222.
177. SCHULZ, K., et al. Demonstrating the “unit hydrograph” and flow routing processes involving active student participation – a university lecture experiment. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2018, 22, 2607–2613. <https://doi.org/10.5194/hess-22-2607-2018>.
178. SEIBERT, J. Multi-criteria calibration of a conceptual rainfall-runoff model using a genetic algorithm. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2000, 4(2), 215–224.
179. SEIBERT, J., and J.J. MCDONNELL. Land-cover impacts on streamflow: A change-detection modelling approach that incorporates parameter uncertainty. *Hydrological Sciences Journal*. 2010, 55 (3), 316–332.
180. SWISS FEDERAL OFFICE OF ENERGY. Hydropower. [žiūrėta 2020.08.10]. Prieiga per internetą <https://www.bfe.admin.ch/bfe/en/home/supply/renewable-energy/hydropower/large-scale-hydropower.html#kw-79916>
181. SINGH, V.P. Hydrologic modeling: progress and future directions. *Geoscience Letters*. 2018, 5, 15. <https://doi.org/10.1186/s40562-018-0113-z>.
182. SMHI. *Integrated Hydrological Modelling System*, Manual, Version 5.8; Swedish Meteorological and Hydrological Institute: Norrköping, Sweden, 2005, 115.
183. SMILGEVIČIUS, J.. *Nemuno hidroeletros stotis ties Pažaisliu*. Kaunas, 1934, 34.

184. SMITH, S. J., and T. M. L. WIGLEY. Multi-gas forcing stabilization with the MiniCAM. Multigas mitigation and climate policy. *Energy Journal*. 2006, 3. 373–391 (Special Issue).
185. STANKUS, J., ir kt. *Lietuvos energetika*. Vilnius. 1982, 1, 192.
186. STONEVIČIUS, E., ŠTARAS, A., ir G. VALIUŠKEVIČIUS. Dirvožemio drėgmės režimo pokyčių XXI a. prognozės pagal skirtingus klimato kaitos scenarijus. *Geografija*. 2008, 44, 1, 17–25.
187. STREETER, H. W., and B. E. PHELPS. A Study of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River. *U.S. Public Health Service*. 1925, 75.
188. 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, 1827–1847. www.hydrol-earth-syst-sci.net/19/1827/2015/doi:10.5194/hess-19-1827-2015.
189. 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.
190. ŠTARAS, A. *Lietuvos teritorijos vandens balanso struktūros pokyčių tyrimas, remiantis skirtingais klimato kaitos scenarijais*. Daktaro disertacija, Vilniaus universitetas, 2005.
191. ŠTARAS, A. Vandens balanso modelių pritaikymo galimybės upių nuotėkio analizei. *Geografija*. 2002, 38(1), 11–14.
192. ŠTEFUNKOVÁ, Z. HLAVČOVÁ, K., LAPIN, M. Runoff change scenarios based on regional climate change projections in mountainous basins in Slovakia. *Contrib. Geophys. Geod.* **2013**, 43, 327–350.
193. TAMM, O., LUHAMAA, A., and T. TAMM. Modeling future changes in the North–Estonian hydropower production by using SWAT. *Hydrology Research*. 2016, 47, 835–846.
194. TEUTSCHBEIN, C., and J. SEIBERT. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*. 2012, 29 (12), 456–457. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.05.052.
195. The FyrisNP model Version 3.1, a user's manual, 2008.
196. *The Nature Conservancy. Indicators of Hydrologic Alteration Version 7.1 User's Manual*. rPurview LLC, 2009, 81.
197. TRZASKA, S., and E. SCHNARR. *A review of downscaling methods for climate change projections*. African and Latin American resilience to climate change (ARCC), 2014.
198. TURNER, S., HEJAZI, M., KIM, S., CLARKE, L., and J. EDMONDS. Climate impacts on hydropower and consequences for global electricity supply investment needs. *Energy*. 2017, 141, 2081–2090.
199. U.S. Fish & Wildlife Service. [žiūrėta 2020–05–31]. Prieiga per internetą <https://www.fws.gov/ecological-services/energy-development/hydropower.html>.
200. U.S. Hydropower Market Report. U.S. Department of Energy, 2021.
201. United Nations framework convention on climate change. United Nations, 1992.
202. United States Department of Energy. Effects of Climate Change on Federal Hydropower; The Second Report to Congress; U.S. Department of Energy: Washington, DC, USA, 2017; p. 35.

203. VALIUSKEVIČIUS G., RIMKUS E., STANKŪNAVIČIUS G., BUKANTIS A. (2005) Nemuno nuotėkio prognozavimo, panaudojant HBV modelį, galimybių įvertinimas. *Meteorologija ir hidrologija Lietuvoje: raida ir perspektyvos*. Respublikinės mokslinės konferencijos, vykusios 2005 metų kovo 23 d. pranešimai: 72–73.
204. Van VUUREN, D. P., et al. Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. *Climate Change*. 2007, 81, 119–159.
205. Van VUUREN, D. P., LUCAS, B. P. L., and M. G. J. den ELZEN. Long-term multigas scenarios to stabilise radiative forcing – Exploring costs and benefits within an integrated assessment framework. Multigas mitigation and climate policy. *Energy*. 2006, 3, (Special Issue), 201–234.
206. VERNOOIJ, M. G. M., QUERNER, E. P., JACOBS, C., and J. FROEBRICH. *Flow characterization temporary streams: using the model SIMGRO for the Evrotas basin, Greece* (No. 2126). Alterra, 2011.
207. VILLARINI, G. On the seasonality of flooding across the continental United States. *Adv. Water Resour.* 2016, 87, 80–91.
208. WAGNER, T., et al. Impacts of climate change on stream flow and hydro power generation in the Alpine region. *Environmental Earth Sciences*. 2017, 76, 4.
209. *Water erosion prediction project (WEPP): development history, model capabilities and future enhancements*. Agriculture research service Vol. 50(5): 1603–1612 2007 American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 0001–2351.
210. *WATFLOOD / CHARM User's Manual*, 2018.
211. WATSON, R.T., and the Core Writing Team (Eds.). IPCC, 2001: *Climate Change 2001: Synthesis Report*. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA. 2001, 398 pp.
212. WILLIAMS, J.R., NICKS, A.D., and J.G. ARNOLD. Simulator for Water Resources in Rural Basins. *ASCE Hydr. Div.* III(6):970–986. 1985.
213. WINTER, T.C. Uncertainties in estimating the water balance of lakes. *The Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*. 1981, 17, 82–115.
214. (WMO, 2019) Guidance on Environmental Flows. Integrating E-flow Science with Fluvial Geomorphology to Maintain Ecosystem Services. WMO. 2019. ISBN 978–92–63–11235–4
215. WOODS, J. 2017. *Hydrokinetic turbine systems for remote river applications in cold climates*. A Thesis submitted to the Faculty of Graduate Studies of The University of Manitoba. In partial fulfilment of the requirement of the degree of Doctor of Philosophy. Department of Mechanical and Manufacturing Engineering the University of Manitoba Winnipeg, Manitoba, 172.
216. World Energy Council (2016). *World Energy Resources. Hydropower 2016*.
217. World Energy Outlook 2019, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>
218. XUE, L., ZHANG, H., YANG, C., ZHANG, L., and C. SUN. Quantitative Assessment of Hydrological Alteration Caused by Irrigation Projects in the Tarim River basin, China. *Scientific Reports*. 2017, 7, 4291. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04583-y>.
219. YAO, W., et al. Developing a Model to Assess the Potential Impact of TUM Hydropower Turbines on Small River Ecology. *Sustainability*. 2018, 10, 1662. 10.3390/su10051662.

220. YATES, D. *WatBal – an integrated water balance model for climate impact assessment for river runoff*. WP-94-64, IIASA, Laxenburg, Austria, 1994.
221. ZARFL, C., LUMSDON, A.E., BERLEKAMP, J., TYDECKS, L., and K. TOCKNER. A global boom in hydropower dam construction. *Aquatic Sciences*. 2015, 77, 161–170.
222. ZHANG, L., PANG, M., WANG, C., AND S. ULGIATI. Environmental sustainability of small hydropower schemes in tibet: an emergy-based comparative analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2016, 135:97–104.

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

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

1. Jakimavičius D., **Adžgauskas G.**, Šarauskienė D., Kriauciūnienė, J. Climate Change Impact on Hydropower Resources in Gauged and Ungauged Lithuanian River Catchments. *Water*, 2020, 12, 3265, <https://doi.org/10.3390/w12113265>
2. Šarauskienė D., **Adžgauskas G.**, Kriauciūnienė J., Jakimavičius D. Analysis of Hydrologic Regime Changes Caused by Small Hydropower Plants in Lowland Rivers. *Water* 2021, 13(14), 1961; <https://doi.org/10.3390/w13141961>

Straipsniai tarptautinių konferencijų pranešimų medžiagoje

1. **Adžgauskas G.** Review of riverine hydro energy research in Lithuania // The 16th International Conference of Young Scientists on Energy Issues (CYSENI 2019) Kaunas, Lithuania, May 23–24, 2019. Kaunas: LEI, 2019, ISSN 1822–7554. p. 456–459
2. **Adžgauskas G.**, Jakimavičius D. Evaluation of hydropower energy production in the context of climate change In: 6th IAHR Europe Congress, June 30th – July 2nd, 2020, Warsaw, Poland. Warsaw: International Association for Hydro–Environment Engineering and Research, 2020, p. 459–460. ISBN 978–83–66847–01–9.
3. **Adžgauskas G.**, Jakimavičius D. Regional climate models data adaptation for the projection of the lithuanian rivers runoff In: The 17th International Conference of Young Scientists on Energy and Natural Sciences Issues (CYSENI 2021) Kaunas, Lithuania, May 24–28, 2021. Kaunas: Lietuvos energetikos institutas, 2021, p. 1176–1184. ISSN 1822–7554.

Pranešimai tarptautinėse konferencijose

1. **Adžgauskas G.** Review of riverine hydro energy research in Lithuania // The 16th International Conference of Young Scientists on Energy Issues (CYSENI 2019) Kaunas, Lithuania, May 23–24, 2019. Kaunas: LEI, 2019, ISSN 1822–7554. p. 456–459
2. **Adžgauskas G.**, Jakimavičius, D. Evaluation of hydropower energy production in the context of climate change. 6th IAHR Europe Congress, Varšuva.
3. **Adžgauskas G.** Regional climate models data adaptation for the projection of the Lithuanian rivers runoff. CYSENI 2021.
4. **Adžgauskas G.**, Jakimavičius, D. Estimation of uncertainties in the projection of Lithuanian rivers hydroenergy resources. CYSENI 2022.
5. **Adžgauskas G.**, Jakimavičius, D. Climate change impact on hydrokinetic resources of Lithuanian rivers. Nordic Hydrological Conference 2022, Tallinn, August 15–18, 2022.

PRIEDAI

1 priedas. Hidroelektrinių, kurios buvo tirtos darbe, techninės charakteristikos.

Nr.	Pavadinimas	Upė	Savivaldybė	Atstumas nuo žiočių, km	Koordinatės		HE pastatymo metai	Užtvankos pastatymo metai	Maksimalus slėgio aukštis, m	Vandens telkinio plotas, ha	HE galia, kW	Turbinų skaičius
					X	Y						
1	Akmenių HE	Lėvuo	Kupiškio r.	85,6	546590	6183832	1999	1836	2,1	9,4	35	1
2	Alsėdžių malūno HE	Sruoja	Plungės r.	27,6	378660	6211992	2004	1930	4,2	2,3	75	1
3	Angirių HE	Šušvė	Kėdainių r.	25	483806	6127355	2000	1980	15,8	248,3	1250	2
4	Antalieptės HE	Šventoji	Zarasų r.	211,2	618031	6170725	1961	–	35,3	1572,3	2550	3
5	Antanavo HE	Šešupė	Marijampolės	177	461352	6059440	1957	1957	5,2	107,7	400	2
6	Aukštadvario HE	Verknė	Trakų r.	56,5	533348	6048207	2000	1960	15,5	293,5	180	2
7	Bagdononių HE	Strėva	Trakų r.	60,5	545475	6054221	1960	1960	10,9	95,5	90	1
8	Balsių HE	Virvyčia	Akmenės r.	27,7	411638	6218736	2002	–	3,3	11,6	202	2
9	Balskų HE	Jūra	Tauragės r.	78	382765	6137971	2005	1984	13	280	2900	2
10	Baltininkų HE	Virvyčia	Telsių r.	77,7	400421	6191591	2005	–	4,3	33,6	260	2
11	Baltosios Ančios HE	Baltoji Ančia	Lazdijų r.	4,3	487251	5982451	1955	1955	12,2	249,5	650	2
12	Bartkuškio HE	Musė	Širvintų r.	31	560037	6088725	2001	1986	8	60,6	150	2
13	Biržuvėnų HE	Virvyčia	Telsių r.	72	403469	6196576	2004	1929	3,5	8,66	200	2
14	Brunknynės (Borovkos) HE	Šventelė – Dėmė	Švenčionių r.	3	626604	6122210	2006	1827	4,4	0,98	20	1
15	Bublių HE	Obelis	Kėdainių r.	10,5	504601	6127759	2002	1980	4,9	189	150	1
16	Bublių HE	Strėva	Kaišiadorių r.	9	519758	6076477	1999	–	7	21,7	450	3

17	Druskininkų HE	Ratnyčėlė	Varėnos r.	1,7	498937	5985447	1998	XIX a. p.	3,9	5	40	2
18	Dvariukų HE	Mūša	Pakruojo r.	81,1	503962	6215098	2001	1982	5	136,4	500	1
19	Eišiškių HE	Verseka	Šalčininkų	22,3	555920	6011425	1952	1952	9,2	128,6	180	3
20	Elektrėnų HE	Strėva	Elektrėnų	40,5	541457	6069357	2000	1962	10	1387	150	2
21	Gabrėlių HE	Nevėža	Anykščių r.	11,1	574359	6145559	2001	1936	5	3,4	50	1
22	Gondingos HE	Babrungas	Plungės r.	15,5	360803	6198468	1961	1961	26,2	88	850	1
23	Grigiškių HE	Vokė	Vilniaus	2,6	569773	6060446	1999	1934	4,2	9,7	340	2
24	Gudų HE	Virvyčia	Mažeikių r.	6,6	409431	6229138	2002	–	3,3	7,9	230	2
25	Gulbinų HE	Žadikės	Radviliškio r.	0,8	474314	6160450	2006	1975	9,3	4,8	90	1
26	Janušonių HE	Gynia	Kauno r.	8	490227	6110706	2010	1977	13,95	54,9	100	1
27	Jautakių HE	Venta	Mažeikių r.	199	392419	6243183	2005	1886	2,9	25,5	250	3
28	Jucių HE	Virvyčia	Telsių r.	65,2	405617	6199642	2002	–	3,4	25,4	100	2
29	Jundeliškių HE	Verknė	Birštono	6	508239	6049579	2000	1958	6	14,8	210	3
30	Juodeikių HE	Varduva	Mažeikių r.	6,7	389113	6251923	1996	1979	12,5	261,4	820	2
31	Juodkiškių HE	Obelis	Kėdainių r.	5,3	500949	6128134	1998	1975	10,8	83,4	460	1
32	Juodupės HE	Vyžuona	Rokiškio r.	24,5	599703	6218395	2005	1976	6,3	9,6	75	1
33	Jurbarkų HE	Mituva	Jurbarko r.	7,5	418922	6107062	2003	1985	10	219,5	675	1
34	Jusinės malūno HE	Jusinė	Vilniaus	0,1	605356	6089864	–	–	3,5	2,46	24	1
35	Kadrėnų HE	Mūšia	Ukmergės r.	1,6	553490	6129477	2002	1982	5,5	92,8	80	1
36	Kairiškių HE	Virvyčia	Akmenės r.	20,2	411628	6222737	2001	1951	3,2	980	160	2
37	Kapčiamiesčio HE	Nieda	Lazdijų r.	0,9	477316	5985192	1956	1956	7	21	150	2

38	Kapėnų HE	Virvyčia	Akmenės r.	13,4	408863	6225949	2004	1910	5,5	13,6	288	2
39	Kaulakių HE	Luknė	Raseinių r.	4	453028	6143090	2003	1977	16,3	36,5	165	1
40	Kauno HE	Nemunas	Kauno	223,4	500032	6082049	1959	1959	20,5	6350	100800	4
41	Kavarsko HE	Šventoji	Anykščių r.	69,1	559693	6145135	2002	1962	5,1	78,3	1500	2
42	Kelmės HE	Kražantė	Kelmės r.	–	433371	6166469	–	–	3,1	–	60	–
43	Kernų HE	Erlas	Skuodo r.	0,5	346069	6235613	2005	–	7,9	76,7	110	1
44	Krūminių HE	Verseka	Varėnos r.	7,5	553929	6018273	2002	1975	6,4	53	160	1
45	Kulšėnų HE	Varduva	Mažeikių r.	58	381266	6229738	1998	–	3,4	2,2	115	1
46	Kuodžių HE	Venta	Mažeikių r.	188,9	390383	6250784	2005	–	4,5	1	600	4
47	Labūnavos HE	Barupė	Kėdainių r.	5	493707	6116236	2003	1977	10	109,9	160	1
48	Lakinskių HE	Šešupė	Kalvarijos	243,4	454642	6031783	2002	1934	3,4	4,7	150	2
49	Leckavos HE	Ašva	Mažeikių r.	0,6	392466	6252894	2003	1954	7	11,7	125	1
50	Lentvario HE	Bevardis F–I	Trakų r.	8,3	567565	6059140	1998	1951	24	29	65	1
51	Liubavo HE	Žalesa	Vilniaus r.	–	586144	6080216	–	–	4,2	–	20	–
52	Liudvinavo HE	Šešupė	Marijampolės	217,5	458360	6038697	2006	2006	3,95	7,1	230	2
53	Marijampolės I tv. HE	Šešupė	Marijampolės	201	457413	6046720	1999	1935	3	11,03	150	1
54	Marijampolės II tv. HE	Šešupė	Marijampolės	201,4	457595	6043898	1998	1974	8,3	75	600	4
55	Motiejūnų HE	Širvinta	Širvintų r.	86,5	565730	6099380	1959	1959	5,2	86,9	240	2
56	Mūro Vokės HE	Vokė	Vilniaus m.	9,5	572241	6057417	2010	1932	7,6	12,2	300	1
57	Neičkampio HE	Dovinė	Marijampolės	0,6	459578	6039429	1953	1951	4,8	20,3	240	2
58	Pabradės HE	Dubinga	Švenčionių r.	1,4	612507	6096465	2003	–	10,5	29,6	315	1

59	Pabradės kartono fabrikas HE	Dubingos kanalas	Švenčionių r.	1,3	612893	6096154	2002	1929	10,2	–	132	1
60	Padysnio HE	Dysna	Ignalinos r.	166	650797	6144979	1959	1959	3,5	3075	150	2
61	Pagryžuvio HE	Gryžuva	Kelmės r.	7,4	446602	6164248	–	–	6,35	0,22	78	1
62	Pajiesio HE	Jiesia	Kauno	21	494354	6068706	2008	1975	7,5	64,8	100	1
63	Pamusėlių HE	Musė	Varėnos r.	0,8	532213	6024824	2005	–	2,6	0,64	30	1
64	Pastrėvio HE	Strėva	Kaišiadorių r.	30,4	533041	6072693	1997	1955	10,4	18,5	320	1
65	Pilviškių HE	Šešupė	Vilkaviškio	156,5	450106	6064088	2002	–	0	6,8	220	2
66	Plikų HE	Gynėvė	Raseinių r.	2	470420	6120054	2003	1975	15,5	42,5	98	1
67	Plungės HE	Babrungas	Plungės r.	21,5	365674	6199928	1993	1993	3,7	1,5	40	1
68	Puodkalių HE	Bartuva	Skuodo r.	62,4	346662	6235486	2005	(1984)	5,2	8	80	1
69	Puskelnių HE	Šešupė	Marijampolės	189	460370	6052734	2005	–	3,2	19,8	250	2
70	Rakiškės HE	Virvyčia	Akmenės r.	23,1	412104	6220968	1999	–	4	8,7	230	2
71	Ramučių HE	Tenenys	Šilutės	–	346659	6144713	–	–	7,25	–	195	–
72	Renavo HE	Varduva	Mažeikių r.	44,2	380959	6235149	1995	1955	8,9	29,1	300	1
73	Rokantiškių HE	Vilnia	Vilniaus m.	11,6	588903	6063117	2004	1934	4,5	13,4	225	1
74	Rudikių HE	Venta	Akmenės r.	251,7	428879	6221712	2002	–	2,5	7,7	70	2
75	Sablauskių HE	Dabikinė	Akmenės r.	16	429369	6236914	2007	1975	3,9	125	39	2
76	Semeliškių HE	Strėva	Elektrėnų	56,6	542155	6059319	2001	1932	2,6	1,2	30	1
77	Šerkšnėnų HE	Šerkšnė	Mažeikių r.	23,8	389762	6235958	1997	–	4,6	16,8	64	1
78	Širvintų HE	Širvinta	Širvintų r.	82	560976	6101622	2002	1972	4	51,9	180	2
79	Skleipių HE	Virvyčia	Mažeikių r.	10,8	408312	6226924	1999	–	3,7	8	230	2

80	Skuodo HE	Bartuva	Skuodo r.	55	346145	6239474	2000	1982	8	85,9	220	2
81	Spiečiųų HE	Virinta	Molėtų r.	55	590882	6131889	2006	–	2,8	0,8	10	1
82	Stimiškių HE	Suosa	Kupiškio r.	1,6	553672	6183187	1974	1974	10,3	13,3	60	1
83	Sukončių HE	Virvyčia	Telšių r.	29,8	411702	6216486	1997	(1997)	4,4	10	320	2
84	Šventelės HE	Šventelė–Dėmė	Švenčionių r.	–	627804	6121381	–	–	3,8	–	30	–
85	Svobiškio HE	Virinta	Molėtų r.	51	588363	6133151	1999	–	4,6	7,6	45	1
86	Tryškių HE	Virvyčia	Telšių r.	–	410760	6214413	–	–	3,15	–	90	–
87	Tūbausių HE	Akmena–Danė	Kretingos	–	330158	6206246	–	–	8,5	–	238	–
88	Ubiškės HE	Patekla	Telšių r.	5,1	406292	6207440	1997	1977	10	73	350	1
89	Ukrinų HE	Varduva	Mažeikių r.	27,6	381945	6241951	2002	–	3,3	9,6	110	1
90	Užvenčio HE	Venta	Kelmės r.	330	415866	6184313	2004	1759	3	16,2	24	1
91	Vadagių HE	Varduva	Mažeikių r.	37,1	381073	6237248	2004	–	3,5	5,6	110	1
92	Vaitiekūnų HE	Šušvė	Radviliškio r.	60	478005	6150565	2001	1979	10,5	141,6	370	2
93	Valtūnų HE	Siesartis	Ukmergės r.	11,2	559440	6128306	2001	2001	3,8	2,54	170	1
94	Varėnos HE	Varėnė	Varėnos r.	2,1	535756	6013489	2000	1956	5	19,9	150	1
95	Vieksnių HE	Venta	Mažeikių r.	221,8	408297	6234096	2002	1897	3	17	95	2
96	Volungiškių HE	Mituva	Jurbarko r.	69	444423	6117343	2003	1981	8	68,1	126	1
97	Žerkščių	Venta	Akmenės r.	237	417486	6229245	2012	1926	1,6	–	29	1

INFORMACIJA APIE AUTORIŲ

- Kaišiadorių A. Brazausko gimnazija, 1973–1984 m.
- Kauno technologijos universitetas, 1984–1989 m., inžinieriaus elektriko diplomas.
- Mykolo Romerio universitetas, 2012–2014 m., viešojo administravimo (Energetikos politikos ir vadybos specializacija) magistro laipsnis.
- Lietuvos energetikos institutas, 2018–2022 m., Hidrologijos laboratorija, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija (T 004).

SUMMARY

INTRODUCTION

Increasing energy demand meeting from fossil fuels is leading to an increase in greenhouse gas emissions. This is leading to a rise in average temperature - one of the consequences of global climate change. Governments and scientists around the world have agreed that climate change impact can be mitigated by using more renewable energy sources, and have defined the scale at which this should be done. Lithuania's renewable energy commitments are set out in the National Energy and Climate Plan, which sets out targets for all EU Member States by 2030 to halt climate change. The aim is to reduce greenhouse gas emissions by 40% compared to 1990, improve energy efficiency by at least 32.5% and increase the share of renewables in total energy mix to 32% (Lietuvos Respublikos Seimas, 2018a). Hydropower is one of the renewable forms of energy. It is divided into hydropotential and hydrokinetic power. Worldwide, hydroelectricity generated by conventional hydropower plants accounts for the largest share of electricity from renewable sources. It is therefore necessary to assess Lithuania's hydropotential and hydrokinetic energy resources. As the development of hydropotential power plants is currently restricted by law in Lithuania, the emergence of hydrokinetic power plants and the use of hydrokinetic energy resources could add to the share of renewables in the country's overall electricity generation. The hydrological regime of Lithuania's rivers is affected by climate change, resulting in changes in riverine runoff. Changing riverine runoff affects transformation in the hydropower resources (hydropotential and hydrokinetic) of rivers. The question is, how will the ongoing climate change affect the hydropotential and hydrokinetic energy resources of Lithuanian rivers? Will small hydropower plants be able to operate under conditions where the seasonal shift in river flows, especially during the dry summer season, results in reduced river discharge? How will small hydropower plants change the hydrological regime of rivers? The potential hydropower resources of Lithuanian rivers have been quite well explored so far, while there only have been few studies on hydrokinetic resources. What is the theoretical potential for hydrokinetic power generation in Lithuania and how will it change due to climate change? Moreover, there is no forecast of Lithuanian river hydropower resources under RCP climate scenarios for the 21st century.

This work examines how climate change will change the runoff of Lithuanian rivers, leading to changes in the kinetic and potential hydropower of rivers. It is important to identify a targeted research methodology that answers the questions raised. With the increasing impact of global climate change, which is also being felt in Lithuania, hydrological forecast is playing an increasingly important role in scientific research. In order to assess the forecast of river runoff in Lithuania, it is necessary to investigate how it has varied in the past. Using different climate models and climate scenarios, it is necessary to forecast river runoff, on which river hydropower resources depend directly.

Hydroenergy is undoubtedly one of the most widely used forms of renewable energy, due to its advantages such as dams for water supply, irrigation, flood control,

recreation, navigation, etc., but the production of electricity from hydropower is also associated with negative environmental impacts, such as changes in the hydrological regime of rivers due to hydropower plant operations. It is therefore necessary to determine how the operation of small hydropower plants has affected the hydrological regime of rivers. By assessing the impact of hydropower plants on the hydrological regime of rivers, it is possible to make recommendations for the efficient use of hydropower in the future, taking into account environmental protection requirements.

Taking into consideration that the development of hydropotential power plants in Lithuania has been stopped by legislation, as well as the impact of these plants on the hydrological regime of rivers, it will be possible to make recommendations to the legislators to create the necessary legislation for the development of hydrokinetic power plants in Lithuania. This would pave the way for the emergence of a new type of renewable energy in Lithuania or could increase the contribution of hydropower to Lithuania's overall electricity generation.

Relevance of the research

In recent decades river runoff is being changed by climate change phenomena (increased air temperature and evaporation, changed frequency of extreme climate phenomena). In future there are even greater alterations of river runoff, especially in the dry and wet seasons. River water content determines hydropower resources, which consist of river water flow (kinetic) and river water head (potential) energy. Potential future changes of river runoff are going to influence conditions and amounts of energy production. Absence of the projections of Lithuanian hydropower resources for the periods (2021-2040) and (2081-2100) make it difficult to plan efficiently the resource management in changing environmental conditions.

Object of the research

The hydropotential and hydrokinetic energy resources of the rivers Nemunas, Venta and Lielupe river basin districts (Nemunas, Merkys, Neris, Šventoji, Žeimenė, Nevėžis, Šušvė, Dubysa, Šešupė, Jūra, Šešuvys, Minija, Bartuva, Venta, Mūša, and Lėvuo) were studied.

The aim of the doctoral thesis

To assess the change of hydropower resources of Lithuanian rivers in the past (1961-2020) and in the near (2021-2040) and distant (2081-2100) future, to study the impact of small hydropower plants on the hydrological regime of rivers, and to develop recommendations for the efficient use of hydropower resources in respect to environmental requirements.

The tasks of the doctoral thesis

1. Creation of hydrological models of Lithuanian rivers and, using them and the hydromodule mapping method, to project runoff for gauged and ungauged rivers under climate scenarios.

2. Projecting of hydrokinetic and hydropotential resources for the 21st century based on river discharge forecasts and to assess the uncertainties in these forecasts.

3. Assessing the impact of small hydropower plants on the hydrological regime of rivers.

4. Preparation of recommendations on efficient use of hydropower in future with respect to environmental requirements.

The hypothesis of the doctoral thesis

In the future, change in Lithuanian riverine runoff due to climate change will lead to a reduction in hydropower resources.

Doctoral thesis defence statements

- A changing climate will not only reduce both kinetic and potential hydropower resources of rivers in the future, but will also lead to their seasonal shift: an increase in winter and a decrease in spring
- Climate models have a greater impact on the uncertainty of hydropower resources projections than climate scenarios
- Hydropower plants cause significant changes in the hydrological regime of rivers.

Scientific novelty and application of doctoral thesis

The work develops a methodology for the first time to project the hydrokinetic and hydropotential energy resources of the gauged and ungauged rivers in Lithuania in the near (2021-2040) and distant (2081-2100) future using hydromodule (q , l/s·km²) mapping method, regional climate models and RCP climate scenarios. To assess the accuracy of the forecasts, an assessment of the uncertainty in hydropower forecasts was carried out and the impact of small hydropower plants on the hydrological regime of rivers was determined. The new knowledge on the changes in Lithuania's riverine energy resources in the 21st century has led to the development of good practice recommendations for legislators, environmental authorities and hydropower plant owners on how to make rational use of the changed water resources.

Publications

The material of the doctoral thesis has been published in 2 papers in Clarivate Analytics journals with citation index and 3 papers in international scientific conferences.

The structure of doctoral thesis

The doctoral thesis consists of 118 pages. It contains an introduction, six chapters with 35 figures, 7 tables and 5 conclusions. The literature list contains 222 references.

1. METHODOLOGY and DATA

The thesis research was carried out in 8 phases (Figure 1). In the first stage, hydrometeorological and geographical databases were compiled and used in the study. In the second stage, the kinetic and potential energy resources of Lithuanian rivers in the period 1961-2020 were assessed. In the third stage, hydrological models of 15 Lithuanian river basins (Nemunas, Merkys, Neris, Šventoji, Žeimena, Nevėžis, Šušvė, Dubysa, Šešupė, Jūra, Minija, Bartuva, Venta, Mūša, and Lėvuo) have been developed with the use of HBV software. In the fourth stage, the data from three climate models for the RCP2.6 and RCP8.5 scenarios were adapted to the Lithuanian territory using the QM method. In the fifth stage, the runoff of the gauged and ungauged rivers was projected for the near (2021-2040) and distant (2081-2100) future. In the sixth stage, the hydrokinetic and hydropotential energy resources of the rivers in the near and distant future were estimated using the runoff forecasts and the uncertainties in the forecasts were assessed. In the seventh stage, an assessment of the impact of small hydropower plants on the hydrological regime of rivers was carried out using the IHA methodology. In the final stage, the results of this study were used to develop recommendations for the efficient use of hydropower in the future, considering environmental aspects.

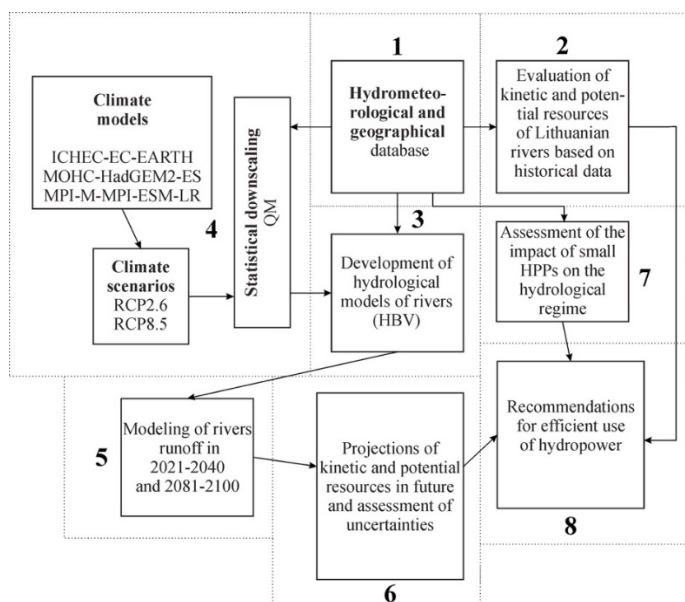


Fig. 1 Operating principle diagram

1.1. Hydropower assessment of Lithuanian rivers using historical data

1.1.1. Kinetic energy assessment

Kinetic resources were assessed in the major Lithuanian rivers (the Nemunas and Neris) and separately in the smaller ones. The assessment of technically available

resources (flow technical capacity obtained from a hydrokinetic device) was made using the equation:

$$P_{TK} = \eta \frac{\rho}{2} v^3 A_D \frac{BL}{20h^2} \quad (1)$$

$$h = 0.29 \bar{Q}^{0.45} k^{0.39} I^{0.2} \quad (2)$$

$$B = 8 \bar{Q}^{0.30} k^{0.08} I^{0.2} \quad (3)$$

$$v = 0.43 \bar{Q}^{0.25} k^{0.53} I^{0.4} \quad (4)$$

$$E_{TK} = P_{TK} t_{TK} \quad (5)$$

where P_{TK} is technical hydrokinetic capacity, W; η is device power coefficient (average value is 0.30 according to), ρ is fluid density, kg m^{-3} , v is flow velocity, m s^{-1} , A_D is device swept area, m^2 , B is a part of the river channel width, where depth is greater than turbine diameter, m, L is segment length, m, h is bed depth equal to device turbine diameter, m, Q is the average annual discharge, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, k is the modular discharge coefficient, I is the bed slope, E_{TK} is hydrokinetic generation, Wh, t_{TK} is hydrokinetic device's working time in hours.

1.1.2. Potential energy assessment

Potential hydropower resources were assessed at existing hydropower plants, without planning for their future development. Currently, there are 97 operating hydroelectric power plants, which are built on 57 Lithuanian rivers. The projection of potential hydropower resources was performed using discharge rates derived from the specific runoff isoline maps generated for different future periods.

The potential hydropower resources of the selected HPP were evaluated using the formula:

$$P_P = 7 \Delta H Q \quad (6)$$

$$E_P = P_P t_P \quad (7)$$

where P_P is hydropotential capacity, kW, E_P is potential generation, kWh, ΔH is the height of the HPP dam head, m, Q is monthly discharge ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), t_P is HPP working time in hours (in Lithuania, on average, 4000 h a^{-1}).

1.2. Prediction of kinetic and potential energy of rivers using regional climate model outputs

1.2.1 Application of the HBV model for river runoff prediction

The HBV model was used to simulate the runoff of gauged Lithuanian rivers. HBV model calculations were performed in three steps, estimating (1) precipitation amount entering the ground, (2) slope runoff, as well as (3) runoff in the watercourse and runoff transformation. HBV is based on water balance equation:

$$P - E - Q = \frac{d}{dt} [SP + SM + UZ + LZ + V] \quad (8)$$

where P is precipitation, E is evaporation, Q is discharge, SM is soil moisture, SP is snow pack, UZ is upper groundwater zone, LZ is lower groundwater zone, V is lake or dam volume.

The daily values of Q in the Lithuanian river and of air temperature and precipitation were used to create hydrological models. Information about the modelled catchment area, presence of lakes and forests, mean elevation (above sea level) of the area, hydrometeorological data from WGS and MS were required as well. Main output data of HBV model was time series of daily water discharge in the modelled river catchments. The period from 1986 to 1995 was selected for model calibration, whereas the period of 1996-2005 was used for validation. The calibration procedure consisted of changing model calibration parameters and comparing calculated discharge values with the measured ones.

1.2.2. Adaptation of regional climate model outputs for river runoff modelling

Air temperature and precipitation data extracted from three regional climate models were used to simulate river runoff and to evaluate its projections in the future. The projections were prepared using RCP2.6 and RCP8.5 scenarios. Adaptation of climate models data (air temperature and precipitation) for the Lithuanian territory was performed using the quantile mapping method:

$$St^{Obs} = h(St^{CMRP}) = ECDF^{Obs}(ECDF^{CMRP}(St^{CMFut})) \quad (9)$$

where St^{Obs} is the observed meteorological parameter, St^{CMRP} is climate model output for the reference period, $ECDF^{Obs}$ is the empirical cumulative distribution function for the observed period, $ECDF^{CMRP}$ is the empirical cumulative distribution function for climate model reference period, St^{CMFut} is a meteorological parameter, which is modelled by climate model for the future period. All estimated results were compared with the values of the reference period (1986-2005).

1.2.3. The runoff projection of ungauged rivers in the 21st century

When assessing the potential energy resources of ungauged Lithuanian rivers, there is a problem of lack of hydrological data. Therefore, it was not possible to develop hydrological models for the rivers in which observations were carried out only briefly or not at all. For this reason, the method of specific runoff (q , $l \times s \text{ km}^{-2}$) mapping was chosen to project the runoff of ungauged rivers. Using this method, isoline maps of specific runoff of Lithuanian rivers were created in the following order:

1) based on the results of hydrological modelling, monthly, seasonal and average annual runoff (Q , $m^3 s^{-1}$) were calculated at the studied WGSs for the periods of 1986-2005, 2021-2040 and 2081-2100 under RCP2.6 and RCP8.5 scenarios;

2) discharge of the gauged rivers Q ($m^3 s^{-1}$) was converted to specific runoff q ($l \times s \text{ km}^{-2}$) according to:

$$q = \frac{1000 \times Q}{A} \quad (10)$$

where q is specific discharge, $l \times s \text{ km}^{-2}$, Q is discharge, $m^3 s^{-1}$, A is river catchment area in the conversion place, km^2 ;

3) using the Spline method of interpolation (in ArcGIS), isoline maps of monthly, seasonal and annual q were created for the whole territory of Lithuania for the past (1985-2005) and future (2021-2040 and 2081-2100) periods;

4) in the ungauged river catchments, specific runoff q was calculated from coordinates of hydropower plant places in the created isoline maps;

5) for ungauged rivers where water resources were assessed, q was converted to Q :

$$Q = \frac{q \times A}{1000} \quad (11)$$

In order to assess the reliability of the created map of specific runoff isolines, four rivers (the Akmena, Lėvuo, Šalčia and Ūla) having discharge observation data of 1986-2005 and not used for the mapping were selected.

1.3. Assessing uncertainties in hydropower resources projections

The uncertainties of hydropower projections arise from the selection of climate models and RCP scenarios. All possible combinations of uncertainty sources were made to identify two main sources of uncertainty. Uncertainty was assessed in three steps: 1) the kinetic and potential energies for each model and RCP scenario were calculated; 2) the difference between the lowest and highest result was estimated; 3) using the ratio method, the contribution of each model and scenario to the final result was evaluated.

1.4. Assessing the impact of small hydropower plants on the hydrological regime of rivers

There are currently 97 small hydropower plants operating in Lithuania, with a total installed capacity of 27 MW. The operation of these plants has the potential to impact the hydrological regime of rivers. 10 HPPs (Aukštadvaris, Kavarskas, Širvintai, Angiriai, Balskai, Skuodas, Rudikiai, Kuodžiai, Akmeniai, Dvariukai) have been selected for the assessment of the impacts. The potential impact of HPP on the hydrological regime of the rivers was done by comparing the pre- and post-impact flow regimes using the IHA software. An easy-to-use open-access tool, called the Indicators of Hydrologic Alteration (IHA) was used to calculate the characteristics of natural and altered hydrologic regimes. The IHA method estimates 33 ecologically relevant, yet sensitive to human influences, statistics divided into five major groups (1. Magnitude of monthly water conditions; 2. Magnitude and duration of annual extreme water conditions; 3. Timing of annual extreme water conditions; 4. Frequency and duration of high and low pulses; 5. Rate and frequency of water condition changes). In the first step of the research, using daily discharge data, the IHA software was applied to calculate the annual means of all analysed flow characteristics and then evaluate the deviation between the modified and natural regime values. In the second step, the Range of Variability Approach (RVA) was applied to compare the variation in the IHA parameters before and after the installation of HPP on the river. The RVA

uses the pre-development natural variation of IHA parameter values as a reference to define the extent to which natural flow regimes have been altered. Water managers should strive to keep the distribution of annual values of the IHA parameters as close to the pre-impact distributions as possible. RVA target range of ± 1 standard deviation from the mean was selected.

1.5. Subject of research and data used

The object of this thesis was the following Lithuanian rivers: Nemunas, Merkys, Šalčia, Ūla, Neris, Šventoji, Žeimenė, Nevėžis, Šušvė, Dubysa, Šešupė, Jūra, Akmena, Šešuvis, Minija, Bartuva, Venta, Mūša, and Lėvuo. Daily river discharge data from 25 water gauging stations (WGS) and daily air temperature and precipitation data from 15 meteorological stations (MS) were used from 1986 to 2005. Hydrokinetic resources were estimated in all main Lithuanian rivers. Potential hydropower resources were assessed for 97 currently operating hydropower plants installed on 57 rivers. The near (2021-2040) and distant future (2081-2100) projections of the hydrokinetic and hydropotential resources were made using daily step output data (average air temperature, $^{\circ}\text{C}$; precipitation amount, mm) from ICHEC-EC-EARTH, MOHC-HadGEM2-ES, and MPI-M-MPI-ESM-LR regional climate models (a grid cell of 11×11 km). The data of regional climate models were derived from the EURO-CORDEX database (www.euro-cordex.net).

2. RESEARCH RESULTS

The research presented in these chapters is further described in published articles (see list of publications).

2.1. Assessment of the kinetic and potential resources of Lithuanian rivers using historical data

This research assessed the hydrokinetic energy resources of Lithuanian rivers for the period 1961-2020. The hydrokinetic energy resources of the smaller Lithuanian rivers varied from 202.6 to 276.1 GWh (Fig. 2, a.), and those of the Nemunas and the Neris from 962.0 to 1114.7 GWh (Fig. 2, b). During the study period, 97 hydroelectric power plants were in operation in Lithuania, producing electricity. Their number varied from 5 in 1981-1990 to 97 in 2011-2020. Electricity production in small hydroelectric power plants is also strongly linked to the change in their numbers. Between 1981 and 1990, they produced 4,387 GWh/year, and between 2011 and 2020 they produced 65,175 GW (Fig. 2, c). Meanwhile, the electricity production of Kaunas HPP varied from 338 GWh (2011-2020) to 395 GWh (1971-1980) (Fig. 2, d). The highest resources were in the spring season and the lowest in the summer season.

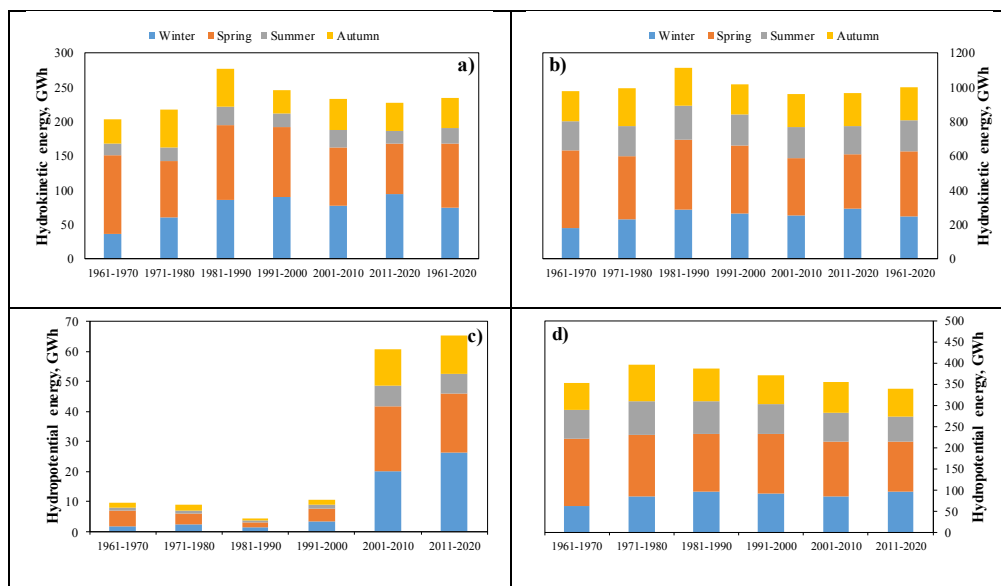


Fig. 2. Changes in hydro resources in Lithuania 1961-2020: kinetic resources of smaller Lithuanian rivers (a) and the Nemunas and Neris (b), potential resources of small hydropower plants (c) and the Kaunas hydropower station (d).

2.2. Projection of hydropower resources of Lithuanian rivers in the 21st century under climate scenarios

2.2.1. Calibration and validation of hydrological models

Calibration and validation of the created hydrological models of Lithuanian rivers was performed. The R of the selected river catchments ranged from 0.75 to 0.89 during the calibration period and from 0.60 to 0.83 during the validation period. NSE and RE (%) are also very important indicators describing the accuracy of calibration and validation. During the calibration period, NSE varied from 0.60 to 0.80, and during the validation period from 0.50 to 0.75. Meanwhile, the difference between the measured and modelled discharge (RE, %) was mostly positive during the calibration period and negative by a similar amount during the validation period.

2.2.2. Verification of the isoline mapping method

The isoline mapping verification method was done in two ways: (1) exported from a runoff isoline map using ArcGIS; or (2) calculated using real observation data at a particular WGS. Using the isoline method, the average annual q differed only by -7.7% - 3.8% from the calculated q based on observational data. The difference in Q varied from -11.5 to + 11.5% in individual seasons. Considering that in practice, the discharge is determined with an error of 40%, the result obtained was reliable and suitable for use in further studies .

2.2.3. Riverine runoff projections in gauged and ungauged river basins

Runoff projections of the gauged rivers were evaluated using hydrological modelling method. The reference period's runoff and its projections in the near and distant future were modelled according to an ensemble of three climate models and two RCP scenarios. In Lithuania, rivers are divided into three hydrological regions according to their runoff regime: western Lithuania, central Lithuania, and southeastern Lithuania. One river from each region was selected for runoff analysis: the Jūra from western Lithuania, the Mūša from central Lithuania, and the Merkys from the hydrological region of southeastern Lithuania (Fig. 3). According to this study, the river runoff will change the least in western Lithuania. The projections showed that, in the near future, the Jūra runoff will decrease from 4.0 to 7.5% compared to the reference period. Even greater changes are projected in the distant future when, according to the RCP2.6 scenario, the Jūra discharge is going to decline by 7.9% and under the RCP8.5 scenario by 10.4% (Fig. 3, a). The most unfavourable situation is possible in the hydrological region of central Lithuania. In the near future, according to the applied emission scenarios, the Mūša runoff will decrease by 6.6–10.7%, and in the distant future, from 11.9% under the RCP2.6 scenario and to 22.7% under the RCP8.5 scenario (Fig. 3, b). Meanwhile, in the hydrological region of southeastern Lithuania, the average changes in runoff have been identified. In the near future, the runoff in the Merkys will be lower from 2.2 to 5.8% compared to the reference period. However, at the end of the century, it will change more significantly and will be lower from 1.2 (RCP2.6) to 16.9% (RCP8.5) (Fig. 3, c).

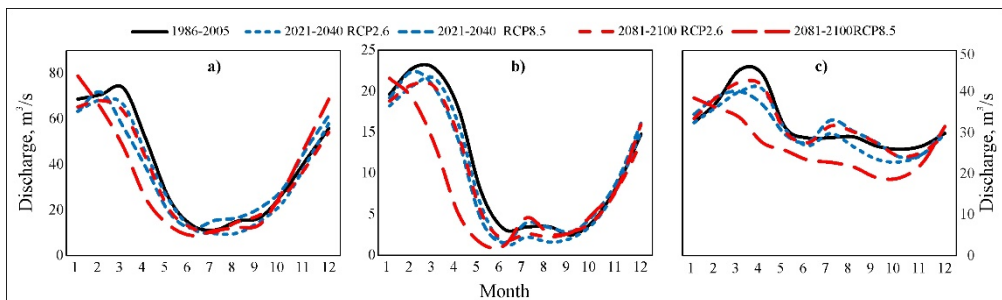


Fig. 3. Projected discharge variation in the investigated rivers in the 21st century: a) the Jūra river, b) the Mūša river, c) the Merkys river.

The method of specific runoff (q) mapping was used to project the runoff of ungauged rivers. Four maps in Fig. 4 show the change (%) in the projections of average annual specific runoff relative to the reference (1986-2005) period in the three hydrological regions. The smallest changes in q are predicted in the hydrological region of western Lithuania. In the near future, depending on the applied RCP scenario, the average q of the whole region will be from 2.2% to 4.5% lower than in the reference period. Small changes in q are likely in the distant future as well. Depending on the RCP scenario, the average values of q of the hydrological region

will decrease by 5.5 - 5.9% according to RCP2.6 and RCP8.5 scenarios respectively compared to the reference period. More considerable changes are possible in the hydrological region of south-east Lithuania; in this region, in the near future, the average region q will decrease from 0.7% to 5.5% depending on the RCP scenario, and in the distant future from 1.8% (under RCP2.6) to 13.3% (under RCP8.5). The biggest changes are projected in the hydrological region of central Lithuania. In the near future, the average q is expected to decline by at least 5.8% to 9.1%, and by the end of the century, from 8.7 (RCP2.6) to 16.6% (RCP8.5) compared to the reference period. Values of specific runoff (q) differ among rivers in the same hydrological region. This is due not only to local physical and geographical conditions, which are heterogeneous in individual hydrological region but also to microclimatic features.

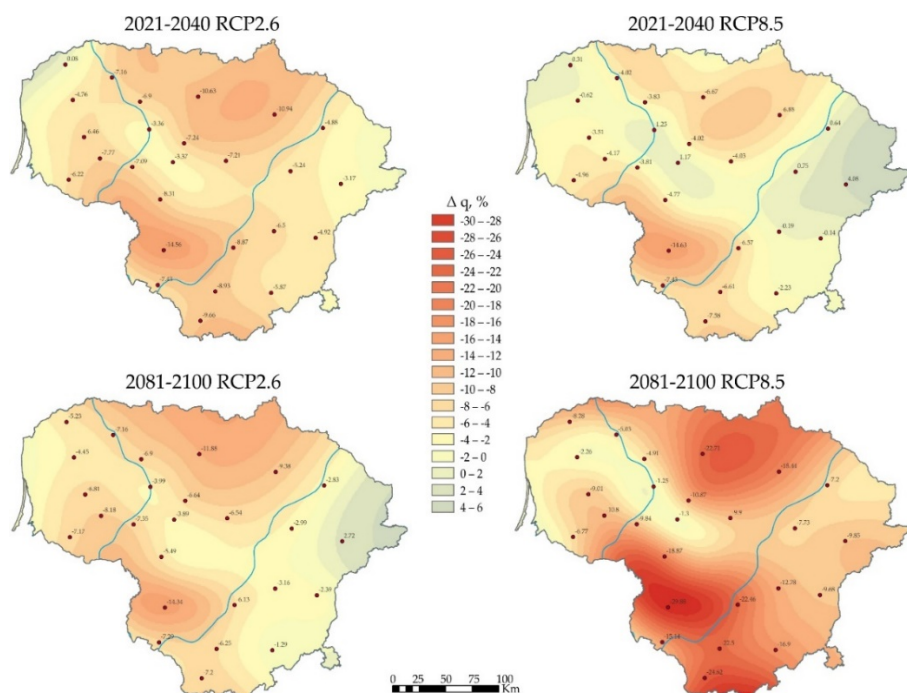


Fig. 4. Changes (in %) of specific runoff in Lithuanian rivers in the 21st century compared to 1986-2005.

2.2.4. Future changes in riverine kinetic energy resources

The assessment of kinetic energy resources of Lithuanian rivers was performed by applying technical restrictions, according to which the depth of the river bed must be greater than 0.5 m, and the flow velocity must exceed 0.4 m s^{-1} . During this study, the kinetic energy resources of the main Lithuanian rivers (excluding the major rivers Nemunas and Neris) were estimated, which amounted to 242 GWh a^{-1} in the reference period. The results show that hydrokinetic resources are expected to decline in both

near and distant future. In the near future, the kinetic resources of the smaller Lithuanian rivers will decrease by 3.8% to 7.9%, and in the distant future by 6.9% to 12.8% compared to the baseline period (Fig. 5, a.). The kinetic resources of the Nemunas and the Neris will change in a very similar way. In the near future, they will shrink between 4.5% and 7.2% and in the distant future between 6.0% and 14.9% (Fig. 5, b.). In the near future, the higher changes will be in the RCP2.6 scenario and in the distant future in the RCP8.5 scenario. It also shows the redistribution of kinetic energy between seasons. At the end of the 21st century, in the RCP8.5 scenario, the percentage of the annual amount (compared to the base period) will change as follows: in the winter season it will increase from 8.3% to 12.7%, in the spring season it will decrease from 8.8% to 14.2%, and in the summer and autumn seasons it will change slightly.

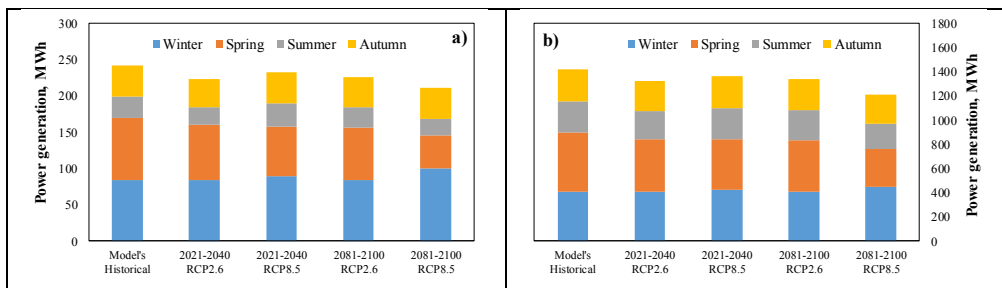


Fig. 5. Projections of kinetic resources of the main Lithuanian rivers (a) and Nemunas and Neris (b) in the near and distant future.

2.2.5. Future changes in the potential energy resources of rivers

During the reference period, 97 small HPPs generated 75 GWh a⁻¹ of electricity. In 2021-2040, depending on the RCP scenario, the hydropower production of small hydropower plants is projected to decrease from 4.5% to 8.6% compared to the reference period. In 2081-2100, even larger decrease in hydropower is expected: from 7.1% (RCP2.6) to 13.7% (RCP8.5) (Fig. 6, a). In 1986-2005, Kaunas HPP produced 386 GWh a⁻¹ of electricity. The projections indicated that the hydropower production of Kaunas HPP would decrease from 6.9% (RCP2.6) to 11.4% (RCP8.5) in the near future (Fig. 6, b) and decline from 7.4% to 30.6% under the selected scenario in the distant future. As shown in Figure 6, electricity production of Small HPPs and Kaunas HPP will gradually decrease during spring and increase slightly during the winter season. These changes are expected to occur due to altered runoff in the rivers of the Nemunas basin.

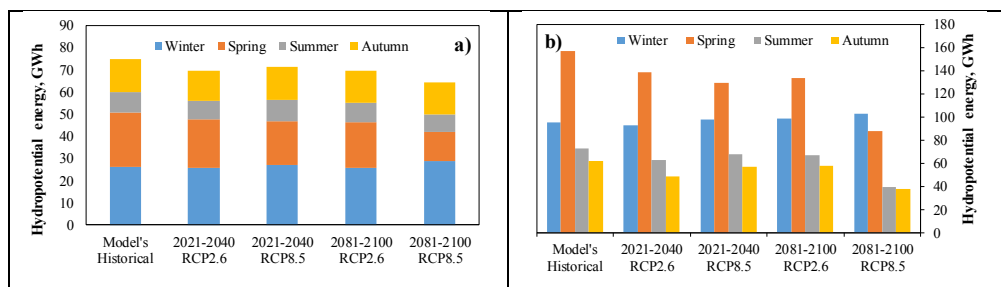


Fig. 6. Projection of energy production in small Lithuanian hydropower plants (a) and Kaunas HE (b) in the near and distant future.

2.2.6. Summary of riverine runoff and hydro-resources projections

Other research has shown that climate change will change river runoff in the future. However, different regions of the Earth may have different runoff projections due to differences in natural conditions. The thesis results demonstrate that even among different hydrological regions of Lithuania, river runoff projections may differ. The most significant and intimidating changes are likely to occur under the RCP8.5 scenario at the end of the 21st century. In the rivers of the hydrological region of western Lithuania, the runoff will decrease from 4.5 (RCP2.6) to 10.4% (RCP8.5), in central Lithuania from 4.0 (RCP2.6) to 31.2% (RCP8.5), and in southeastern Lithuania from 1.3 (RCP2.6) to 24.6% (RCP8.5) relative to the reference period. According to studies by other researchers, by the end of the 21st century, depending on the climate model used, the projected change in global hydropower generation under RCP8.5 will range between -8% and +5%. However, regional variations will be even greater. For example, in Norway, total hydropower production at the end of the 21st century will increase by 8% under the RCP8.5 scenario. In Germany, however, hydropower production in the mid-21st century will decrease between 10 and 30% depending on the region under the RCP8.5 scenario. The results of this thesis and others conclude that differences in predictions between and within regions are influenced by differences in natural conditions and the nature of river response to climate change.

2.2.7. Uncertainties in riverine energy resource projections

Finally the impact of climate models and RCP scenarios on hydro resource projections in the different hydrological regions was determined. The analysis demonstrated that the uncertainty in river kinetic resource projections for the western Lithuanian hydrological region was mainly caused by the choice of the climate model (70% of the uncertainty in the near future and 82% in the distant future) (Fig. 7, a). Meanwhile, the lowest spread of results was for the RCP scenarios (30% in the near future and 18% in the distant future). In central Lithuania, the influence of climate models drops to 64% in the near future and 68% in the distant future. By contrast, the impact of RCP scenarios was 36% in the near future and 32% in the distant future. In the southeastern hydrological region, the influence of climate models

was 62% in the near future, and 54% in the distant future, and the influence of the RCP scenario was 38% and 46%, respectively.

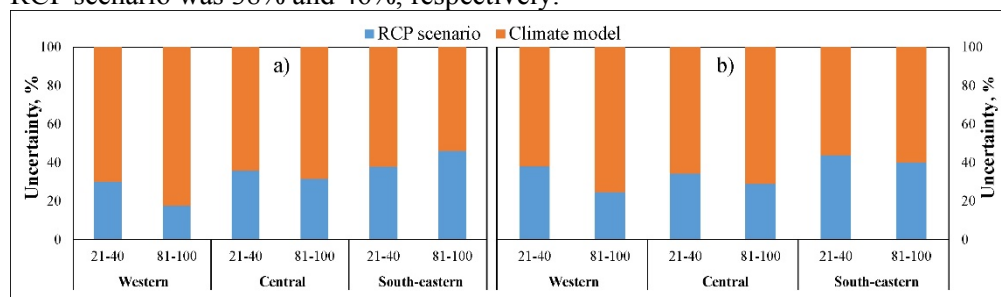


Fig. 7. Uncertainties in hydrokinetic (a) and hydro potential (b) resources projections in the near and distant future.

The uncertainty in the prediction of hydro potential resources in the western Lithuanian hydrological region significantly depended on climate models, ranging from 62% in the near future to 75% in the distant future (Fig. 7, b). The impact of RCP scenarios on the uncertainty was almost twice as small as that of climate models, at 38% in the near future and further reduced to 25% in the distant future (Fig. 7, b). In the central Lithuanian hydrological region, the influence of climate models on the projection of hydro potential resources was 66% in the near future and 71% in the distant future. The other part of the uncertainty was due to the scenarios. The smallest influence of climate models was in the southeastern hydrological region, 56% in the near future and 60% in the distant future. The impact of the scenarios became the highest of all the hydrological regions, with 44% and 40%, respectively.

Estimated that the influence of climate models on the uncertainty of kinetic and potential resource projections is highest in the hydrological region of western Lithuania, slightly lower in the hydrological region of central Lithuania, and the lowest in the hydrological region of southeastern Lithuania. The reason for these tendencies is the different conditions of runoff formation in three hydrological regions.

2.3. Impact of small hydropower plants on the hydrological regime of rivers

Initially, before the detailed investigation of hydrological regime variables using the IHA method, a statistical significance (at $p < 0.05$) of the average, maximum and minimum discharges of the pre- and post-impact periods was tested using a t-test. No statistically significant changes in the average discharges were identified. This confirms that the small HPP reservoirs, which were studied, are mostly daily regulated and do not considerably affect average annual flows. Conversely, the t-test results of extreme (minimum and maximum) flows in some rivers downstream of the dams showed significant changes, indicating substantial dam-induced modifications. The maximum flows changed significantly in the five studied river stretches, while the minimum flows changed significantly in the four stretches. Next, IHA analysis was

performed. The results of deviations of the IHA parameter values are presented in Figure 8. They show that among the studied parameter groups, the most dramatic changes occurred in the frequency and duration of high and low pulses, i.e., in group 4. In contrast, IHA parameters indicating the timing of extreme flows were the least impacted hydrologic variable. The analysis revealed the most affected rivers downstream of the hydropower plants: the Šušvė, Mūša, and Bartuva, where the average of parameter groups exceeded 33%, indicating moderate changes. A possible explanation for the most significant changes in IHA parameters downstream of Angiriai HPP in the Šušvė River is the ratio of installed and multiannual discharges, which is the highest among the studied HPPs. The turbines installed in this HPP leak a large amount of water and are not regulated; therefore, their activation causes hydropeaking phenomena in the river reach below.

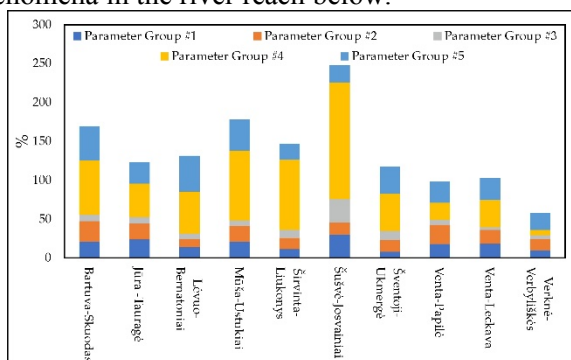


Fig. 8. Average changes of the IHA parameters groups at the studied WGSs.

In the second step of this research, the range of variability approach (RVA) was applied to calculate the alteration in a variation of the IHA parameters after installation of HPP on the river or, in other words, to estimate the degree to which the defined RVA target range (± 1 SD from the mean) was not attained.

Figure 9 indicates the percentage of hydrologic indicators in each category of hydrologic alteration: low, moderate, and high. Records in the Bartuva and Jūra downstream of the HPPs show the largest percentage of flow indicators in the range of moderate and high alterations. Thirty-one hydrologic indicators fell in the low and only one of them was in the moderate alteration range at Venta-Papilė WGS downstream of the HPP.

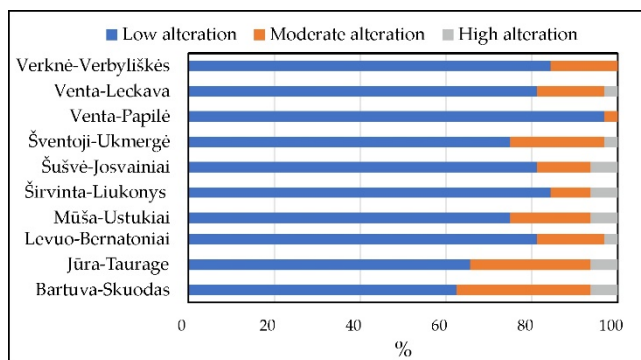


Fig. 9. The percentage of hydrologic indicators in each RVA category.

Figure 10 presents the overall degree (in %) of hydrologic alteration, taking into account both the mean and maximum values of the degree of alteration for each indicator group. At six WGSs, this degree was rated as moderate (higher than 40%), i.e., the rivers of Bartuva, Širvinta, Šušvė, and Mūša were identified as the most hydrologically modified by HPP operation. The applied concept of hydrologic variability revealed that Rudikiai HPP modified the Venta River the least.

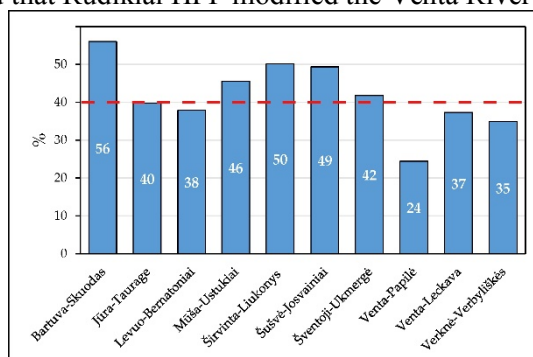


Fig. 10. The overall degree (%) of hydrological alterations.

3. RECOMMENDATIONS FOR THE SUSTAINABLE USE OF HYDROPOWER RESOURCES IN THE BACKGROUND OF CLIMATE CHANGE

The Lithuanian Government's National Energy and Climate Plan (NECP) for 2021-2030 commits to the European Union to increase the share of renewable energy sources in the country's energy mix to 45 % (Seimas of the Republic of Lithuania, 2018a.). In Lithuania, the potential energy resources of rivers represent 3.6 % of final consumption. The kinetic energy of rivers in Lithuania is currently untapped.

The following recommendations are proposed for the sustainable use of hydroenergy resources:

- As river runoff declines in the past and in the future, the electricity output of installed hydropower plants will also decline. The development of new hydropower plants in Lithuania is restricted by law (Seimas of the Republic of Lithuania, 2018 b.). Therefore, in the future, the kinetic resources of rivers should be harnessed, considering the real possibilities of their use, technologies and environmental impacts. However, there is currently no legislative framework in place. Therefore, it would be appropriate for lawmakers to develop legislation to regulate the potential use of Lithuanian rivers kinetic energy and the possible environmental impacts.
- An analysis of the impact of small hydropower plants on the hydrological regime of rivers has revealed changes in the hydrological regime associated with an increase in the number of low and high pulses and reversals. These changes reflect the fact that small hydropower plants operate in some cases in hydropeaking mode. The hydropower plants that have changed the hydrological regime of the river the most are those whose minimum operating flow (Q_{Hmin}) is higher than the regulatory minimum flow - environmental flow (Q_{gamt}). These hydropower plants cannot operate during the dry season, when the environmental flow is required to be passed through the hydropower plant, because their minimum operating flow is much higher than the environmental flow passed through the hydropower plant. It is recommended that the small hydropower plants should be reconstructed by replacing the turbines so that they can generate electricity while passing the environmental flow. The minimum flow to be passed by the hydropower plants must comply with the environmental flow established by the regulatory framework. This recommendation is most relevant for those hydropower plants with $Q_{gamt}/Q_{Tmin} \leq 0,6$.

CONCLUSIONS

1. Modelling of river runoff in Lithuania has shown that runoff will decrease by up to 15.2% between 2021 and 2040 compared to the period 1986-2005. However, in the period 2081-2100 these changes will be significantly higher and will depend on the hydrological region. Under the RCP8.5 scenario, the runoff in western Lithuania hydrological region will decrease by up to 10.4%, in central Lithuania hydrological region by up to 31.2%, and in southeastern Lithuania hydrological region by up to 24.6%, compared to the period 1986-2005.

2. Depending on the scenario and the hydrological region, the hydrokinetic resources in 2021-2040 are estimated to decrease by up to 4.3% or up to 18.8% compared to 1986-2005, while in 2081-2100 only the hydrological region of southeastern Lithuania is estimated to show a slight change (up to 2.7% according to RCP2.6), while in the rest of the regions they are estimated to decrease by between 8.8% and 36.2% compared to 1986-2005.
3. It has been estimated that in the period 2021-2040, a decrease in hydropower production of small hydropower plants is expected to reach 8.6%, and that of Kaunas HPP to 11.4%. The largest changes in hydropotential energy are likely to occur in 2081-2100, when small hydropower production will decrease by up to 14 % and Kaunas HPP by up to 30 % compared to 1986-2005. The largest negative changes in energy production will be experienced in spring season, when production will decrease by up to 40 %. Meanwhile, in the winter seasons, due to inter-seasonal redistribution of runoff, energy production may increase by up to 10%.
4. The assessment of the uncertainties in the future projections of kinetic and potential resources showed that the influence of climate models was up to 70% and 82% respectively, and up to 30% and 18% for RCP scenarios. The highest impact of climate models on uncertainties was in the hydrological region of western Lithuania and the lowest in southeastern Lithuania. This is due to the different runoff generation conditions: in western Lithuania hydrological region, the majority of the runoff is from rain, while in southeastern Lithuania groundwater recharge dominates.
5. The IHA approach to assessing the impact of small hydropower plants on the hydrological regime of rivers has identified varying degrees of changes in the hydrological regime after the construction of hydropower plants. The most significant changes occurred in frequency and duration of large and small pulses. The number of low pulses increased on average by 151% after the installation of the hydropower plants, while the number of high pulses increased by 14%. Some of the most significant changes were found in the rate and frequency of change of runoff conditions. In ten of the eleven rivers studied, the number of reversals increased by an average of 45% after the construction of hydropower plants.

AUTHOR INFORMATION

- Kaišiadorys A. Brazauskas Gymnasium 1973-1984.
- Kaunas University of Technology 1984-1989, Diploma of Electrical Engineering.
- Mykolas Romeris University 2012-2014, Master's degree in Public Administration (specialization in Energy Policy and Management).
- Lithuanian Energy Institute, 2018-2022, Hydrology Laboratory, Technological Sciences, Environmental Engineering (T 004).

Gintaras ADŽGAUSKAS

LIETUVOS UPIŲ HIDROENERGETINIŲ IŠTEKLIŲ PROGNOZĖ
VERTINANT KLIMATO KAITĄ
Mokslo daktaro disertacija

Redakcija Irmos Urbonavičienės

Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, LT-51424
Kaunas

Užsakymo Nr. xx-xxx. Tiražas 15 egz. 2023 04 28.

Nemokamai