

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS
JŪROS TECHNOLOGIJŲ IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS
GAMTOS MOKSLŲ KATEDRA

MAKROFITŲ POVEIKIS BANGŲ GALIOS
PASISKIRSTYMOUI KURŠIŲ MARIŲ LITORALĖJE

Ekologijos ir aplinkotyros studijų programos magistro
baigiamasis darbas

Autorius JMNEA17, Laura Nesteckytė

Vadovas Doc. dr. Rita Jankauskienė

Konsultantai: dr. Loreta Kelpšaitė–Rimkienė
dr. Martynas Bučas

Reg. nr.

Klaipėda, 2019

SANTRAUKA

Laura Nesteckytė

MAKROFITŲ POVEIKIS BANGŲ GALIOS PASISKIRSTYMIUI KURŠIŲ MARIŲ LITORALĖJE

Ekologijos ir aplinkotyros studijų programos magistro baigiamasis darbas

Darbo vadovė: Doc. dr. Rita Jankauskienė

Konsultantai: dr. Loreta Kelpšaitė–Rimkienė

dr. Martynas Bučas

Klaipėdos universitetas

Jūros technologijų ir gamtos mokslų fakultetas

Gamtos mokslų katedra

Klaipėda, 2019

Darbo apimtis: 43 psl., 1 lent., 27 pav.

Pagrindiniai žodžiai: SWAN bangų modelis, Kuršių marios, makrofitai, bangų parametru pasiskirstymas, maksimalūs bangų aukščiai.

Priekrančių lagūnos ekologiškai labai vertingi, bet pažeidžiami regionai. Sekliuose vandens baseinuose tokiuose kaip Kuršių marios labai didelės įtakos rūšių įvairovei ir pasiskirstymui turi bangų sukeltas trikdymas. Makrofitų sąžalynai daro labai didelę įtaką pakrančių lagūnų ekologiniam funkcionavimui. Darbe naudojamas SWAN (Simulating WAVes Nearshore). Šio darbo tikslas yra: įvertinti makrofitų poveikį bangų galios pasiskirstymui Kuršių marių litoralėje. Darbo objektas – kaip makrofitai gali paveikti bangų galią Kuršių mariose. Bangų galia ir aukščiai buvo modeliuojami pagrindinėms 8 vėjo kryptims bei skirtingais vėjo greičiais, nuo 3 m/s iki 34 m/s. Naudojant SWAN bangų modelį gauta, kad visais nagrinėtais vėjo krypčių atvejais daugiausia bangų galios generuojama ties vakariniu Kuršių marių krantu, išskirtinės zonos – Ventės ragas ir Nemuno delta. Daugiausia galios generuojama pučiant vakarinių krypčių vėjams, aukščiausios bangos susidaro pučiant pietinių krypčių vėjams. Atnaujinus bangų modelį su makrofitų duomenimis pastebėta, kad turimi augalijos duomenys įvesti į modelį reikšmingai nepakeičia modeliuotų bangų parametru. Tolimesniam bangų modelio vystymui reikalingi tikslesni ir detalesni makrofitų augimviečių fizinių parametru aprašymai.

SUMMARY

Laura Nesteckytė

MACROPHYTES IMPACT ON THE WAVE POWER DISTRIBUTION IN THE LITTORAL ZONE OF THE CURRONIAN LAGOON

Master's degree thesis of the study programme in ecology and environmental sciences

Thesis supervisor: Assoc. prof. dr. Rita Jankauskienė

Consultants: dr. Loreta Kelpšaitė–Rimkienė

dr. Martynas Bučas

Klaipėda University

Faculty of Marine Technology and Natural Sciences

Department of Natural Sciences

Klaipėda, 2019

Work's size of work: 43 p., 1 table, 27 fig.

Keywords: SWAN wave model, Curonian Lagoon, macrophytes, wave parameter distribution, maximum wave heights.

Ecologically, the coastal lagoons are highly valuable and vulnerable regions. In the shallow basins such as the Curonian Lagoon, any wave-type disturbance has a major impact on species diversity and their distribution and vice versa.

In order to understand how macrophytes affects the distribution of wave power, it is necessary to combine the ecological and oceanographic knowledge. This work aims to evaluate the effect of macrophytes on wave power distribution in the littoral zone of the Curonian Lagoon. The object of the study is to analyse how the macrophytes can affect the wave power in the Curonian Lagoon.

To obtain data on the wave power distribution SWAN (Simulating WAVes Nearshore) wave model were used. The model was runned for the 2013-2018 year. Were calculated wave height, period, and wave power. Model validation were performed with the wave observation in Nida (Lithuanian Hydrometeorological Service) Having compared the model's wave heights and

the wave heights measured in situ and having calculated the average absolute error, the results demonstrate a value equal to 0.09 m.

The wave power and heights were modelled for the main 8 wind directions and at different wind speeds from 3 m/s to 34 m/s. Using the SWAN wave model, the results demonstrate that having analysed all wind directions, the greatest wave power is generated on the western coast of the Curonian Lagoon with the exclusive zones of Ventė Cape and Nemunas Delta. The greatest power is generated by the western winds: west wind - 1.03 N/m², southwest - 0.89 N/m², northwest - 0.78 N/m². When modelling the wave power at different wind speed, it was observed that the wave power increased with the wind speed. The fastest power growth is observed at wind speeds changing from 7 m/s to 11 m/s with the maximum available power increasing from 0.13 N/m² to 0.61 N/m², respectively. According to the SWAN model results, the highest waves are formed in the southern part of the Lithuanian Curonian Lagoon and can grow higher than 2 m. The study found that the highest waves are generated by the southern winds. With the southwest wind, the maximum wave heights can reach up to 2.28 m, S winds - 2.18 m, and SE - 2.07 m.

The wave model supplemented with macrophyte data collected during 2014-2015 and 2018 field companies shows that the wave parameters modelled based on the available macrophyte data do not differ from the wave parameters obtained by modelling the waves without entering the plant data. Available data on the macrophyte quantities in the Curonian Lagoon may not be sufficient to measure their impact on waves. For more accurate results, it is recommended to consider not only the submerged macrophytes but also different types of macrophytes, and, while collecting sonar material, use the repeated line transects nearby. For this reason, further in-situ research is needed.

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Bangų klasifikacija pagal jų periodą (Munk, 1950).	6
---	---

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Kuršių marios (VĮ Vidaus vandens kelių direkcija, 2017)	4
2 pav. Bangų savirašis (Nesteckytė, 2018)	7
3 pav. Vandens judėjimas tarp ir virš panirusių augalų. h – augalų aukštis, H – vandens gylis. CDah turbulencijos koeficientas. (Modifikuota pagal: Luhar ir kt., 2008)	11
4 pav. Augalo nulenkimas vandenyje (Modifikuota pagal: Jones ir kt., 2015)	13
5 pav. Tyrimo vieta, makrofitų stebėjimo taškai pilka – 2014 m, raudona – 2015 m, geltona – 2018 m (Modifikuota pagal: VĮ GIS–Centras, 2018)	15
6 pav. Echogramos pavyzdys su panirusiais makrofitais (Stebėjimus atliko: dr. Martynas Bučas ir dokt. Vaiva Stragauskaitė).	16
7 pav. Makrofitų tankio erdvinio išsidėstymo SWAN modelyje fragmentas	17
8 pav. Trikampio tinklelio smulkinimas sekliose vietose	18
9 pav. Bangų aukščių dažnių histograma, a) modelio bangų aukščiai ties Nida, b) stebėti bangų aukščiai ties Nida 2013 – 2018 m.	22
10 pav. 99 percentilių bangų galios (a) (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio aukščių (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant stacionariam rytų vėjui	23
11 pav. 99 percentilių bangų galios (a) (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant stacionariam šiaurės vėjui	24
12 pav. 99 percentilių bangų galios (a) (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant stacionariam šiaurės rytų vėjui	25
13 pav. 99 percentilių bangų galios (a) (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant stacionariam šiaurės vakarų vėjui	25
14 pav. 99 percentilių bangų galios (a) (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant stacionariam pietų vėjui	26
15 pav. 99 percentilių bangų galios (a) (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant pietryčių vėjui	27
16 pav. 99 percentilių bangų galios (a) (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant stacionariam pietvakarių vėjui	27

17 pav. 99 percentilių bangų galios (a) (N/m ²) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant stacionariam vakarų vėjui	28
18 pav. 99 percentilių bangų galios (a) (N/m ²) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant 3 m/s vėjui	29
19 pav. 99 percentilių bangų galios (a) (N/m ²) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant 7 m/s vėjui	29
20 pav. 99 percentilių bangų galios (a) (N/m ²) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant 11 m/s vėjui	30
21 pav. 99 percentilių bangų galios (a) (N/m ²) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant 15 m/s vėjui	30
22 pav. 99 percentilių bangų galios (a) (N/m ²) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant 19 m/s vėjui	31
23 pav. 99 percentilių bangų galios (a) (N/m ²) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant 22 m/s vėjui	32
24 pav. 99 percentilių bangų galios (a) (N/m ²) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant 26m/s vėjui	32
25 pav. 99 percentilių bangų galios (a) (N/m ²) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant 31 m/s vėjui	33
26 pav. 99 percentilių bangų galios (a) (N/m ²) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant 34 m/s vėjui	34
27 pav. 99 percentilių bangų galios (N/m ²) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio aukščių (m) pasiskirstymas su augalija pučiant stacionariam rytų vėjui	35
28 pav. Maksimalaus vėjo greičio 2013 – 2018 m. mėnesių vidurkiai (m/s)	35

TURINYS

ĮVADAS	3
I LITERATŪROS APŽVALGA	4
1.1 Kuršių marios	4
1.2 SWAN bangų modelio taikymas	5
1.3 Bangų ir augalų sąveika	8
II TYRIMO METODAI IR MEDŽIAGA	15
2.1 Tyrimų vieta	15
2.2 SWAN modelio parametrai	17
2.2.1 SWAN modelio validacija	20
III TYRIMO REZULTATAI	22
3.1. SWAN modelio validacija	22
3.2. Bangų galios pasiskirstymas	23
3.3 Bangų galios pasiskirstymas įvertinus makrofitų įtaką	34
IV TYRIMO REZULTATŲ APTARIMAS	37
IŠVADOS	39
LITERATŪROS SĄRAŠAS	40
PRIEDAI	44

ĮVADAS

Priekrančių lagūnos ekologiškai labai vertingi, bet pažeidžiami regionai. Sekliuose vandens baseinuose tokiuose kaip Kuršių marios labai didelės įtakos rūšių įvairovei ir pasiskirstymui turi bangų sukeltas trikdymas, nuosėdų pakėlimas limituojantis šviesos patekimą iki makrofitų bei galintis sukelti jų užnešimą (Forsberg ir kt., 2018). Svarbu suprasti kaip buveines formuojantys makrofitai yra paveikiami bangų. Makrofitų sąžalynai daro labai didelę įtaką pakrančių lagūnų ekologiniam funkcionavimui: mitybinių tinklų palaikymas, sudaromos nerštavietės žuvims, stabilizuojamas gruntas augavietėse, gerinama vandens kokybė, sukuriamos pereinamosios buveinės ar koridoriai tarp sausumos ir vandens ekosistemų (Jones ir kt., 2015; Forsberg ir kt., 2018).

Gebėjimas nustatyti vietas, kuriose daromas didžiausias poveikis makrofitų augavietėms Kuršių mariose, suteiktų galimybę tikslingiau taikyti ekologinės būklės gerinimo, krantų valdymo priemones. Tinkamai projektuojant ir prižiūrint makrofitai yra vienas geriausių kranto valdymo metodų. Makrofitai sukuria tvarią aplinką ir gali turėti daugiau ekologinių plusų lyginant su infrastruktūriniais statiniais (dambos, bunos) (University of Massachusetts Amherst, 2017).

Šiuolaikiniame pasaulyje ekologija tampa labai svarbi. Siekiant įvairiapusiškai išnagrinėti problemas bei rasti jų sprendimus svarbu skirtingų sričių žinių derinimas. Kompleksiniuose moksliniuose tyrimuose nagrinėjamos problemos dažnai reikalauja keleto skirtingų mokslinių disciplinų sinergijos. Todėl siekiant suprasti kaip makrofitai gali paveikti bangų galios pasiskirstymą svarbu gebėti derinti ekologines žinias ir okeanografines žinias. Darbe naudojamas SWAN (Simulating WAves Nearshore) bangų modelis pritaikytas okeanografiniams tyrimams, dar nebuvo naudotas Kuršių mariose siekiant atsakyti į ekologinius klausimus.

Šio darbo tikslas yra: įvertinti makrofitų poveikį bangų galios pasiskirstymui Kuršių marių litoralėje.

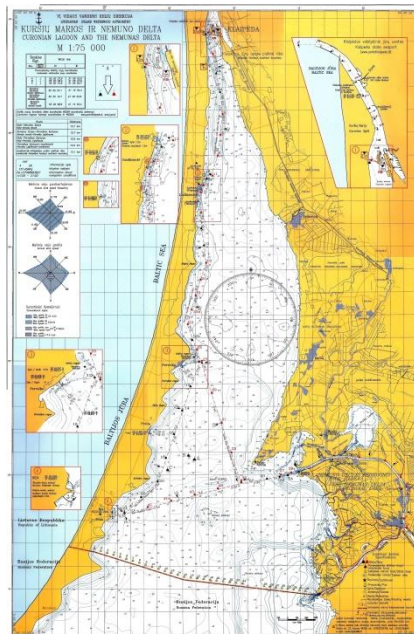
Uždaviniai:

1. SWAN modelio pritaikymas Kuršių marioms 2013 – 2018 m;
2. Bangų galios Kuršių mariose pasiskirstymo įvertinimas panaudojant SWAN modelį;
3. Naudojant SWAN modelį nustatyti bangų energijos pokyčius makrofitų augavietėse Kuršių mariose.

I LITERATŪROS APŽVALGA

1.1 Kuršių marios

Kuršių marios tai didžiausia Europos lagūna, uždaras ir sekclus vandens telkinys (visas plotas 1584 km², vidutinis gylis 3,8 m. (Žaromskis, 1996), šiaurinėje dalyje turinčios siaurą susijungimą su Baltijos jūra Klaipėdos sąsiauriu (1 pav.). Rytinėje dalyje į Kuršių marias įteka viena didžiausių Baltijos regione upių – Nemunas. Upės atneštos gėlo vandens masės maišosi su sūriomis jūros vandens masėmis sudarydamos nestabilius druskingumo gradientus laike ir erdvėje svyruojančius nuo 0‰ iki 7‰ (Dailidienė ir Davulienė, 2008; Bučas ir kt., 2016). Žemyninė pakrantė (rytinė lagūnos pusė) sekli lyguma švelniai nuožulni į vakarus iki 1 – 2 m gylio. Vakarinė lagūnos dalyje, Kuršių nerijos pakrantėje, gyliai siekia iki 4 m (Gasiūnaitė ir kt., 2008). Pietinė marių dalis savo savybėmis labiau panaši į ežerą, dėl savo santykinai uždaros cirkuliacijos, mažesnių srovių greičių bei didesnės vėjo įtakos vandens judėjimui (Bučas ir kt., 2016).



1 pav. Kuršių marios (VĮ VIDAUS vandens kelių direkcija, 2017)

Pakrančių lagūnos, tokios kaip Kuršių marios, yra ekologiškai vertingi ir labai pažeidžiami regionai klimato kaitos perspektyvoje (Forsberg ir kt., 2018). Keičiantis klimatui vidutinėse platumose aktyvėja cikloninė veikla. Intensyvėjanti cikloninė veikla, kuri būdinga ir Lietuvai (Bukantis, 1994), lemia stiprių audrų padažnėjimą Lietuvos pakrantėse bei ramiojo laikotarpio

trumpėjimą. Audrų metu oro srautas plūsta nuo jūros į sausumą, sukeldamas bangavimą Kuršių mariose bei Danės Nemuno upių ir Klaipėdos sąsiaurio patvankas (Bukantis ir kt., 2007).

Savita Kuršių marių forma ir morfometrines dugno savybės sukuria kontrastingą bangų klimatą. Juodkrantės pakrantę marių bangos pasiekia beveik praradusios savo energiją dėl plačios smėlingos seklumos rytinėje duburio pusėje bei marių pločio susiaurėjimo ties Juodkrante – Kintais, kurie neleidžia bangoms įsibėgėti (Grigelis ir kt., 2007). Kirlio (2002) teigimu pučiant 12 m/s rytinių krypčių vėjams, tiesinio kranto atkarpai bangavimo jėga statmenai krantui Juodkrantės priekrantėje neviršija 15 kW/1 m, o Vidmarėse ties Nida tokiomis pačiomis sąlygomis, bangavimo srauto galia sustiprėja statmenai krantui nuo 70 iki 95 kW/1 m ilgio tiesinio kranto atkarpai. (Grigelis ir kt., 2007). Sekliuose vandens baseinuose rūšių gausai bei pasiskirstymui labai didelės įtakos turi bangų sukeltas trikdymas (Jones ir kt., 2015). Norint suprasti skirtumus tarp makrofitų augaviečių struktūros ir dinamikos, svarbu suprasti, kaip buveines sudarantys makrofitai yra paveikiami bangų ir kokia bangų įtaka skirtingose vietose (Forsberg ir kt., 2018; Jones ir kt., 2015; Baldock ir kt., 2014).

1.2 SWAN bangų modelio taikymas

Dažniausia išorinė jėga sukelianti bangas yra vėjo trintis į vandens paviršių (Mažeika, 2001). Silpnai išjudintame vandens paviršiuje atsiranda mažos trumpos bangų ruzgos, vadinamos kapiliarinėmis bangomis, kurių ilgis matuojamas centimetais, o aukštis – milimetrais (Žaromskis, 1996) (1 lentelė). Bangų ruzgoms susidaryti svarbiausios yra vandens paviršiaus įtampos jėgos, kurios išnykus išjudinimo priežastiai slopina kapiliarines bangas. Bangavimo pradžioje susidariusios bangų ruzgos ir kapiliarinė įtampa išorinei jėgai stiprėjant greitai pasidaro neberekšminga, ji yra viršijama gravitacijos, kuri stengiasi vertikalų vandens paviršiaus iškilimą gražinti į ramybės lygmenį – vienodo vandens tankumo lygį, taip susidaro gravitacinės bangos (Mažeika, 2001).

1 lentelė. Bangų klasifikacija pagal jų periodą (Munk, 1950).

Periodas	Dažnis	Bangos pavadinimas
Mažiau nei 0,1 s	Daugiau nei 10 Hz	Kapiliarinės bangos
Nuo 0,1 s iki 1 s	Nuo 10 Hz iki 1 Hz	Ultragavitacinės bangos
Nuo 1 s iki 30 s	Nuo 1 Hz iki 0,03 Hz	Paprastos gravitacinės bangos
Nuo 30 s iki 5 min	Nuo 0,03 Hz iki 0,003 Hz	Infragravitacinės bangos
Nuo 5 min iki 12 h	Nuo 0,003 Hz iki 0,00002 Hz	Ilgaperiodinės
Nuo 12 h iki 24 h	Nuo 0,00002 Hz iki 0,00001 Hz	Paprastieji potvyniai
Nuo 24 h ir daugiau	Nuo 0,00001 Hz ir mažiau	Potvynių atoslūgių bangos

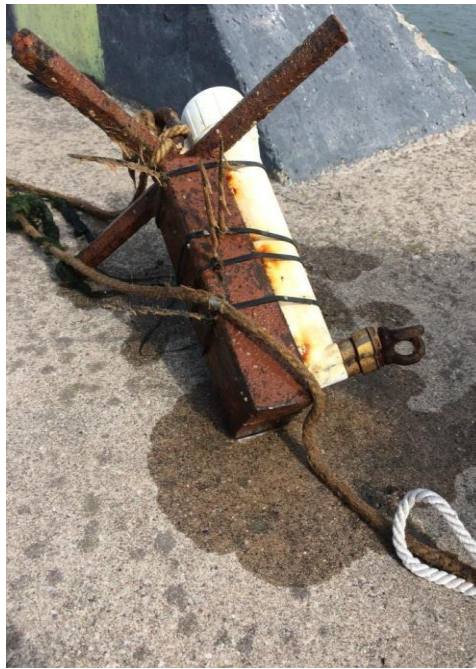
Kai tos pačios krypties ir stiprumo vėjas pučia pakankamai ilgai ir susidaro bangos, kurių parametrams išlaikyti sunaudojama visa vėjo energija. Nusistovėjusio bangavimo sąlygomis bangos aukštį iš esmės lemia 3 faktoriai: a) vėjo greitis; b) vėjo poveikio trukmė; c) įsibangavimo atstumas (Žaromskis, 1996).

Kuršių marios, kur didžiausi gyliai yra tik apie 6–10 metrų, vėjinis bangavimas įgyja naujų ypatumų, susijusių ir su ribotu gyliu, ir su padidėjusia vandens dalelių trintimi į dugną (Žaromskis, 1996):

1. Pakilus vėjui, bangų aukštis auga labai greitai.
2. Net pučiant uraganiniam vėjui, sekliavandenės bangos nepasiekia didelių aukščių;
3. Vėjui nurimus, bangos greitai išsisklaido;
4. Bangos pasižymi statumu;
5. Bangų parametrai daugiau priklauso nuo vėjo greičio ir mažiau nuo įsibangavimo atstumo.

Duomenys apie bangas gali būti gaunami tiesiogiai matuojant vandens baseino sąlygas pasitelkiant okeanografinius instrumentus arba apskaičiuojame pasitelkiant skaitmeninius modelius. Keletas okeanografijos prietaisų: bangos jėgai matuoti – dinamometrai (Carrington–Bell, 1994); tiesioginiam bangos aukščiui matuoti naudojami elektroniniai registratoriai – plūdurai bangų

parametrms (Wright, 1976); slėgio sensoriai (2 pav.); akcelerometrai, akustiniai dopleriai, radarai arba altimetrai, sumontuoti ant palydovų.



2 pav. Bangų savirašis (Nesteckytė, 2018)

Tačiau bangų parametrų stebėjimai labai limituojami laiko ir erdvės aspektais, taip pat brangi stebėjimų įranga bei jos išlaikymas. Bangų matavimai dažniausiai atliekami tik tam tikru laikotarpiu ir konkrečioje vietoje, todėl neatspindi platesnės teritorijos bangų parametrų (Jones ir kt., 2015; Infantes, 2016.). Siekiant įvertinti bangų režimą didesnėse teritorijose ar teritorijose, kuriose matavimai neįmanomi, pasitelkiami skaitmeniniai bangų modeliai. Šiame darbe vertinant bangų galios kitimą dėl Kuršių marių litoralėje augančių makrofitų yra taikomas SWAN bangų modelis.

SWAN (Simulating WAVes Nearshore) – skaitmeninis modelis pagrįstas bangų fizika leidžiantis prognozuoti bangų parametrus pakrančių regionuose, vidiniuose ar kituose sekliuose vandenyse (<http://swanmodel.sourceforge.net/>). Modelis sukurtas ir tobulinamas Delfto technologijos universitete nuo 1993 metų (Delft University of Technology). Tai skaitmeninis bangų modelis, kuris modeliuoja bangų sukūrimą ir sklaidą, atsižvelgiant į lokalius vėjo duomenis ir jūros šelfo ar kito seklaus vandens telkinio dugną (Jones ir kt., 2015). SWAN modelis gali būti taikomas įvairaus masto pakrančių zonoms. Pritaikomas vėjinėms bangoms, gylio sukkelto bangų lūžimo, bangos – bangos sąveikos, bangų galios išsklaidymo dėl vandens augmenijos modeliavimui (<http://swanmodel.sourceforge.net/>; De Oude, 2010; Jones ir kt., 2015). Modelis buvo sukurtas ir pritaikytas nagrinėti okeanografinius klausimus bei pakrančių inžinerinius scenarijus, pavyzdžiui,

apsauginių pylimų aukščio mažinimas SWAN modelio pagalba apskaičiavus kokių parametru (ilgis, plotis) makrofitų juostą reikalinga sumažinti bangų aukštį prieš pylimą (De Oude, 2010).

1.3 Bangų ir augalų sąveika

Makrofitai –gamintojai, kurie tiekia deguonį ir maistą, stabilizuoja vandens telkinio dugną, sukuria palankią aplinką žuvų nerštui, mažina bangų aukštį bei greitį taip pristabdydami pakrančių eroziją (Infantes, 2016).

Kuršių marioms pagal augalijos paplitimą būdingas juostinis – ištisinis, fragmentinis, fragmentinis – juostinis apaugimo tipai (Jurgilaitė, 1998; Žaromskis, 2009). Kuršių mariose išskirtos penkios pagrindinės vandens augalijos juostos: žemųjų hidrohelofitų, aukštųjų hidrohelofitų, nimfeidų, potameidų, limneidų (Jurgilaitė, 1998). Žemųjų hidrohelofitų juosta labai gerai išsivysčiusi rytinėje marių pakrantės dalyje. Pagrindinės juostą formuojančios rūšys: pelkinis asiūklis (*Equisetum palustre*), pelkinis duonis (*Eleocharis palustris*), grakščioji viksva (*Carex gracilis*) (Jurgilaitė, 1998).

Aukštųjų hidrohelofitų juosta išsidėsčiusi nuo kranto į telkinio vidurį, gali pasiekti 1,5 m gylį (Jurgilaitė, 1998). Būdingas dėmėtas erdvinis pasiskirstymas. Pagrindinės rūšys: paprastoji nendrė (*Phragmites australis*), ežerinis meldas (*Schoenoplectus lacustris*), plačialapis meldas (*Typha latifolia*) ir kitos rūšys (Jurgilaitė, 1998).

Nimfeidų juosta reta, aptinkama tik uždumblėjusiose, vėjo ir bangavimo nepaveikiamose įlankose. Juostą formuojančios rūšys: paprastoji lūgnė (*Nuphar lutea*), mažažiedė vandens lelija (*Nymphaea candida*) (Jurgilaitė, 1998).

Potameidų juosta užima labai didelius Kuršių marių plotus. Potameidų juosta aptinkama palei rytinę ir vakarinę marių pakrantes bei formuoja netolygiai pasiskirsčiusių sąžalynų dėmes marių gilumoje (Jurgilaitė, 1998). Pagrindinės juostą sudarančios rūšys: šukinė plūdė (*Potamogeton pectinatus*), permautalapė plūdė (*Potamogeton perfoliatus*).

Limneidų juosta vyrauja iki 20 – 40 cm gylio ribos, tai lemia didelis marių drumstumas. Juostai dažnai įsiliejusi į potameidų (Jurgilaitė, 1998). Pagrindinės rūšys: pelkinė vandensargė (*Zannichellia palustris*), šiurkštusis maurabragis (*Chara aspera*), paprastoji nertis (*Ceratophyllum demersum*).

Einant iš atvirų marių kranto link makrofitai vyravo tokia seka (Žaromskis, 2009):

- 1) *P. perfoliatus* – *Schoenoplectus lacustris* – *Phragmites australis* – *Acorus calamus*,
- 2) *Perfoliatus* – *Schoenoplectus lacustris*,
- 3) *Perfoliatus* – *Phragmites australis*,

4) *Phragmites australis*,

5) *Perfoliatus*.

Vietose, kuriose hidrodinamis aktyvumas nedidelis tarp atskirų makrofitų juostų ir *P. perfoliatus* sąžalynuose, dažnai paplinta *Chlorophyta* (Žaromskis, 2009).

Pagal 2016 metais Bučo atliktą tyrimą, Kuršių mariose vyramo 4 pagrindinei makrofitų taksonai: *Myriophyllum spicatum*, *Potamogeton perfoliatus*, *Stuckenia pectinata*, *Chara spp.* Šiaurės rytinė marių dalis pasižymi didžiausiais makrofitų užimamais plotais bei rūšių įvairove, tai lemia didesnis vandens skaidrumas ir druskingumas (Bučas, 2016; Bučas ir kt., 2016). Iš šiaurės į pietus makrofitų gausumas ir rūšinė įvairovė mažėja (Bučas, 2016).

Makrofitai per savo vegetacijos ciklą hidrodinamikos poveikį patiria beveik visuose biologiniuose bei cheminiuose procesuose įvairiais būdais, tokiais kaip: žiedadulkių dispersija, daigų ir sėklų pernaša (Koch ir kt., 2010); daigų išgyvenimas (Rivers ir kt., 2011); erdvinis pasiskirstymas (Frederiksen ir kt., 2004).

Pakrančių lagūnos uždari vandens telkiniai, kuriuose vandens lygio svyravimus lemia atmosferos reiškiniai, seišu sukeltas vandens judėjimas, potvyniai atoslūgiai (Forsberg ir kt., 2018). Bangų sukelta dugno šlyties jėga gali išjudinti dugno nuosėdas (Forsberg ir kt., 2018). Jos yra pakeliamos ir pernešamos, o tai gali lemti makrofitų užnešimą, atidengti šaknis ir šakniastiebius arba per dideles audras netgi išrauti visus augalus (Frederiksen ir kt., 2004; Forsberg ir kt., 2018; Preen ir kt., 1995).

Maži makrofitų sąžalynai nedaro įtakos bangų pasiskirstymui, tačiau tankūs sąžalynai sumažina bangų energiją tenkančią dugnui šalia makrofitų augavietės (3 pav.) (Luhar ir kt., 2008). Makrofitų sąžalynai skiriasi savo stiebų tankiu, geometrija tiek vertikalia tiek horizontalia kryptimis (Luhar ir kt., 2008; Infantes, 2016). Sąžalyno vegetacijos laipsnis apibūdinamas pagal pasiskirstymo morfologiją parametru a (užimamas plotas) ir ah – užimamo ploto indeksu, kur h – augalo aukštis.

Kiekvienoje augavietėje vandens srautas yra priverstas judėti aplink atskirus stiebus ir šakas, todėl greičio laukas tampa heterogeniškas atskiroms stiebo dalims. Dvigubas vidurkio metodas leidžia paprasčiau apibūdinti susidarantį greičio heterogeniškumą. Koordinatės apibrėžiamos taip: x ir z paralelios vidutiniam lokaliai dugno nuolydžiui, $z = 0$ prie dugno, ir teigiamas tolyn nuo dugno. Greičio vektorius $\vec{u} = (u, v, w)$, atitinkantis koordinates (x, y, z) . Momentiniai greičio ir slėgio (p) laukai yra suskirstyti į laiko vidurkius ir nuokrypius nuo laiko vidurkio. Laiko vidurkiai suskaidomi į erdvinius vidurkius plokštumoje, lygiagrečiai dugnui ir nuokrypius nuo tos erdvinės reikšmės (1) formulė:

$$\frac{d(\bar{u})}{dt} = g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\delta(\bar{p})}{\delta x} - \frac{\delta}{\delta z}(\bar{u}' \bar{w}') - \frac{\delta}{\delta z}(\bar{u}'' \bar{w}'') + \nu \frac{\delta^2(\bar{u})}{\delta z^2} + \frac{1}{2} C_{Da}(\bar{u})|\bar{u}|$$

(i) (ii) (iii) (iv)

(1)

kur: g_x – gravitacijos komponentė lygiagrečiai dugnui;

ρ – skysčio tankis, kg/m^3 ;

ν – kinematinis klampumas, St.

Pirma dalis (i) vidutinė erdvinė turbulencija. Antra dalis (ii) dispersija, priklausanti nuo erdvinės greičio koreliacijos. Dispersija yra nereikšmingas komponentas (mažiau 10%) įvertinant turbulenciją (Poggi ir kt., 2004). Nors dispersija daro nedidelę įtaką retoms augalų sąžalynams, tačiau Reinoldso įtampa yra jėga veikianti visas vandens augalų rūšis (Luhar ir kt., 2008). Klampumas (iii) palyginus su tamprumo jėga (iv) yra nereikšmingas komponentas, o virš makrofitų sąžalyno tamprumo jėga yra nereikšminga lyginant su turbulencija (Luhar ir kt., 2008). Erdvinis trikdymas dėl greičio ir slėgio sukelia virš kiekvieno augalo klampumo ir trinties jėgas, kurios gali būti apibūdinamos ketvirta (iv) formulės dalimi. Trinties koeficientas, gali kisti dėl augalų tankio, Reinoldso skaičius, augalų morfologijos bei lankstumo (Luhar ir kt., 2008). Todėl (1) formulę galima supaprastinti taip:

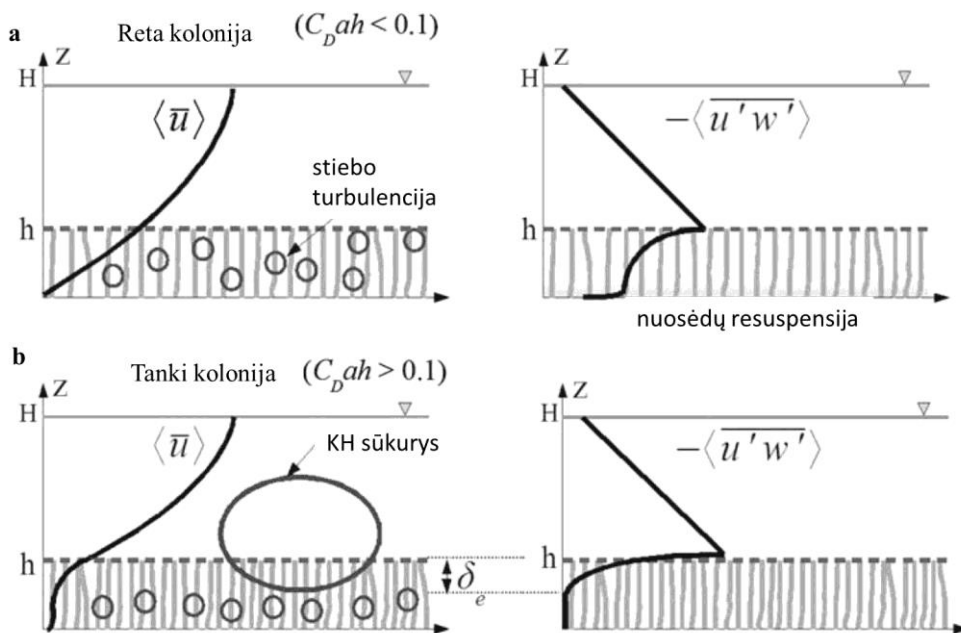
$$\frac{d(\bar{u})}{dt} = gS - \frac{\delta}{\delta z}(\bar{u}' \bar{w}') + \frac{1}{2} C_{Da}(\bar{u})|\bar{u}|$$

(2)

Iš (2) formulės galima apibrėžti du skirtingus vandens srauto judėjimo atvejus: tankia augmenija ir reta. Esant tolygiam srautui ($\frac{d\bar{u}}{dt} = 0$), potencinė jėga yra sudaryta iš turbulencijos ir trinties jėgos sumos. Kai turbulencija didelė, greičio profilis artėja prie turbulentinio ribinio sluoksnio – taip susidaro vandens srauto judėjimas retoje augavietėje (3 pav. a). Kai tamprumo jėga yra stipresnė, ji išlenkia augalų viršūnes pagal greičio profilį – taip susidaro trinties sluoksnis. Toks srauto performavimas vyksta esant tankiam augalų sąžalynui (3 pav. b). Esant tankiai sąžalynui, išlenkimo taškas esantis arčiau augalų viršutinio paviršiaus sukuria Kelvino–Helmholco nestabilumo sūkurį. Šie energiniai sūkuriai vyrauja tarp augalų ir virš jų esančiame vandenyje.

Profiliai parodo vidutinį greitį ir turbulencijos jėgą. Dėl reto augalų sąžalyno profilis panašus į turbulentinį ribinį sluoksnį ir turbulentinė jėga išlieka didelė (3 pav. a). Tankiame sąžalynė

makrofitai sukuria šlyties sluoksnį, kuris sudaro sąlygas Kelvin–Helmholtz (KH) nestabilumo sūkuriui susidaryti (3 pav. b). KH sūkurys išiskverbia į sąžalyną δ_e atstumu (3 pav. b), taip sumažindamas turbulencijos jėgą arčiau dugno.



3 pav. Vandens judėjimas tarp ir virš panirusių augalų. h – augalų aukštis, H – vandens gylis. C_{Dah} turbulencijos koeficientas. (Modifikuota pagal: Luhar ir kt., 2008)

Duomenys gaunami iš SWAN bangų modelio yra naudojami apibūdinti kaip bangos veikia makrofitus (4 pav. a). Hidrodinaminių jėgų veikimas augalo stiebas gali būti nulenkiamas ar kitaip pažeidžiamas. Objektai esantys judančiame skystyje yra veikiami tamprumo (F_d) ir pagreičio (F_a) jėgų, bei dėl šių jėgų sąveikos susidaranti plūdrumo jėgos (B) (4 pav. a). (Utter ir Denny, 1996). Pagal Utter ir Denny (1996) aprašomą modelį, augalas yra vertinamas kaip taškinis elementas, turintis masę M ir veikiamas visų hidrodinaminių jėgų (4 pav). Hidrodinaminės jėgos aprašomos taip:

$$\begin{aligned}
 B &= -gV(\rho_k - \rho_w) \\
 F_a &= \rho_w C_a V a_r + \rho_w V a_w \\
 F_d &= 0,0074 \rho_w u_r^{1,596} A
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

kur: a_r – taškinio elemento (a_r) pagreitis, priklausomas nuo aplink esančio vandens pagreičio – $a_w(a_r=a_w - a_k)$, m/s²;

u_r greitis taškinio elemento (uk), priklausomas nuo vandens greičio – uw ($ur=uw-uk$), m/s;

ρ_k augalo tankis, kg/m³.

Hidrodinaminės jėgos stiebą veikia jį ištempdamos, taip susidaro įtampa F_t . Įtampa yra nustatoma pagal ištempimo augalo ilgį ir jo pradinį ilgį, pagal šią formulę:

$$F_t = - \left\{ 1,19 \times 10^7 \left[\frac{\sqrt{x^2 + y^2} - l_0}{l_0} \right]^{1,407} A_{xs} \right\} \\ [\cos \cos(\theta)\hat{x} + \sin \sin(\theta)\hat{y}], \text{ kai } \sqrt{x^2 + y^2} > l_0 \\ F_t = 0, \text{ kai } \sqrt{x^2 + y^2} \leq l_0 \quad (4)$$

x ir y masės taško horizontalus ir vertikalus atstumas nuo vandens telkinio dugno augalo prisitvirtinimo taško, \bar{x} ir \bar{y} vektoriai horizontalia ir vertikalia kryptimis atitinkamai (4 pav. b). Įtampos jėga yra nukreipta tiesiai į stiebą kampu Q horizontalės atžvilgiu.

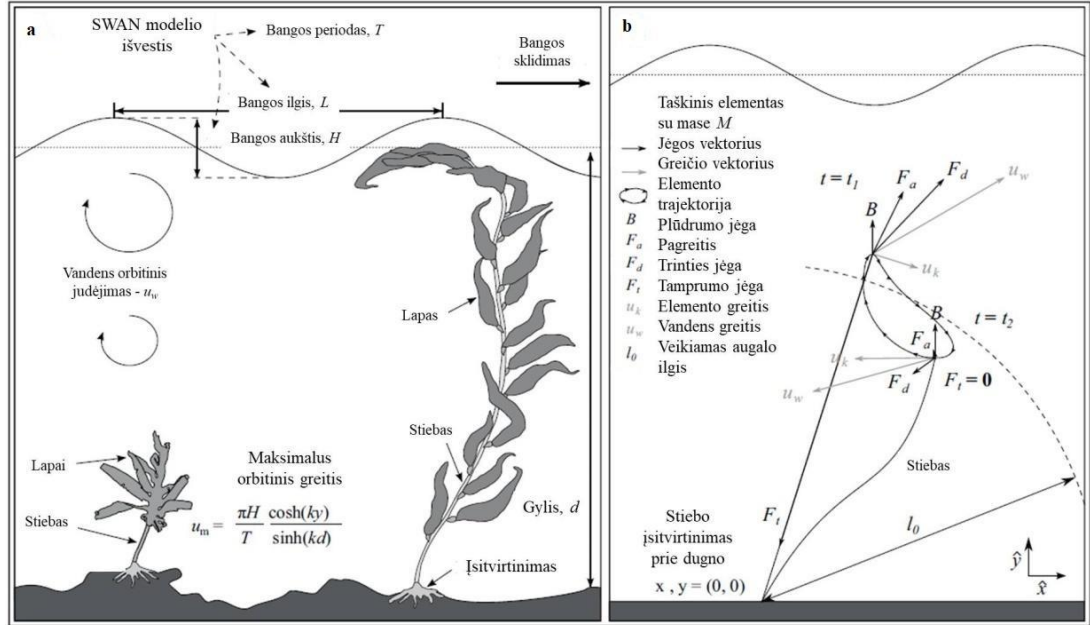
$$\theta = \arctan \arctan \left(\frac{y}{x} \right) \quad (5)$$

Augalo judėjimas priklauso nuo bangų greičio ir pagreičio sąveikos su augalo greičiu ir pagreičiu. Bangų greitis u_w ir pagreitis a_w priklauso nuo: gylio d , bangos aukščio H , periodo T , bangos ilgio L , laiko funkcijos t , vietos (6).

$$u_w = \frac{\pi H}{T} \cos \cos(kx - \omega t) \frac{\cosh \cosh(ky)}{\sinh \sinh(kd)} \hat{x} + \frac{\pi H}{T} \sin \sin(kx - \omega t) \frac{\sinh \sinh(ky)}{\sinh \sinh(kd)} \hat{y} \\ a_w = \frac{2\pi^2 H}{T^2} \sin \sin(kx - \omega t) \frac{\cosh \cosh(ky)}{\sinh \sinh(kd)} \hat{x} - \frac{2\pi^2 H}{T^2} \\ \cos \cos(kx - \omega t) \frac{\sinh \sinh(ky)}{\sinh \sinh(kd)} \hat{y} \quad (6)$$

Jėgų balanso lygtis aprašo masės taško pagreitį ak , kaip rezultatą visų hidrodinaminių jėgų ir įtampos jėgos sumos (7).

$$M_e a_k = B + F_d + F_a + F_t \quad (7)$$



4 pav. Augalo nulenkimas vandenyje (Modifikuota pagal: Jones ir kt., 2015)

SWAN modelis suteikia galimybę įvertinti augalijos poveikį bangų slopinimui įvairiuose gyliuose. Dalrymple (1984) pasiūlė cilindro metodą išreikšti bangų išsklaidymą dėl augmenijos, kuris naudojamas SWAN modelyje. Energijos nuostoliai apskaičiuojami kaip faktinis augalijos darbas dėl augalų sukeltų jėgų, veikiančių skystį, išreikštas Morison tipo lygtimi. Šiuo metodu nepaisoma augmenijos judėjimo, pavyzdžiui, vibracijos, atsirandančios dėl sūkurių ir augalo nulenkimo (Simulating WAVes Nearshor – <http://swanmodel.sourceforge.net/>). Dėl santykinai standžių augalų tempimo jėga laikoma dominuojančia ir inercinės jėgos yra ignoruojamos. Kadangi trinties jėga dėl trinties yra daug mažesnė, nei trintis jėga dėl slėgio skirtumų, todėl atsižvelgiama tik į paskutiniąją. Trinties koeficientas mažėja kai augalas yra nulenkiamas (Galema, 2009). Remiantis šiuo metodu ir jį papildžius nereguliarioms bangoms vidutinis energijos išsklaidymas dėl augalų per horizontalų ploto vienetą apskaičiuojamas (Mendez ir Losada, 2004):

$$\langle \varepsilon_V \rangle = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \rho \tilde{C}_{DbV} N_V \left(\frac{gk}{2\sigma} \right)^3 \frac{\sinh \sinh^3 kah + 3 \sinh \sinh kah}{3k \cosh \cosh^3 kh} H_{rms}^3$$

(8)

kur: ρ – vandens tankis, kg/m^3 ;

C_d – trinties koeficientas, priklausantis nuo bangų aukščio bei augalų tipo;

b_v – yra cilindro (augalo) stiebo skersmuo, m;

N_v – augalų skaičius kvadratiniam metre;

ah – augalų aukštis, m;

h – vandens gylis, m;

H – bangų aukštis, m;

$S_{ds, veg}$ – bangų išsklaidymas dėl augmenijos;

$\underline{\sigma}$ – vidutinis dažnis, Hz;

\tilde{k} – vidutinis bangos numeris.

$$S_{ds, veg} = - \sqrt{\frac{2}{\pi}} g^2 \tilde{C}_{DbvNv} \left(\frac{\tilde{k}}{\tilde{\sigma}} \right)^3 \frac{\sinh \sinh^3 \tilde{k}ah + 3 \sinh \sinh \tilde{k}ah}{3k \cosh \cosh^3 \tilde{k}h} \sqrt{E_{tot E(\sigma, \theta)}}$$

(9)

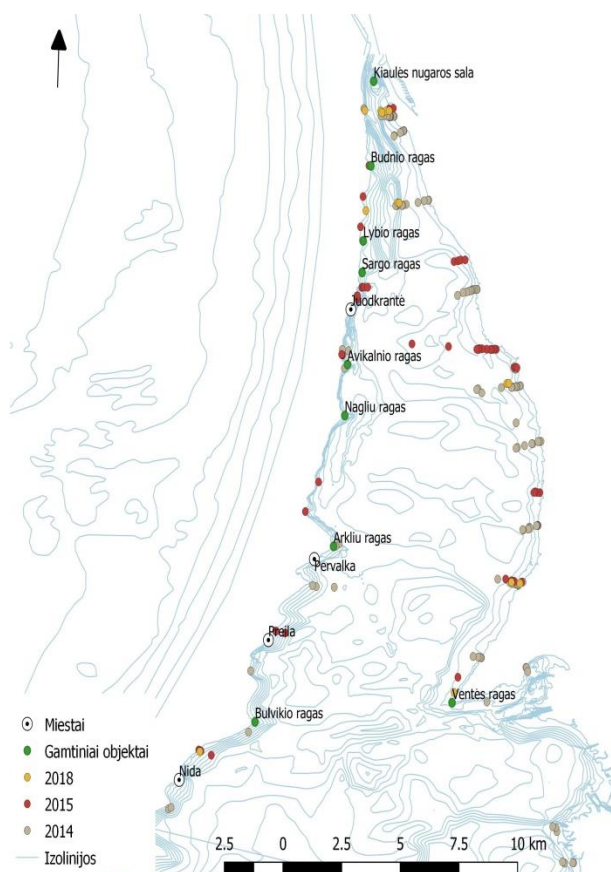
Mendez ir Losada (8) spektrinio išsklaidymo formulė gali būti papildyta dažniu ir srauto kryptimi (9).

II TYRIMO METODAI IR MEDŽIAGA

2.1 Tyrimų vieta

Šio darbo tyrimo vieta apima Lietuvai priklausančios Kuršių marių dalies litoralę (5pav.). Siekiant įgyvendinti darbo tikslą buvo svarbu įvertinti makrofitų augavietes, augalų aukštį, tankį bei augalo skersmenį. Darbe nagrinėta panirusių makrofitų įtaka bangų galios išsklaidymui, pagal 2014 m. 2015m. ir 2018 m. surinkus augaviečių duomenis. Makrofitų rūšys buvo neišskiriamos dėl didelio jų heterogeniškumo bei dėmėto erdvinio pasiskirstymo.

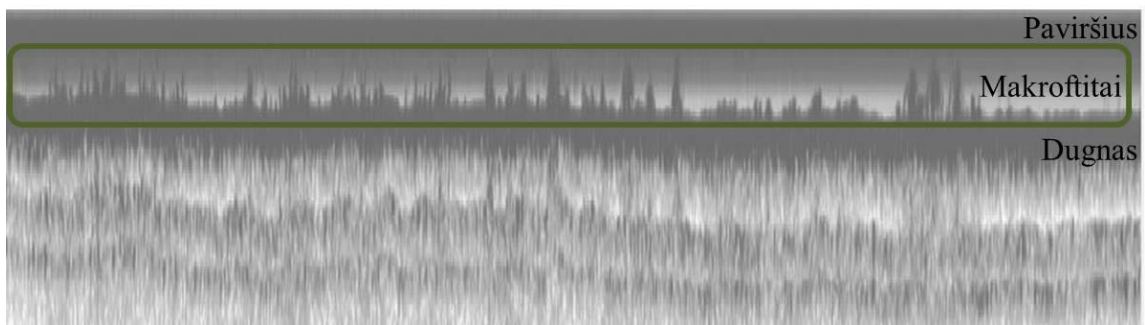
Panirusių makrofitų augavietės buvo stebimos 2014 metais rugpjūčio mėnesį keturiolikoje transektų, 2015 metais rugsėjo mėnesį penkiose transektose, 2018 metais gegužės, birželio, rugsėjo mėnesiais šešiuose transektose (5 pav.) (Stebėjimus atliko: dr. Martynas Bučas ir dokt. Vaiva Stragauskaitė).



5 pav. Tyrimo vieta, makrofitų stebėjimo taškai pilka – 2014 m, raudona – 2015 m, geltona – 2018 m (Modifikuota pagal: VĮ GIS–Centras, 2018)

Makrofitai buvo stebimi iš valtės (ilgis 6 m, grimzlė 0.3 m) naudojant Humminbird 898c SI Combo sonaru su XHS 9 HDSI 180 T davikliu. Sonaras gali dirbti su 200/83/455/800/50 kHz dažniais ir turi 6,35 cm taikinio atskyrimo galimybes (<https://humminbird.com.au/>). Sonaras buvo sumontuotas laivo gale, 0.4 m žemiau vandens paviršiaus. Sonaras dirba vienu metu veikiančiais dvigubais vieno spindulio dažniais (200/455 kHz) ir registruoja šoninius nuskaitymo duomenis su 2D vaizdu. Hidroakustiniai duomenys buvo renkami statmenai kranto.

Sonaru 2018 metais surinkti duomenys buvo nagrinėjami HumViewer programa. Naudojant šią programą iš surinktų sonaro echogramų buvo atrinktos taškų koordinatės, kuriose užfiksuoti makrofitai. Makrofitai buvo išskiriami vizualiai pagal 6 pav. pavyzdį. Echogramose matomi makrofitai yra lankstūs panirę vandens augalai (Bučas ir kt., 2016). Taip pat pasitelkiant HumViewer programą buvo įvertintas augalų tankis, pirma procentiškai įvertinant padengtumą, po to pagal naudotą darbe makrofitų skersmenį perskaičiuojant tankį. Vertinant 2014 – 2015 metų makrofitų tankį buvo naudoti dr. Martyno Bučo surinkti duomenys (2 priedas).



6 pav. Echogramos pavyzdys su panirusiais makrofitais (Stebėjimus atliko: dr. Martynas Bučas ir dokt. Vaiva Stragauskaitė).

Makrofitų skersmuo, remiantis literatūros šaltiniais (Bučas, 2016; Bučas ir kt., 2016; Diba ir kt., 2013) parinktas kaip konstanta – 0,005 m, trinties koeficientas lankstiems augalams pagal Rowinski (2002) yra 1,22 – 1,35, darbe naudotas trinties koeficiento vidurkis – 1,285 (Galema, 2009). Vidutinis makrofitų aukštis išnagrinėjus echogramų duomenis gautas 0,253 m.

Atrinkus taškų koordinates, kuriuose užfiksuoti makrofitai su QGIS 3.2.3. programa sudarytas tyrimo vietos žemėlapis su užfiksuotomis makrofitų augavietėmis (5 pav.). SWAN modeliui buvo sudarytas atskiras makrofitų tankio duomenų failas, kuriame pagal turimas makrofitų koordinates atidėti jų tankio duomenys (7 pav., 4 priedas).

0	0	0	0	0	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	340	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	20	0	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	400	0	0	250	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	40	220	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	400	0	20	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	100	320	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	20	268	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	240	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	180	360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	20	0	0	400	400	360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	400	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	400	0	0	0	0	0	0	0	400	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	400	0	0	0	0	0	0	0	0	400	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	400	0	0	0	0	0
0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	400	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	400	0	0	0	0	0

7 pav. Makrofitų tankio erdvinio išsidėstymo SWAN modelyje fragmentas

SWAN modelio batimetrijos ir makrofitų tankio duomenų failo gardelė 25 m (7 pav.).

Atliekant šį darbą buvo naudotas batimetrinis žemėlapis sudarytas 2015 metais, duomenys parengti susistemintus Gamtos tyrimų centro, Geologijos ir geografijos instituto, Klimato ir vandens sistemų sektoriaus, Vidaus vandens kelių direkcijos, Aplinkos apsaugos agentūros bei VĮ GIS–Centro turimą medžiagą (batimetrinius planus, schemas). Medžiagos sisteminimą ir duomenų rinkinio kūrimą atliko VĮ GIS–Centras (VĮ "GIS–Centras").

Atliekant darbą taip pat naudotas Kuršių marių batimetrinis žemėlapis, sudarytas Pajūrio tyrimų ir planavimo instituto 2004 m. pagal VĮ Vidaus vandens kelių direkcijos duomenis.

2.2 SWAN modelio parametrai

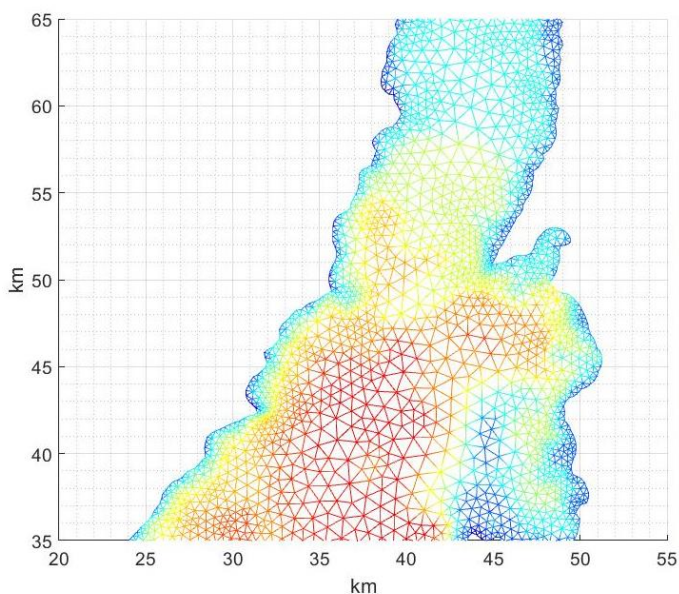
SWAN bangų modelis modeliuoja susidarančių bangų aukštį, kryptį, periodą, galią, bangų išsklaidymą dėl augalijos. Modelis apskaičiuoja lokalaus vėjo sukeltas vėjines bangas. Skaičiavimams naudoti 2013 – 2018 metų vėjo duomenis iš Nidos meteorologijos stoties (Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba prie Aplinkos ministerijos). Vėjas stotyje matuojamas kas tris valandas visą parą, modelyje naudoti vidutinis vėjo greitis bet vidutinė vėjo kryptis per tris valandas.

Siekiant įvertinti makrofitų įtaką bangų galios pasiskirstymui modelyje naudoti iš echogramų surinkti augalų duomenys: augalų tankis kvadratiniam metre, aukštis bei skersmuo.

Modeliuojami metai buvo suskirstyti į atskiras laikotarpius: gegužės – liepos, rugpjūčio – gegužės taip pat atmetant laikotarpius kai Kuršių mariose ties Nida buvo fiksuojamas ledas. Gegužės – liepos mėnesiai išskiriami dėl vegetacinio laikotarpio svarbos, rugpjūčio – gegužės dėl sporų pernešimo. Ledo buvimas nustatomas vizualiai stebėtojo ties Nida. Ledo buvimui ar nebuvimui nustatyti taip pat naudotos NASA MODIS palydovo Aqua sensoriaus palydovinės

nuotraukos (United States Government as represented by the Administrator of the National Aeronautics and Space Administration).

Bangų modelyje naudojamas nestruktūrinis tinklelis, leidžiantis geriau apibūdinti kompleksines ribas, tokias kaip: pakrantės, zonos aplink salas. Nestruktūrinis tinklelis taip pat leidžia pagerinti rezoliuciją konkrečiose dominančiose zonose – estuarijose, vietose kur batimetrija greitai kinta, ko neįmanoma padaryti su įprastu tinkleliu (Simulating WAVes Nearshor – <http://swanmodel.sourceforge.net/>). Pirmiausia atliekamas tinklelio rezoliucijos generavimas. Tinklelis paruošiamas naudojant Dvimačių kokybės tinklelio generatorių ir Delaunay trianguliaciją (A Two-Dimensional Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator – <http://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.html>). Tinklelio restruktūrizavimas į trikampi leidžia pagerinti rezoliuciją vietose, kuriose bangos kinta greitai bei turėti stambesnę tinklelį kur bangų evoliucija ir gylis kinta lėčiau (8 pav.).



8 pav. Trikampio tinklelio smulkinimas sekliose vietose

SWAN modelis veikia Dekarto koordinatinių sistemoje. Visi geografinių vietovių ar orientaciniai taškai išvesties failuose yra pradedami (0,0) koordinatėmis. Šiame darbe pietiniam kairiajam marių taškui suteikta (0,0) koordinatė. Todėl siekiant sumažinti netikslumų skaičių pereinant iš vienos koordinatinių sistemos į kitą darbe rezultatų paveikslai pateikiami Dekarto koordinatinių sistemoje. Darbe naudota 25 m gardelė.

SWAN bangų modelyje pagrindiniai skaičiuoti parametrai: H_{SIG} – reikšmingas bangos aukštis (m), 15 – 20 gerai apibrėžtų, aukštesnių bangų aukštis (Holthuijsen, 2010); FORCE – bangų sukelta jėga tenkanti ploto vienetui (N/m²). Modelio įvesties failas pridamas 5 priede.

Bangų energija – procesas, kai banga vandens daleles išjudina iš jų ramybės būsenos ir perkelia į kitą vietą. Vandens daleliai keičiant poziciją iš vienos į kitą atliekamas darbas nukreiptas priešinga gravitacijos jėgos kryptimi – potencinė energija, kai bangos dalelės juda – kinetinė energija. Bendras bangų energijos kiekis $E = E_{potencinė} + E_{kinetinė}$. Bangos sklisdamos vandens paviršiumi su savimi pernešą tiek potencinę tiek kinetinę energiją (Holthuijsen, 2010). Bangos perneša ne vien energiją, bet ir impulsą (judesio kiekį). Impulsas yra vektorinis dydis – masės ir bangų sugeneruoto vandens dalelės greičio sandauga. Impulsas lygus įtampai, horizontaliai kintanti įtampa sukuria jėgą vandenyje ir gali paveikti vidutinį vandens lygį ir generuoti sroves, ypač bangų gožos zonoje. To priežastis yra augantis impulso pernešimas, horizontalia kryptimi augantis fizinio virsmo srautas lygus atsirandančiai priešingos krypties jėgai vandenyje (augantis vandens slėgis teigiama x kryptimi, sukelia jėga vandenyje neigiama x kryptimi). Bangų sugeneruota fizinio virsmo jėga – galia, horizontaliam paviršiaus ploto vienetui x kryptimi (10):

$$F_x = -\frac{\delta S_{xx}}{\delta x} - \frac{\delta S_{xy}}{\delta y} \quad F_y = -\frac{\delta S_{yy}}{\delta y} - \frac{\delta S_{yx}}{\delta x} \quad (10)$$

kur: $-\frac{\delta S_{xx}}{\delta x}$ variacijos poveikis fizinio virsmo x arba atitinkamai y kryptimi;
 $-\frac{\delta S_{xy}}{\delta y}$ variacijos poveikis fizinio virsmo x arba atitinkamai y kryptimi.

Minuso ženklas rodo, jei fizinio virsmo srautas auga teigiama x kryptimi, atsakomoji jėga nukreipta neigiama x kryptimi, ir atvirkščiai kai fizinio virsmo srautas mažėja teigiama kryptimi, atsakomoji jėga nukreipta teigiama x kryptimi (pvz. pakrantės zonoje bangų aukštis mažėja judant link kranto ir fizinio virsmo srautas mažėja, todėl vandens telkinyje susidaro jėga nukreipta kranto link – galia). SWAN modelyje buvo skaičiuojama bangų galia.

Norint įvertinti bangų pasiskirstymą Kuršių mariose buvo apskaičiuota bangų sugeneruojama galia (N/m²) bei galimi didžiausi bangų aukščiai. Bangų parametrai buvo skaičiuojami pagrindinių aštuonių krypčių (šiaurės, šiaurės vakarų, vakarų, pietvakarių, pietų, pietryčių, rytų, šiaurės rytų) vėjui ir esat skirtingam (3 m/s, 7m/s, 11 m/s, 15 m/s, 19 m/s, 22 m/s, 26 m/s, 31 m/s, 34 m/s) vėjo greičiui.

2.2.1 SWAN modelio validacija

Modelio validacija – „modelio tikslumo įvertinimas“ (angl., evaluation of model), kadangi tikrinimas adekvatumas tarp modelio prognozių ir išmatuotų stebėjimų. Modelio validacijai naudoti bangų aukščių duomenys surinkti 2013 – 2018 metais Nidos meteorologijos stotyje (Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba prie Aplinkos ministerijos). Bangų aukščių matavimai stotyje atliekami vizualiai stebėtojo. Kadangi bangų aukščių stebėjimai atliekami vizualiai, bangos vertinamos nustatytais pastoviais įverčiais – <0,25, 0,25, 0,5 it t.t., taip pat esat rūkui ar kitoms nepalankioms sąlygoms bangų aukščiai neįvertinami, todėl 2013 – 2018 metų duomenų eilutėje atsiranda daug 0. Didelis kiekis 0 duomenų eilutėje gali iškreipti duomenis ir apsunkinti modelio sugeneruotų rezultatų palyginimą. Siekiant įvertinti modelio tikslumą modelio rezultatai buvo suskirstyti intervalais kas 0,25 m, bei apskaičiuotas kiekvieno intervalo pasikartojimo dažnis procentais naudojantis OriginPro 8.1 programą (9 pav.).

Siekiant statistiškai įvertinti modelio tikslumą buvo vertinama ar kintamųjų reikšmių pasiskirstymas atitinka normalinį skirstinį naudojant empirinių ir teorinių kvantilių palyginimo diagramas (3 priedas). Skaičiuotas Vilkoksono ženklų kriterijus – tai yra Stjudento porinio kriterijaus neparametrinis analogas (Čekanavičius, Murauskas, 2002). Vilkoksono ženklų kriterijus taikomas dviem priklausomoms imtims, stebėjimo metu užfiksuotas bangų aukštis priklauso nuo vėjo greičio, kuris naudojamas modeliuoti bangų aukščius. Vilkoksono ženklų kriterijus skaičiuotas naudojant R 3.5.1 programą. Siekiant tikslesnės modelio reikšmių analizės buvo sudaryta modeliuotų bangų aukščių (9 pav. a) bei stebėto užfiksuotų bangų aukščių (9 pav. b) reikšmių pasikartojimo histograma. Taip pat buvo skaičiuojamos vidutinės absoliučios paklaidos (Mean Absolute Error (MAE)):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_j - \hat{y}_j| \quad (10)$$

kur: n – paklaidų skaičius;

y_j – išmatuotos reikšmės;

\hat{y}_j – modeliuotos reikšmės.

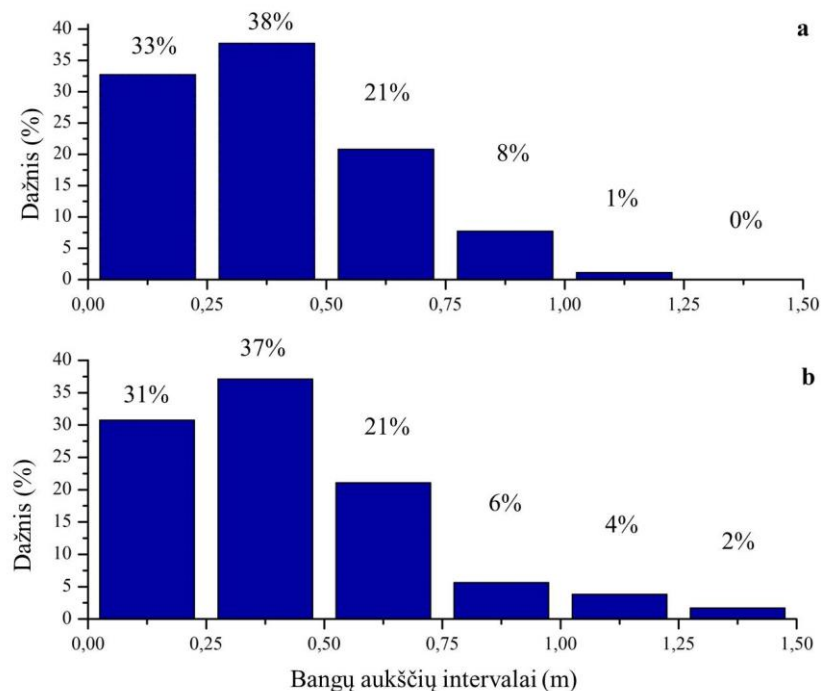
Absoliuti paklaida yra prognozuojamos vertės ir tikrosios vertės skirtumo absoliučioji vertė. MAE nurodo, kokio dydžio vidutinių paklaidų galima tikėtis iš modelio. Paklaida išreiškiama skaičiuojamo parametro vienetais.

III TYRIMO REZULTATAI

3.1. SWAN modelio validacija

Atliekant SWAN modelio validaciją t.y. lyginant SWAN ir pakrantėje atliktus bangų matavimus. Patikrinus ar reikšmių pasiskirstymas atitinka normalinį skirstinį iš empirinių ir teorinių kvantilių palyginimo diagramų pastebėta, kad duomenys negali būti aproksimuoti normaliniu skirstiniu (3 priedas). Imčių vidurkiai statistiškai reikšmingai skyrėsi ($V= 1600200$, $df=2189$, $p< 0,01$).

Siekiant tikslesnės modelio reikšmių analizės buvo sudaryta modeliuotų bangų aukščių (9 pav. a) bei stebėtojo užfiksuotų bangų aukščių (9 pav. b) reikšmių pasikartojimo histograma. Iš histogramos galime pastebėti, kad bangų aukščių reikšmės procentiškai išsidėsto labai panašiai. Modeliuotų ir stebėtų bangų aukščių dažniai intervale nuo 0,5 m iki 0,75 m sutampa, didžiausias skirtumas tarp bangų aukščių dažnių procentinio išsidėstymo matomas intervale nuo 1,0 m iki 1,25 m ir yra lygus 3% (9 pav.). Iš modelio duomenų galima pastebėti, kad bangos aukštesnė kaip 1,25 m negautos, tačiau stebėjimo duomenyse bangos aukštesnės kaip 1,25 m sudarė 2%.



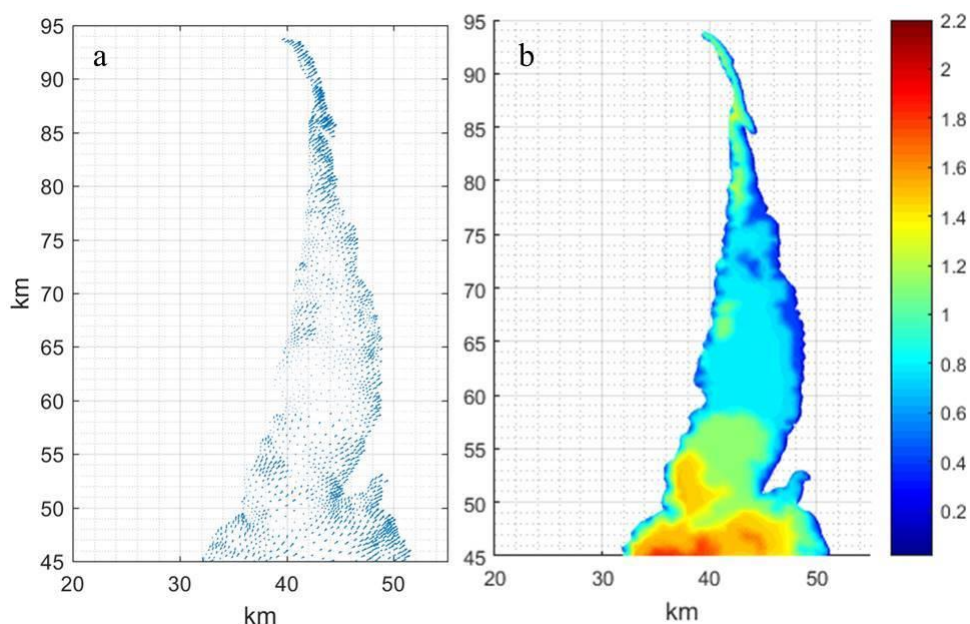
9 pav. Bangų aukščių dažnių histograma, a) modelio bangų aukščiai ties Nida, b) stebėti bangų aukščiai ties Nida 2013 – 2018 m.

Apskaičiavus vidutinę absoliučią paklaidą tarp stebėtų bangų aukščių ir modeliuotų gauta paklaida lygi – 0,09.

3.2. Bangų galios pasiskirstymas

Norint įvertinti bangų pasiskirstymą Kuršių mariose buvo apskaičiuota bangų sugeneruojama galia (N/m^2) bei galimi didžiausi bangų aukščiai. Bangų parametrai buvo skaičiuojami pagrindinių aštuonių krypčių (šiaurės, šiaurės vakarų, vakarų, pietvakarių, pietų, pietryčių, rytų, šiaurės rytų) vėjui ir esat skirtingam (3 m/s, 7m/s, 11 m/s, 15 m/s, 19 m/s, 22 m/s, 26 m/s, 31 m/s, 34 m/s) vėjo greičiui.

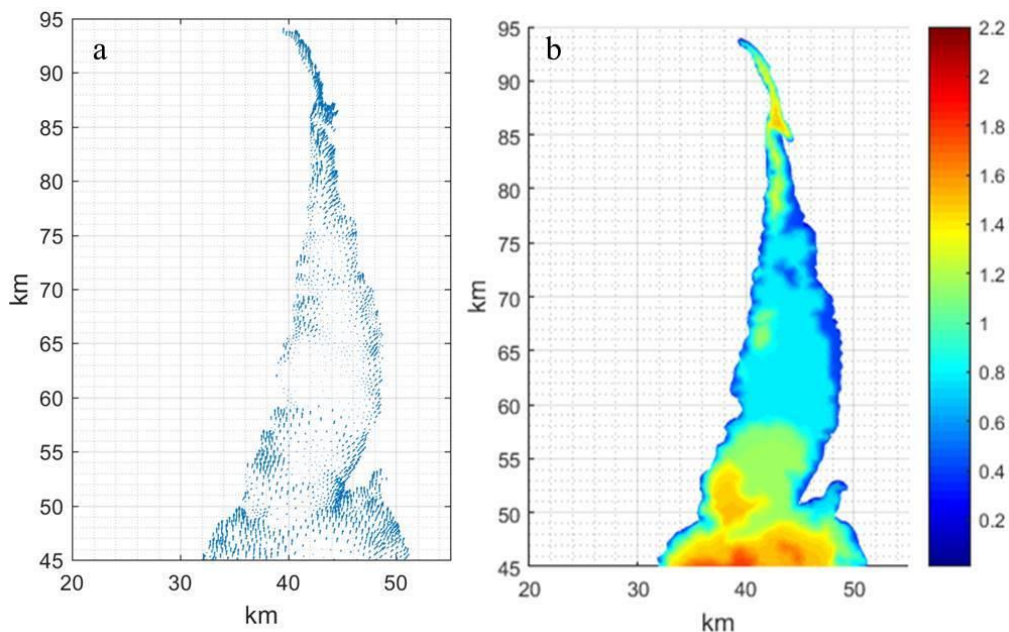
Pučiant stacionariam rytų vėjui Lietuvos Kuršių marių dalyje aukščiausios bangos formuojasi ties Preila – Bulvikio ragu, ir siekia apie 1,4 m (10 pav. b). Esant rytų vėjui daugiausia bangų galios sugeneruojama nuo Klaipėdos uosto įplaukos kanalo iki Juodkrantės bei pietrytinėje marių dalyje nuo Ventės rago ir piečiau. Maksimalus krantui tenkantis bangų galios kiekis – $0,47 N/m^2$, daugiausia galios nukreipta į vakarinę Kuršių marių krantą (10 pav. a) (1 priedas, 1 pav.).



10 pav. 99 percentilių bangų galios (a) (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio aukščių (b) pasiskirstymas be augalijos pučiant stacionariam rytų vėjui

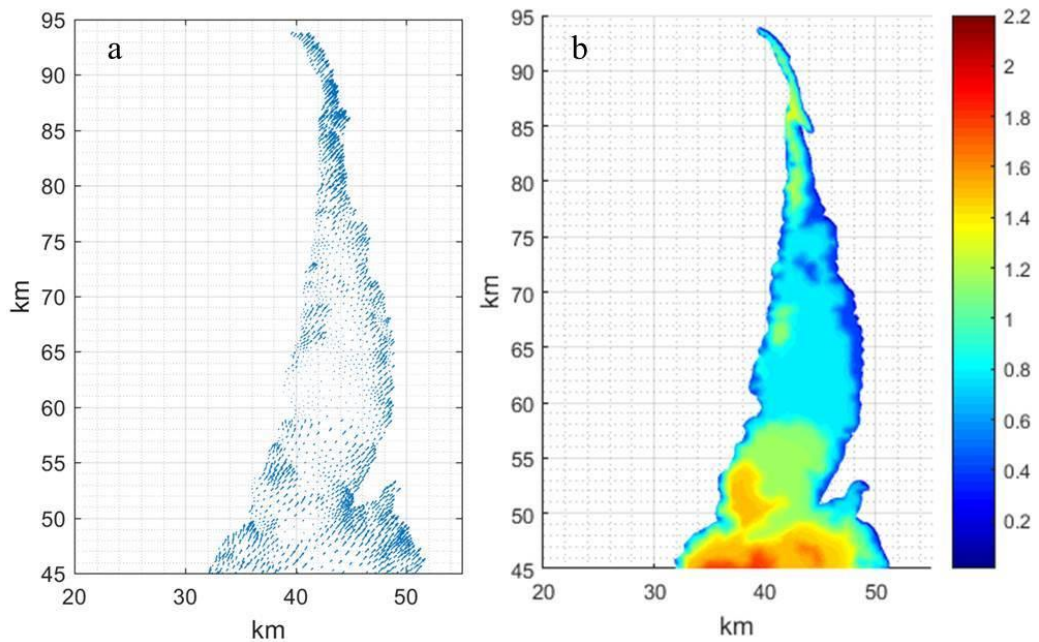
Esant šiaurės vėjui daugiausia galios tenka šiaurinei Kuršių marių dalei, nuo uosto iki Juodkrantės, ties Ventės ragu bei Preila. Didžiausias sugeneruotas energijos kiekis pučiant stacionariam šiaurės vėjui yra – $0.48 N/m^2$ (11 pav. a) (1 priedas, 2 pav.). Aukščiausios modelio

apskaičiuotos bangos susidaro ties Kiaulės nugaros sala ir siekia apie 1,6 m, nuo Preilos iki Bulvikio rago – apie 1,4 – 1,6 m bei pietinėje, plačiausioje marių dalyje ties Lietuvos – Rusijos siena ir siekia apie 1,8 m (11 pav. b).



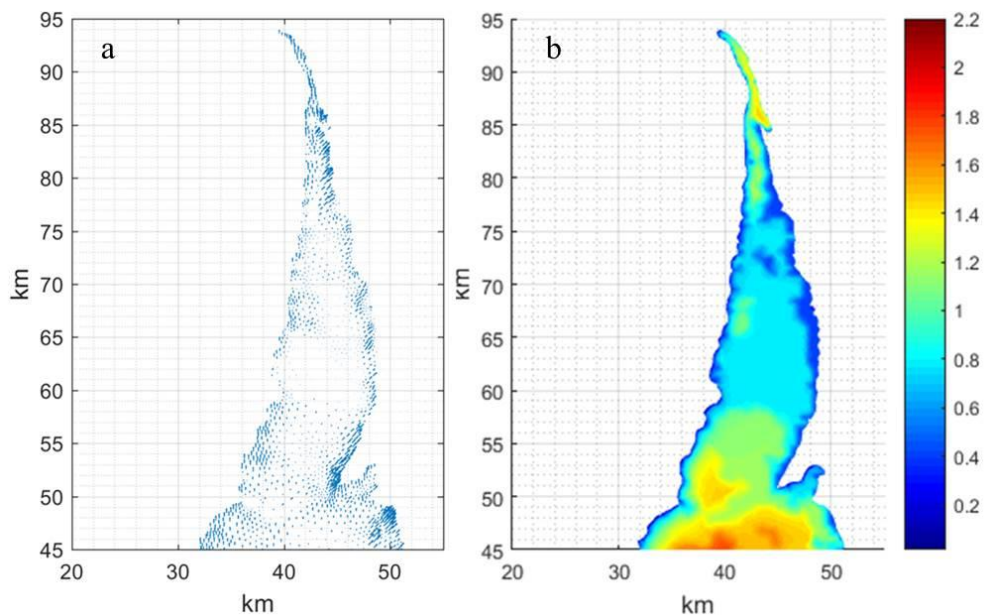
11 pav. 99 percentilių bangų galios (a) (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant stacionariam šiaurės vėjui

Pučiant stacionariam šiaurės rytų vėjui maksimali bangų galia siekia $0,48 N/m^2$ (12 pav. a) (1 priedas, 3 pav.). Daugiausia bangų galios tenka vakariniam marių krantui nuo Klaipėdos uosto įplaukos kanalo iki pat Nemuno deltos. Į rytinį marių krantą nukreipta bangų galia susidaro nuo Bulvikio rago iki Nidos. Galima pastebėti galios sustiprėjimus ten kur generuojamos aukštesnės bangos prie rytinio marių kranto (žalia, geltona spalvos). Aukščiausios bangos susidaro pietinėje marių dalyje (12 pav. b).



12 pav. 99 percentilių bangų galios (a) (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant stacionariam šiaurės rytų vėjui

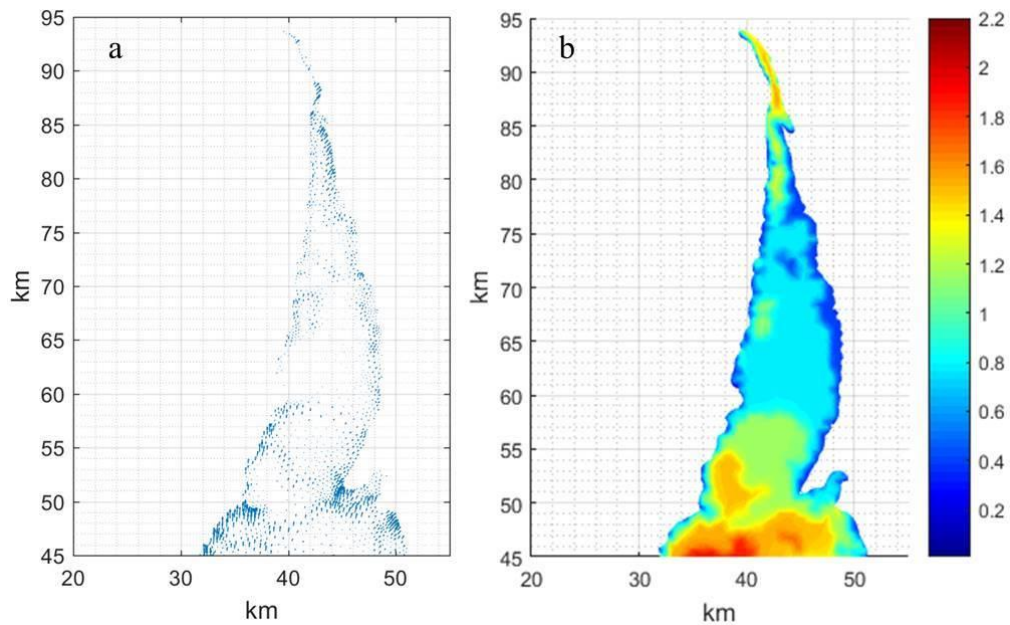
Pučiant stacionariam šiaurės vakarų vėjui daugiausia bangų galios tenka Ventės ragui bei Nemuno deltai. Didžiausia sumodeliuota galia siekia $0,78 \text{ N/m}^2$ (13 pav. a) (1 priedas, 4 pav.).



13 pav. 99 percentilių bangų galios (a) (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant stacionariam šiaurės vakarų vėjui

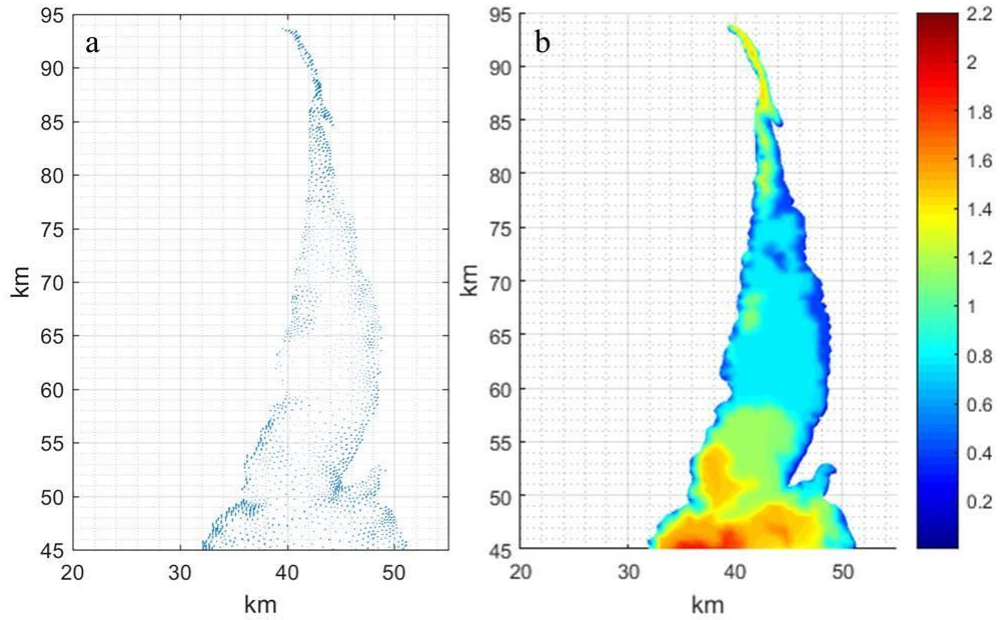
Vakarinėje marių dalyje nuo Kiaulės nugaros salos iki Nemuno deltos galia nukreipta nuožulniau krantui, o rytinėje marių dalyje galia nukreipta iš pietų į šiaurį. Aukščiausios bangos Klaipėdos uosto rytinėje pusėje iki Kiaulės nugaros salos bei pietinėje marių dalyje (13 pav. b).

Esant pietų vėjui aukščiausios bangos generuojamos Klaipėdos uoste iki Kiaulės nugaros salos ir siekia apie 1,8 m, pietinėje marių dalyje bangos siekia apie 2 m (14 pav. b). Daugiausia bangų galios fiksuojama pietinėje Kuršių marių dalyje nuo Lietuvos sienos iki Nidos ir ties Ventės ragu – $0,58 \text{ N/m}^2$ (14 pav. a) (1 priedas, 5 pav.).



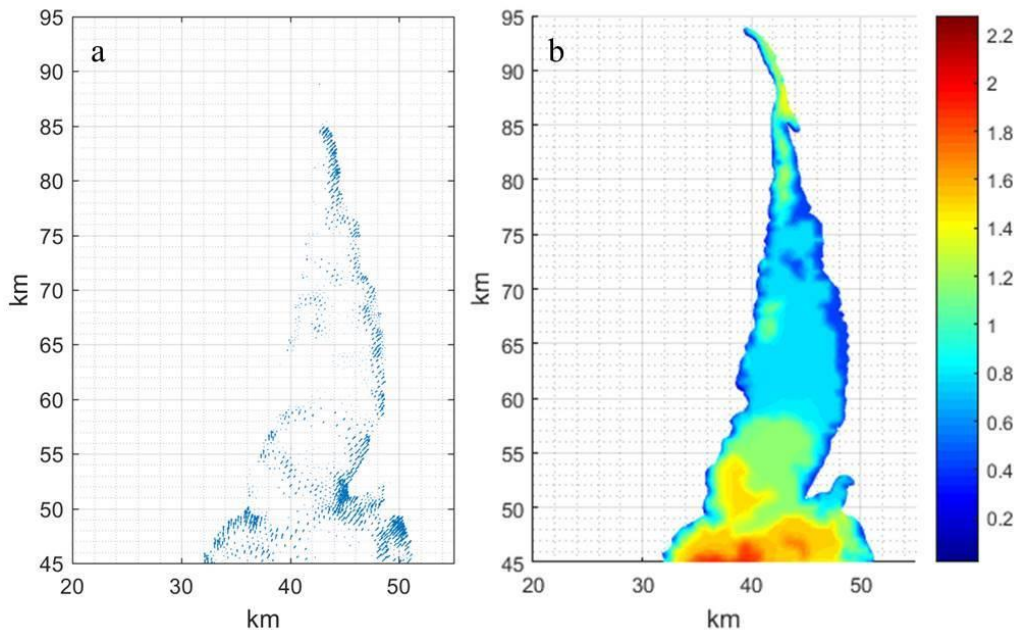
14 pav. 99 percentilių bangų galios (a) (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant stacionariam pietų vėjui

Pučiant stacionariam pietryčių vėjui Lietuvos Kuršių marių dalyje aukščiausios bangos formuojasi ties Preila – Bulvikių ragu bei Klaipėdos uoste ir siekia apie 1,6 m, pietinėje marių dalyje bangos siekia apie 1,8 m (15 pav. b). Esant pietryčių vėjui daugiausia bangų galios sugeneruojama nuo Klaipėdos uosto įplaukos kanalo iki Juodkrantės bei pietvakarinėje marių dalyje nuo Bulvikių rago ir piečiau (15 pav. a) (1 priedas, 6 pav.). Maksimalus krantui tenkantis bangų galios kiekis – $0,57 \text{ N/m}^2$.



15 pav. 99 procentilių bangų galios (a) (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant pietryčių vėjui

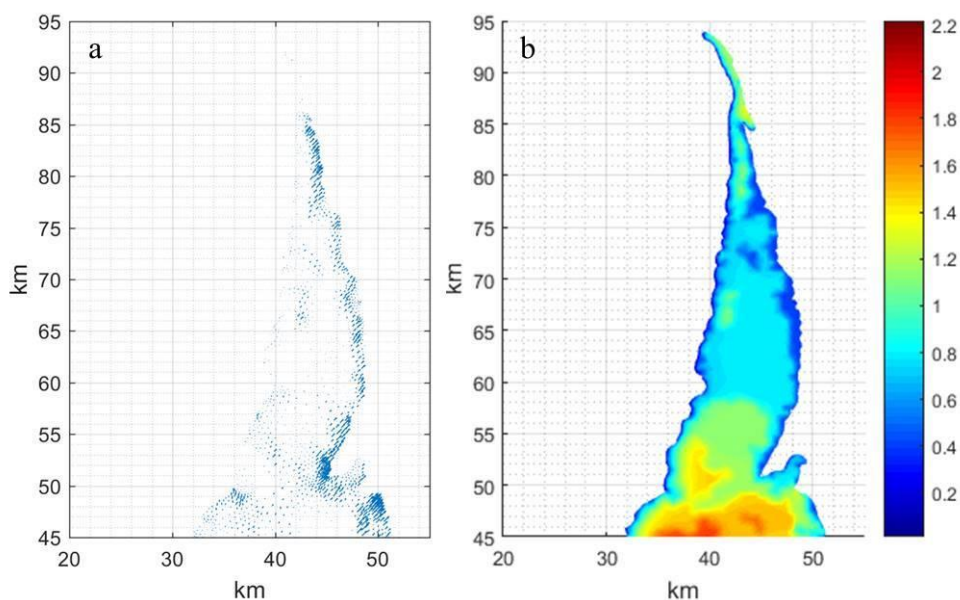
Esant pietvakarių vėjui daugiausia galios tenka visam vakariniam Kuršių marių krantui bei pietrytiniai daliai – Bulvickio ragui. Didžiausias sugeneruotas energijos kiekis pučiant stacionariam pietvakarių vėjui yra – $0,89 N/m^2$ (16 pav. a) (1 priedas, 7 pav.).



16 pav. 99 procentilių bangų galios (a) (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant stacionariam pietvakarių vėjui

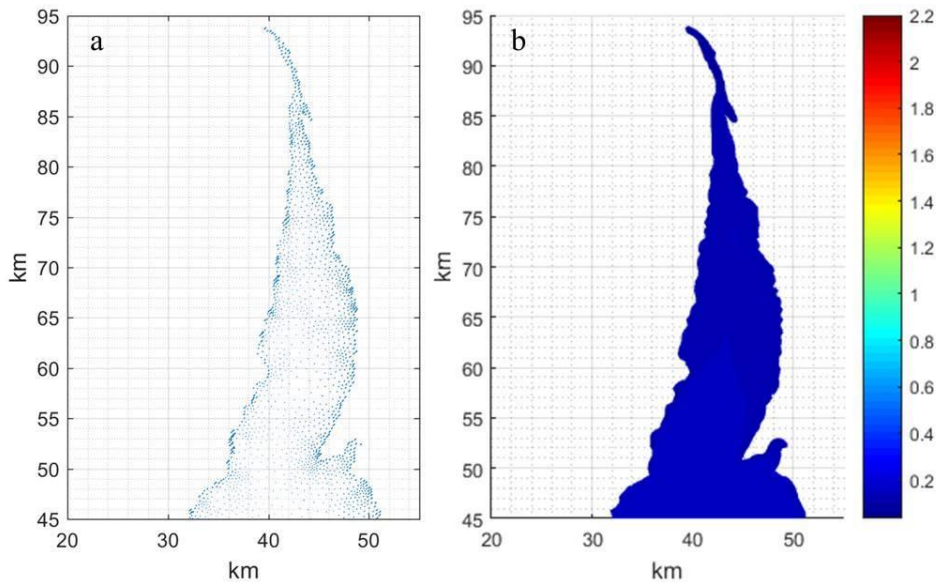
Aukščiausios modelio pateiktos bangos susidaro ties Kiaulės nugaros sala ir siekia apie 1,4 m, nuo Preilos iki Bulvikio rago – apie 1,4 m bei pietinėje, plačiausioje marių dalyje ties Lietuvos siena ir siekia apie 1.6 – 1,8 m (16 pav. b).

Pučiant stacionariam vakarų vėjui maksimali bangų galia siekia 1.03 N/m^2 (17 pav. a) (1 priedas, 8 pav.). Daugiausia bangų galios tenka vakariniam marių krantui nuo Klaipėdos uosto įplaukos kanalo Kiaulės nugaros salos, Ventės ragui bei Nemuno deltai. Galima pastebėti galios sustiprėjimus ten kur generuojamos aukštesnės bangos prie rytinio marių kranto (žalia, geltona spalvos). Aukščiausios bangos susidaro pietinėje marių dalyje (17 pav. b).



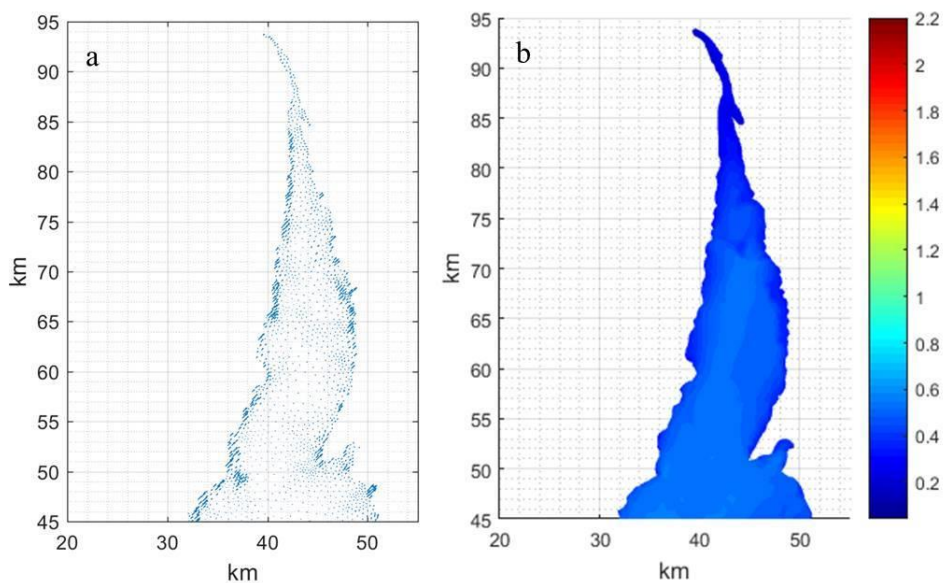
17 pav. 99 procentilių bangų galios (a) (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant stacionariam vakarų vėjui

Pučiant 3 m/s vėjui bangų maksimali galia siekia – $0,01 \text{ N/m}^2$ (18 pav. a) (1 priedas, 9 pav.). Galia pasiskirsto gan tolygiai visose mariose. Mažiausi bangų aukščiai Klaipėdos uoste, aukštesnės bangos susidaro pietinėje marių dalyje, tačiau esant 3 m/s vėjui bangos neviršija 0,3 m (18 pav. b).



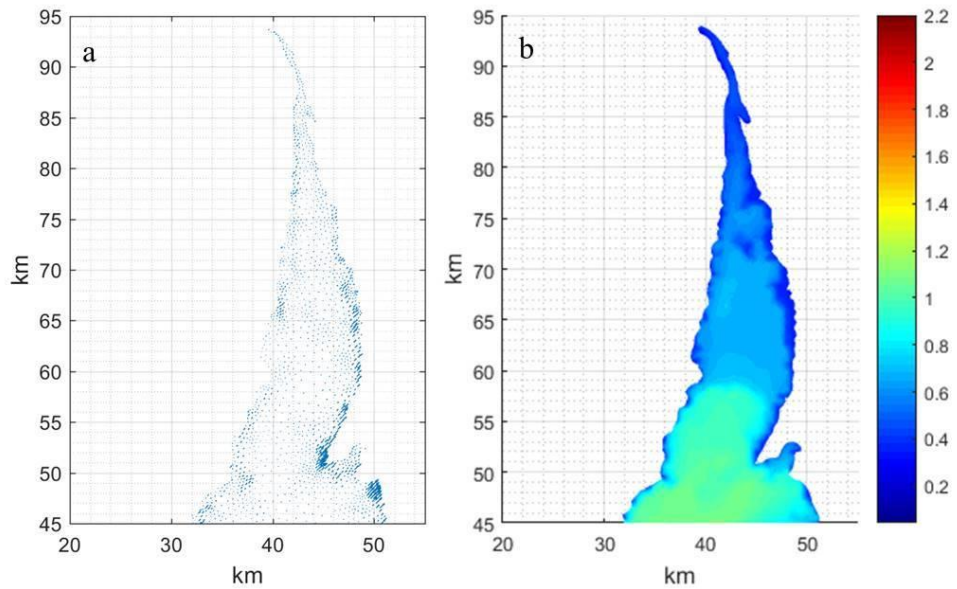
18 pav. 99 procentilių bangų galios (a) (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant 3 m/s vėjui

Esant 7 m/s vėjui daugiau bangų galios generuojama ties rytiniu marių krantu, Nida – Bulvikio ragu, Arklių ragu – Juodkrante, ir vakariniam krante ties Svencele. Maksimali bangų galia siekia $0,13 \text{ N/m}^2$ (19 pav. a) (1 priedas, 10 pav.). Pučiant 7 m/s vėjui maksimalūs bangų aukščiai svyruoja nuo Klaipėdos uoste mažiau kaip 0,2 m, iki pietinėje marių dalyje apie 0,6 m (19 pav. b).



19 pav. 99 procentilių bangų galios (a) (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant 7 m/s vėjui

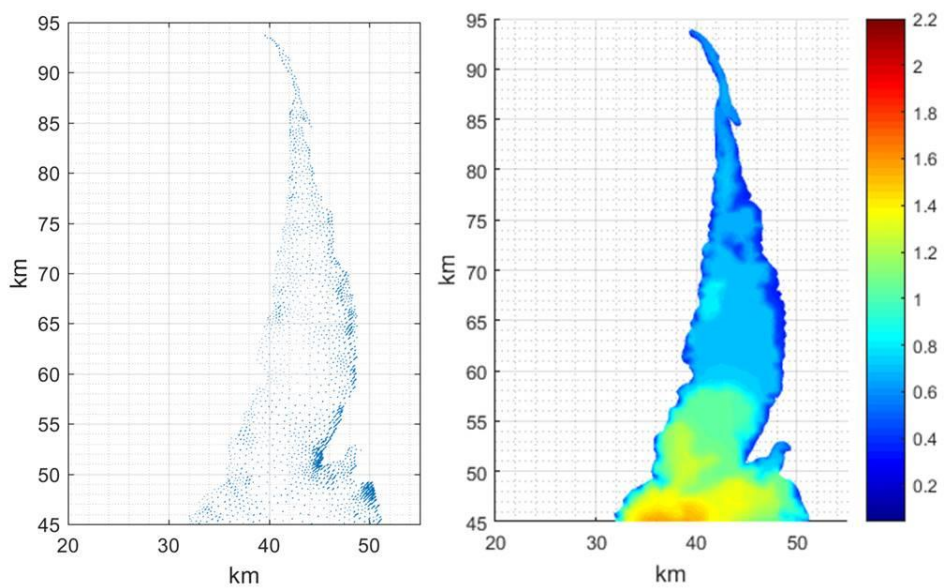
Pučiant 11 m/s vėjui didžiausia bangų galia siekia $0,61 \text{ N/m}^2$ (20 pav. a) (1 priedas, 11 pav.).



20 pav. 99 procentilių bangų galios (a) (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant 11 m/s vėjui

Daugiausia galios generuojama ties vakariniu marių krantu nuo Svencelės iki Nemuno deltos. Aukščiausios bangos susidaro nuo Arklių rago į pietus, bangų aukščiai galis siekti apie 1 m (20 pav. b).

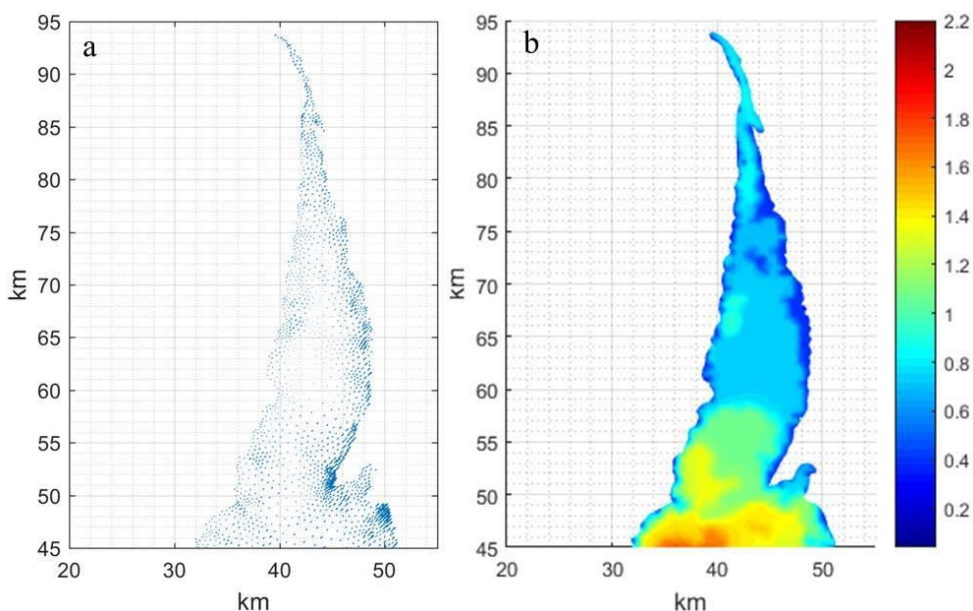
Pučiant 15 m/s vėjui maksimali bangų galia siekia $0,92 N/m^2$ (21 pav. a) (1 priedas, 12 pav.).



21 pav. 99 procentilių bangų galios (a) (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant 15 m/s vėjui

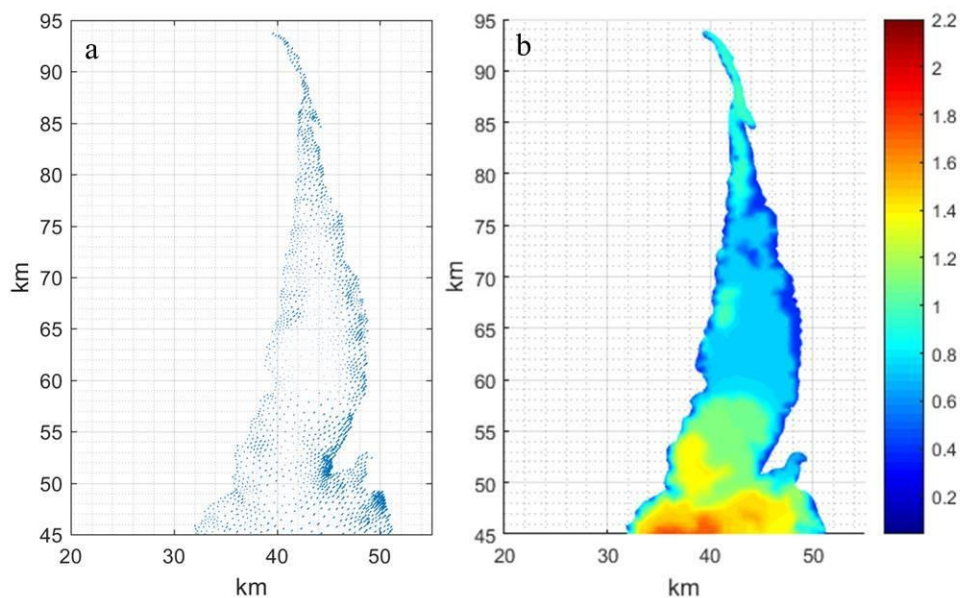
Daugiausia galios generuojama ties vakariniu marių krantu nuo Svencelės iki Nemuno deltos. Aukščiausios bangos susidaro nuo Arklių rago į pietus, piečiausioje Lietuvos marių dalyje bangų aukščiai gali siekti iki 1,6 m (21 pav. b).

Stiprėjant vėjui auga bangų galia visose mariose, esant 19 m/s vėjui maksimali galia siekia $0,99 \text{ N/m}^2$ (22 pav. a) (1 priedas, 13 pav.). Daugiausia galios generuojama ties vakariniu marių krantu, ypač daug bangų galios tenka Ventės ragui. Aukščiausios bangos susidaro ties Preila – Bulvickio ragu apie 1,4 m, ir piečiau Bulvickio rago svyruoja nuo 1,4 m iki 1,6 m (22 pav. b).



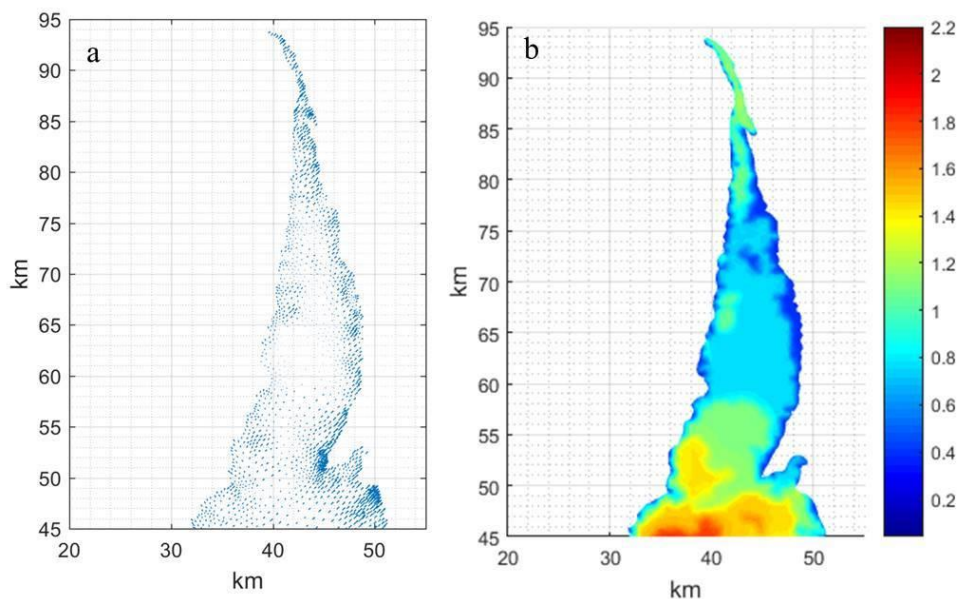
22 pav. 99 percentilių bangų galios (a) (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant 19 m/s vėjui

Stiprėjant vėjui auga bangų galia visose mariose, esant 22 m/s vėjui maksimali galia siekia $1,02 \text{ N/m}^2$ (23 pav. a) (1 priedas, 14 pav.). Daugiausia galios generuojama arčiau marių krantų, ypač daug bangų galios prie Ventės ragui, Nemuno deltos. Aukščiausios bangos susidaro ties Preila – Bulvickio ragu apie 1,4 m, ir piečiau Bulvickio rago svyruoja nuo 1,4 m iki 1,6 m. (23 pav. b).



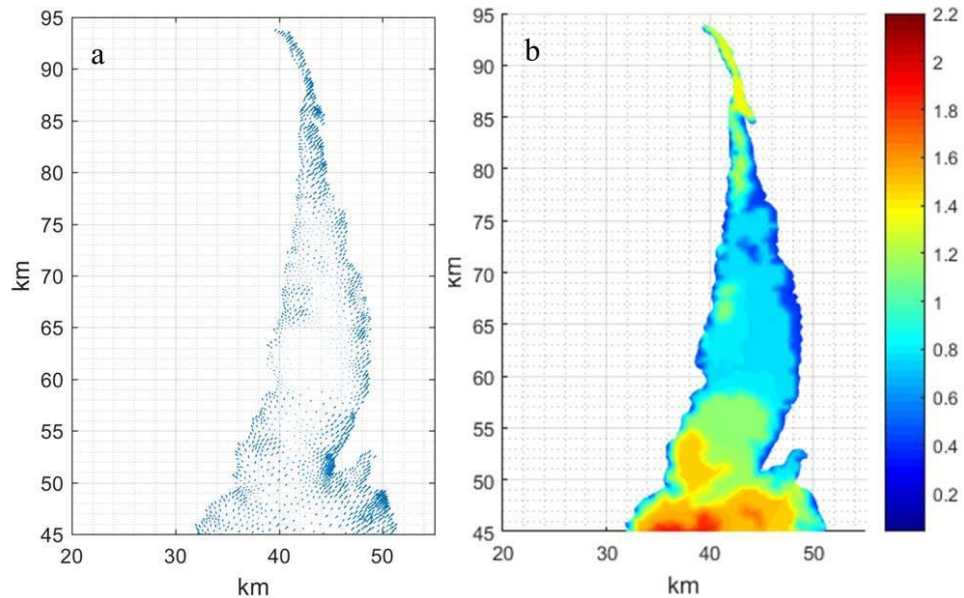
23 pav. 99 procentilių bangų galios (a) (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant 22 m/s vėjui

Pučiant 26 m/s vėjui didžiausia bangų galia siekia $1,02 \text{ N/m}^2$ (24 pav. a) (1 priedas, 15 pav.). Daugiausia galios generuojama ties vakariniu marių krantu Ventės ragu bei Nemuno delta. Aukščiausios bangos susidaro nuo Arklių rago į pietus, ties Preila –Bulvikių ragu bangos galis siekti iki $1,4 \text{ m}$, piečiau bangų aukščiai gali siekti iki $1,8 \text{ m}$ (24 pav. b).



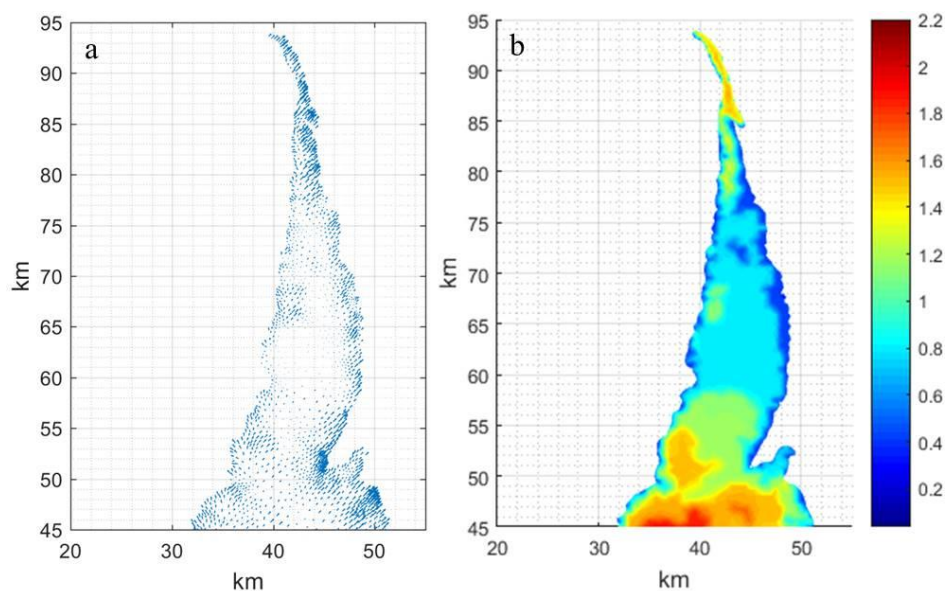
24 pav. 99 procentilių bangų galios (a) (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant 26m/s vėjui

Pučiant 31 m/s vėjui maksimali bangų galia siekia $1,03 \text{ N/m}^2$ (25 pav. a) (1 priedas, 16 pav.). Stiprėjant vėjui daugiau bangų galios susidaro nuo Klaipėdos uosto iki Juodkrantės, bei pietinėje marių dalyje. Bangų aukščiai Klaipėdos uoste iki Kiaulės kuragos salos ir siekia iki 1,6 m, marių pietrytinėje dalyje, nuo Preilos iki Bulvikio rago bangų aukščiai apie 1,6 m, piečiau bangos gali siekti iki 2 m (25 pav. b).



25 pav. 99 procentilių bangų galios (a) (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant 31 m/s vėjui

Pučiant 34 m/s vėjui maksimali bangų galia siekia $1,04 \text{ N/m}^2$ (25 pav. a) (1 priedas, 17 pav.). Stiprėjant vėjui bangų galia išauga nuo Klaipėdos uosto iki Juodkrantės, bei pietinėje marių dalyje nuo Pervalkos. Bangų aukščiai Klaipėdos uoste iki Kiaulės kuragos salos gali būti apie 1,6 m, marių pietrytinėje dalyje, nuo Preilos iki Bulvikio rago bangų aukščiai apie 1,6 m, piečiau bangos gali siekti iki 2 m (26 pav. b).



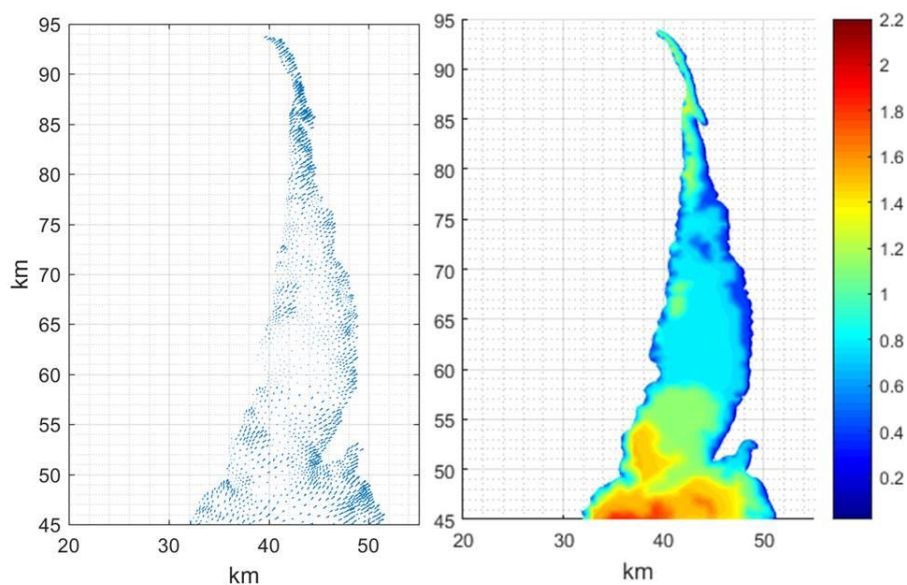
26 pav. 99 percentilių bangų galios (a) (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio (b) (m) pasiskirstymas be augalijos pučiant 34 m/s vėjui

3.3 Bangų galios pasiskirstymas įvertinus makrofitų įtaką

Nagrinėjant makrofitų įtaką bangų pasiskirstymui Kuršių mariose buvo pastebėta, kad modelio rezultatai įvertinus makrofitų duomenis, gautus iš echogramų padarytų 2014 – 2015 m bei 2018 m, bangų parametrai nekinta (27 pav.).

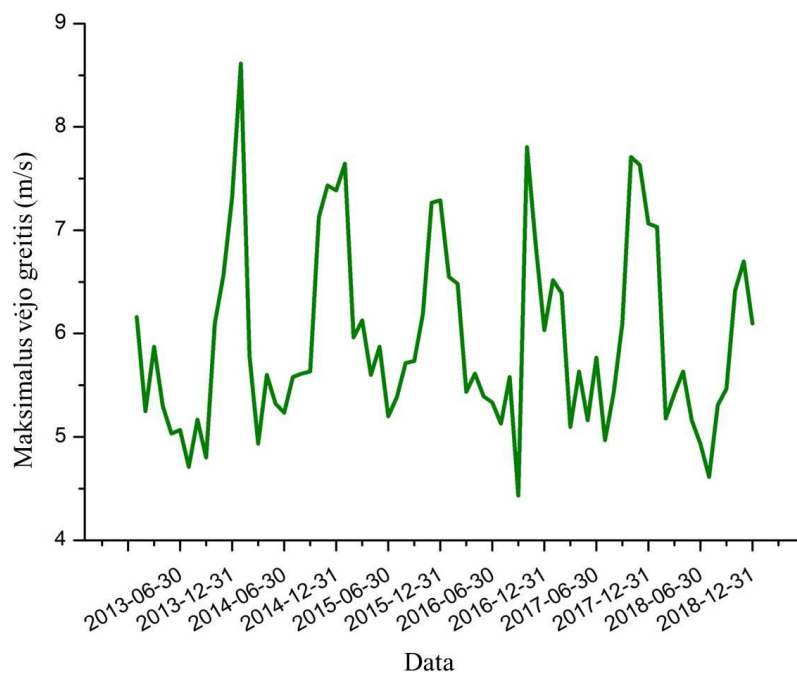
Apskaičiavus maksimalius bangų aukščius neįvertinant makrofitų poveikio ir jį įvertinus gauti skirtumai tarp šių reikšmių buvo lygūs nuliui. Todėl siekiant įvertinti bangų režimą Kuršių mariose modeliavimas nebebuvo atliekamas atskiriems vegetaciniams periodams, bangų parametrai buvo modeliuojami atskiromis stacionariomis vėjo kryptimis ir skirtingais vėjo greičiais. Darbe nagrinėti SWAN modelio bangų režimo rezultatai be augmenijos.

Dėl stipraus vėjo auganti bangų galia galinti paveikti makrofitų įsitvirtinimą grunte, užnešti ar išrauti makrofitus. Todėl siekiant nustatyti ar vegetacinis laikotarpis sutampa su stipriausių vėjų sezoniškumu, buvo sudarytas 2013 – 2018 metų maksimalaus vėjo greičio grafikas. Buvo apskaičiuoti maksimalaus vėjo greičiai vidurkiai kiekvienam 2013 – 2018 metų mėnesiui (28 pav.). Pastebėta, kad vėjo greičio vidurkis ties Nida padidėja spalio mėnesį ir greičio padidėjimas tęsiasi iki sausio mėnesio imtinai visais tyrimo metais.



27 pav. 99 percentilių bangų galios (N/m^2) ir vidutinis reikšmingo bangų aukščio aukščių (m) pasiskirstymas su augalija pučiant stacionariam rytų vėjui

Makrofitų vegetacijos laikotarpiu gegužės – rugpjūčio mėnesiais 2013 metais vėjo maksimalių vėjo greičių vidurkis buvo: 2013 m – 5,06 m/s, 2014 m – 5,47 m/s, 2015 m – 5,55 m/s, 2016 m – 5,41 m/s, 2017 m – 5,39 m/s, 2018 m – 5,12 m/s (28 pav.).



28 pav. Maksimalaus vėjo greičio 2013 – 2018 m. mėnesių vidurkiai (m/s)

Išnagrinėjus modelio rezultatus galima pastebėti, kad jei vėjo greitis 3 m/s bangos aukštis sieks iki 0,15 m, esant 7m/s vėjui bangų aukštis bus iki 0,59 m, pučiant 11 m/s vėjui bangos gali siekti 1,15 m, kai vėjo greitis 15 m/s – bangų aukščiai iki 1,59 m. Todėl iš turimų 2013 – 2018 m. vėjo duomenų ir modelio rezultatų galima teigti, kad tiriamu laikotarpiu makrofitų vegetacijos sezonais bangų aukščiai vidutiniškai svyravo tarp 0,15 m ir 0,59 m.

IV TYRIMO REZULTATŲ APTARIMAS

SWAN modelis gali būti taikomas įvairaus masto pakrančių zonoms (Jones ir kt., 2015). Pritaikomas vėjinėms bangoms, bangų parametrų pokyčiams dėl vandens augmenijos modeliavimui. Jones (2015) SWAN bangų modelį panaudojo norėdamas identifikuoti bangų galios variacijas bei vietas, kuriuose bangos gali paveikti makrofitų sąžalynus. De Oude (2010) aprašė SWAN modelio pritaikymą įtraukiant makrofitų poveikį bangų režimui. Modelio pagalba buvo nustatyta kokių parametrų makrofitų juosta turi būti užauginta prieš Noordwaard polderį (Olandija), siekiant sumažinti bangų aukštį per stiprias audras. Makrofitų juosta leistų sumažinti polderio aukštį ir taip mažiau būtų paveikiamas kraštovaizdis.

De Oude (2010) kaip vieną svarbiausių ir aiškiausių modelio tinkamumo įvertinimo indikatorių naudojo maksimalų bangų aukštį. Šiame darbe atliekant modelio validaciją taip pat buvo naudotas maksimalus bangų aukštis. Modelis buvo paleistas su 2013 – 2018 metų Nidos vėjo duomenimis ir apskaičiuoti maksimalūs bangų aukščiai, kurie vėliau lyginti su Nidoje Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos stebėtojo nustatytais maksimaliais bangų aukščiais tuo pačiu laikotarpiu. Siekiant statistiškai įvertinti modelio tikslumą buvo skaičiuotas Vilkoksono ženklų kriterijus ($V=1600200$, $df=2189$, $p<0,01$). Imčių vidurkių skirtumus galėjo lemti didelis 0 kiekis *in situ* nustatytuose bangų aukščiuose, nes esant ledui ar prastoms oro sąlygoms, neleidžiant įvertinti bangų aukščių, jie buvo vertinami 0. Tačiau palyginus modelio ir *in situ* išmatuotus bangų aukščius ir apskaičiuotus vidutinę absoliučią paklaidą, ji buvo lygi 0,09 m.

Pagal Dailidienės (2014) analizės rezultatus pastaruoju metu yra stebimas didesnis pietvakarių vėjų, formuojančių aukštesnius vandens lygius, pasikartojimas, o pietryčių vėjų, formuojančių nuotvanką– sumažėjimas. Siekiant įvertinti bangų pasiskirstymą Kuršių mariose buvo apskaičiuota bangų sugeneruojama galia (N/m^2) bei galimi didžiausi bangų aukščiai (m). Didžiausi bangų aukščiai pasirinkti analizei nes pagal de Oude (2010) tai yra puikus indikatorius atspindintis kaip kinta bangų galia, taip pat maksimalius bangų aukščius, apskaičiuotus SWAN bangų modelio, savo darbe naudojo Jones (2015) bei Gorrell (2011). Bangų galia ir aukščiai buvo modeliuojami pagrindinėms 8 vėjo kryptims bei skirtingais vėjo greičiais, nuo 3 m/s iki 34 m/s. Naudojant SWAN bangų modelį gauta, kad visais nagrinėtais vėjo krypčių atvejais daugiausia bangų galios generuojama ties vakariniu Kuršių marių krantu, išskirtinės zonos – Ventės ragas ir Nemuno delta. Daugiau bangų galios tenka kyšuliams ir atviresnėms vietoms, Jones (2015) atliktame tyrime taip pat pastebėti, didesnius bangų parametrus atvirose vietose. Daugiausia galios generuojama pučiant vakarinių krypčių vėjams: vakarų vėjui – $1,03 N/m^2$, pietvakarių – $0,89 N/m^2$, šiaurės vakarų – $0,78 N/m^2$. Modeliuojant bangų galią pučiant skirtingo stiprumo vėjui pastebėta, kad didėjant vėjo

greičiui auga bangų galia. Sparčiausias galios augimas stebimas vėjo greičiui kintant nuo 7 m/s iki 11 m/s, maksimali galima galia atitinkamai auga nuo 0,13 N/m² iki 0,61 N/m². Pagal SWAN modelio rezultatus aukščiausios bangos formuojasi pietinėje Lietuvos Kuršių marių dalyje ir gali siekti daugiau kaip 2 m. Pučiant pietvakarių vėjui maksimalūs bangų aukščiai gali siekti 2,28 m, pietų – 2,18 m, pietryčių – 2,07 m. Gauti rezultatai patvirtina, kad pietvakarių vėjas sukelia aukštesniais bangas (Dailidienė 2014). Skaičiuojant galimus bangų aukščius su skirtingas vėjo greičiais pastebėta, kad didėjant vėjo greičiui nuo 11 m/s išryškėja atskiros aukštesnių bangų zonos Kuršių mariose: Klaipėdos uostas iki Kiaulės nugaros salos, nuo Avikalnio rago iki Naglių rago bei nuo Preilos iki Bulvikio rago. Ties kyšuliais seklesnis ir platesnis atabradas labiau veikiamas bangų (Žaromskis, 2009).

Atnaujinus bangų modelį su makrofitų duomenimis surinktais 2014 – 2015 m. ir 2018 m. iš gautų rezultatų pastebėta, kad pagal turimus makrofitų duomenis sumodeliuoti bangų parametrai nesiskiria nuo bangų parametrų, gautų modeliuojant bangas neįvedant augalų duomenų. Nagrinėtose echogramose užfiksuoti panirę lankstūs makrofitai (Bučas ir kt., 2016). Pagal de Oude (2010) tyrimą lankstūs makrofitai turi mažesnes vegetacijos parametro reikšmes net ir būdami tokio pat tankio ir storio kaip standūs makrofitai. Todėl nagrinėti lanksčių makrofitų sąžalynai daro mažesnę įtaka bangų parametrams nei standūs makrofitai. Tačiau negalima atmesti prielaidos, kad makrofitai keičia bangų galios pasiskirstymą, sugerdami didesnę bangų energijos dalį. Žaromskio (2009) teigimu susiformavusios augalijos juostos mažina hidrodinaminį aktyvumą. De Oude (2010) atliktame tyrime SWAN modelis buvo pasitelktas busimai makrofitų juostai įvertinti, buvo padaryta išvada, kad platesnė, ilgesnė bei mažiau lanksčių augalų juosta stipriau veiks bangų parametrus. Jones (2015) tyrime buvo vertinamos dvi panirusių makrofitų rūšys, besiskiriančios savo aukščiu. Rūšis pasiekianti vandens paviršiu buvo vertinta iš ortofoto nuotraukų iš kurių atsitiktinai pasirinkus 20000 taškų buvo vertinamas jos buvimas nebuvimas, antroji rūšis – panirę makrofitai vertinti tik teoriškai dėl mažo duomenų kiekio apie jų buvimą. SWAN modelis dažniau taikytas standiems augalams – mangrovėms (Vanegas ir kt., 2019; Suzuki ir kt., 2012).

Turėti duomenys apie makrofitų sąžalynus Kuršių mariose gali būti nepakankami norit įvertinti jų įtaką bangoms. Modelyje naudota gardelė buvo 25 m, norit gauti tikslesnius modelio rezultatus reikėtų smulkinti naudojamą gardelę. Siekiant tikslesnių rezultatų patartina įvertinti ne vien panirusius makrofitus, bet ir skirtingų rūšių makrofitus, renkant medžiagą sonaru daryti pakartotinius transektus šalia. Todėl būtini detalesni *in situ* tyrimai.

IŠVADOS

1. Atlikus modelio validaciją ir palyginus SWAN modelio su 2013 – 2018 metų Nidos vėjo duomenimis maksimalių bangų aukščių rezultatus su Nidoje stebėtais maksimaliais bangų aukščiais ir apskaičiavus vidutinę absoliučią paklaidą, ji buvo lygi 0,09 m.
2. Naudojant SWAN bangų modelį gauta, kad visais nagrinėtais vėjo krypčių atvejais daugiausia bangų galios generuojama ties vakariniu Kuršių marių krantu, išskirtinės zonos – Ventės ragas ir Nemuno delta. Daugiausia galios generuojama pučiant vakarinių krypčių vėjams: vakarų vėjui, pietvakarių, šiaurės vakarų. Aukščiausios bangos pagal SWAN modelio rezultatus susidaro pietinėje Lietuvos Kuršių marių dalyje. Aukščiausios bangos susidaro pučiant pietinių krypčių vėjams. Didėjant vėjo greičiui nuo 11 m/s išryškėja atskiros aukštesnių bangų zonos Kuršių mariose – Klaipėdos uostas iki Kiaulės nugaros salos, nuo Avikalnio rago iki Naglių rago bei nuo Preilos iki Bulvikio rago.
3. Atnaujinus bangų modelį su makrofitų duomenimis surinktais 2014 – 2015 m. ir 2018 m. išgautų rezultatų pastebėta, kad turimi augalijos duomenys įvesti į modelį reikšmingai nepakeičia modeliuotų bangų parametrų. Tolimesniam bangų modelio vystymui reikalingi tikslesnis ir detalesni makrofitų augaviečių fizinių parametrų aprašymai.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Bučas M. 2016. *Makrofitobentosos stebėsenos kuršių mariose ir Baltijos jūroje bei ekologinės būklės pagal makrofitus įvertinimas*. Klaipėda, p. 12-14.
2. Bučas M., Šaškov A., Šiaulys A., Sinkevičienė Z. 2016. *Assessment of a simple hydroacoustic system for the mapping of macrophytes in extremely shallow and turbid lagoon*. *Aquatic Botany* 134 (2016) 39–46 p.
3. Bukantis A. 1994. *Lietuvos klimatas*. Vilnius, VU leidykla, p. 187.
4. Bukantis A., Dailidienė I., Česnulevičius A., Gelumauskaitė L.Ž., Jarmalavičius D., Kavolytė R., Kažys J., Liukaitytė J., Morkūnaitė R., Pilikaitė R., Paškauskas R., Povilanskienė R., Razinkovas A., Stankūnavičius G., Stonevičius E., Šečkus J., Taločkaitė E., Žilinskas G. 2007. *Klimato kaita: prisitaikymas prie jos poveikio Lietuvos pajūryje*. Vilnius, Vilniaus universitetas. Prieiga internetu: http://www.hkk.gf.vu.lt/publikacijos/2007_Klimato_kaita_prisitaikymas_prie_jos_poveikio_Lietuvos_pajuryje.pdf [žiūrėta 2018–01–06].
5. Carrington–Bell E., Denny M.W., 1994. *Quantifying “wave exposure”: a simple device for recording maximum velocity and results of its use at several field sites* *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, p. 181, 9–29. Prieiga internetu: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022098194901015> [žiūrėta 2018–01–06].
6. *Computer Science Division University of California at Berkeley Berkeley*. Prieiga internetu: <http://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.html> [žiūrėta 2019–01–05].
7. Čekanavičius V., Murauskas G. 2000. *Statistika I dalis*. Vilnius, p. 240.
8. Dailidienė, I., Davulienė, L., 2008. *Salinity trend and variation in the Baltic Sea near the Lithuanian coast and in the Curonian Lagoon 1984–2005*. *Journal of Marine Systems*, p. 20–29.
9. Dailidienė, I., Gelumauskaitė, L. Ž., Grigelis, A., Gulbinskas, S., Kelpšaitė, L., Kriaučiūnienė, J., Zemlys, P., 2014. *Baltijos jūros krantų erozijos problemų analizė ir sprendimo būdai*. Studija Klaipėda, Klaipėdos universitetas. Prieiga internetu: <http://www.esparama.lt/documents/10157/490675/BALTIJOS+J%C5%AAROS+KRANT%C5%B2+EROZIJOS+PROBLEM%C5%B2+ANALIZ%C4%96+IR+SPRENDIMO+B%C5%AADAI.pdf> [žiūrėta 2018-01-06].
10. Dalrymple, R.A., J.T. Kirby and P.A. Hwang, 1984: *Wave diffraction due to areas of energy dissipation*. *Journal of Waterways, Ports, Harbours and Coastal Engineering*, p. 67-79
11. de Oude R. 2010. *Modelling wave attenuation by vegetation with SWAN-VEG. Model evaluation and application to the Noordwaard polder*. Delft, p. 18 – 20, 74 – 87.

12. Diba N. J., Naz S., Azam Shah Md. G. G. 2013. *Chara contraria Braun ex Kütz. (Characeae): A new record for Bangladesh*. Algological Studies, p. 3–9.
13. Forsberg P.L., Ernstsens V.B., Andersen T.J., Winter C., Becker M., Kroon A. 2018. *The effect of successive storm events and seagrass coverage on sediment suspension in a coastal lagoon*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 212 (2018), p. 329–340.
14. Frederiksen M, Krause–Jensen D, Holmer M, Laursen JS., 2004. *Spatial and temporal variation in eelgrass (Zostera marina) landscapes: influence of physical setting*. Aquatic Botany, p. 147–165.
15. Galema A.A. 2009. *Evaluation of vegetation resistance descriptors for flood management*. Daktato disertacija. Enschede, p. 11 – 26, 40.
16. Gasiūnaitė Z.R., Daunys, D., Olenin, S., Razinkovas, A. 2008. *The Curonian Lagoon*. Ecology of Baltic Coastal Waters. p. 197–215. Springer–Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, p. 197–216. Prieiga internetu: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-73524-3_9
17. Gorrell L., Raubenheimer B., Elgar S., Guza R.T. 2011. *SWAN predictions of waves observed in shallow water onshore of complex bathymetry*. Coastal Engineering, p. 510–516.
18. Grigelis A., Paškauskaitė J., Gelumauskaitė L.Ž., Šečkus J., Rusteika P. 2007. *Kuršių nerijos krantų geodinaminė aplinka ir jų apsauga*. Vilnius – Neringa: Lietuvos mokslų akademija, Neringos savivaldybės administracija, p. 40–58.
19. Holthuijsen L. H. 2010. *Waves in oceanic and costal waters*. Cambridge University Press, p. 24-243.
20. *Humminbird sonaro specifikacijos aprašymas*. 2011. Prieiga internetu: https://humminbird.com.au/wp-content/themes/humminbird/media/support/900series/998si_958di_958_898si_858di_858_Manual.pdf [žiūrėta 2018–09–05].
21. Infantes E. 2016. *Wave hydrodynamic on marine macrophytes*. Gothenburg: University of Gothenburg. p. 27–94.
22. Jones T., Gardner J.P.A., Bell ., J.J. 2015. *Modelling the effect of wave forces on subtidal macroalgae: A spatial evaluation of predicted disturbance for two habitat-forming species*. Ecological Modelling 313, p. 149–161. Prieiga internetu: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380015002756> [žiūrėta 2018–09–05].
23. Jurgilaitė D. 1998. *Kuršių marių šiaurinės dalies makrofitų augmenija*. Klaipėda.
24. Koch EW (2001) *Beyond light: Physical, geological, and geochemical parameters as possible submersed aquatic vegetation habitat requirements*. Estuaries, p. 1–17.

25. Luhar M, Rominger J, Nepf H (2008) *Interaction between flow, transport and vegetation spatial structure*. Environmental Fluid Mechanics, p. 423–439.
26. *MAE and RMSE—Which Metric is Better?*, 2014. Prieiga internetu: <https://medium.com/human-in-a-machine-world/mae-and-rmse-which-metric-is-better-e60ac3bde13d> [žiūrėta 2019–01–05].
27. Mažeika P. A. 2001. *Baltijos jūros hidrodinamika*. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla, p. 52–100.
28. Mendez, F.J. and I.J. Losada, 2004: *An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields*. Coastal Engineering, p. 103-118
29. Munk W. H. 1950. *Origin and generation of waves*. Institute of Geophysics and Scripps Institution of Oceanography University of California La Jolla, California. Prieiga internetu: <https://icce-ojs-tamu.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view/904> [žiūrėta 2018–09–05].
30. *NASA MODIS palydovo Aquva sensoriaus palydovinės nuotraukos*. 2013 – 2018. United States Government as represented by the Administrator of the National Aeronautics and Space Administration. Prieiga internetu: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/> [žiūrėta 2019–01–05].
31. Poggi D., Katul G., Albertson J., 2004. *A note on the contribution of dispersive fluxes to momentum transfer within canopies*. Boundary-layer Meteorology, p. 615–621.
32. Preen A., Lee Long W., Coles R., 1995. *Flood and cyclone related loss, and partial recovery, of more than 1000 km² of seagrass in Hervey Bay, Queensland, Australia*. Aquatic Botany, p. 3–17.
33. Rivers D., Kendrick G., Walker D., 2011. *Microsites play an important role for seedling survival in the seagrass Amphibolis antarctica*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, p. 29–35
34. Rowinski, P.M. and Kubrak, J., 2002. *A mixing-length model for predicting vertical velocity distribution in flows through emergent vegetation*. Hydrological Sciences-Journal des Sciences Hydroliques, p. 893-904.
35. Suzuki T., Zijlema M., Burger B., Meijer M. C., Narayan S. 2012. *Wave dissipation by vegetation with layer schematization in SWAN*. Coastal Engineering, p. 64 – 71.
36. *SWAN naudotojo vadovas*. 1993–2018 Delft University of Technology Simulating. Prieiga internetu: <http://swanmodel.sourceforge.net/> [žiūrėta 2018–09–05].
37. Tupčiauskaitė J. 2012. *Botanikos mokomoji lauko praktika*. Mokomoji knyga. Prieiga internetu:

- http://www.bg.gf.vu.lt/duomenys/botaninepraktika/botanikos_mokomoji_lauko_praktika.pdf
/[žiūrėta 2018–09–05].
38. University of Massachusetts Amherst. 2017. *Climate Action Tool*. Prieiga internetu: <https://climateactiontool.org/> [žiūrėta 2019–01–05].
 39. Utter, B.D., Denny, M.W., 1996. *Wave-induced forces on the giant kelp *Macrocystis pyrifera* (Agardh): Field test of a computational model*. *Experimental Biology*, p. 2645–2654.
 40. Vanegas A. C., Osorio A. F., Urrego L. A. 2019. *Wave dissipation across a *Rhizophora* mangrove patch on a Colombian Caribbean Island: An experimental approach*. *Ecological Engineering*, p. 271 – 281.
 41. VĮ GIS-Centras. WMS. *Lietuvos vidaus vandenų batimetrija*. Prieiga internetu: <https://www.geoportal.lt/map/#> [žiūrėta 2018–09–05]
 42. VĮ Vidaus vandens kelių direkcija. *Kuršių marių žemėlapis*. Prieiga internetu: <http://vvkd.lt/kursiu-mariu-zemelapis/> [žiūrėta 2017–09–05].
 43. Wright, L.D., 1976. *Near shore wave–power dissipation and the coastal energy regime of the Sydney–Jervis Bay region, New South Wales: a comparison*. *Marine and Freshwater Research*, p. 27, 633–640
 44. Žaromskis R. 1996. *Okeanai, jūros, estuarijos*. Vilnius: Debesija, p. 85–100.
 45. Žaromskis R. 2009. *Kuršių marių priekrantės makrofitai ir jų augimviečių litodinaminės sąlygos*. Vilniaus universitetas.

PRIEDAI