

LIETUVOS ŽEMĖS ŪKIO UNIVERSITETAS
VANDENS ŪKIO IR ŽEMĖTVARKOS FAKULTETAS
Hidrotechnikos katedra

Aušra Janonytė

KAUNO HE ŽEMUTINIO BJEFO HIDRODINAMIKA

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Studijų sritis: Technologijos mokslai

Studijų kryptis: Aplinkos inžinerija

Studijų programa: Hidrotechnikos inžinerija

Akademija, 2010

Magistratūros studijų baigiamojo darbo valstybinė kvalifikavimo komisija (patvirtinta Rektoriaus 2010 gegužės 10 d. įsakymu Nr. 117-kb).

Pirmininkas: Lietuvos melioracijos įmonių asociacijos pirmininkas doc. dr. Kazys SIVICKIS.

Nariai:

1. LŽŪU, Vandens ūkio ir žemėtvarkos fakulteto prodekanas Vandentvarkos katedros doc. dr. Antanas DUMBRAUSKAS;

2. LŽŪU, Vandens ūkio ir žemėtvarkos fakulteto Melioracijos katedros vedėjas doc. dr. Liudas KINČIUS;

3. LŽŪU, Vandens ūkio ir žemėtvarkos fakulteto Statybinių konstrukcijų katedros doc. dr. Feliksas MIKUCKIS;

4. LŽŪU, Vandens ūkio ir žemėtvarkos fakulteto Hidrotechnikos katedros vedėjas doc. dr. Algirdas RADZEVIČIUS.

Mokslinis vadovas: LŽŪU, Vandens ūkio ir žemėtvarkos fakulteto, Hidrotechnikos katedros doc. dr. A. ŠIKŠNYS.

Recenzentas: LŽŪU, Vandens ūkio ir žemėtvarkos fakulteto, Hidrotechnikos katedros lekt. V. DAMULEVIČIUS.

Katedros vedėjas: LŽŪU, Vandens ir žemėtvarkos fakulteto, Hidrotechnikos katedros vedėjas doc.dr. A. RADZEVIČIUS.

Oponentas: LŽŪU, Vandens ūkio ir žemėtvarkos fakulteto prodekanas Vandentvarkos katedros doc. dr. Antanas DUMBRAUSKAS.

SANTRAUKA

Šiame darbe nagrinėjamas nenusistovėjęs netolyginis vandens tekėjimas Kauno HE žemutiniame bjefe, kurį sukelia staigus HE turbinų paleidimas ir stabdymas. Dvimačiame hidrodinamikos modelyje su MIKE21 programa buvo modeliuojami įvairūs turbinų paleidimo scenarijai. Nenusistovėjęs tekėjimas HE žemutiniame bjefe buvo tiriamas analizuojant patvankos bangos greičius ir vandens lygio kilimą 12 kontrolinių vertikalių, kuriose bangos sklidimo greitis buvo apskaičiuotas pagal kitų autorių literatūroje siūlomas formules ir lyginamas su modeliavimo rezultatais. Tyrimais nustatyta, kad patvankos bangos sklidimo greičiai, nustatyti MIKE 21 hidrodinamikos modelyje artimiausiame HE žemutinio bjefo ruože, yra žymiai didesni už bangos sklidimo greičius, apskaičiuotus pagal kitų autorių literatūroje siūlomas formules, tačiau tolstant nuo HE tekėjimo kryptimi šie skirtumai sumažėja. Hidrodinamikos modeliavimo rezultatų patikimumo vertinimui literatūroje pateiktų skaičiavimo metodų nepakanka, tam yra būtini natūrinių matavimų rezultatai.

Pagrindiniai žodžiai: tėkmė, patvanka, banga, greitis, debitas, modeliavimas, MIKE21.

SUMMARY

This thesis focuses on the unsteady and non-uniform water flow, which takes place in the downstream reach of Kaunas hydroelectric power station due to the sudden launch of the hydroelectric power plant turbines. Various scenarios of the turbine launching were created. Using the MIKE 21 program and the two-dimensional hydrodynamic model the unsteady flow in the downstream reach of Kaunas hydroelectric power station was analyzed by studying the speeds of the affluent waves and the water level rise in 12 control verticals. The wave spreading speed also was calculated pursuant to the formulas found in the literature of various authors. Comparison of the results showed that the speeds of the affluent waves determined in the MIKE 21 hydrodynamic model in the nearest downstream reach of Kaunas hydroelectric power station are significantly higher than the wave spreading speeds, which were calculated using the formulas found in the literature of various authors. However, these differences become lower at greater distances from the hydroelectric power station in the direction of the flow. The calculation methods found in the literature are not sufficient to verify the results of the hydrodynamic model; a results from field measurements are necessary to carry out such a verification.

Keywords: flow, affluent, wave, speed, modelling, MIKE 21.

TURINYS

| | |
|---|----|
| ĮVADAS..... | 6 |
| 1. LITERATŪROS APŽVALGA..... | 8 |
| 1.1 HE vystimosi istorija pasaulyje ir Lietuvoje..... | 8 |
| 1.2 Kauno hidroelektrinė..... | 10 |
| 1.3 Hidroelektrinių įtaka upės hidrologiniam ir hidrauliniam režimui..... | 12 |
| 1.4 Teisiniai dokumentai, reglamentuojantys HE veiklą..... | 14 |
| 2. TYRIMO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI..... | 17 |
| 3. TYRIMO METODIKA IR ORGANIZAVIMAS..... | 18 |
| 3.1 Pradiniai duomenys..... | 18 |
| 3.2 Hidrodinamikos skaitmeninis modelis..... | 24 |
| 3.2.1 Batimetrinių duomenų paruošimas..... | 29 |
| 3.2.2 Pakraštinės sąlygos..... | 30 |
| 4. TYRIMŲ REZULTATŲ ANALIZĖ IR APTARIMAS..... | 32 |
| IŠVADOS IR PASIŪLYMAI..... | 41 |
| LITERATŪRA..... | 42 |

IVADAS

Statynys, įterptas į gamtinę aplinką, ją veikia, kartais toks poveikis turi neigiamų padarinių. Keičiasi susiformavęs vietovės reljefas, susidariusi dirvožemio struktūra, vietovės mikroklimatinės sąlygos ir vandens tekėjimo režimas, augalijos danga ir gyvūnijos pasaulis. Žmogaus veiklos poveikis hidromorfologinėms vandens telkinių charakteristikoms labiausiai pasireiškia tvenkiant upes, statant ir eksploatuojant hidroelektrines bei tiesinant/gilinant upių vagas. Pakitusios hidromorfologinės vandens telkinių ar jų baseinų charakteristikos įtakoja ir vandens telkinių florą bei fauną.

Hidroelektrinės gamina elektros energiją, žemių drėkinimas didina žemės ūkio kultūrų derlius ir ūkių produktyvumą, sudaro mėgėjiškos ir pramoninės žvejybos galimybes, sukuria vandens kelius arba pagerina jų būklę, išplečia gyventojų rekreacines zonas ir kt., todėl galima tvirtinti, kad užtvankos kompleksiskai pagerina žmogaus gyvenimą. Tačiau yra ir neigiamas šių hidrotechnikos statinių veikos poveikis vandens telkinių aplinkai.

- **Upių tvenkimas** - užkertamas žuvų migracijos kelias. Patvenkus upę, nenatūraliai pradeda formuotis vandens telkinys su ežerams būdingais augalais ir gyvūnais. Užtvenktuose upių ruožuose susidaro pakrančių zonos su padidėjusiu vandens užterštumu dėl upei būdingos tėkmės nebuvimo.
- **Hidroelektrinės** - reguliuojamas vandens lygis. Vandens lygis nenatūraliai pakeliamas ar nuleidžiamas - sutrikdomas žuvų nerštas, neigiamai veikiami augalai, šalia esančios pelkės - pradeda svyruoti ir jų vandens lygis. Yra nustatyta, kad hidroelektrinės gali turėti ženklų poveikį vandens ekosistemoms, jeigu jų galingumas yra virš 100 kW [22].

Kauno hidroelektrinės (HE) turbinų staigus paleidimas ir stabdymas, susijęs su netolygiu elektros energijos poreikavimu paros laikotarpiu, Nemuno upėje sukelia patvankos ir slūgio bangas, kurios neišvengiamai įtakoja upės hidraulinių-hidrologinį režimą. Patys didžiausi vandens lygių ir tėkmės greičių svyravimai dėl HE poveikio pasireiškia HE užtvankų žemutiniuose bjevuose.

Analizuojant ir tiriant gamtoje vykstančius sudėtingus hidraulinius procesus, projektuojant įvairius hidrotechnikos statinius ir prognozuojant jų poveikį aplinkai tenka susidurti su ypatingai sudėtingais uždaviniais, kuriems spręsti nepakanka paprastų hidraulikos formulių. Tokiais atvejais taikomas hidraulinių reiškinių modeliavimas.

Atvirų vandens telkinių hidrodinamikos skaitmeninis modeliavimas yra palyginti naujas ir ypatingai sparčiai besivystantis tyrimų metodas, taikomas gamtoje vykstančių įvairių hidraulinių reiškinių moksliniams tyrimams, sudėtingų hidrotechnikos statinių projektavimui

ir jų poveikio aplinkai vertinimui. Šiame darbe tyrimams atlikti buvo naudojamas naujas kompiuterinių programų paketas MIKE 21 HD (2007 metų versija), kuriuo buvo atliekami hidrodinamikos skaitmeninį modeliavimą palengvina ir paspartina tyrimus ir gautų duomenų analizę. Tokiu būdu galima tiksliau ir patikimiau įvertinti hidrotechnikos statinių įtaką aplinkai ir jos tausoavimo galimybes.

Naudojant šiuolaikines informacines technologijas ir modernius tyrimų metodus galima atlikti detalesnius tyrimus, įvertinti gautų rezultatų patikimumą ir gauti pagrįstas išvadas.

Pastaraisiais metais mokslinėje literatūroje pastebimai dažniau nagrinėjami klausimai, susiję su HE neigiamu poveikiu ekosistemoms, siūlomos įvairios galimos žalos mažinimo priemonės [1, 2, 3, 4]. Hidrauliniu požiūriu gana sudėtingi nenusistovėjusio netolyginio neslėginio vandens tekėjimo uždaviniai buvo nagrinėjami pačiais paprasčiausiais skaičiavimo metodais, panaudojant vienmatis Sen-Venano, Bernulio, tėkmės vientisumo lygtis, antrąjį Niutono dėsnį atvirai tėkmei [5], kuriuose natūralių vagų sudėtingos morfometrines charakteristikos suprastintai skaičiuojamos pagal prizminių vagų schemas, neįvertinant vagos geometrinės formos ir jos hidraulinio šiuurkštumo įvairovės, ignoruojant netolygų tėkmės greičių pasiskirstymą upės plotyje, sūkurinių zonų atsiradimą ir kt. Suprantama, kad toks esminis hidraulinių skaičiavimų schematizavimas gali turėti reikšmingą įtaką gautų rezultatų tikslumui ir patikimumui.

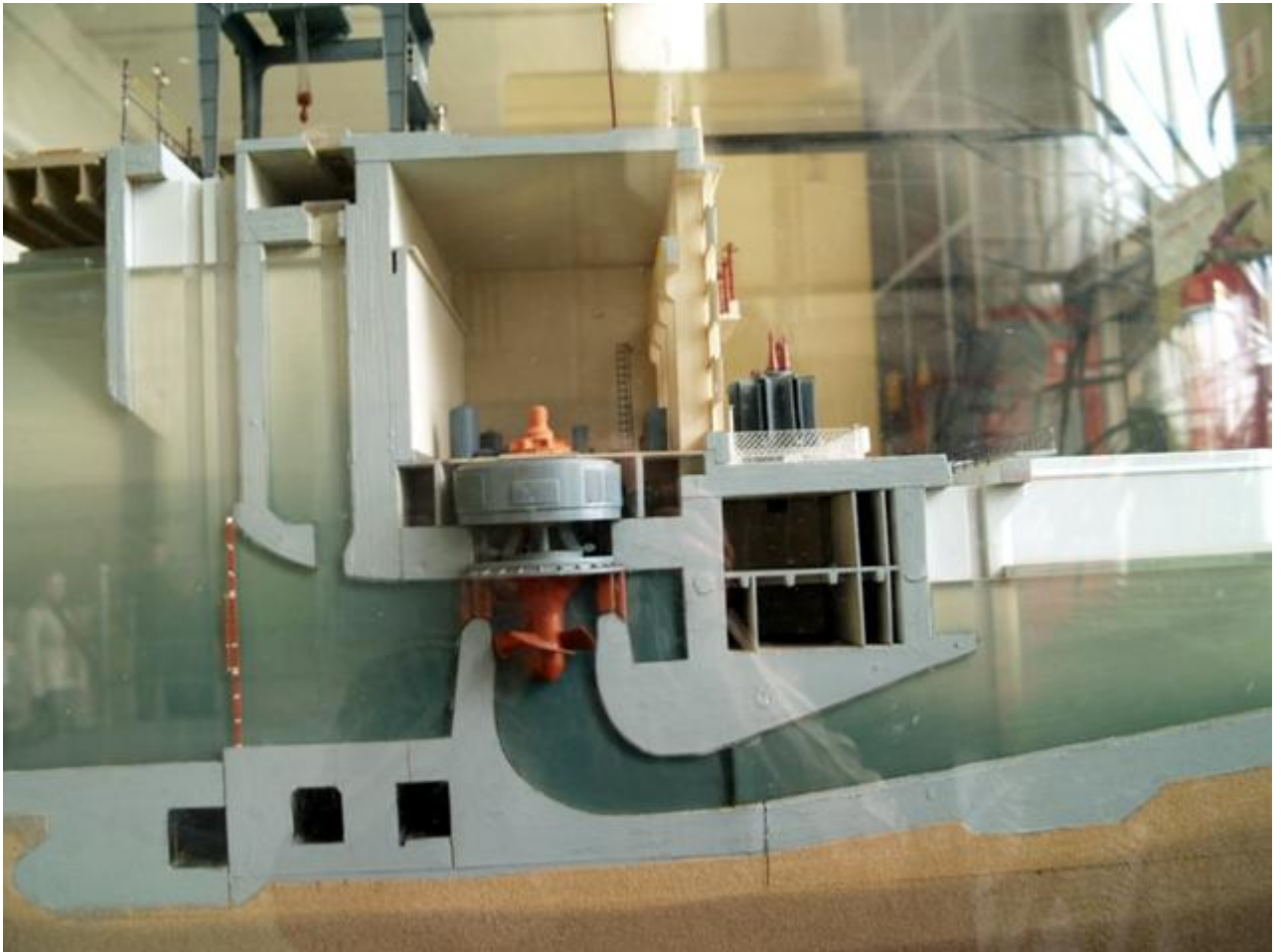
Nagrinėjamas objektas – Kauno hidroelektrinės žemutinis bježas, kuris yra apie 223,4 km nuo Nemuno žiočių.

Darbo tikslas – sumodeliuoti ir detaliau išnagrinėti Kauno HE žemutinio bježo hidrodinamiką paleidžiant ir stabdant HE turbinas, nustatyti nenusistovėjusio tekėjimo dėsningumus ir juos palyginti su kitų autorių gautais rezultatais.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. HE vystymosi istorija pasaulyje ir Lietuvoje

Hidroelektrinė (HE) – elektros energijos gamybos įmonė ar įrenginys, kuriame mechaninę energiją elektros energijai gauti sukuria krentančio vandens sukama vandens turbina, sujungta su elektros energiją gaminančiu generatoriumi. Hidroelektrinės potencinė energija dažniausiai sukaupiama užtvenkus upes.



1.1 pav. Kauno HE pjūvis

Pirmoji hidroelektrinė buvo pastatyta 1868 – 1870 m. Kregsaide (Cragside) Anglijoje, tiekusi energiją kelioms elektros lemputėms. 1882 m. JAV, Epltone (Appleton) pastatyta pirmoji komercinė hidroelektrinė. 1895 m. Tasmanijoje pastatyta pirmoji viešoji hidroelektrinė, tiekusi energiją Launčestono miesto gatvių apšvietimui.

Pirmoji hidroelektrinė Lietuvoje – tai 1903 m. prie Virvytės upės Kairiškių dvaro popieriaus dirbtuvėje įrengtas elektros generatorius, kurį suko vandens ratas.

Nemuno hidroresursus dar prieš Pirmąjį pasaulinį karą tyrinėjo ir jų panaudojimo problemą sprendė lietuvių kilmės Peterburgo Kelių instituto profesoriaus Jurgio Merčingo vadovaujama Vandens energijos tyrimų komisija. Po karo šią problemą kėlė profesorius Steponas Kolupaila, inžinierius Jonas Smilgevičius ir kiti, o akcinė bendrovė „Galybė“ planavo statyti hidroelektrines, tačiau visa tai liko neįgyvendinta.

1929 m. inžinierius J. Smilgevičius parašė Lietuvos vyriausybei raštą, kuriame nurodė, kad viena krašto atsilikimo priežasčių – menkas Lietuvos elektrifikavimas – vienas Lietuvos gyventojas per metus sunaudoja 5 kWh elektros energijos, kai Norvegijoje vienam gyventojui tenka 3000 kWh. Išėitis – panaudoti Lietuvos hidroresursus ir statyti hidroelektrines ant Nemuno ties Petrašiūnais, Prienais ir Nemaniūnais, ant Neries – ties Jonava. Turi būti išnaudotos ir mažesnės upės – Minija, Jūra, Šventoji, Dubysa, Šešupė ir kitos. Autorius pateikė ne tik techninius - ekonominius skaičiavimus, bet ir finansinius siūlymus, kaip sukaupti statyboms lėšų, kokie bus gaunami pelnai ir kaip bus gražinamos skolos. Jo siūlomos hidroelektrinės per metus būtų pagaminusios kiekvienam gyventojui per 300 kWh elektros energijos. Tik 1955 m. pradėta statyti ir 1959 m. pradėjo veikti pirmieji du Kauno hidroelektrinės agregatai. Pastačius Ignalinos AE, prireikė balansuojančios ir kompensuojančios elektrinės, todėl buvo pradėta statyti ir 1992 m. pradėjo veikti Kruonio hidroakumuliacinės elektrinės pirmasis ir antrasis agregatas.

Pastaruosiu metu hidroenergetikai Lietuvoje vėl skiriama šiek tiek dėmesio, nors Lietuvos upių potencinė energija ir nėra didelė.

Hidroelektrinės gaminama elektra yra pigesnė už gaminamą šiluminėje elektrinėje, nepaisant to, kad brangiai kainuoja užtvankos statyba, nes naudoja praktiškai nemokamą kurą. Be to, vanduo yra atsinaujinantis energijos šaltinis, leidžiantis pagal galimybes sumažinti dažniausiai importuojamų kuro rūšių – anglių, naftos produktų ir gamtinių dujų poreikius energijos gamybai. Elektros gamyba hidroelektrinėje neteršia aplinkos. Hidroelektrinės agregatus galima greitai įjungti ir išjungti pagal elektros energijos poreikio padidėjimą ar sumažėjimą.

Tačiau statyba vyksta palyginus ilgai. Užtvankos suformuotas vandens telkinys užima dideles teritorijas, dažniausiai visam laikui palaidodamas žemės ūkio naudmenas. Daugelio hidroelektrinių užtvankos sutrikdo natūralią žuvų migraciją į nerštavietes, todėl nukenčia gamta [20].

1.1 lentelė. Didžiausios pasaulio hidroelektrinės

| Pavadinimas | Valstybė | Statybos metai | Galia |
|-------------------|------------------------|----------------|-----------|
| Itaipu | Brazilija – Paragvajus | 1984–1991–2003 | 14,000 MW |
| Guri | Venesuela | 1986 | 10,200 MW |
| Grand Kulee | JAV, Vašingtonas | 1942–1980 | 6,809 MW |
| Sajanų Šušenskaja | Rusija | 1983 | 6,721 MW |
| Roberto-Burasos | Kanada | 1981 | 5,616 MW |
| Čerčilio krioklys | Kanada | 1971 | 5,429 MW |
| Jasireta | Argentina – Paragvajus | 1998 | 4,050 MW |
| Geležinių vartų | Rumunija – Serbija | 1970 | 2,280 MW |
| Asuanas | Egiptas | 1970 | 2,100 MW |

1.2. Kauno hidroelektrinė

Kauno HE – didžiausia elektrinė Lietuvoje naudojanti elektros gamybai atsinaujinančius ir atliekinius išteklius. Jos pagaminama elektra sudaro daugiau nei 80% visos energijos, gaminamos šalyje naudojant šiuos išteklius. Elektrinė kasmet pagamina beveik 3,5% Lietuvoje suvartojamos elektros energijos.



1.2 pav. Kauno hidroelektrinė

Kauno HE yra vienintelė Lietuvos energetikos sistemos elektrinė, galinti pati pradėti veikti ištikus visuotinei sistemos avarijai. Ji yra svarbiausias elektros šaltinis energetikos sistemai įjungti po visuotinės avarijos ar sistemos susidailijimo. Nepaisant nedidelės galios, Kauno HE – išskirtinis generuojantis šaltinis, užtikrinantis Lietuvos energetikos sistemos patikimumą. Kauno HE pagaminta elektra tiekama į 110 kV įtampos tinklą.

Pagrindiniai hidroelektrinės duomenys:

- Galia 100,8 MW ;
- Hidroagregatų skaičius 4;
- Kateros altitudė 48 m;
- Normalus patvankos lygis 44 m;
- Forsuotas patvankos lygis 45,6 m .

Hidroelektrinės konstrukcija:

- Pirma ir antra žemės užtvankos: aklinos, supiltinė iš smėlio ir priemolio gruntų, su antifiltraciniu branduoliu; ilgis – 912 m, didžiausias žemės užtvankos aukštis – 19 m;
- Gelžbetoninis hidroelektrinės pastatas, ilgis – 75,5 m, aukštis – 37,5 m;
- Slenkstinė betoninė gravitacinė užtvanka: trijų angų, bendras ilgis – 79 m;
- Slenksčio kateros altitudė – 37,0 m, segmentiniai uždoriai;
- Maksimalus debitas – 3300 m³/s.

Trečia žemės užtvanka: aklina, supiltinė iš smėlio gruntų, jos ilgis – 464 m, maksimalus aukštis – 26 m [19].

Kauno HE jėgainės pastatas yra užtvankinio tipo, per skiriančiąją sieną (vidinį ramtą) susietas su analogiška slenkstinės betoninės gravitacinės užtvankos (SBGU) siena. Tų sienų tęsinys žemutiniame bjeje yra skiriantysis ramtas. SBGU atlieka ir patvankos, ir pertekliaus/potvynių vandens pralaidos (PVP) funkcijas. Tokia komponuotė yra kompaktiška, ekonomiška, tačiau hidrauliniu požiūriu turi reikšmingą trūkumą – ties HE jėgaine ir ties SBGU paprastai prateka skirtingi linijiniai debitai (tekantys 1 m tėkmės pločio). Linijinių debitų verčių skirtumai ypač išryškėja tuomet, kai per SBGU praleidžiami dideli potvynių debitai. Dėl susidariusio gretimų linijų debitų disbalanso atsiranda tėkmių persiformavimas ŽB, greičių dydžių ir kryptių pokyčiai, sąlygojantys Nemuno vagos ŽB hidromorfologinius pokyčius, pirmiausia, išplovimus.

Situaciją komplikuoja nedidelis SBGU angų kiekis (tik 3), dideli segmentinių uždorių matmenys (20x7 m). Dėl pastarosios priežasties jie valdomi kranu ir fiksuojami „laipteliais“ apytiksliai kas 0,40 m. Be to, dėl galimo ledų pasiurbimo didžiausiais palaipsniškas uždorių pakėlimas apribotas 1,73 m dydžiu. Jei visų trijų SBGU angų praleidžiamas debitas su 1,73 pakeltais uždoriais yra mažesnis už pritekantį debitą, reikia vieną angą atidaryti visiškai,

pakeliant uždorį apie 7 m. Ties šia atidaryta anga prateka daug didesnis, negu apatinių angų, debitas, sukeldamas nepalankius hidrodinaminius reiškinius ir tuo pačiu žalingus hidromorfologinius poveikius ŽB. Reikšmingą įtaką turi ir tai, kuri SBGU anga – I, II ar III atidaroma pirmiausiai; priimtinausia yra atidaryti vidurinę (II) SBGU angą. Jei pritekantis debitas didėja toliau, atitinkamu momentu reikia visiškai atidaryti kitas likusias angas. Kai debitas pradeda mažėti, veiksmai su uždoriais vystosi atvirkštine tvarka. Taip susidaro savita uždorių manevravimo problema, kurią, be to, komplikuoja ir siekimas kiek galint riboti krano važinėjimą nuo vieno uždorio prie kito, tausoti mechaninę įrangą [15].

1.3. Hidroelektrinių įtaka upės hidrologiniam ir hidrauliniam režimui

Hidroelektrinės veikla įtakoja upės hidraulinį-hidrologinį režimą ir su juo susijusius ekosistemos pokyčius. Upės užtvanka patvenkia upės vandens lygius ir pakeičia upės ekosistemą į ežerui būdingą ekosistemą. HE tvenkiniuose kaupiasi upės nešmenys (smėlis ir dumblas), o žemutiniuose užtvankų bjevuose yra stebimi bendrieji ir vietiniai vagos dugno išplovimai, su tuo susiję vandens lygių pažemėjimai, kurie yra ypatingai ryškūs esant minimaliems vandens lygiams sausmečių periodais. Pavyzdžiui, Kauno HE žemutiniame bjeve upės dugnas dėl bendrojo vagos išplovimo pažemėjo daugiau kaip 2 metrus, atitinkamai nukrito minimalūs vandens lygiai. Šiuo metu čia susiformavusi savigrinda iš stambaus žvyro ir gargždo su 10..15 cm skersmens rieduliais. Esant nepalankioms sąlygoms, pvz., jei dėl kokių nors priežasčių tektų visiškai atidaryti vandens pralaidos angas, savigrindos sluoksnis gali būti nuplautas, ir upės dugno išplovimai tęsis dar daugelį metų.

Iš vandens energijos hidroelektrinėse pagaminta elektra priskiriama atsinaujintiems energijos šaltiniams. Hidroelektrinės yra svarus energijos šaltinis, kadangi nėra „šiltnamio dujų“ teršalų išskyrimo, todėl šiuo aspektu HE yra nežalinga aplinkai. Yra ir kiti svarbūs HE privalumai: ten, kur yra galimybės, statyti hidroelektrinę yra palyginti pigu, elektros gamybos technologija yra palyginti paprasta ir patikima, energijos šaltinis – vanduo – nekainuoja ir atsinaujina, yra galimybės staigiai paleisti ir stabdyti HE, kontroliuoti jos galią, todėl HE eksploatacija yra palyginti pigi ir ilgaamžė, lyginant su kitų tipų elektrinėmis. Kiti HE privalumai buvo paminėti įvade. Be to, kai kuriais atvejais, pavyzdžiui Kauno HE, yra naudinga Nemuno potvynių kontrolei: pastačius Kauno HE sumažėjo katastrofinių potvynių Kauno mieste tikimybė.

Nepaisant įvairių tarptautinių pastangų, „šiltnamio dujų“ koncentracija atmosferoje ir toliau auga, nes per dvidešimt pirmąjį amžių pasaulyje trigubai, nei tikėtasi, išaugo energijos sunaudojimas.

Vandens energija šiuo metu yra pagrindinis atsinaujinantis energijos šaltinis, prisidedantis prie elektros tiekimo, kurios suvartojimas ateityje, tikėtina, žymiai išaugs. Didėjant klimato pasikeitimo grėsmėms ir įvertinant nenutrūkstamą elektros suvartojimo augimą galima tvirtinti, kad atnaujinančių šaltinių, įskaitant vandens energiją, poreikis vis didės.

Lietuvos energetikos sektorius daug priklauso nuo importuojamų degalų, daugiausia nuo branduolinės energijos (kuri sudarė daugiau nei 80%). Vandens energijos dalis sudaro tik 2,5% visos šalies elektros gamybos (2005 metų duomenimis). Iki 2007 vandens energijos panaudojimas galėjo būti padidintas iki 7%. Pagal J.Jablonskio ir A.Tomkevičienės duomenis, vandens energija teoriškai galėtų sudaryti iki 21,5% sunaudojamos energijos. Vandens energijos plėtojimas Lietuvoje yra būtinas, tačiau aplinkosauginiai reikalavimai trukdo hidroelektrinių tinklo vystymą, taip siekiama išsaugoti natūralią gamtinę aplinką ir upių ekosistemas. Gamtosaugininkų požiūriu, vienas iš svarbiausių HE trūkumų yra tai, kad HE užtvanka yra tiesioginis barjeras migruojančioms žuvims, tokioms kaip lašišos, šlakiai, ungučiai, eršketai, kai kurioms baltamėsėms žuvims, dryžuotiems ešeriams, upinėms plekšnėms ir t.t., HE trukdo jų migraciją upe. Priklausomai nuo žuvų bendrijos, HE tvenkiniuose ežero žuvis pakeičia upines žuvis, arba migruojančios žuvis gali tapti nuolatinėmis.

Vandens lygių svyravimai dėl HE turbinų netolygaus darbo trukdo žuvų neršimui. Siekiant apsaugoti žuvis neršto metu, rekomenduojama, kad vandens lygio svyravimų intensyvumas neturėtų viršyti 2,5 iki 15 cm/h, tačiau gali būti nustatyti ir kiti vandens lygių svyravimų apribojimai.

Tam, kad būtų galima numatyti HE veikimo neigiamas pasekmes ir pagrįstai apriboti vandens lygių, tėkmės greičių ir debitų kitimą HE žemutiniuose bjevuose, reikalinga patikima informacija apie šiuos fizinius hidraulinio-hidrologinio režimo pokyčius.

Pagal [14], Vandens Įstatymas reguliuoja vandens naudojimą ir apsaugą Lietuvoje. Pagal šį įstatymą, vandens energijos vykdytojai ar operatoriai yra įpareigoti laikytis griežtų tvenkinių naudojimo taisyklių ir laiduoti sąlygas, išlaikančias ekologinę pusiausvyrą, laisvą kelią žuvims ir kasdienę vandens lygio svyravimų amplitudę 0,10...0,20 m. Maksimumo amplitudės galėtų būti apskaičiuojamos remiantis sukauptais vandens lygio svyravimų natūralioje upėje hidrometrinių matavimų duomenimis.

1.4. Teisiniai dokumentai, reglamentuojantys HE veiklą

Gamtos turtų racionalus naudojimas, kai nedaroma žalos gamtai, yra stimulus šalies gerovei pasiekti. Turimi šalies vandens išteklių – brangus mūsų šalies turtas. Dėl gamtos turtų

naudojimo išryškėja dvi alternatyvios nuostatos: materialinė nauda ir naudojimo ribojimas dėl galimo išteklių išsekimo ir neigiamos įtakos gamtinei aplinkai, dėl to reikia atsižvelgti į ekologiškos aplinkos išsaugojimą. Tai liečia bet kurių šalies išteklių saikingą naudojimą.

Hidroenergetikos plėtra mūsų šalyje yra problematiška, nes jos neskatina valstybė, manant, kad ši ūkinė veikla neigiamai veikia gamtinę aplinką, ypač jos ekologinę būseną. Hidroenergetikos plėtra yra ribojama Lietuvos Respublikos vandens įstatymu ir kt. įstatymais bei teisės aktais [16].

Vandens įstatymas reglamentuoja santykius, atsirandančius naudojant, valdant ir saugant gamtinėje aplinkoje esantį vandenį. Įstatymo tikslas:

- neleisti prastėti vandens ekosistemų ir ekosistemų, tiesiogiai priklausomų nuo vandens, būklei, ją apsaugoti ir (arba) pagerinti;
- gerinti vandens kokybę įgyvendinant priemones, skirtas laipsniškai mažinti pavojingų medžiagų ir nutraukti prioritetinių pavojingų medžiagų patekimą į vandenį;
- racionaliai ir subalansuotai naudoti vandenį;
- mažinti žalingą vandens poveikį.

Vandens telkiniuose gali būti statomi hidrotechnikos statiniai, reikalingi vandens apsaugai, jo naudojimui ir aplinkai nuo žalingo vandens poveikio saugoti, hidroenergetikai bei kitoms reikmėms. Tvenkiniai įrengiami ir kiti hidrotechnikos statiniai statomi vadovaujantis šiuo Įstatymu, Statybos įstatymu, Teritorijų planavimo įstatymu, Saugomų teritorijų įstatymu ir Planuojamos ūkinės veiklos poveikio aplinkai vertinimo įstatymu. Hidrotechnikos statiniams statyti ir naudoti atskiro vandens naudojimo leidimo nereikia.

Fiziniai ir juridiniai asmenys, statantys ir naudojantys hidrotechnikos statinius, privalo:

- nepažeisti aplinkos ministro patvirtinta tvarka nustatyto vandens lygio svyravimo režimo;
- užtikrinti, kad hidrotechnikos statiniai praleistų vandens ne mažiau už aplinkos ministro nustatyta tvarka apskaičiuotą gamtosauginį debitą;
- aplinkos ministro nustatyta tvarka tvarkyti tekančio vandens apskaitą ir teikti apskaitos duomenis;
- imtis priemonių erozijos procesams tvenkinių krantuose mažinti;
- aplinkos ministro nustatyta tvarka įrengti ir naudoti veiksmingas žuvisaugos priemones bei užtikrinti galimybę žuvims migruoti.

Draudžiama statyti užtvankas Nemuno upėje bei ekologiniu ir kultūriniu požiūriu vertingose upėse [17].

Gamtosauginio vandens debito apskaičiavimo tvarkos aprašas (toliau – Tvarkos aprašas) reglamentuoja gamtosauginio vandens debito (toliau – Gamtosauginis debitas) vandens telkiniuose apskaičiavimo ir praleidimo į tvenkinių ar užtvenktų ežerų (toliau – Tvenkinys) žemutinį bjefą tvarką, kuri privaloma visiems fiziniams ir juridiniams asmenims, projektuojantiems, statantiems, rekonstruojantiems, remontuojantiems ir eksploatuojantiems hidrotechnikos statinius.

Tvarkos aprašo tikslas – užtikrinti vandens telkiniuose vandens debitus, būtinus vandens telkinių ekosistemų gyvavimui.

Vandens telkiniuose žemiau hidrotechnikos statinių (užtvankų, pralaidų, hidrojęgainių, įrenginių vandeniui išgauti, žuvitakių) turi būti užtikrinamas ne mažesnis kaip remiantis šiuo Tvarkos aprašu apskaičiuotas gamtosauginis debitas, kurį būtina užtikrinti hidrotechnikos statinius projektuojant, statant, rekonstruojant, vykdant remonto darbus, eksploatuojant. Gamtosauginis vandens debitas – minimalus vandentakio vandens debitas, reikalingas, kad būtų užtikrinamos minimalios ekosistemų gyvavimo sąlygos. Gamtosauginį debitą apibrėžia minimalus vasaros – rudens nuotėkio (V–X mėn.) 80% arba 95% tikimybės (priklausomai nuo upės nuotėkio per metus natūralaus reguliavimo (išlyginimo) koeficiento) 30 sausiausių parų iš eilės vidutinis vandens debitas. Į žemutinį bjefą Gamtosauginis debitas gali būti praleidžiamas:

- per slenksčių viršų ir uždorius;
- per įrengtus įvairius vamzdžius (paprastus arba sifonus), vandens pralaidų angas;
- per hidroturbinas ir žuvitakius.

Gamtosauginio debito praleidimo per hidrotechnikos statinius kontrolės būdai priklauso nuo hidrotechnikos statinio projekte ar Tvenkinio naudojimo ir priežiūros taisyklėse numatytų priemonių Gamtosauginiam debitui užtikrinti [18].

Lietuvos Respublikos įstatymai taip pat riboja ūkinę veiklą parkuose, draustiniuose, rezervatuose, prie vandens telkinių, išskirtinės reikšmės upėse ar jų dalyse.

Statybos techninis reglamentas (STR 2.02.06:2004 Hidrotechnikos statiniai. Pagrindinės nuostatos) nustato naujai statomų, rekonstruojamų ir kapitališkai remontuojamų hidrotechnikos statinių (toliau – HTS) projektavimo bei statybos pagrindinius reikalavimus, atsižvelgiant į HTS naudojimo ypatumus. Reglamentas taip pat taikomas rekonstruojamiems ir kapitališkai remontuojamiems jūrų uostų statiniams, kurie, klasifikuojant statinius pagal jų

naudojimo paskirtį, priskiriami prie transporto paskirties statinių (STR 1.01.09:2003), nors pagal kitus požymius jie priskiriami prie HTS.

Reglamentas yra suderintas ir atitinka statinių konstrukcijų projektavimą reglamentuojančių Lietuvos standartais perimtų Europos standartų (Eurokodų) reikalavimus, Europos Tarybos direktyvos 89/106/EEC ir jos aiškinamųjų dokumentų nustatytus statinio esminius reikalavimus.

Projektuojant naujus HTS, Reglamento nuostatos taikomos atsižvelgiant į konkrečių HTS bei jų konstrukcinių elementų ypatumus, išdėstytus atitinkamuose (betoninių, gelžbetoninių, metalinių, mūrinių, gruntinių, kompozicinių konstrukcijų ir geotechnikos) projektavimo reglamentuose:

Projektuojant HTS būtina atsižvelgti į saugomų teritorijų, susisiekimo sistemų, geležinkelio linijų ir automobilių kelių planavimo bei poveikio aplinkai vertinimo reikalavimus.

HTS statomi vadovaujantis šalies ūkio plėtros schema, teritorijų planavimo dokumentais, atsižvelgiant į kompleksinio vandens išteklių naudojimo bei statybos objektų kooperavimo reikalavimus.

HTS tipai, jų parametrai, komponavimas, skaičiuotini vandens lygiai turi būti parinkti techniniu, ekonominiu, socialiniu, aplinkosauginiu bei estetiniu požiūriu lyginant galimus variantus, atsižvelgiant į:

- HTS statybos vietos ir aplinkos sąlygas (klimatą, topografijos, inžinerinės geologijos, hidrogeologijos, hidrologijos, biologijos, ekologijos ir kt. ypatumus);
- Hidrologinio režimo pokyčių aukštutiniame ir žemutiniame bjefuose prognozę, apimančią vandens lygius ir debitus, vandens termiką, nuosėdų kaupimąsi bei krantų persiformavimą aukštutiniame bjefe, vaginius procesus žemutiniame bjefe ir HTS įtakos zonos intakuose, teritorijų užliejimą bei patvenkimą arba jų inžinerines apsaugos priemones;
- Žuvivaisos reikmes, ypač vertingų migruojančių žuvų išsaugojimą [24].

2. TYRIMO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI

Pagrindinis šio tyrimo tikslas – nustatyti ir įvertinti Nemuno vagos bendrojo išplovimo sąlygas Kauno HE žemutiniame bjefe

Uždaviniai:

1. Išnagrinėti Nemuno potvynių praleidimo per Kauno HE VPP sąlygas ir pasirinkti 3-4 skaičiuojamuosius scenarijus.
2. Paruošti dvimatį skaitmeninį Kauno HE žemutinio bjefo hidrodinamikos modelį ir jį suderinti pagal natūrinių matavimų rezultatus.
3. Hidrodinamikos modelyje nustatyti patvankos bangos sklidimo greičius ir juos palyginti su kitų autorių rezultatais.

3. TYRIMO METODIKA IR ORGANIZAVIMAS

3.1 Pradiniai duomenys

Nemunas – ilgiausia ir didžiausia Lietuvos upė. Jos ilgis iš viso yra 937 km, Lietuvos teritorijoje teka 359 km, 116 km – Lietuvos siena su Rusijos Kaliningrado sritimi. Nemuno baseino plotas yra 98 200 km², iš jų 46 600 km² yra Lietuvoje (užima 72% Lietuvos teritorijos). Nemuno gylis yra iki 5 m., vagos plotis iki 500 m., srovės greitis siekia 1 – 2 m/s. Per metus į Baltijos jūrą vidutiniškai iš Nemuno nuteka 21,6 km³ vandens. Nemunas prasideda Baltarusijoje, ir įteka į Kuršių marias. Ties Kaunu pastačius Kauno hidroelektrinę Nemunas yra užtventkas. Ties užtvanka susidaręs vandens telkinys yra didžiausias Lietuvoje dirbtinis vandens telkinys, vadinamas Kauno mariomis [23]. Nagrinėjamas objektas - Kauno HE žemutinis bjefas, jis yra 223,4 km nutolęs nuo Nemuno upės žiočių (3.1 ir 3.2 pav.), Kauno mieste.



3.1 pav. Kauno HE žemutinis bjefas



3.2 pav. Kauno HE žemutinis bježas (pagal Google Earth)

Hidraulikos žinyne [6] mažo aukščio patvankos bangos sklidimo greitį c bet kokio profilio vagoje rekomenduojama skaičiuoti pagal tokią formulę:

$$c = \sqrt{g \frac{\omega_0}{B'}} \pm v_0, \quad (3.1)$$

o kai vaga yra stačiakampio profilio:

$$c = \sqrt{gh_0} \pm v_0, \quad (3.2)$$

čia g – gravitacinis pagreitis;

ω_0 – pradinis tėkmės skerspjūvio plotas;

B' – tėkmės paviršiaus plotis vidutiniame bangos aukštyje;

v_0 – pradinis tėkmės greitis.

Lygtyje (1) ženklas „+“ imamas tiesiajai bangai (judančiai pasroviui), o ženklas „-“ priimamas atbulinei bangai (judančiai prieš srovę).

Kai bangos aukštis yra didesnis už $0,1 \cdot h_0$, jos sklidimo greitį siūloma skaičiuoti pagal tokią lygtį [6]:

$$c = \sqrt{g \frac{\omega_0}{B'} \left(1 + \frac{3}{2} \frac{B'}{\omega_0} \zeta \right)} \pm v_0, \quad (3.3)$$

čia ζ – bangos aukštis.

Lietuviškoje literatūroje [1] užpildymo (patvankos) bangos greičiui skaičiuoti siūloma formulė, mūsų manymu, gauta iš tėkmės vientisumo lygties:

$$c = \frac{Q_2 - Q_1}{(h_2 - h_1)B}, \quad (3.4)$$

čia Q_1 – upės debitas iki įjungiant turbinas;

Q_2 – debitas įjungus turbinas;

h_1 ir h_2 – vidutiniai vandens gyliai prieš paleidžiant turbinas ir jas paleidus;

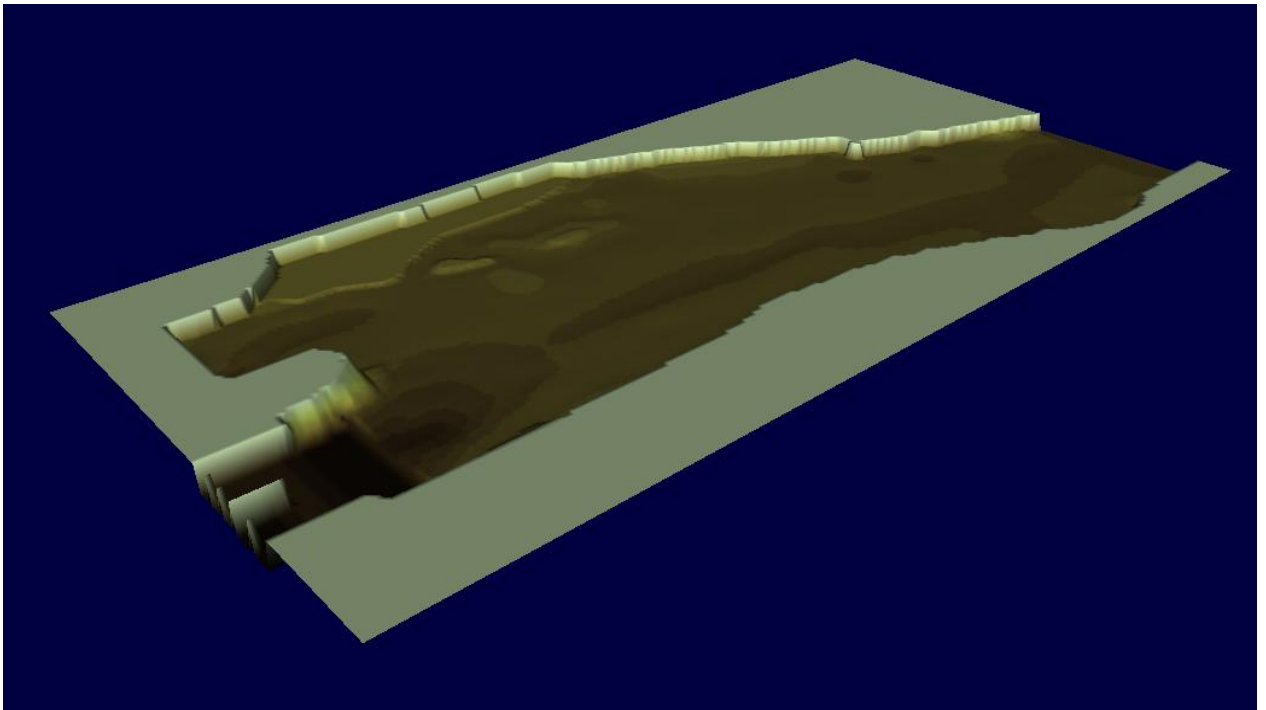
B – vidutinis upės skaičiuojamojo ruožo vagos plotis.

2007 metais LŽŪU Hidrotechnikos katedroje buvo atliekami Kauno HE užtvankos žemutinio bjefo hidrodinamikos modeliniai tyrimai, kurių pagrindu paruoštos HE užtvankos uždorių manevravimo tvarkos taisyklės [7]. Šiame darbe buvo panaudotas modernus ir pasaulyje pripažintas hidrodinamikos skaitmeninio modeliavimo programinės įrangos paketas MIKE21.

GIS kompiuterinių programų aplinkoje buvo paruoštas Kauno HE žemutinio bjefo ruožo skaitmeninis reljefo modelis (dugno aukščių gridas), kurio elementarios gardelės matmenys buvo 5x5m; modeliuojamos akvatorijos plotas 1330x685m; bendras gardelių skaičius 36442; „šlapių“ gardelių skaičius 21318 (3.3 ir 3.4 pav.). Šie duomenys buvo

konvertuoti į MIKE21 formatus ir panaudoti Kauno HE žemutinio bjefo skaitmeniniam dvimačiam hidrodinamikos modeliui sukurti [8,9]. Tokiu pat būdu buvo paruoštas vagos dugno šiurkštumo koeficientų gridas, įvertinantis šiurkštumo koeficientų įvairovę nagrinėjamoje akvatorijoje. Skaitmeninis hidrodinamikos modelis buvo suderintas pagal ankstesniuose tyrimuose išmatuotus tėkmės greičius ir vandens lygius bei atlikta serija skaičiavimų modeliuojant įvairius potvynių pralaidimo per užtvankos slenkstį scenarijus [7].

Darbe buvo panaudotas tas pats hidrodinamikos modelis, tačiau jame buvo modeliuojamas nenusistovėjęs tekėjimas Kauno HE žemutiniame bjefe staigiai atidarant potvynių pralaidos uždorus potvynio sąlygomis bei paleidžiant ir stabdant HE turbinas esant minimaliems vasaros vandens lygiams.



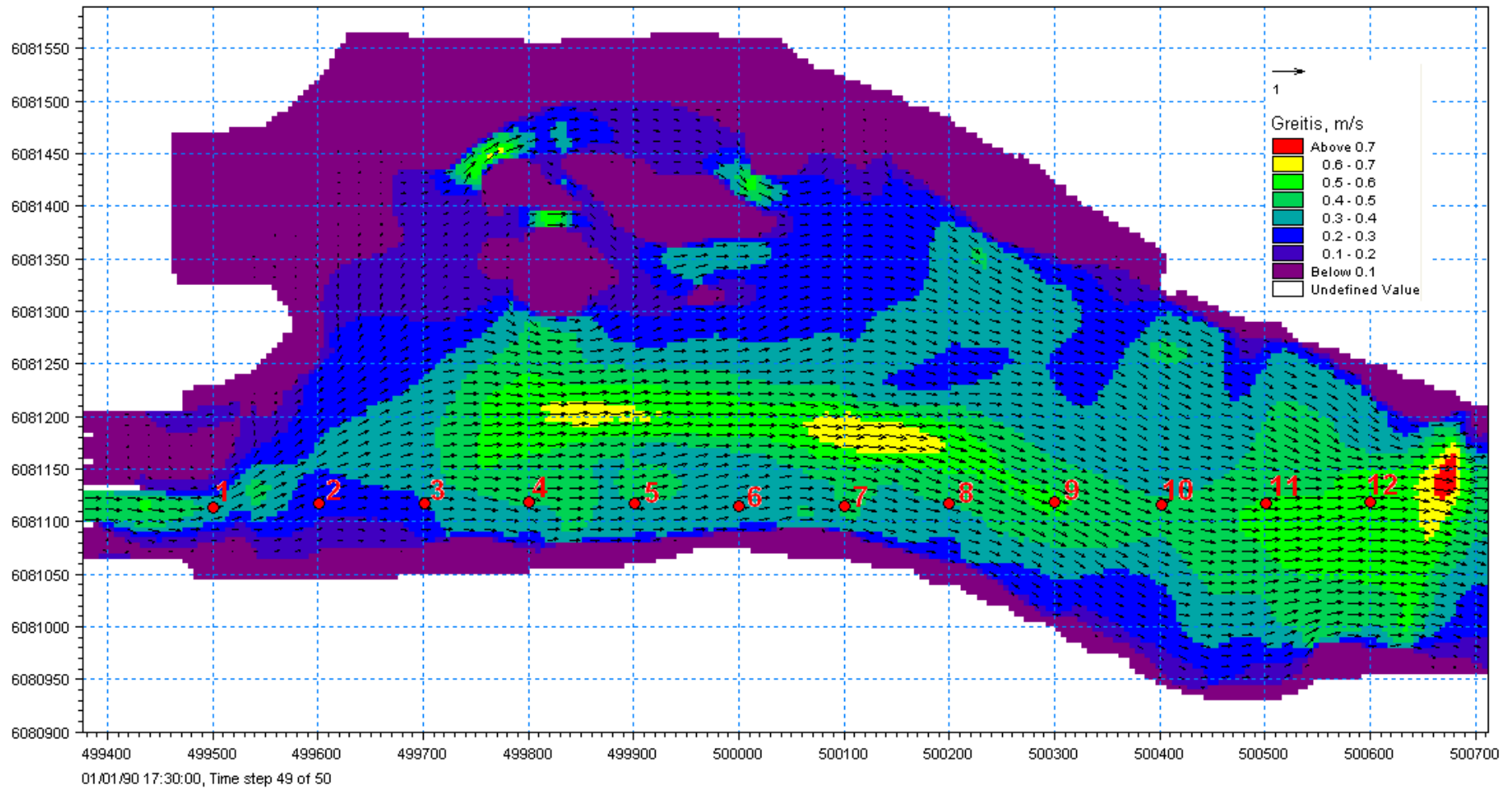
3.3 pav. Kauno HE ŽB dugno skaitmeninis reljefo modelis (3D vaizdas, vertikalaus ir horizontalaus mastelių santykis lygus 2)

3.1 lentelė. Kauno HE žemutinio bjefo vandens lygiai (ŽBVL) Nemuno debitai (Q) pagal [8]

| ŽBVL M | Q m ³ /s | ŽBVL m | Q m ³ /s |
|-----------|------------------------|-----------|------------------------|
| 23,58 | 117 | 24,9 | 537 |
| 23,8 | 172 | 25,03 | 577 |
| 23,93 | 216 | 25,13 | 618 |
| 24,35 | 354 | 25,46 | 759 |
| 24,49 | 396 | 25,81 | 905 |
| 24,56 | 410 | 25,97 | 991 |
| 24,78 | 501 | 26,00 | 1007 |

3.2 lentelė. Hidrodinamikos modelių pakraštinių sąlygų lentelė

| Var. Nr. | Q _{T1} m ³ /s | Q _{T2} m ³ /s | Q _{T3} m ³ /s | Q _{T4} m ³ /s | Q _{P1} m ³ /s | Q _{P2} m ³ /s | Q _{P3} m ³ /s | Bendras debitas Q _{sum} m ³ /s | VL _{ŽB} m |
|-------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|-----------------------|
| 1 | 0 | 0 | 150 | 150 | 204 | 264 | 204 | 966 | 25,99 |
| 2 | 0 | 0 | 150 | 150 | 264 | 264 | 264 | 966 → 1091 | 25,99 |
| 3 | 0 | 0 | 150 | 150 | 264 | 264 | 264 | 966 → 1091 | 25,99 |
| 4 | 0 | 0 | 120 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 23,40 |
| 5 | 0 | 0 | 120 | 120 | 0 | 0 | 0 | 120 → 240 | 23,80 |
| 6 | 0 | 0 | 120 | 120 | 0 | 0 | 0 | 120 → 240 | 23,40 |
| 7 | 120 | 120 | 120 | 120 | 0 | 0 | 0 | 120 → 480 | 23,40 |
| 8 | 120 | 120 | 120 | 120 | 0 | 0 | 0 | 120 → 480 | 24,47 |



3.4 pav. Tėkmės greičių vektorių laukas 1 variante (vektoriai išretinti 2 k.) ir kontrolinių vertikalių padėtis LKS-94 koordinacių sistemoje

Modelio žemutinėje atviroje riboje buvo nustatomas vandens lygis, atitinkantis per HE užtvanką praleidžiamą debitą nusistovėjusio tekėjimo sąlygomis (3.1 lent.).

Modelio aukštutinėje atviroje riboje buvo nustatomi debitai, tekantys per potvynių pralaidos angas ir HE turbinas. Šie duomenys pateikti 3.2 lentelėje, kur $Q_{T1...T4}$ reiškia turbinos eil. Nr. nuo dešiniojo kranto, o $Q_{P1...P3}$ reiškia potvynių pralaidos angos numerį nuo dešiniojo kranto.

Siekiant išryškinti HE žemutiniame bjeje sklindančias patvankos ir slūgio bangas ir tiksliau nustatyti jų charakteristikas buvo pasirinkti tokie potvynių pralaidos uždorių pakėlimo ir turbinų įjungimo-išjungimo scenarijai:

1. Nagrinėjamoje akvatorijoje modeliuojamas tėkmės greičių vektorių laukas ir vandens lygiai nusistovėjusio tekėjimo sąlygomis ir paruošiami „karšto starto“ duomenys nenusistovėjusio tėkmės modeliavimui (3.1 lent., 1, 4 ir 8 variantai).

2. Naudojant „karšto starto“ duomenis modeliuojamas patvankos bangos sklidimas dėl akimirksniu atidaromos potvynių pralaidos angos (2 ir 3 var.) arba staigiai paleidžiamų HE turbinų (5..8 variantai).

Vertinant 2 varianto hidrodinamikos modeliavimo rezultatus paaiškėjo, kad modeliavimo rezultatų išvedimas (užrašymas) kas 10 skaičiuojamojo laiko žingsnių, kai skaičiuojamasis laiko žingsnis visuose modeliuose buvo 1 s, yra netikslus, todėl kituose modeliavimo variantuose skaičiavimų rezultatai buvo išvedami ir analizuojami kiekvienu laiko žingsniu ($t=1s$).

Modeliavimo rezultatai buvo atvaizduojami ir analizuojami naudojant MIKE Zero programų paketo modulį Result Viewer. Tokiu būdu buvo apskaičiuojami ir braižomi tėkmės greičių vektorių laukai, pasirinktose kontrolinėse akvatorijos vertikalėse (žr. 3.4 pav.) sudaromi tėkmės greičių ir vandens lygių dinamikos grafikai.

Iš gautų modeliavimo rezultatų buvo skaičiuojami patvankos arba slūgio bangos sklidimo greičiai, kurie lyginami su bangos sklidimo greičiais, apskaičiuotais pagal kitų autorių literatūroje siūlomus metodus.

3.2 Hidrodinamikos skaitmeninis modelis

Darbe skysčių tekėjimo tyrimams naudotas matematinis (skaitmeninis) modeliavimas. Hidrodinamikos modeliai yra skirti vandens ir kitų skysčių tekėjimui tirti. Šiems modeliams skaičiuoti naudojami kompiuteriai, o skaičiavimai užrašomi matematinėmis formulėmis. Programų paketas MIKE 21 HD yra skaitmeninio hidrodinamikos modeliavimo sistema, skirta atvirų (beslėgių) vandens lygių, tėkmės debitų ir greičių skaičiavimams upių žiotyse (estuarijose), jūrų įlankose ir sausumos vandenyse, jei yra priimtinos šios hidraulinės sąlygos:

- nagrinėjamas nenusistovėjęs arba nusistovėjęs beslėgis turbulentinis vandens tekėjimas kvadratinų pasipriešinimų srityje;
- nenusistovėjusi dvimatė (plane) tėkmė gali būti laikoma vientisa ir homogenine (nestratifikuota);
- tėkmės greičio kryptys vertikalės taškuose gali būti laikomos horizontaliomis (t.y. greičio vertikalusis komponentas lygus arba artimas 0);
- bet kurios vertikalės taškuose tėkmės greičių kryptys yra lygiagrečios, t.y. paviršinių ir dugninių tėkmių kryptys yra tos pačios.

Šios sąlygos paprastai yra tenkinamos nagrinėjant tėkmės palyginti sekliuose atviruose vandens telkiniuose, kuriuose vertikalusis tėkmės greičio komponentas yra nereikšmingas, o paviršinių ir dugninių tėkmės linijų kryptys gali būti sutapatinamos. Priešingu atveju naudojami erdviniai (3D - trimačiai) skaitmeniniai hidrodinamikos modeliai arba kiti specialūs tyrimų metodai.

3.5 paveiksle pavaizduotas plane staigiai kintančio tekėjimo ruožas, padengtas stačiakampių koordinačių tinklu, kuris padalina visą nagrinėjamą akvatorijos plotą į elementarias stačiakampes gardeles. Vandens tekėjimas kiekvienoje elementarioje gardelėje (3.6 ir 3.7 pav.) aprašomas tokio pavidalo diferencialinių lygčių sistema:

$$\frac{\delta \zeta}{\delta t} + \frac{\delta p}{\delta x} + \frac{\delta q}{\delta y} = 0, \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\delta p}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\delta \zeta}{\delta x} + \frac{gp \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \\ & - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\delta}{\delta x} (h \tau_{xx}) + \frac{\delta}{\delta y} (h \tau_{xy}) \right] - \Omega_q - fV V_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\delta}{\delta x} (p_a) = 0, \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\delta q}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\delta}{\delta x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\delta \zeta}{\delta y} + \frac{gp \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \\ & - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\delta}{\delta y} (h \tau_{yy}) + \frac{\delta}{\delta x} (h \tau_{xy}) \right] - \Omega_p - fV V_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\delta}{\delta y} (p_a) = 0, \end{aligned} \quad (3.7)$$

čia δ - dalinės išvestinės simbolis;

$\zeta(x, y, t)$ – vandens paviršiaus aukštis (altitudė);

$p(x, y, t)$ – vienetinis debitas x ašies kryptimi ($p = u \cdot h$);

$q(x, y, t)$ – vienetinis debitas y ašies kryptimi ($q = v \cdot h$);

u, v – vidutinio vertikalėje tėkmės greičio projekcijos x ir y ašyse;

t – laikas;

x, y – erdvės koordinatės, m;

g – gravitacinis pagreitis, m/s^2 ;

$C(x, y)$ – Šezi koeficientas, $m^{0.5}/s$;

ρ_w – vandens tankis, kg/m^3 ;

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ – paviršiaus trinties jėgos (klampos) įtempių projekcijos koordinačių ašyse;

$\Omega_q(x, y)$ – Koriolio jėgos parametras, s^{-1} ;

$f(V)$ – vėjo trinties koeficientas;

$V, V_x, V_y(x, y, t)$ – vėjo greitis ir jo projekcijos x ir y ašyse, m/s;

$p_a(x, y, t)$ – atmosferos slėgis, Pa.

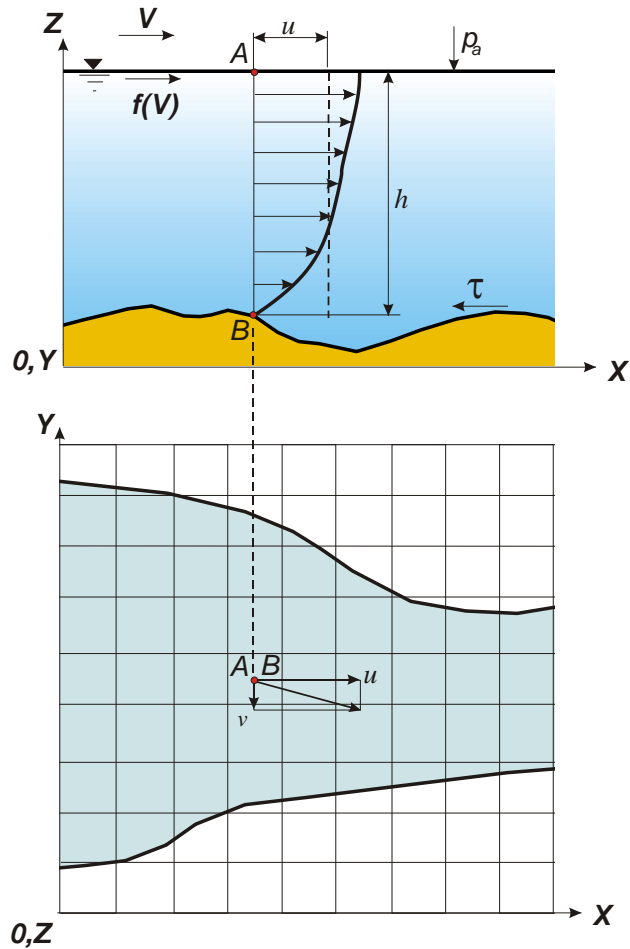
Šezi koeficientas yra skaičiuojamas pagal Maningą

$$C = M \cdot h^{1/6}, \quad (3.8)$$

čia M – Maningo skaičius, lygus $1/n$;

n – dugno paviršiaus šiurkštumo koeficientas.

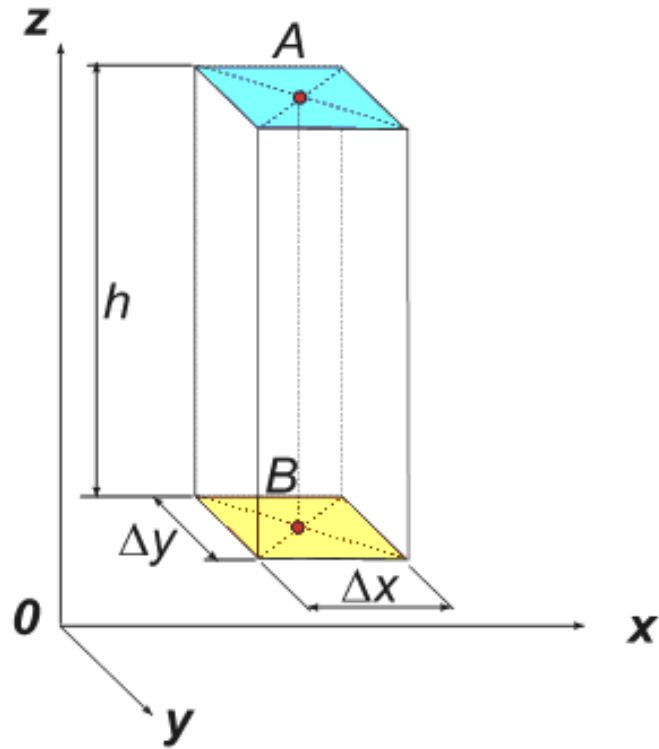
Lygtis (3.5) yra vadinama tėkmės vientisumo (vandens balanso) lygtimi, o (3.6) ir (3.7) lygtys – judesio kiekio balanso (x ir y ašių kryptimis) lygtimis.



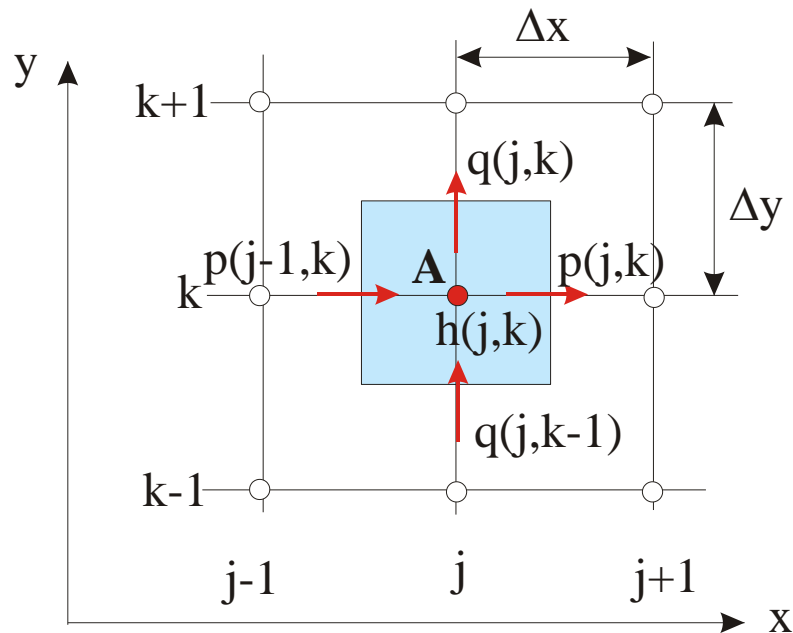
3.5 pav. Modeliuojamos tėkmės schematizavimas

Hidrodinamikos modeliavimas paremtas tėkmės vientisumo ir judesio kiekio dvimačių lygčių sprendimu erdvės ir laiko atžvilgiu. Lygčių (3.5)...(3.7) sistema sprendžiama iteracijų arba nuoseklaus kartojimo-priartėjimo būdu (baigtinių skirtumų metodu) erdvės koordinatėms x ir y ašių kryptimi kiekvienai elementariai gardelėi (3.5 pav.).

Lygčių sistemos sprendinys – kiekvienam skaičiuojamojo laiko žingsniui kiekvienoje elementarioje gardelėje apskaičiuotos ir rezultatų faile tam tikra tvarka užrašytos vienetinių debitų $p(x, y, t)$ ir $q(x, y, t)$ bei vandens paviršiaus aukščių $\zeta(x, y, t)$ reikšmės. Tėkmės parametrai elementarios gardelės plote yra tokie, kokie nustatomi centriniam gardelės taškui.



3.6 pav. Elementarios gardelės ribos



3.7 pav. Tėkmės elemento (elementarios gardelės) hidraulinių skaičiavimų schema

MIKE 21 HD diferencialinių lygčių sprendimui naudojama vadinamoji neišreikštinė kintamos krypties skaičiavimų schema (Alternating Direction Implicit), kuri apjungia tėkmės

vientisumo ir judesio kiekio lygtis erdvės-laiko srityje. Čia panaudojamas vadinamasis dvigubo apėjimo (Double Sweep) algoritmas, kuris priartėjimų būdu skaičiuoja tėkmės charakteristikas x ir y ašių kryptimis išilgai kiekvienos elementarių gardelių linijos.

MIKE 21 HD pasižymi tokiomis svarbiomis savybėmis kaip tėkmės vientisumo, judesio kiekio ir energijos skaičiavimų paklaidos, susidarančios dėl elementarios gardelės parametrų sutelkimo į tašką, yra iš esmės nereikšmingos ir santykinai geras sprendimų algoritmas garantuoja tikslų, patikimą ir greitą uždavinio skaičiavimą.

3.2.1. Batimetrinių duomenų paruošimas

Pradiniai batimetrijos duomenys neužtikrina sklandaus ir greito hidrodinamikos modelio paleidimą ir derinimą. Todėl parenkant modeliuojamos akvatorijos plotą visų pirma būtina atsižvelgti į hidrodinamikos modelio atviras ribas ir joms keliamus reikalavimus:

- hidrodinamikos modeliavimo programoje MIKE 21 HD bazinės diferencialinės lygtys yra sprendžiamos baigtinių skirtumų metodu, kuris reikalauja stačiakampių gardelių tinklo, todėl modeliuojama sritis turi būti stačiakampė;
- nagrinėjama akvatorijos sritis turi būti modeliuojamo ploto viduje ir nutolusi nuo modelio atvirų ribų kiek galima toliau, ne mažiau kaip 10 elementarių gardelių;
- į modeliuojamą sritį patartina įtraukti ne tik nagrinėjamą akvatorijos plotą, bet ir šalia esančią žymiai didesnę akvatorijos dalį, jei, pavyzdžiui, reikia atsižvelgti į vėjo sukeltą bangas ir pan.

Hidrodinamikos modelio atviros ribos, per kurias į modelį „įteka“ vanduo arba iš jo „išteka“, turi tenkinti šiuos reikalavimus:

- modelio atvira riba turi būti kiek galima statmena tėkmės kryptims;
- modelio atviroje riboje ir artimiausioje pakraštinėje modelio dalyje (5-10 gardelių atstumu nuo modelio ribos) vandens tekėjimas turi būti artimas tolygiam;
- jei modelio atvira riba negali būti statmena tekmei, tai būtina nustatyti kampą, kurį tėkmės kryptis sudarys su atvira modelio riba, bet kuriuo atveju šis kampas turi būti kiek įmanoma statesnis;
- nustatant atviros modelio ribos padėtį plane turi būti žinomas vandens lygis modelio riboje, o jei modeliuojamas nenusistovėjęs tekėjimas turi būti žinoma vandens lygio priklausomybė nuo laiko išilgai atviros modelio ribos.

Hidrodinamikos modelio batimetriniai duomenys charakterizuoja modeliuojamos akvatorijos dugno paviršiaus reljefą: kiekvienai modelio gardelei suteikiama dugno aukščio (altitudės) reikšmė; šie duomenys tam tikra tvarka surašomi ir išsaugomi modelio batimetrijos duomenų faile, kuriame gali būti papildomai redaguojami; jie yra būtini hidrodinamikos skaičiavimams, bet gali būti panaudoti ir kitiems tikslams (dugno reljefui grafiškai atvaizduoti, tėkmės profiliams sudaryti, darbų kiekiams skaičiuoti ir kt.).

Batimetrijos duomenys sparčiausiai paruošiami naudojant standartinį ASCII (.txt) batimetrinių duomenų failą, kuris gali būti sukurtas įvairiomis priemonėmis, pvz., eksportuojant batimetrinius duomenis iš skaitmeninių planų, ACAD, GIS duomenų bazių ir pan. Šie duomenys gali būti transformuojami į MIKE 21 formatą (.dfs2) grido redaktoriumi (Grid Editor). Toks batimetrinių duomenų paruošimo būdas dažniausiai naudojamas modeliuojant palyginti didelius akvatorijų plotus ir esant dideliame akvatorijos gardelių skaičiui.

Kad patogiau būtų galima modeliuoti, modelio koordinatės „pririštos“ prie stačiakampių koordinatinių sistemų (Lietuvos koordinatinių sistema LKS-94).

Tėkmės gylio arba dugno aukščio reikšmė, kuri užrašoma elementarios gardelės centriniam taškui, suteikiama ir visiems kitiems tos modelio gardelės taškams (žr. 3.7 pav.).

Detalesnė informacija ir batimetrinių duomenų paruošimo ypatumai aprašyti mokomosiose knygose ir metodinėje medžiagoje [9].

3.2.2. Pakraštinės sąlygos

Jei pagal svarbą pirmasis hidrodinamikos modeliavimo uždavinys yra batimetrijos duomenų paruošimas, tai antrasis – pakraštinių sąlygų nustatymas. Kuo geriau nustatomos modelio pakraštinės sąlygos, tuo labiau tikėtini sklandūs skaičiavimai ir patikimi modeliavimo rezultatai.

MIKE 21 modelyje baigtinių skirtumų metodu yra sprendžiamos diferencialinės lygtys, aprašančios vandens tekėjimą horizontalioje plokštumoje. Tokio tipo lygtims, kurių nežinomi (ieškomi) kintamieji yra vandens lygis bei vienetinių debitų projekcijos x ir y ašyse, yra būtina nustatyti atitinkamas pakraštines sąlygas.

Formuluojant pakraštines sąlygas kiekvienai atviroje modelio riboje esančiai gardelei būtina nurodyti tik dviejų (iš paminėtų trijų) kintamųjų reikšmes kiekvienam skaičiuojamojo laiko žingsniui. Tačiau dažniausiai yra žinomi tik vandens paviršiaus aukščiai ir pagrindinė vandens tekėjimo kryptis arba bendras vandens debitas, kuris įteka ar išteka per atvirą modelio ribą.

Programa MIKE 21 HD leidžia pasirinkti vieną iš dviejų pakraštinių sąlygų nustatymo būdų:

- nustatyti vandens lygį ir tėkmės kryptį.
- nustatyti suminį vandens debitą, įtekantį arba ištekantį per atvirą modelio ribą, bei tos tėkmės kryptį [9].

4. TYRIMŲ REZULTATŲ ANALIZĖ IR APTARIMAS

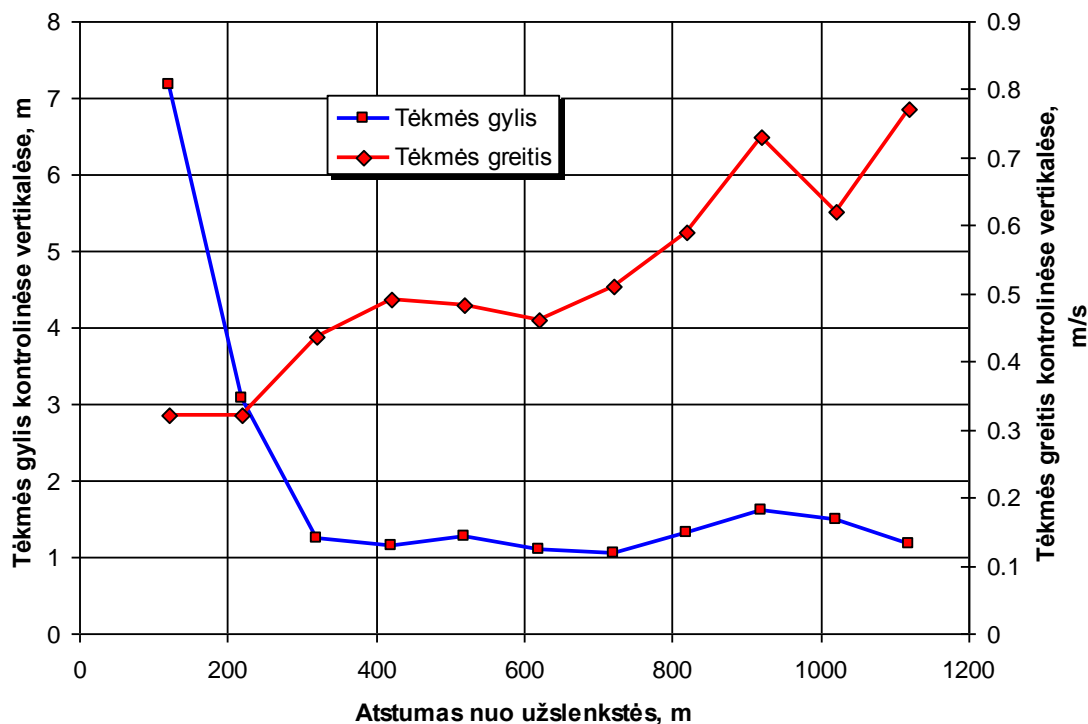
Hidrodinamikos modeliavimo rezultatai parodė, kad Kauno HE žemutiniam bjeffe tekėjimas yra netolyginis staigiai kintantis: apie 600 metrų nuo HE tėkmė nesimetriškai plečiasi, o toliau – palaipsniui siaurėja (3.4 pav.). Maksimalūs tėkmės greičiai esant nusistovėjusiam tekėjimui formuojasi giliausioje vagos dalyje ir seklumoje už 1200 m nuo HE. Esant minimaliam $120 \text{ m}^3/\text{s}$ debitui maksimalūs tėkmės greičiai neviršija $0,79 \text{ m/s}$.

Didžiausi tėkmės gyliai yra šalia užslenksčio išplovimo duobėje ties kontroline vertikale Nr.1, kur siekia 6,8 m. Tėkmės kryptimi gyliai sumažėja iki 1-1,6 m, kaip matyti 4.1 paveiksle.

Didžiausias dėmesys šiame darbe buvo skiriamas nenusistovėjusio tekėjimo analizei ir patvankos bei slūgio bangų sklidimo greičiui nustatyti. Tam tikslui buvo analizuojami vandens lygių ir tėkmės greičių laiko serijų grafikai, sudaryti jau aptartu būdu pagal hidrodinamikos modeliavimo rezultatus.

Tokia modeliavimo rezultatų analizė parodė, kad kontrolinėse vertikalėse vandens lygių dinamikos laiko serijų grafikams yra būdingos šios charakteringos vandens lygio kilimo fazės (4.2 pav.):

- nusistovėjusio tekėjimo fazė arba laikotarpis, per kurį nuo HE užtvankos judanti patvankos banga pasiekia kontrolinę vertikale;
- staigiausio vandens lygio kilimo fazė, kuri ryškiausiai pastebima 1...8 vertikalėse, esančiose arčiausiai HE, ji pasireiškia apie 900 m ilgio žemutinio bjeffe ruože, tokios bangos aukštis laipsniškai mažėja tekėjimo kryptimi, o tolimesniuose tėkmės pjūviuose ši fazė tampa nepastebima;
- lėto vandens lygio kilimo fazė, kurios pradžioje būdingas staigesnis vandens lygio kilimas laipsniškai lėtėja tol, kol tekėjimas galiausiai nusistovi;
- nusistovėjusio tekėjimo fazė, kurioje vandens lygiai laikui bėgant nekinta.



4.1 pav. Tėkmės gyiai ir greičiai kontrolinėse vertikalėse esant minimaliam $120 \text{ m}^3/\text{s}$ upės debitui

Kontrolinėse vertikalėse apskaičiuotų tėkmės greičių dinamikos laiko serijų grafikai parodė, kad bendrosios jų kitimo tendencijos buvo analogiškos vandens lygių kitimui (4.3 pav.), čia taip pat išryškėjo jau aptartos vandens lygio kilimo fazės.

Aukščiau paminėtoje literatūroje šiai temai skirtuose darbuose analizuojami įvairūs patvankos bangos parametrai: bangos aukštis ir jos sklidimo greitis, vandens lygio kilimo (arba slūgimo) greitis, vandens debitas, bangos energija ir pan. Dėl nedidelės šio darbo apimties mes apsiribojome bangos sklidimo greičio analize.

Patvankos bangos sklidimo greitis hidrodinamikos modelyje buvo skaičiuojamas paprastai ir pakankamai tiksliai - dalinant kontrolinės vertikalės atstumą nuo HE iš jau aptartos 1-osios nusistovėjusio tekėjimo fazės trukmės (4.4 pav.). Skaičiavimų rezultatai pateikti grafike 4.5 paveiksle, kuriame panaudoti tokie žymėjimai: $c(6v)$ – bangos greitis, apskaičiuotas 6 variante pagal tėkmės greičius modelyje; $c(6h)$ – bangos greitis, apskaičiuotas 6 variante pagal tėkmės gylius modelyje; $c(sk1)$ – bangos greitis, apskaičiuotas pagal (3.2) formulę; $c(7h)$ – bangos greitis, apskaičiuotas 7 variante pagal tėkmės laisvojo paviršiaus aukščius; $c[sk4]$ – bangos greitis, apskaičiuotas pagal (3.4) formulę.

Palyginus gautus rezultatus matyti, kad bangos sklidimo greičiai, apskaičiuoti pagal vandens lygius ir tėkmės greičius yra panašūs 1-4 kontrolinėse vertikalėse, kurios yra arčiau HE. Tolimesniuose tėkmės ruožuose bangos sklidimo greičiai, apskaičiuoti pagal vandens

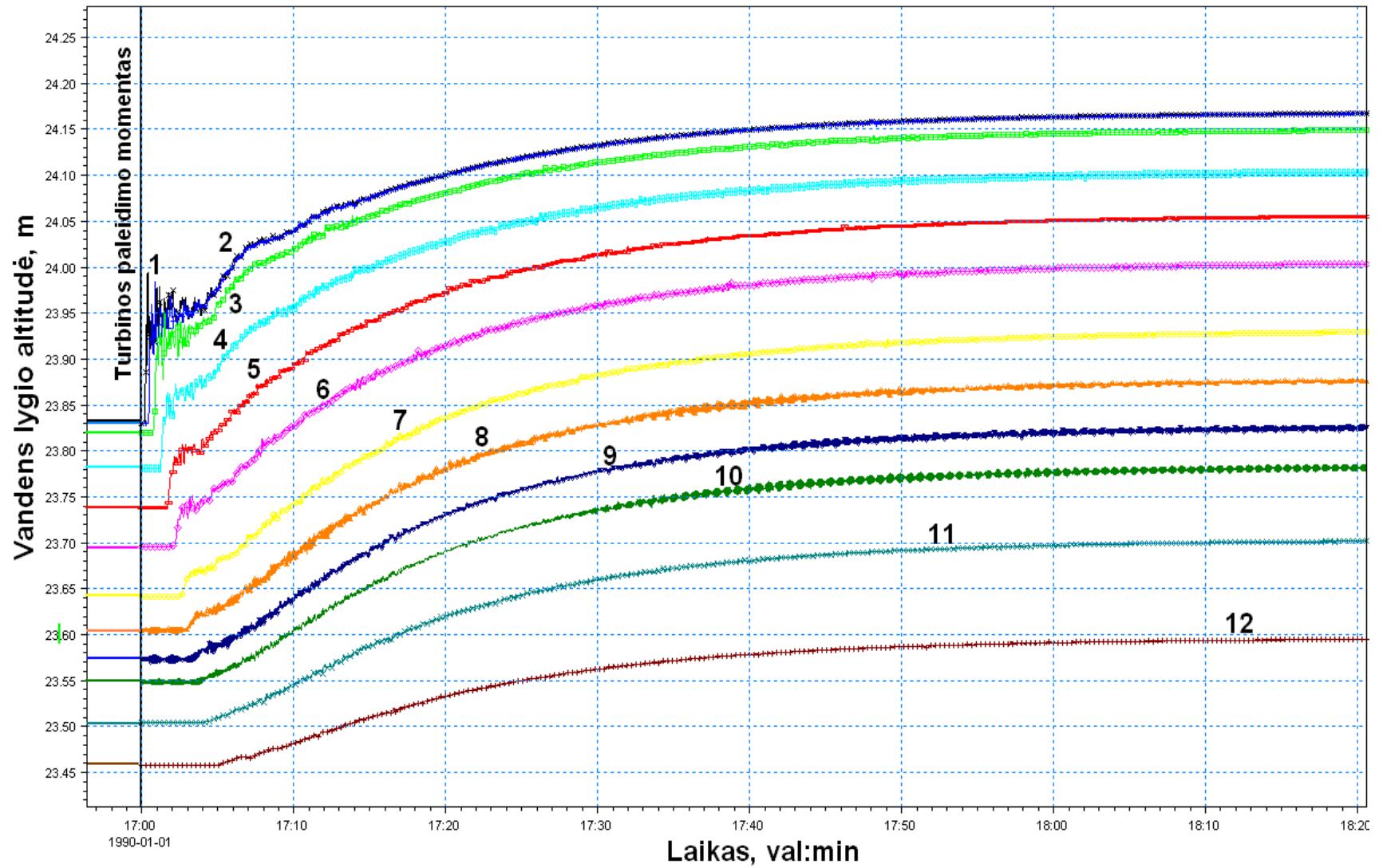
lygius, yra apie 10 % mažesni, t.y. artėjant patvankos bangai pirmiausia padidėja tėkmės greičiai, po to pradeda kilti vandens lygis.

Lyginant 6 ir 7 modeliavimo variantus buvo nustatyta, kad patvankos bangos sklidimo greitis artimoje zonoje (1...4 kontrolinės vertikalės) nepriklauso nuo bangos debito ir jos aukščio, tačiau tolimesniame tėkmės ruože bangos greitis padidėja, kai padidėja bangos debitas ir jos aukštis (žr. 4.5 pav., c(6h) ir c(7h)).

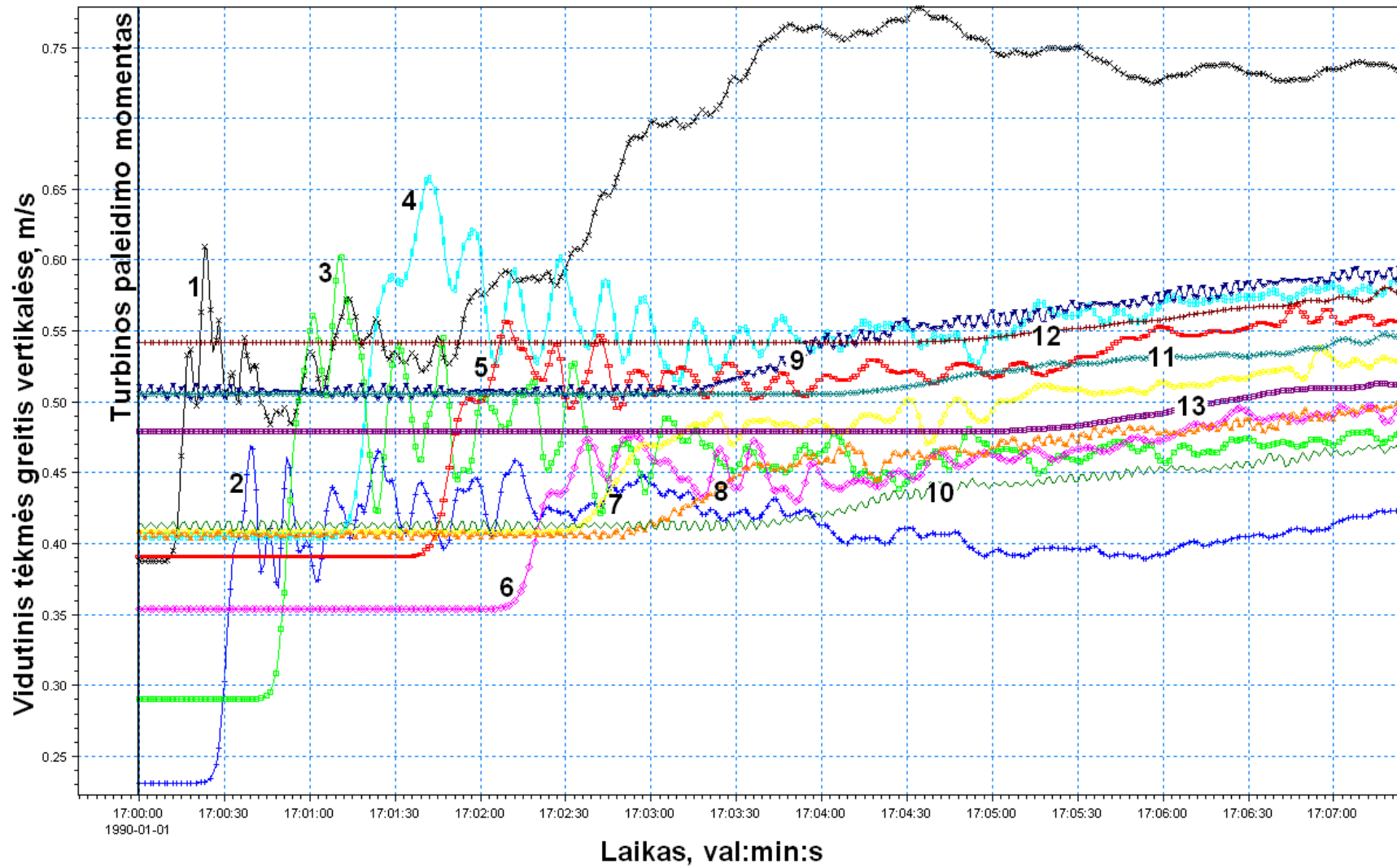
Iš grafiko (4.2 pav.) matyti, kad pirmoje vertikalėje, staigiai kintant turbinų debitui nuo 120 iki 240 m³/s, vandens lygis aukščiausiai pakyla 0,16 m praėjus vos kelioms minutėms nuo turbinų paleidimo momento. Antroje vertikalėje aukščiausiai vandens lygis pakyla iki 0,34 m, toks lygis pasiekiamas praėjus maždaug valandai po turbinos paleidimo, trečioje vertikalėje vandens lygis pakyla iki 0,33 m, ketvirtoje – 0,32 m, penktoje – 0,32 m, šeštoje – 0,31 m, septintoje – 0,29 m, aštuntoje – 0,27 m, devintoje – 0,26 m, dešimtoje – 0,23 m, vienuoliktoje – 0,20 m, dvyliktoje iki 0,13 m. Taigi, aukščiausias vandens lygio pakilimas buvo antroje vertikalėje.

Iš grafiko (4.3 pav.) matyti, kad paleidus turbinas (turbinų debitas kinta nuo 120 iki 240 m³/s) didžiausias greitis užfiksuotas pirmoje vertikalėje (praėjus daugiau kaip keturioms minutėms nuo turbinų paleidimo) 0,78 m/s. Antroje vertikalėje didžiausias greitis buvo 0,47 m/s, trečioje – 0,6 m/s, ketvirtoje – 0,66 m/s, penktoje – 0,56 m/s, šeštoje – 0,50 m/s, septintoje – 0,53 m/s, aštuntoje – 0,50 m/s, devintoje – 0,59 m/s, dešimtoje – 0,47 m/s, vienuoliktoje – 0,55 m/s ir dvyliktoje – 0,58 m/s.

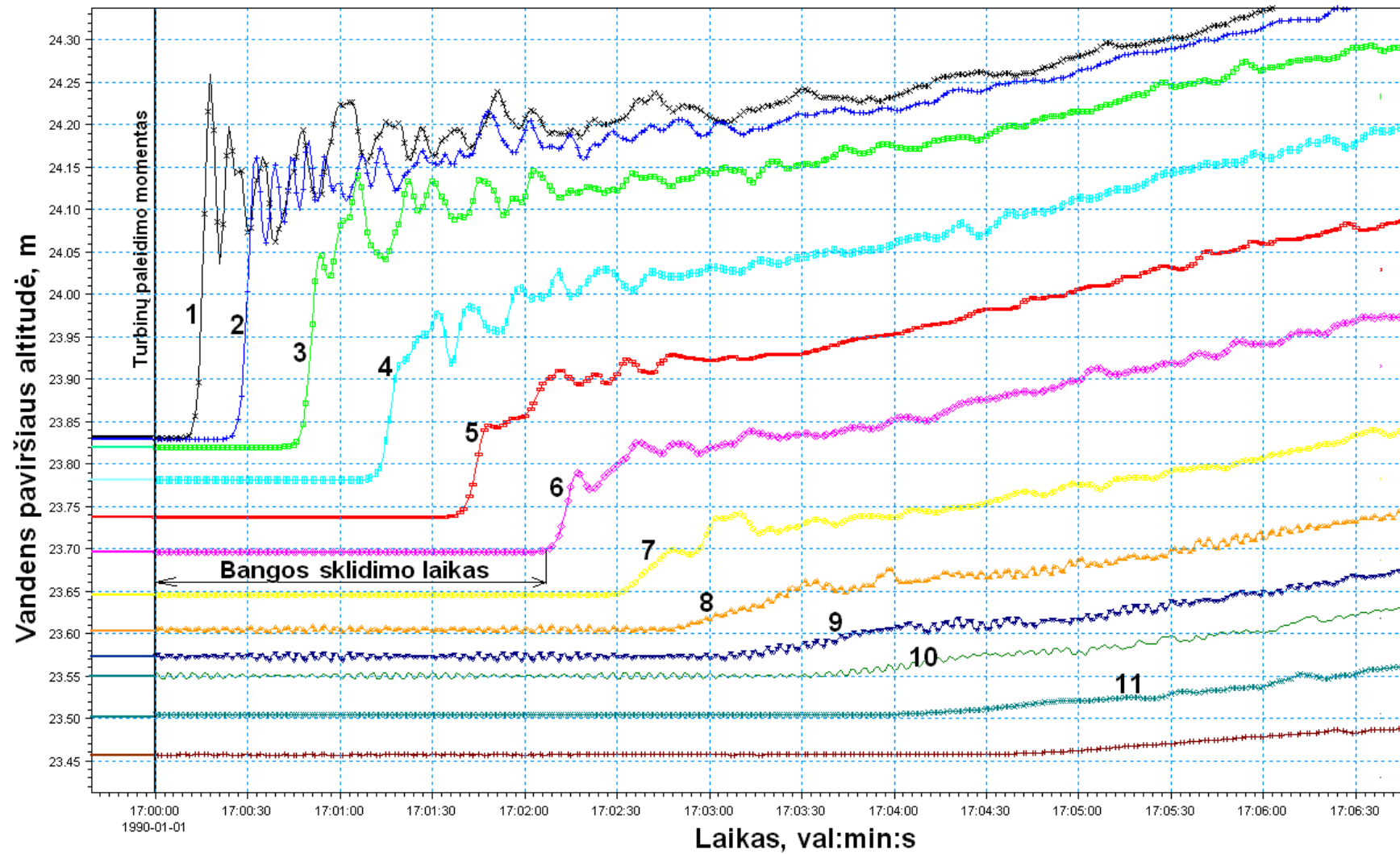
Iš 4.4 paveikslo matyti, kad bangos sklidimo laikas trumpiausias buvo pirmoje vertikalėje (apie 20 s), o ilgiausias dvyliktoje vertikalėje (beveik penkias minutes). Staigiausiai vandens lygis pakyla pirmoje vertikalėje, o lėčiausiai dvyliktoje.



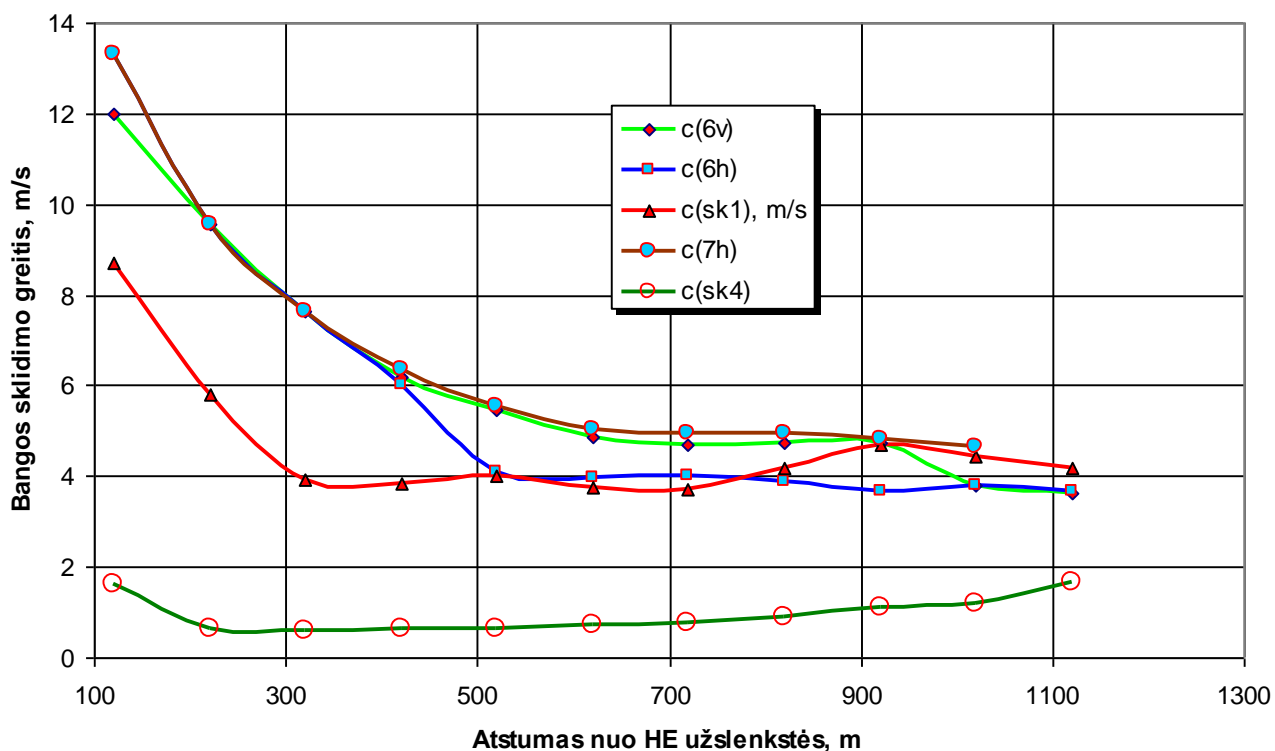
4.2 pav. Vandens lygio dinamika kontrolinėse vertikalėse 6 modeliavimo variante staigiai kintant turbinų debitui nuo 120 iki 240 m³/s (fragmentas), čia 1..12 – kontrolinės vertikalės numeris



4.3 pav. Tėkmės greičio dinamika kontrolinėse vertikalėse 6 modeliavimo variante staigiai kintant turbinų debitui nuo 120 iki 240 m³/s (fragmentas), čia 1..12 – kontrolinės vertikalės numeris



4.4 pav. Vandens lygio dinamika kontrolinėse vertikalėse 7 modeliavimo variante staigiai kintant turbinų debitui nuo 120 iki 480 m³/s (fragmentas), čia 1..12 – kontrolinės vertikalės numeris



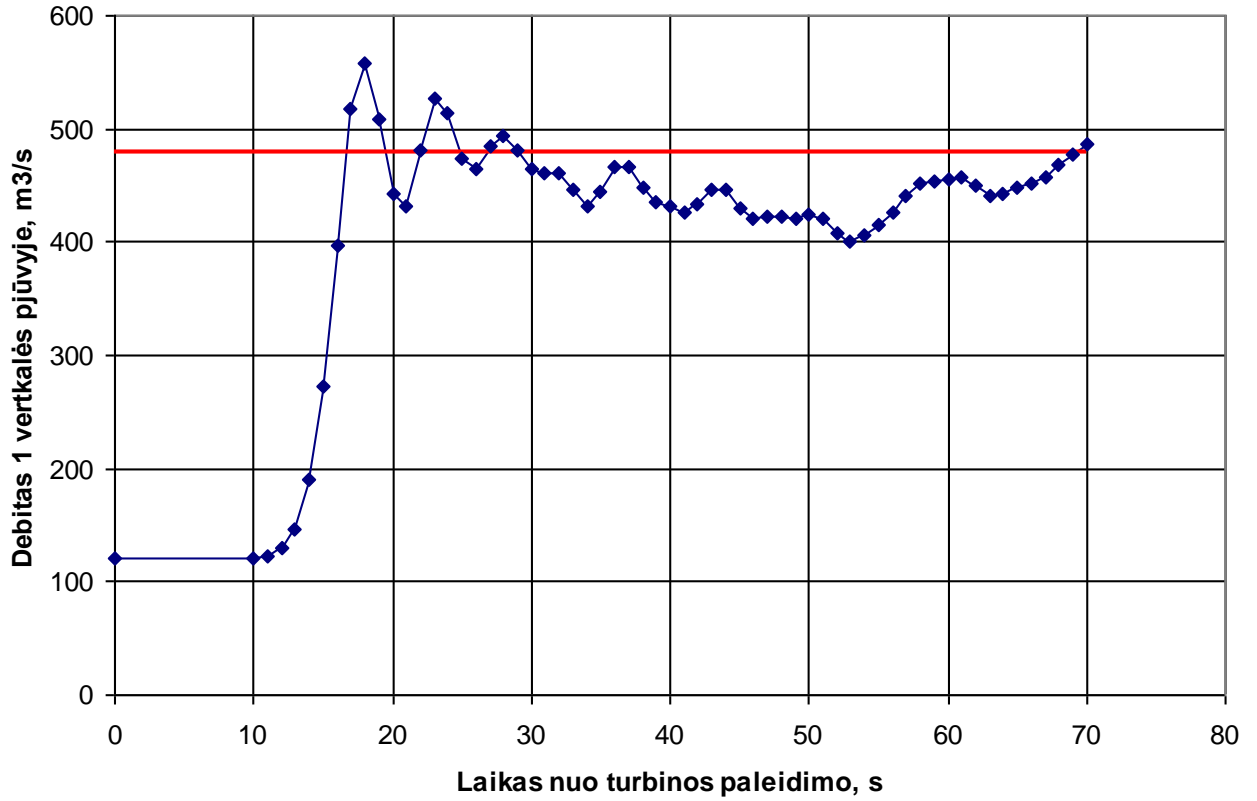
4.5 pav. Bangos sklaidimo greičių skaičiavimų rezultatai.

Naudojant hidrodinamikos modelyje 6 variante nustatytus tėkmės parametrus visose kontrolinėse vertikalėse pagal (3.4) lygtį buvo apskaičiuoti bangos sklaidimo greičiai, o gauti rezultatai palyginti su bangos greičiais, nustatytais kitais metodais (4.5 pav., $c(sk4)$). Kaip matyti, pagal (3.4) lygtį apskaičiuoti bangos sklaidimo greičiai yra keletą kartų mažesni, tačiau tekėjimo kryptimi šie skirtumai pastebimai mažėja.

Siekiant įvertinti hidrodinamikos modelio tikslumą skaičiavimų rezultatai buvo kontroliuojami pagal atskiruose tėkmės skerspjūviuose apskaičiuotus debitus. Tyrimais nustatyta, kad esant nusistovėjusiam tekėjimui bet kuriame tėkmės skerspjūvyje apskaičiuotų debitų paklaidos neviršijo 0,2%. Tačiau skaičiuojant vandens debitą tėkmės skerspjūvyje, praeinančiame per 1-ąją kontrolinę vertikalę, paaiškėjo, kad patvankos bangai pasiekus skaičiuojamąjį pjūvį, debitų reikšmės staigiai padidėja ir kurį laiką svyruoja apie tam tikrą vidutinę reikšmę (4.6 pav.). Mūsų manymu, tai yra susiję su nenusistovėjusiu netolyginiu staigiai kintančiu tekėjimu ir vandens lygių svyravimais.

Kai kurių autorių darbuose [1, 2, 5, 11] nenusistovėjusiam tekėjimui HE užtvankų žemutiniuose bjeuose apibūdinant yra naudojamos ir kiti parametrai bei charakteristikos: vandens lygio kitimo intensyvumas, maksimalus vandens lygis, maksimalus debitas, debito atitekėjimo greitis, maksimalaus gylio nusistovėjimo laikas ir kt. Šių parametru detalesnė analizė hidrodinamikos modeliuose yra tikslinga tik tokiu atveju, kai apskaičiuotas patvankos

bangos sklaidimo greitis yra patikrinamas pagal natūrinių matavimų rezultatus. Tikimasi, kad artimiausiu laiku tokie duomenys bus gauti ir išanalizuoti magistratūros baigiamojo darbo tezėse ir kituose šios tematikos darbuose.



4.6 pav. Debito dinamika 1-osios vertikalės pjūvyje 7 modelio variante. Raudona tiesė – į modelį įtekantis debitas

IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

1. Nenusistovėjusį staigiai kintantį tekėjimą HE užtvankų žemutiniuose bjefuose yra patogu tirti skaitmeniniuose dvimačiuose hidrodinamikos modeliuose, kuriuose žymiai tiksliau įvertinamos vagos morfometrinės ir hidraulinės charakteristikos.
2. Intensyviausi vandens lygių ir greičių svyravimai būdingi HE artimiausiems žemutinio bjefo ruožams, Kauno HE tokio ruožo ilgis siekia 600-800 m.
3. Tolimesniuose nuo HE tėkmės kryptimi upės ruožuose tėkmės greičių ir vandens lygių svyravimų, atsirandančių dėl staigiai kintančio HE turbinų debito, intensyvumas mažėja.
4. Patvankos bangos sklidimo greičiai, nustatyti MIKE 21 hidrodinamikos modelyje artimiausiame HE žemutinio bjefo ruože, yra žymiai didesni už bangos sklidimo greičius, apskaičiuotus pagal kitų autorių literatūroje siūlomas formules; tolystant nuo HE tekėjimo kryptimi šie skirtumai pastebimai mažėja.
5. Patvankos bangos sklidimo greitis artimojoje HE zonoje nepriklauso nuo bangos debito ir jos aukščio, tačiau tolimesniame tėkmės ruože bangos greitis padidėja, kai padidėja bangos debitas ir jos aukštis.
6. Hidrodinamikos modeliavimo rezultatų patikimumo vertinimui literatūroje pateiktų skaičiavimo metodų nepakanka, tam yra būtini natūrinių matavimų rezultatai.
7. Norint nustatyti ir įvertinti įvairių autorių literatūroje siūlomų nenusistovėjusio tekėjimo skaičiavimo metodų tikslumą ir patikimumą, rekomenduojame modeliuoti ilgesnius žemutinių bjefų ruožus.

LITERATŪRA

1. Vaikasas S., Poškus V. HE turbinų įjungimo sukeltos potvynio bangos žemutiniame bjeфе tyrimai // Vandens ūkio inžinerija, 2009, Nr.35 (55), 103-109 p.
2. Ždankus N., Sabas G. The Impact of Hydropower Plant on Downstream River Reach // Environmental research, engineering and management, 2006.No.4(38), P.24-31.
3. Ždankus N., Vaikasas S., Sabas G. Impact of hydropower plant on the downstream // Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 2008, 16(3): 128–134.
4. Ždankus N, Sabas R. The Influence of Anthropogenic Factors to Lithuanian Rivers Flow Regime. // Proceedings of the 6th International Conference “Environmental Engineering”, 2005, vol.1, p.515-522.
5. Каганов Г.М., Волков В.И. Секисова И.А. Сравнение параметров волны прорыва, определенных различными методами // Гидротехническое строительство Но. 1, 2010, с.31-37.
6. Справочник по гидравлическим расчетам. Под ред. П.Г.Киселева. М., Энергия, 1972.
7. Kauno hidromazgo slenkstinės betono gravitacinės užtvankos uždorių manevravimo tvarkos taisyklės. Autorinio mokslinio-tiriamąo darbo ataskaita. Akademija, 2007.
8. Šikšnys A. Atvirų vandens telkinių hidrodinamikos skaitmeninis modeliavimas. Metodiniai patarimai. Kaunas, Ardiva, 2008.
9. Šikšnys A. Atvirų vandens telkinių hidrodinamikos skaitmeninis modeliavimas. Mokomoji knyga. Kaunas, Ardiva, 2008.
10. Kauno hidroelektrinės tvenkinio naudojimo ir priežiūros taisyklės. LAE Hidrologijos laboratorija. Darbo vadovas B.Gailiušis, 2005.
11. Гидротехнические сооружения. Справочник проектировщика. М., Стройиздат, 1983.
12. Kustienė R., Poška A. Mažoji hidroenergetika. Kaunas, 1997.
13. Ruplys B. Hidrotechniniai statiniai, 1998.
14. Sabas G. Analysis of Hydropower Plant Influence to the River Hydrological and Hydraulic Regimes // Proceedings of the 6th International Conference “Environmental Engineering”, 2005, vol.1, p.451-457.
15. Kauno hidromazgo slenkstinės betono gravitacinės užtvankos uždorių manevravimo tvarkos taisyklės//Lietuvos žemėtvarkos ir hidrotechnikos inžinierių sąjunga. Akademija, 2007.

16. Jablonskis J., Jurgelėnaitė A., Tomkevičienė A. Hidroenergetika aplinkos apsaugos kontekste//Lietuvos hidroenergetikų asociacija, 2007.T53.P48-56 p.
17. Lietuvos Respublikos vandens įstatymą (Žin., 1997, Nr. 104-2615; 2003, Nr. 36-1544).
18. Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2005 m. liepos 29 d. įsakymą Nr. D1-382 „Dėl Gamtosauginio vandens debito apskaičiavimo tvarkos aprašo patvirtinimo“ (Žin., 2005, Nr. 94-3508).
19. Lietuvos energija [žiūrėta 2010 02 23]. Prieiga prie interneto:
<http://www.lpc.lt>
20. Kauno hidroelektrinė [žiūrėta 2010 01 20]. Prieiga prie interneto:
http://lt.wikipedia.org/wiki/Kauno_hidroelektrinė
21. Aplinkos ministerija [žiūrėta 2010 02 28]. Prieiga prie interneto:
<http://www.am.lt>
22. Aplinkos apsaugos agentūra [žiūrėta 2010 03 09]. Prieiga prie interneto:
http://vanduo.gamta.lt/files/Lielupes_plano_santrauka_visuomenei_BEF_BP_2009-12-02.pdf
23. Nemunas [žiūrėta 2010 03 23]. Prieiga prie interneto:
<http://lt.wikipedia.org/wiki/Nemunas>.
24. Statybos techninis reglamentas STR 2.02.06:2004 „Hidrotechnikos statiniai. Pagrindinės nuostatos“.