



**VILNIAUS UNIVERSITETO
CHEMIJOS IR GEOMOKSLŲ FAKULTETO
KARTOGRAFIJOS IR GEOINFORMATIKOS KATEDRA**

Jonas Kaminskas

**KARTOGRAFINIŲ MODELIAVIMO METODŲ TAIKYMAS VERTINANT
KURŠIŲ NERIJOS KOPŲ DINAMIKA**

**APPLICATION OF CARTOGRAPHIC MODELLING METHODS IN THE
EVALUATION OF DYNAMICS OF THE CURONIAN SPIT DUNES**

Magistro darbas

Studijų programa – Kartografija

Vadovas: dr. A. Baurėnas

Vilnius 2018

Turinys

| | |
|--|----|
| Anotacija..... | 2 |
| ĮVADAS | 3 |
| 1. LITERATŪROS APŽVALGA | 5 |
| 1.1 Užsienyje atliktų tyrimų istorinė analizė | 5 |
| 1.1 Lietuvoje atliktų tyrimų apžvalga | 8 |
| 1.2 Smėlio transportacija | 12 |
| 2. DARBO METODOLOGIJA | 14 |
| 2.1 Teritorijos parinkimas ir matavimo prietaisai..... | 15 |
| 2.2 Kartografinių modeliavimo metodų atranka | 15 |
| 2.3 Meteorologinių duomenų vertinimas..... | 31 |
| 2.4 Apsauginių priemonių atranka vertinimui | 35 |
| 3. MATAVIMO REZULTATŲ ANALIZĖ..... | 37 |
| 3.1 Kopų reljefo 2D modeliai | 37 |
| 3.2 Reljefo profiliai | 38 |
| 3.3 Kopų tūriai tiriamose teritorijose | 40 |
| 3.4 Dinaminių pokyčių kartografavimas..... | 43 |
| 3.5 3D modeliai..... | 47 |
| 3.6 Meteorologinių veiksnių poveikis kopų dinamikai | 48 |
| 3.7 Apsauginių priemonių poveikio kopų reljefui analizė..... | 50 |
| IŠVADOS..... | 53 |
| LITERATŪROS IR INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS | 55 |
| Santrauka | 57 |
| Summary..... | 58 |
| PRIEDAI | 59 |

Kaminskas J. Kartografinių modeliavimo metodų taikymas vertinant Kuršių nerijos kopų dinamiką. Magistro darbas. Vilnius: VU. 2018.

Anotacija. Kuršių nerija pasižymi išskirtinai unikaliu kraštovaizdžiu. Nuo 2000 m. Kuršių nerijos kopos įtrauktos į UNESCO pasaulinio kultūros paveldo sąrašą. Ši teritorija Lietuvoje yra populiari turistų traukos vieta. Kasmet tūkstančiai turistų atvyksta aplankyti kopų. Deja, dėl nevaržomų lankytojų srauto, bei dėl meteorologinių reiškinių sukeltų defliacijos procesų Kuršių nerijos kopos pradėjo sparčiai nykti. Dėl sparčių dinaminių pokyčių kartografuoti kopas yra sudėtinga. Siaučiant audroms kopų forma gali ženkliai pasikeisti, net per itin trumpą laiko tarpą. Šio darbo tikslas – pritaikyti kartografinius modeliavimo metodus vertinant Kuršių nerijos kopų dinamiką. Darbo tikslo įgyvendinimui suformuluoti penki uždaviniai: atlikti užsienyje ir Lietuvoje vykdytų tyrimų istorinę analizę; parinkti kartografinius modeliavimo metodus, kuriais būtų galima atvaizduoti reljefo dinaminius pokyčius; atlikti tiesioginius kartografinius tyrimus pasirinktose teritorijose; atlikti duomenų analizę taikant parinktus kartografinio modeliavimo metodus; pritaikyti kartografinio modeliavimo metodiką vertinant apsauginių priemonių poveikį. Magistriniame darbe atlikta išsami literatūrinė analizė – apžvelgti su kopų dinamiką ir stabilizavimu susiję įvairūs moksliniai tyrimai Lietuvoje ir pasaulyje. Tyrimo metu parinkti įvairūs kartografinio modeliavimo metodai kuriais galima atvaizduoti kopų reljefo dinamiką: profiliai, 2D žemėlapiai, dinaminių pokyčių žemėlapiai, 3D modeliai. Taip pat paskaičiuotos tūrių reikšmės Naglių kopų 15 333 m² ploto teritorijoje ir Parnidžio – 27 894 m² plote. Šis tyrimas yra svarbus Kuršių nerijos nacionaliniam parkui, nes sukurti kartografiniai modeliavimo metodai pritaikyti vertinant naujai įrengtų apsaugines kopų reljefo priemones saugomose gamtos objektuose.

Tekstas 58 psl., 2 priedų, 59 pav., 2 lentelės. Santrauka lietuvių ir anglų kalbomis.

Reikšminiai žodžiai: GIS, kartografija, Kuršių nerija, kopos, kopų dinamika, reljefo modelis

Kaminskas J. Application of cartographic modelling methods in the evaluation of dynamics of the Curonian spit dunes. Master thesis. Vilnius: VU. 2018.

Abstract. The Curonian spit distinguishes itself for its unique landscape. From 2000, the Curonian spit is in UNESCO world heritage list. This place is very popular among tourists. Every year thousands of people come to visit it. Unfortunately, because of many tourists and the deflation process caused by meteorological phenomena, sand dunes in the Curonian spit started to decrease rapidly. It is difficult to map dunes because of fast dynamical changes. Because of storms, the shape of dunes can change extremely even in a short period of time. The main goal of this research is to apply cartographical modelling methods in the evaluation of dynamics of the Curonian spit sand dunes. Five tasks were formed in order to achieve the purpose: to make an analysis of literature sources from Lithuania and other countries, to select cartographical modelling methods to express sand dunes dynamical changes, to make cartographical measurements in selected objects, to make data analysis and apply selected cartographical modelling methods, to apply cartographic modelling methods for estimation of sand dunes stabilisation constructions. Cartographical modelling methods are based on geographical information systems technologies. The relief of sand dunes is represented by 2D maps, topographic profiles, maps of dynamics, 3D models and the evaluation of the surface volume in different periods of time. The cartographic modelling was applied to estimate the impact of fencing in surface dynamical changes.

58 pages of text, with 2 annexes, 59 illustrations and 2 tables. Summaries in Lithuanian and English.

Keywords: Curonian Spit, dunes, cartographical modelling.

IVADAS

Kuršių nerija pasižymi išskirtinai unikaliu kraštovaizdžiu. Kuršių nerijos kopos nuo 2000 m. yra įrašytos į UNESCO pasaulinio kultūros paveldo sąrašą. Ši teritorija Lietuvoje yra populiari turistų traukos vieta. Kasmet aplankyti kopų atvyksta tūkstančiai turistų. Deja dėl nevaržomo lankytojų srauto, bei dėl meteorologinių reiškinių sukeltamų defliacijos procesų, Kuršių nerijos kopos pradėjo sparčiai nykti. Daugelio mokslininkų pastebėta, kad geodinaminiai procesai Kuršių nerijoje yra paspartėję, tad būtini dažnesni tyrimai vertinti pokyčiams. Dėl sparčių dinaminį pokyčių kartografuoti kopas yra sudėtinga. Siaučiant audroms kopų forma gali ženkliai pasikeisti, net per itin trumpą lako tarpą.

Nuo 2013 m. Vilniaus Universiteto mokslininkai bendradarbiaujant su Kuršių nerijos nacionaliniu parku pradėjo Parnidžio, Naglių ir Sklandytojų kopų sistemings kartografavimo darbus. Šių tyrimų metu vertinta kopų dinamika, defliaciniai ir akumuliaciniai procesai, nagrinėti meteorologiniai ir antropogeniniai poveikiai kopų reljefo kaitai.

Atlikus literatūros šaltinių analizę ir įvertinus įvairiuose šalyse (tame tarpe ir Lietuvoje) atliekamus mokslinius tyrimus susijusius su kopų dinamikos stebėjimais, bei išsaugojimo darbais daugelis autorių teigia, kad tokie tyrimai turėtų vykti ne trumpesniu, nei 10 metų laikotarpiu, kad būtų galima išskirti vyraujančias reljefo pokyčių tendencijas, vertinti apsauginių priemonių poveikį.

Kartografinių modeliavimo metodai paremti geografinių informacinių sistemų technologijomis. Tokio pobūdžio darbuose vis plačiau taikomos GIS technologijos palengvina duomenų analizę, nes perdengiant kelis skirtingų laikotarpių kopų reljefo sluoksnius, atsiranda galimybė nustatyti erdvinius ryšius, kuriuos kitomis priemonėmis nustatyti būtų sudėtinga. Kadangi ne visi GIS metodai tinka analizuoti kopoms, tad šiame darbe buvo parinkti tinkamiausi metodai tinkantys išreikšti kopų reljefą ir jo dinaminį pokyčius.

Šiame tyrime panaudoti ekspediciniai 2017 m. kovo – rugsėjo mėnesių duomenys, bei papildomi ankstesnių matavimų sukaupta kartografinė medžiaga (1910 m. topografinis žemėlapis ir 2013 m. LIDAR duomenys). Visi matavimai atlikti LKS94 koordinacinių sistemoje, o visi aukščiai (z –koordinatė), pateikti LAS07 aukščių sistemoje.

Duomenų analizė buvo atlikta keliais metodais sudarant: 2D reljefo modelius, pasirinktų vietų reljefo pjūvius (profilus), apskaičiuojant matuotų teritorijų tūrinius pokyčius, sudarant reljefo dinaminį pokyčių žemėlapius. Kartografinių modeliavimo metodų optimizavimui buvo panaudotas „ArcMap“ programinės įrangos įrankis „Model Builder“.

Didžiausias veiksnys lemiantis kopų reljefo dinamiką yra vėjas, todėl buvo atlikta meteorologinių duomenų analizė išskiriant vyraujančių vėjų kryptis (sudarant vėjų rožių grafikus), pagal atrinktą tinkamiausią meteorologinę stotį.

Pagal mokslininkų rekomendacijas 2016 – 2017 metais buvo įrengtos specialios medinių kuoliukų ir pušų šakų tvoros, skirtos sustabdyti smėlio defliaciją, siekiant stabilizuoti kopą ir akumuliuoti smėlį. Taikant tyrimo metu sukurtus kartografinių modeliavimo metodus pateiktas kompleksinis apsauginių priemonių vertinimas.

Darbo aktualumas. Kopų dinamikos stebėjimų rezultatai aktualūs pokyčių vertinimui ir naujų kartografinių modeliavimo metodų pritaikomumo ir analizės vertinimui.

Darbo naujumas. Kartografinių modeliavimo metodai pirmą kartą panaudoti vertinant 2017 metais įrengtų apsauginių priemonių poveikį Kuršių nerijos kopose.

Darbo pritaikomumas. Tyrimo metu sukaupti matavimo duomenys gali būti panaudojami sprendžiant įvairius kopų kraštovaizdžio planavimo, rekreacijos takų įrengimo klausimus ir kuriant informacinius (edukacinius) filmus pagal sudarytus 3D modelius.

Magistrinio darbo tikslas – pritaikyti kartografinius modeliavimo metodus vertinant Kuršių nerijos kopų dinamiką.

Siekiant įgyvendinti darbo tikslą iškelti šie uždaviniai:

1. Atlikti užsienyje ir Lietuvoje vykdytų tyrimų istorinę analizę.
2. Atlikti tiesioginius kartografinius tyrimus pasirinktose teritorijose.
3. Parinkti kartografinius modeliavimo metodus, kuriais būtų galima atvaizduoti reljefo dinaminis pokyčius.
4. Atlikti duomenų analizę taikant parinktus kartografinio modeliavimo metodus.
5. Pritaikyti kartografinio modeliavimo metodiką vertinant apsauginių priemonių poveikį.

Padėka. Darbo autorius norėtų padėkoti Lietuvos hidrometeorologijos tarnybai – už meteorologinius duomenis. Nacionalinei žemės tarnybai – už Kuršių nerijos kopų 2013 m LIDAR duomenis. Kuršių nerijos nacionalinio parko direkcijai – už pagalbą tiriant kopas ir apsauginių priemonių įrengimą. GisBox įmonės darbuotojams Liviu Toma ir Irina Carlan – už konsultacijas įvairiomis su magistrinio darbo tyrimu susijusiomis temomis. Austrijos Karintijos taikomųjų mokslų universiteto dėstytojui Karl-Heinrich Anders už 3D modeliavimo konsultacijas. Ypatingai visiems Vilniaus universiteto ChGF fakulteto Kartografijos ir Geoinformatikos katedros dėstytojams ir darbuotojams už studijų metu įgautas žinias. Taip pat Artūriui Bautrėnui, Linui Bevainiui, Neringai Mačiulevičiūtei-Turlienei, Reginai Morkūnaitei, Reginai Bugorevičienei ir Audriui Kalesnikui – už pagalbą vykdant Kuršių nerijos kopų kartografavimo darbus.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

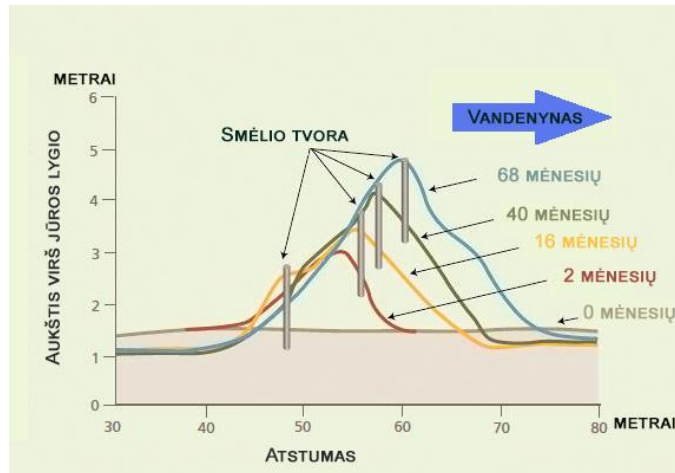
1.1 Užsienyje atliktų tyrimų istorinė analizė

Moksliniai tyrimai susiję su kopų kartografavimo ir stabilizavimo yra aktualūs daugelyje šalių kuriose susiduriama su šia problema. Tyrimai atliekami JAV, Australijoje, Izraelyje, Prancūzijoje, Anglijoje, Naujojoje Zelandijoje, Lenkijoje ir kitose šalyse.

Kopų judėjimą dažnai pristabdo augmenija ar kitos kliūtys. Pastebėta, kad 10 – 20 metrų aukščio kopos be augalinės dangos pajuda 1 –10 metrų/metus. Pietvakarių Prancūzijoje esanti 100 metrų aukščio Pilos kopa vidutiniškai pajuda 1 m/metus. Tyrimai Naujajame Pietų Velse, Australijoje parodė, kad 20 metrų aukščio kopos pajudėdavo iki 19 m/metus, o mažesnės kopos, net iki 50 m/metus. (Bird, 2008; Chapman ir kt., 1982)

JAV, Masačusetso valstijoje jau XVIII a. buvo pastebėta, kad išnaikinus žemės plotus su augaline danga, paspartėjo vėjo pustymas. Jau tada šiam procesui stabdyti pustomose teritorijose buvo pradėtos rengti pušų šakų apsauginės konstrukcijos ir sodinami specialūs augalai. (Knutson P.L. ir Finklerstein K., 2008)

Vienas įdomesnių tyrimų atliktas 1968 metais JAV, Šiaurės Karolinoje. Buvo vykdomi eksperimentiniai tyrimai siekiant sukurti ir kartu stabilizuoti kopą ties vandenyno krantu. Kelių kilometrų ilgio atkarpoje buvo analizuojami reljefo pokyčiai. Tyrimo rezultatai parodė, kad tvorelės ir augalai sustabdo pustomą smėlį ir sukuria barjerinę kopą. Sparčiai augantys paplūdimio augalai pustomą smėlį sustabdo iki 27 metrų pločio juostoje. Apsauginės tvorelės yra pranašesnės todėl, kad jos gali būti panaudojamos tokiose vietose kur augalijai augti yra nepalankios sąlygos, arba ji yra nepageidaujama. Įrengus smėlio tvoreles, jau po dviejų mėnesių pastebėta, kad barjerinės kopos susiformavo iki 2 metrų aukščio. Kai supustytos kopos aukštis susilygindavo, su įrengtos tvorelės aukščiu, ji būdavo pakeliama ant naujai suformuoto paviršiaus. Tokie tvoros „pakėlimai“ buvo atlikti tris kartus. Tokiu būdu, praėjus 68 mėnesiams nuo pirmosios tvorelės pastatymo, naujai suformuotos kopos aukštis pakilo 4 metrus. Mokslininkai panaudojo reljefo profilio atvaizdavimo metodą, pateikti reljefo dinaminiais pokyčiams (Savage R.P. ir Woodhouse, 1968)



1 pav. 1968 metais atlikto eksperimento rezultatai (Savage R.P. ir Woodhouse, 1968)

JAV, Masačusetse esančiame Duksburio paplūdimyje dėl nesukontroliuojamų procesų, bei smarkių audrų kai kuriose vietose kopos visiškai išnyko, tad mokslininkai ėmėsi įvairių priemonių jas atstatyti. Visų pirma teritorijoje esančius smėlio atsargos buvo papildomos dirbtinai jo atvežus. (O'Connell, 2008)



2 pav. Kopų stabilizavimo darbai įrengiant apsauginę tvorelę ir ją apsodinant augalais Duksburio paplūdimyje. (O'Connell, 2008)

Taip pat buvo įrengtos apsauginės tvorelės sustabdančios smėlio pustomą, taip sudarant sąlygas smėliui akumuliuotis aplink tvorelę. Siekiant geriau stabilizuoti naujai supustytą kopą, aplink tvorelę dar buvo sodinami specialiai kopose augantys augalai. Eksperimentinio tyrimo rezultatai parodė, kad tokios priemonės sudaro palankias sąlygas susiformuoti naujoms kopoms. (O'Connell, 2008)

Atliekant įvairius tyrimus susijusius su pakrantės apsauga Ispanijoje, tyrėjai pabrėžė, kad GIS technologijos yra naudingas įrankis kuriant skirtingų mastelių žemėlapius reikalingus atvaizduoti tiriamiems objektams. Be to, GIS palengvina duomenų analizę. Perdengiant kelis skirtingus sluoksnius, atsiranda galimybė nustatyti erdvinius ryšius, kuriuos kitomis priemonėmis nustatyti būtų

sudėtinga. Šiuo būdu galima sudaryti modelius skirtus analizuoti geomorfologinę raidą ir numatyti būsimus pakitimus pakrantės zonoje. Vertinant kopas GIS suteikiamos galimybės tyrime yra itin svarbios, nes jos suteikia galimybę: 1) integruoti, organizuoti ir struktūrizuoti geoduomenis; 2) Sudaryti skaitmeninį aukščio modelį (angl. *digital elevation model*) kuris yra būtinas norint paskaičiuoti kopų tūrį ir nustatyti trendus; 3) vertinti smėlio kopų judėjimą; 4) nustatyti kopų morfologiją; 5) kopų šlaitų ir orientacijos nustatymas; 6) sukurti galimus kopų kaitos scenarijus kurie galėtų susidaryti dėl jūros bangų, vėjo greičio ir jūros lygio pakilimo. Mokslininkai siekiant atvaizduoti pakrantėje vykstančius procesus panaudojus GIS atvaizdavo kranto linijos raidą ir pakrantės smėlio kopų vystymąsi. (Rodriguez ir kiti, 2008)

JAV mokslininkai iš Rytų Karolinos universiteto tyrinėjo pakrantės kopų modeliavimo galimybes taikant GIS. Mokslininkai pabrėžė, kad atvaizduoti kopas yra sudėtinga, dėl sparčiai vykstančių dinaminių pokyčių. Kopų forma gali smarkiai pasikeisti dėl dažnai audrų sukeliamų vėjų ir bangų poveikio. O vyraujantys vėjai gali pernešti reikšmingus kiekius smėlio visoje kopų sistemoje. Mokslininkai tyrinėjo 6000 m² ploto stačiakampio formos teritoriją Outer Banks saloje, Šiaurės Karolinoje. Tyrimas truko vienerius metus, kas mėnesį atliekant kartografinius tyrimus. Pabrėžiama, kad atlikus kartografinius matavimus surinktų duomenų rinkiniai turi būti modifikuoti, taip kad išmatuotų taškų ribos būtų vienodos. Todėl yra būtina nustatyti kiekvieno matavimo pastovias ribas. Tyrimo metu susidurta, su interpoliacijos metodo parinkimo problema. Tyrėjai pabrėžė, kad topografijoje naudojami IDW, Natūralių kaimynų, Spline ir Kriging interpoliacijos metodai. Šiame tyrime, kaip tinkamiausias metodas buvo pasirinktas, Kriging metodas, nes pagal vizualinę analizę ji labiausiai atitiko tikrovę. Aukščio pasikeitimai buvo atvaizduoti pagal sudarytą rastrinį duomenų atvaizdavimo modelį, pagal kurį buvo galima spręsti, kad reljefo aukštis per metus pasikeitė iki 2 metrų. Tyrimo rezultatai parodė, kad tūriniai reljefo pasikeitimai per vienerius metus susidarė dažniausiai dėl erozijos poveikio. Juos dalinai kompensavo eolinio transporto supustytos akumuliacinės teritorijos. (Andrews B., Gares P.A. ir Colby J.D., 2002)

Australijos ir Izraelio mokslininkai kartu tyrinėjo Moretono saloje vykstančius kopų ir prieškopio geodinaminius procesus. Moretono saloje esančių kopų aukštis siekia, net iki 280 metrų, tai yra septintos pagal aukštį kopos pasaulyje. Dinaminiam pokyčiams vertinti mokslininkai naudojo istorines aeronuotraukas, palydovinius vaizdus ir LIDAR duomenis, tam kad kiekybiškai įvertintų pustomo smėlio plotus, kopų judėjimo greičius, prieškopio formavimąsi, ir pakrantės ribos pasikeitimus per 1944 – 2015 metų laikotarpį. Taip pat mokslininkai naudojo meteorologinius duomenis siekiant kiekybiškai įvertinti vėjo dreifo potencialui ir vėjo krypčiai. Lygindami skirtingo laikotarpio kartografinę medžiagą mokslininkai pastebėjo, kad kopos stabilizavosi XX a. 7 dešimtmečio pradžioje. Prieškopis pradėjo formuotis XX a. 7–8 dešimtmetyje, nes tuo laikotarpiu

vyraujančios meteorologinės sąlygos pasižymėjo nepastoviu vėjo kryptingumu. Tyrimą atlikę mokslininkai teigia, kad kopų aktyvumas turėtų būti tiriamas, bent keletą dešimtmečių, tam kad būtų galima kiekybiškai įvertinti tendencijas ir suprasti pagrindines priežastis kurios sukelia šiuos procesus. Suvokiant esminius pagrindus lemiančius kopodarą galima spręsti įvairius kopų stabilizavimo klausimus Moretono saloje. (Levin N ir kiti, 2017)

Vienas žymiausių mokslininkų tyrinėjusių vėjo transportą ir eroziją, taip prisidedamas ir prie kopų tyrinėjimų yra R. A. Bagnold (*Ralph A. Bagnold*). Atliekant įvairius su smėlio judėjimu susijusius eksperimentus jis atrado ko ne pagrindinius smėlio erozijos ir transporto veikimo principus. (Marsh, 1987)

1.1 Lietuvoje atliktų tyrimų apžvalga

Su kopomis susijusių gamtos problemų istorinė apžvalga

Kopų judėjimas akivaizdžiai pastebimas beveik visada, ypač vėjuotomis dienomis. Dažnai ten kur vakar buvo lygi vietovė, išauga naujas smėlio kalnas arba nušluojama visa kopos ketera. Vyraujant tokioms dinamiškoms sąlygoms neretai susidarydavo ir įvairios ekologinės problemos padarančios žalą gamtai ir žmonėms. (Kristapavičius, 1964)

Istoriniai įrašai parodo, kad kopų judėjimą lemiantys procesai vietiniams Kuršių nerijos gyventojams ne kartą sukėlė įvairių problemų. Yra žinoma daugybė atveju, kai šalia kopų esančios gyvenvietės buvo užpustytos. Pavyzdžiui, Lentavaldės kaimo sodybas 1762 metais užpylė smėlis. Dabar ši yra palaidota po 42 metrų aukščio smėlio kalnu. Panaši tragedija ištiko ir kitą kaimą – Kuncus. Žinoma, kad Kuncų kaimo kapines buvo išpustytos vėjo. Dar 1769 m. šiame bažnytkaimyje gyveno 26 žvejų šeimos, tačiau jau 1852 metais, joms teko persikelti, kai šį kaimą galutinai užpustė smėlis. 1865 m. slenkančiųjų smėlio kalvų paviršiuje vėl pasirodė Kuncų kaimo bažnyčios bokštai, o vėliau kopoms nuslinkus tolyn iškilo į paviršių ir to kaimo liekanos. Panašaus likimo sulaukė ir Nida, kurios gyventojai buvo priversti du kartus keisti gyvenamąją vietą, kol galų galiausiai apsistojo dabartinėje vietoje. Taip pat teko persikelti ir Predinės, Senujų Pilkapių, Naujųjų Pilkapių, Karvaičių ir kitų kaimų gyventojams. (Kristapavičius, 1964; Pronckus J, 1923; Čepulytė, 1957)

Nors kopų pustymas ir sukeldavo žmonėms nepatogumų verčiant juos vis pakeisti gyvenamąją vietą, tačiau vargu ar pareikaludavo žmonių gyvybių. Deja, įvykus kopų nuošliaužoms kurios gali susidaryti dėl erozijos sukkelto padidėjusio šlaito statumo, vibracijos arba kritulių pagausėjimo sukkelto uolienų patvarumo sumažėjimo. Yra užfiksuotas ne vienas atvejis, kai įvykus kopos nuošliaužai nukentėjo ir žmonės. Naujuosiuose Nagliuose įvyko katastrofa, kai juos užpylė staiga griuvusi kopa. Viena iš naujausių griūčių įvyko 1922 metais, kai Negyvųjų kopų grandinėje (5

km nuo Juodkrantės), 50 metrų aukščio kopa nuvirto į marias. Akimirkai iš kranto išniro sausas marių dugnas, o didžiulės bangos vos nenuskandino žvejų. Sukeltas garsas tarsi griaustinis buvo girdimas, net Nidoje. (Kristapavičius, 1964; Pronckus J, 1923)

Remiantis istoriniais šaltiniais buvo pastebėta, kad stichinės nelaimės Lietuvos pajūrii ištiko ne kartą. Nuo XV a. siaučiant stiprioms audroms, jūra su mariomis buvo susijungusi, net 8 kartus įvairiose vietose. Per pastarąjį šimtmetį stiprios vėtros ir galingi štormai 8 – 9 kartus buvo nusiaubę Lietuvos pajūrio zoną. (Gudelis, 1998)

Kuršių Nerija yra labai jautri kraštovaizdžio dalis. Yra žinomas ne vienas atvejis, kai susidarius nepalankioms meteorologinėms sąlygoms gamtai buvo padaryta didžiulė žala. 1983 m. sausio – vasario mėn. siautus galingoms audroms, Dėl vėjo ir bangų sudarytos patvankos jūros vanduo pradėjo lieti į Kuršių marias, dėl to smarkiai, kai kur net iki 2 metrų pakilo vandens lygis. Bangos ritosi per visą paplūdimį, ardė kopas ir kranto skardžius. Maksimalus vėjo greitis siekė iki 40 m/s. Audra jūroje truko iki 10 dienų. Lietuvos pajūriui buvo padaryta didžiulė materialinė žala. Daugelyje kranto ruožų buvo nuskalauti paplūdimiai ir apsauginis kopagūbris. Per šį štormą, Kuršių nerijos dalyje labiausiai nukentėjo Smiltynės – Alksnynės ir Nidos ruožai, kur apsauginis paplūdimio kopagūbris buvo nuardytas iki 15 m pločio. Uraganinio štormo metu, į šiaurę nuo Kranto gyvenvietės bangos pralaužė neaukštą kranto kopagūbrį, susidarius keliasdešimties metrų pločio vagai, vanduo per neriją ėmė plūsti į marias. Tai truko keletą dienų, Kuršių neriją pavertus sala. Vėjai gerokai pakeitė ir aukštąsias Kuršių nerijos kopas. Pasikeitė reljefas, atsirado ne viena nauja dauba, ar raguva. Kopų nuobirinis šlaitas daug kur pasistūmėjo keliolika metrų į priekį, taip užpildamas pamario palvę, arba transportuodamas smėlį į marias. Pagal Lietuvos MA geografo skaičiavimus, vien tik Lietuvos pajūrio teritorijoje krantai neteko 1,5 milijono tonų smėlio. Iš kopų ir jūros paplūdimio nupustytą smėlį jūros bangos nuneša gilyn į jūrą, arba perneša išilgai krantu tolyn. Nurimus bangavimui, tik nedidelė jo dalis (apie 15 – 20 %) grįžta į tą patį kranto ruožą. Situacija šiek tiek kitokia vadinamose kranto dinaminėse pusiausvyros atkarpose, tokiose kaip Nida, kur net po smarkiausių štormų jūros paplūdimiai gana greitai atsikuria. Tačiau kopagūbriui atsigauti prireikia daugiau laiko. (Gudelis, 1998)

Pasak V. Gudelio, „klaidinga manyti, kad Lietuvos jūros krantuose smėlio yra pakankamai. Yra pagrindo teigti, kad smėlio išteklių jūros priekrantėje kai kur yra gerokai sumažėję, o dėl to kaskart vis daugiau nuskalaujami paplūdimys ir kopos.“ (Gudelis, 1998) Tad būtina imtis priemonių siekiant sumažinti kopų defliacijos sukeltus padarinius.

Lietuvoje vykdytų kopų stabilizavimo darbų istorinė analizė

Nors veiksnių išsaugoti kopoms imtasi jau nuo XVI a., tačiau detalių tyrimų vertinant kopų išsaugojimo priemonių nebūtą. Įvairūs literatūros šaltiniai pateikia informaciją kokios priemonės buvo vykdytos iki šiol.

Pagal Hennerbergerio 1576 m. žemėlapi, sprendžiama, kad Kuršių marios buvo apaugusios spygliuotu mišku. 1665 m. rašytiniuose šaltiniuose buvo rašoma, kad Neringoje buvo virta daug smalos. Po smėlio sluoksniu yra išlikusių medžio kelmų, kurie savo didumu parodo, jog Neringoje ankščiau gyvavo miškas, kuris stabilizavo kopas ir neleido vykti smėlio pustymo procesams. (Pronckus J, 1923)

Smilčių apsodinimas Kuršių Nerijoje buvo pradėjęs vykdyti XV – XVI amžiuje. Sodinimo tikslai buvo: sulaikyti vietoje išplautą smiltį. (Pronckus J, 1923)

Nuo 1830 m. pradėta pradėta apsodinti teritoriją, ties Rasyte, Nida ir Juodkrante, sėjant tyrų avižas (lot. *Elymus arenarius*) ir žoles (lot. *Arundo arenaria*). Priešakinėms kopoms sukurti buvo tveriami tvora, kurią vėjas greitai apnešė smilčių volu ligi 10 metrų aukštumo, kuris vis buvo apsėjamas žolėmis, kol pagaliau smilčių pakilimas nuo jūrų visai tapo sulaikytas. Kalvos buvo apsodintos pušaitėmis (lot. *pinus Montana sinops*).

XVIII amžiaus karai daugelyje Kuršių nerijos vietų išnaikino miškus. Miško skynimuose prasidėjo smėlio pustymas. Vėjo pustomi smėliai pradėjo slinkti. Atsirado reiškinys vadinamas „keliaujančiomis kopomis“. (Čepulytė, 1957)

Kalbėdamas apie pustomas didžiąsias nerijos kopas, profesorius Vytautas Gudelis teigė, kad jas reikia palikti neapželdintas, natūralias. Tačiau būtinai reikia sugriežtinti žmonių lankymąsi jose ir paruošti specialias prieigas prie jų, kad žmogus mažiau jas tryptų. (Gudelis, 1998)

Lietuvoje vykdytų tyrimų istorinė analizė

Kuršių Nerijos tyrinėjimu pradžia siekia XIX a. vidurį. J. Šumanas ir G. Berendtas apibūdino Nerijos paviršiaus formas, aprašė geologinę praeitį. N. Sokolovas savo darbuose tyrinėjo smėlio judėjimo dėsnius, kopų formavimosi procesus, smėlio paviršiaus sąveiką su vėju. (Bandžiulienė, 1983)

Eolodinamės pakraipos tyrimus Kuršių nerijoje atliko vokiečių mokslininkai Gerhardas, Eksneris ir Paulas. Savo tyrimuose jie nagrinėjo kopų geomorfologiją, smėlio litologinę sudėtį, pernešamų dalelių vertikalų pasiskirstymą. Daug dėmesio skyrė, kopų stabilizacijos klausimams. (Jarmalavičius. D., Minkevičius. V., Žilinskas. G. 2001)

Geografijos ir geologijos institutui pradėjus organizuoti pajūrio zonos kompleksinio dinamikos ir morfologijos tyrimus nuo 1954 m. prasidėjo naujas Kuršių nerijos tyrimų etapas. Pradėti

Kuršių nerijos kopų eolodinaminiai, geomorfologiniai ir geologiniai-litologiniai tyrimai. Pradėta tirti kopų struktūra, vėjo smėlio srauto struktūrą nagrinėti kopų morfogenezės ir kiti klausimai. (Morkūnaitė. R., 2011)

Daug eolodinaminių ir geomorfologinių tyrimų Kuršių nerijoje atliko eolodinamikos pradininkas Lietuvoje – Vytautas Gudelis. Jis aprašė Neriją, pateikė siūlymų kaip ją prižiūrėti ir tvarkyti, sukūrė nemažai kopų tyrinėjimo metodų. (Akademikas Vytautas Gudelis, 2011; Bandžiūlienė, 1983)

Septintajame dešimtmetyje eolodinaminius tyrimus vykdė V Minkevičius. Pažeminis vėjo smėlio srautas buvo tiriamas pustomose Kuršių nerijos kopose, netoli Nidos. (Morkūnaitė, 2011)

E. Michaliukaitė kartografiniais ir instrumentiniais metodais tyrinėjo kopų grandinės dinamiką. Ji atliko kartometrinę 1910 – 1955 m. kopų ruožo slinkimo analizę. Buvo nustatyta, kad, atkarpoje tarp Nidos ir Pilkopės kopos judėjo intensyviausiai – 5 m per metus. O tarp Pervalkos ir Juodkrantės nuo 0,5 iki 2,8 m per metus. Taip pat tyrinėtas ir vėjo poveikis kopoms. Nustatyta, kad metinis pernešamo smėlio kiekis siekia 23400 m³ (Michaliukaitė, 1967).

Vykdamas defliacijos proceso tyrimus aerovamzdyje, buvo nustatytas velėninių jaurinių smėlio dirvožemių ir skirtingos granulimetrinės sudėties (smėlio, priemolio, priemolio) dirvų kritinis vėjo greitis lemiantis defliacijos pradžią. Pradinis, išpustymą sukeliantis, vėjo greitis buvo matuojamas ir natūraliomis sąlygose. Sudarant potencialios defliacijos paplitimo ar intensyvumo kartoschemas neretai tenka remtis generalizuotais, apibendrinančiais, bendrusius proceso dėsningumus atspindinčiais duomenimis (Paškauskas ir kt. 2009)

Pajūrio mikroklimato tyrimus atliko A. Gričiūtė, B. Kavaliauskas ir B. Tomkus. Deja šiame darbe, vėjo greičio profiliai iš viso neanalizuoti. Šią spragą užpildė G. Žilinskas savo tyrimuose. Taip pat G. Žilinskas tyrinėjo smėlio diferenciaciją ir defliacines formas. (Jarmalavičius. D., Minkevičius. V., Žilinskas. G., 2001)

Defliacinių-akumuliacinių procesų kaitos, bei kiekybinio eolodinamikos masto vertinimo tyrimai Didžiajame kopagūbryje pradėti jau 2005 metais. Česnulevičius, Morkūnaitė ir Izmailow atlikto tyrimą panaudojant elektroninį tacheometrą – ELTA 500. Buvo atlikti reljefo kaitos vertinimai penkiuose tikslios niveliacijos profiliuose: Parnidžio kopos, Naujųjų Naglių, Naglių rago, Vingiakopės ir Avių rago. Taip pat buvo atlikta defliacinių daubų Didžiajame kopagūbryje analizė, paremta vėjo greičio, drėgmės ir kritulių sugretinimu su defliacinių daubų morfometriniiais rodikliais pokyčiais. Nustatyti pokyčiai palyginti su Lenkijoje esančiais Baltijos jūros pakrantės pokyčiais. Atlikto tyrimo metu nustatyti, trys per 150 metų buvę dinaminiai etapai Didžiajame Kuršių Nerijos Kopagūbryje: Pirmojo dinaminio etapo metu (XIX a. I pusė) kopos slinko vidutiniškai – 8,5 m/metus, antrojo (XX a. pirmasis–šeštasis dešimtmečiai) –2,3 m/metus, trečiojo (XX a. 7 dešimtmetis – XXI

a. pradžia) – 0,9 m/metus. Toks greičio mažėjimas, pasak mokslininkų įvyko, dėl vykdomų apželdinimų. Panaudojus Klaipėdos ir Nidos meteorologinių stočių duomenis nustatyta, kad didžiausią poveikį defliacijos procesams lemia stiprūs ir pasikartojantys vienos krypties vėjai. Didžiausi vėjo greičiai nustatyti birželio, rugpjūčio ir spalio mėnesiais, kai vėjo greitis siekė, net iki 25 m/s. Taip pat nustatyta, kad paviršiaus kaitą skirtingose Didžiojo kopagūbrio dalyse lemia vyraujanti vėjo kryptis, šlaitų ekspozicija ir reljefo aukštis. Per 2003 – 2004 m. laikotarpį Didžiojo kopagūbrio keterose vyravo defliacijos procesai, dėl kurių reljefo aukštis sumažėjo iki 1 m. Ties rytiniu šlaitu vyrauja akumuliacijos procesai, susikaupus kritinei smėlio masei ties briauna formuojasi nuoslinkis. Taip pat tiriamuose objektuose buvo išskirti akumuliaciniai–defliaciniai arealai. (Česnulevičius ir kiti, 2006)

Nuo 2013 m. Vilniaus universiteto Kartografijos ir geoinformatikos specialistai atlieka periodinę Kuršių nerijos judančių kopų, Lietuvos Respublikos teritorijoje, stebėseną bei kartografavimą.

1.2 Smėlio transportacija

Kopos – akumuliacinės eolinės reljefo formos. Pajūrio kopos dažniausiai formuojasi tose vietose kur smėlis ties krantu išsausėja ir yra nupučiamas toliau nuo paplūdimio. Augalinės dangos nebūvimas, stiprių ir pastovių vėjų vyravimas, bei jų atnešamos gausios, nuolat papildomos smėlio atsargos sudaro palankias sąlygas formuoti pakrančių kopoms. (Bird, 2008; Česnulevičius, 2010; Hugget 2007)

Dėl smėlio pustymo iškyla problemos, tokios kaip krantų irimas, uostų užpustymas smėliu, kopų slinkimas, kurios gali sukelti materialinę žalą žmonėms.

Visų pirma, dėl vėjo poveikio daugiausia smėlio transportuojama dalelėms šokinėjant per paviršių (angl. *saltation*) ir šliaužiant, riedant (angl. *creep*). Taip pat yra išskiriamas procesas suspensijos (skridimo) procesas, kai dalelės yra pekkeliamos į orą. Smėlio judėjimas priklauso nuo dalelių dydžio, vėjo stiprumo, bei kitų faktorių (gravitacija, drėgnumas). (Anderson, 1988; Holden, 2012)

Anglų mokslininkas A.R. Bagnold'as nustatė ryšį tarp vėjo greičio ir pernešamo smėlio kiekio. Pasak Bagnoldo pirmosios smėlio dalelės pradeda judėti vėjo greičiau pakilus iki 4,5 m/s. Pirminis smėlio judėjimas vyksta smėlio grūdeliams šliaužiant, riedant, tokiu būdu pernešama apie 20 – 25 % smėlio. Esant silpnam vėjui, tik nedidelės smėlio dalelės pradeda judėti, kuo didesnis vėjo greitis tuo didesnės dalelės yra pernešamos. Didžioji dalis smėlio kopose pernešama, dėl vėjo jėgos pakėlus smėlio daleles į orą, taip joms šokinėjant žemės paviršiumi (75 – 80 %). Dauguma smėlio

grūdų yra pernešami vos kelis centimetrus, esant didesniai vėjui iki 2 metrų. Tačiau pavėjui, judant nuokalne oro srautai gali pernešti smėlio grūdėlius apytikriai iki 10 metrų ar daugiau.

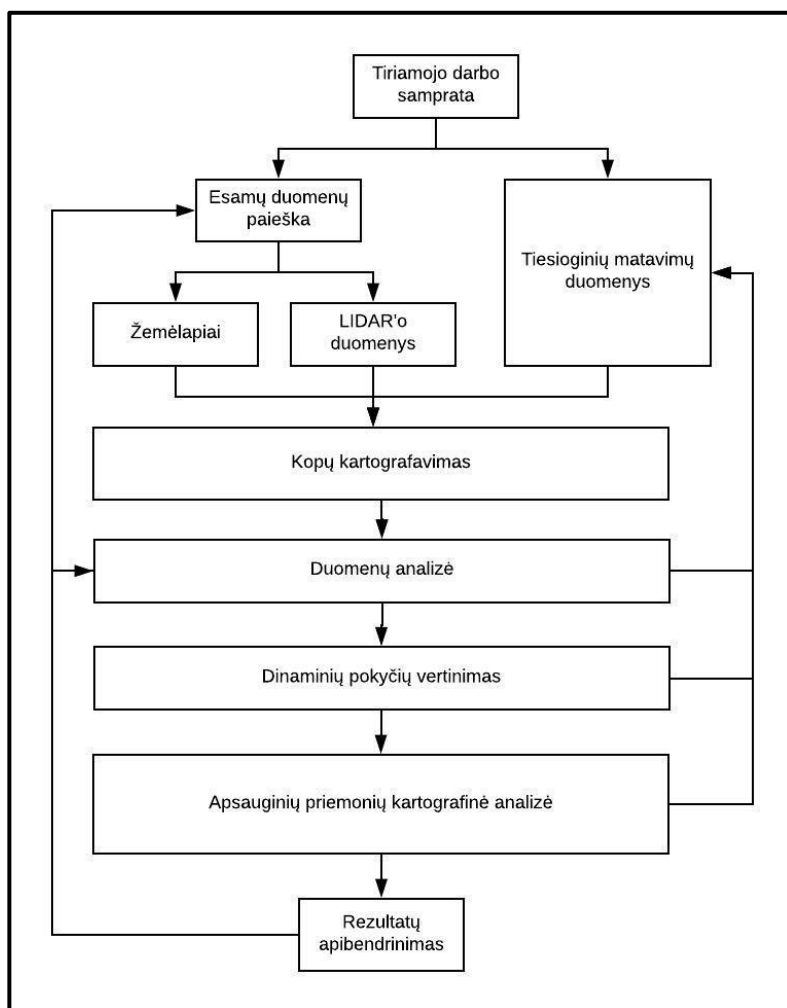
Minimalus vėjo greitis, sukeliantis dalelių judėjimą ir lemiantis defliacijos pradžią, vadinamas kritiniu vėjo greičiu (V_k). Tai viena svarbiausių eolinio proceso struktūrinių ir dinaminių charakteristikų, atspindinčių grunto paviršiaus jautrumą vėjo poveikiui. Kritinis vėjo greitis yra bazinis parametras, figūruojantis eolinio proceso skaitmeniniuose modeliuose bei sudaromose įvairaus pobūdžio matematinėse priklausomybėse, aprašančiose defliaciją ir jos vyksmo sąlygas. Todėl, nagrinėjant eolinio proceso vyksmo ir teritorinės sklaidos dėsnumus bei su šio proceso valdymu susijusias problemas, reikalingi vyraujančių dirvožemių bei gruntų V_k duomenys. (Paškauskas, 2009)

Kai smėlio dalelė yra pakelta į orą, ji turi tendenciją leisti žemyn. Tačiau ji gali pradėti leisti tik tuomet, kai ji yra pakankamai sunki, įveikti į viršų ją keliančią vėjo jėgą. (Holden. J., 2012)

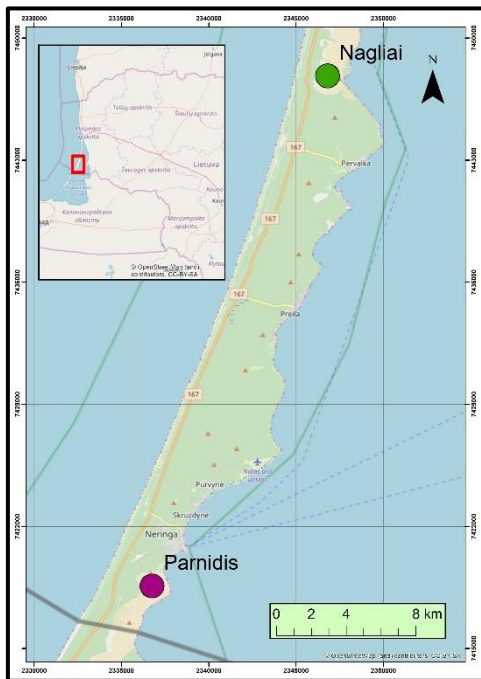
Vietovėse kur žiemos metu susidaro sniego danga, smėlio defliaciją kopose gali susidaryti dėl po pavasario polaidžio išdžiūvusio paviršiaus, dar nespėjus užaugti augalinei dangai, kuri stabilizuoja paviršių. (Walker, 1988)

2. DARBO METODOLOGIJA

Kartografuojant kopas reikia suprasti esminius jų susiformavimo principus. Kaip jau minėta, dėl sparčiai vykstančių dinaminių požymių kartografuoti kopas yra sudėtinga, todėl buvo atlikta esamų duomenų paieška, peržiūrėtos skirtingos duomenų bazės, įvairūs topografiniai žemėlapiai. Atlikti ekspediciniai matavimai, tiriamuose teritorijose. Sukaupus esamus ir ekspedicinius skirtingų laikotarpių duomenis, buvo atliekamas kopų kartografavimas – taikomos įvairios GIS galimybės siekiant kartografinėmis galimybėmis atvaizduoti kopų reljefą ir dinامينius pokyčius. Sukurta kopų kartografavimo metodiką pritaikyta vertinant ir paaiškinant lokalių formų formavimąsi, dėl įkurtų apsauginių priemonių. Kadangi kopų dinamiką lemia meteorologiniai faktoriai buvo panaudoti meteorologiniai duomenys vėjų rožėms sudaryti. Įvertintas sukurtos kartografavimo metodikos pritaikomumas. Darbas atliktas pagal (3 pav.) pateiktą schemą.



3 pav. Tyrimo metodikos schema



5 pav. tyrimo objektai

2.1 Teritorijos parinkimas ir matavimo prietaisai

Tyrimo objektais pasirinktos dvi Kuršių nerijos kopos: Naglių ir Parnidžio (5pav.)

Tokį pasirinkimą lėmė tai, kad Naglių ir Parnidžio kopos yra dažnai turistų lankomi objektai. Jose kopoms daro įtaką, tiek antropogeniniai, tiek meteorologiniai veiksniai. Todėl jose įrengtos, apsauginės priemonės, kurių kartografavimas leis įvertinti naujos metodikos privalumus ir trūkumus. Naglių ir Parnidžio kopos yra nutolusios maždaug 17 km atstumu.

Parnidžio kopose matavimai atliekami tacheometro ir topografinio GPS prietaisais. Bepiločio orlaivio panaudojimas

Parnidžio kopoje yra negalimas, nes taisyklės draudžia skraidinti bepilotį orlaivį 1 jūrmylės atstumu nuo Lietuvos – Rusijos valstybių sienos.

Naglių kopoje matavimai gali būti vykdomi tacheometru, topografiniu GPS ir netiesioginiais matavimais panaudojant bepilotį orlaivį.

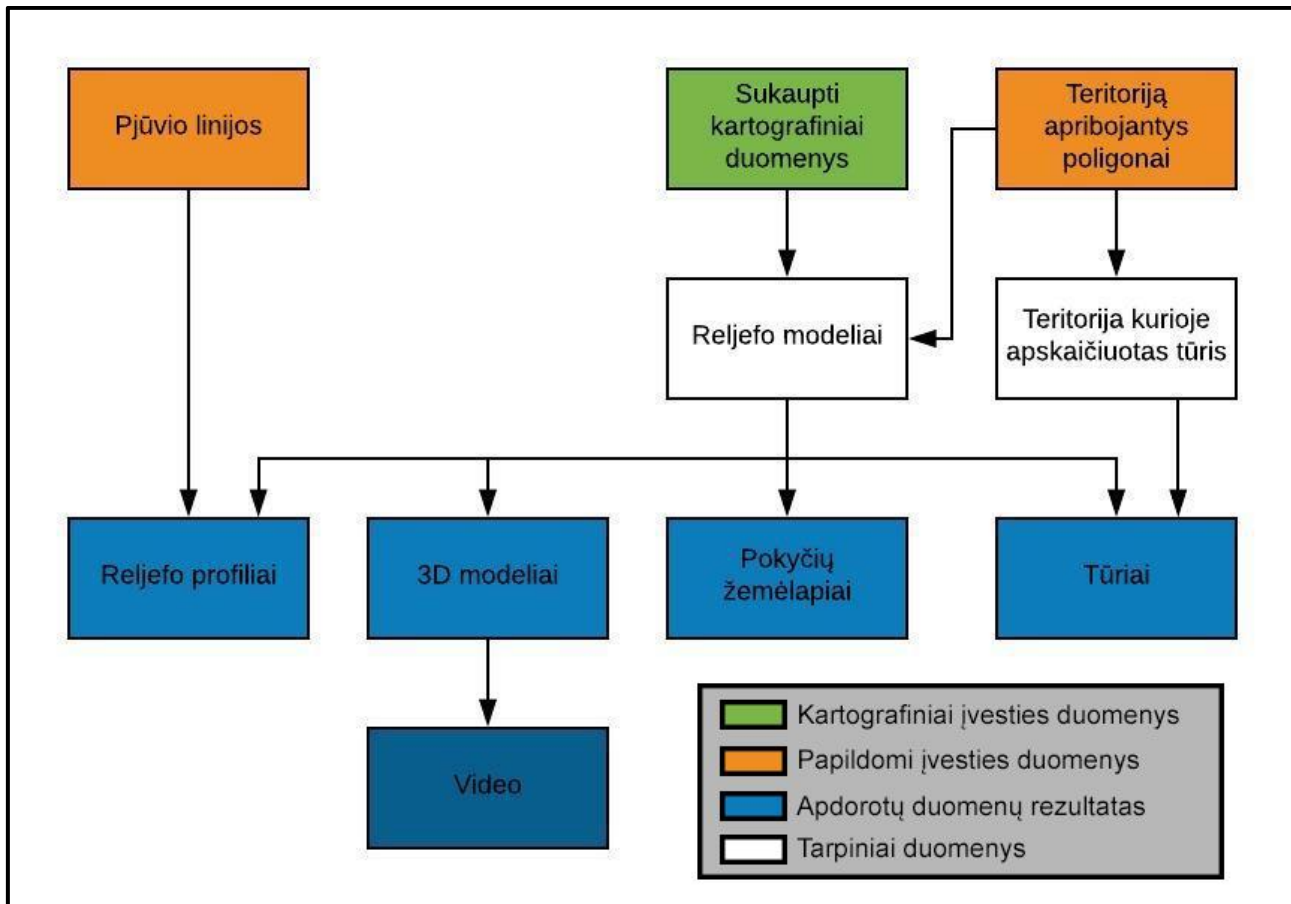
2.2 Kartografinių modeliavimo metodų atranka

Kopų kartografavimas yra pagrindinė šio magistrinio darbo dalis. Ja siekiama parodyti, kad pritaikytos kartografavimo technologijos yra aktualios sprendžiant įvairius kopų formavimosi, stabilizavimo, apsauginių priemonių vertinimo ir kitus klausimus.

Prieš pradėdant analizuoti duomenis svarbus žingsnis buvo atlikti esamų duomenų analizę. Siekiant palyginti ilgesnį laikotarpį buvo patikrinti įvairūs galimi duomenų šaltiniai (topografiniai žemėlapiai, duomenų bazės). Taip pat, parinkti GIS technologijų suteikiamas galimybes, kurias galima pritaikyti Kuršių nerijos kopų kartografavimui.

Schema parodanti magistriniame darbe panaudotas GIS galimybes atliekant kopų kartografavimą pateikta 6 pav. Pagrindiniai įvesties duomenys, tai ekspediciniu matavimo metu ir jau egzistuojantys kartografiniai duomenys. Kai kuriems norimiems sluoksniams sudaryti reikalingi papildomi duomenys, tad specialiai buvo sudaryti du papildomi sluoksniai, tai – pjūvio linijos ir teritoriją apribojantys poligonai. Tarpiniai duomenys – kopų reljefo modeliai, kurie buvo panaudoti sudarinėjant visus tolimesnius kartografinius produktus. Taip pat tūrio skaičiavimui buvo pagal

persidengiančius sluoksnius buvo sukurtas papildomas tarpinių duomenų sluoksnis su teritorijos plotu. Kopų kartografavimo dalies rezultatai yra pjūvio linijose sudaryti reljefo profiliai, 3D modeliai, tarp tam tikrų laikotarpių paskaičiuoti pokyčių žemėlapiai ir tūriai.



6 pav. Kopų kartografavimo schema.

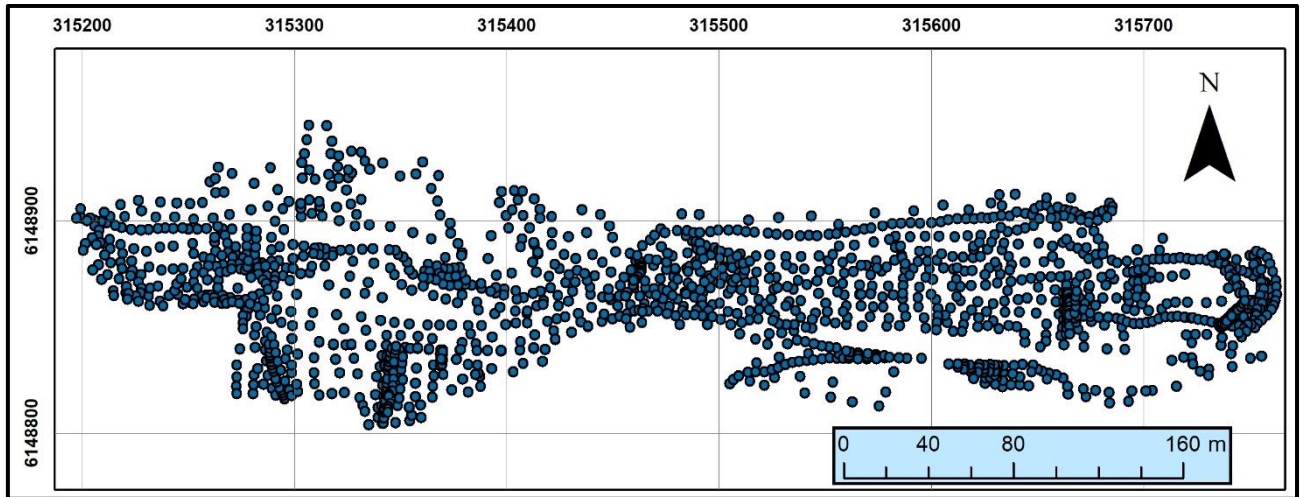
Sukaupti kartografiniai duomenys

Ekspedicijų metu Vilniaus universiteto mokslininkai atliko kartografinius matavimus. Naudojant tacheometrą ir palydovinį GPS buvo išmatuojami aukščio taškai, kuriuos vėliau panaudojant tolimesniame etape buvo sudaromi reljefo modeliai. Iš viso buvo surengtos 5 ekspedicijos kurių metu buvo matuojamos Naglių, Parnidžio arba Sklandytojų kopų reljefas. Informacija apie ekspedicijų metu išmatuotus objektus pateikta 1 lentelėje.

1 lentelė. Kartografiniai duomenys išmatuoti ekspedicijų metu („+“ – išmatuota, „-“ – nematuota)

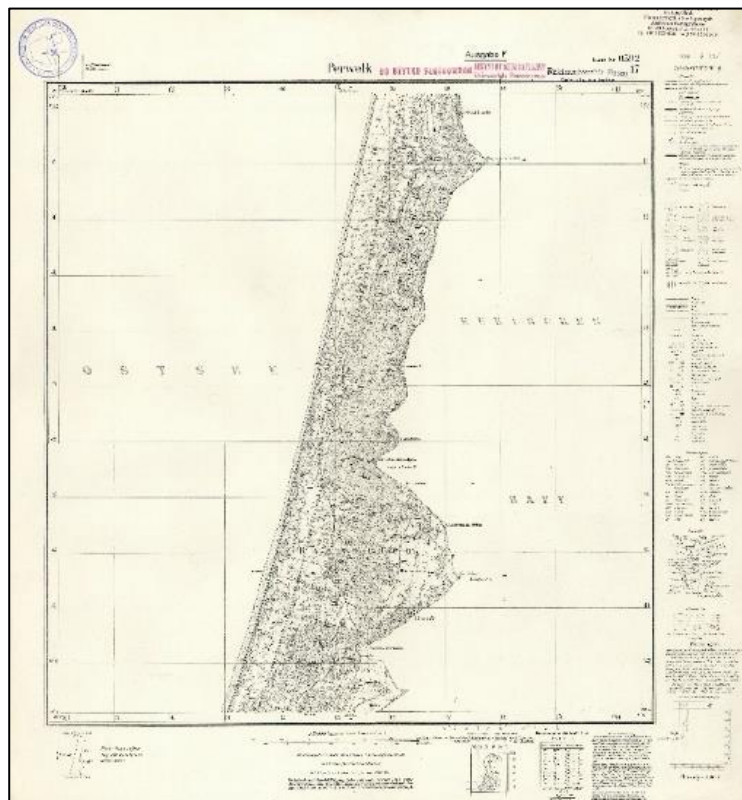
| | 2016/12 | 2017/03 | 2017/06 | 2017/09 | 2018/02 |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Nagliai | - | + | + | + | + |
| Parnidis | - | + | + | + | + |
| Sklandytojai | + | + | + | - | - |

Išmatuotų taškų masyvas (angl. *Point cloud*,) turi 3 parametrus – X, Y ir Z. Sukaupti duomenys apdorojami programiais duomenų apdorojimo ir braižymo programa ArcMAP sudarant tolimesnius modelius.



7 pav. Naglių kopoje 2017 m. rugsėjo mėn. išmatuoti aukščio taškai

Tam, kad kopų dinamiką būtų galima palyginti kuo ilgesniame laiko intervale tiriamajame darbe buvo panaudoti 1910 metų duomenimis sudaryti stambaus mastelio 1:25000 topografiniai žemėlapiai. Panaudoti šį žemėlapių susidaro galimybė palyginti kokia situacija vyravo Kuršių nerijoje daugiau nei prieš 100 metų, kitomis galimybėmis to patikrinti neįmanoma.



8 pav. Pagal 1910 metų duomenis sudarytas reljefo žemėlapis

Taip pat tiriamajame darbe panaudoti lazeriniu skaneriu (Lidar) išmatuoti aukščio taškai – 2013 metais.

Interpoliacijos metodų parinkimas

Atliekant topografinius tiesioginius matavimus neįmanoma užfiksuoti visų paviršiaus taškų erdvinės padėties, todėl praktiškai matuojamos tik charakteringi reljefo taškai, o bendras reljefo modelis sudaromas taikant interpoliacijos metodų galimybes. Interpoliacija pagal esamus išmatuotų reljefo aukščių taškus sudaro rastrinę sluoksnį prognozuojant nežinomų teritorijų reikšmes. Rastrinis duomenų atvaizdavimo modelis atvaizduoja realius objektus per ląstelių tinklą (angl. *grid of cells*). Tačiau kiekvienas interpoliacijos metodas pasižymi savitomis pritaikomumo savybėmis, tad būtina atlikti bandomuosius modeliavimo darbus pagal skirtingus metodus.

Pagrindiniai interpoliacijos metodai:

IDW – Atvirkščiai proporcingo atstumo (angl. *Inverse distance weighting*) metodas. Šis metodas apskaičiuoja gardelių reikšmes, pagal tiesinę taškų svorių kombinaciją. Ši technika įvertina Z reikšmę nežinomame taške, artimiesiems taškams priskiriama didesni svorį. Šis metodas gali suteikti gerą preliminarų interpoliuojamo paviršiaus vaizdą. IDW geriausiai veikia, kai atrankos taškai yra tankiai ir tolygiai išdėstyti. IDW negali apskaičiuoti didesnių ir mažesnių reikšmių, nei atrankos taškų reikšmės.

Krigingas – Pagal šį metodą vietose kur aukščiai yra neišmatuoti, jų reikšmės yra priskiriamos aplinkinėms išmatuotoms reikšmėms. Krigingo metodu aukščio reikšmės gaunamos atsižvelgiant į erdvinį duomenų pobūdį. Interpoliuotų taškų reikmės, priklauso ne tik nuo atstumo tarp matuojamųjų taškų, bet ir nuo visų matuojamųjų taškų išsidėstymo erdvėje.

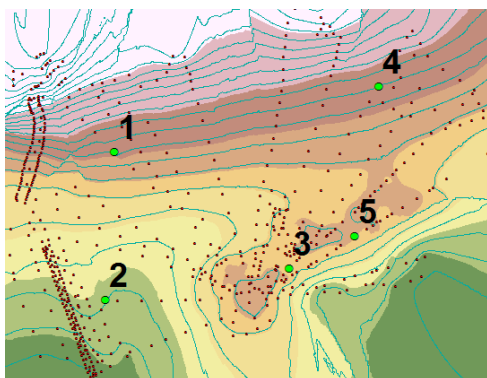
Natūralūs kaimynai – Šiame metode naudojama „Delaune“ trianguliaciją ir „Voronoi“ diagramos. Panaudojant Delaunė trianguliaciją pagal pradinius duomenis sudaromas trikampių tinklas. Iš trikampių struktūros sudaroma Voronoi diagrama, kai kiekvienam apskaičiuotam taškui yra priskiriamas iškilusias daugiakampis, taip kad atstumai tarp to taško ir daugiakampių viršūnių būtų mažiausi. Interpoliuojamam taškui sudaroma nauja ląstelė, kuri kertasi su kaimyninėmis ląstelėmis. Šis metodas nenumatys trendų (angl. *trend* – ilgai trunkančių reiškinijų plėtros tendencija), tad jei tarp interpoliuojamųjų (atrinktų) taškų nebus išmatuotos viršūnės ir duobės, jos nebus atvaizduotos. Natūralių kaimynų metodu interpoliuotas paviršius yra glotnus, išskyrus pradinius taškus

Splainas – Metodas pasižymintis tikslia interpoliacijos technika, pritaikanti paviršiui visas išmatuotas atrankos taško reikšmes. Splainai naudojami glodiems paviršiams su daug pradinių taškų.

Dažnai naudojamas atvaizduoti meteorologiniams reiškiniams (oro temperatūrai, drėgnumui) Šis metodas nėra tinkamas, kai modeliuojamas paviršius pasižymi staigiais altitudžių pokyčiais.

Topo to raster – Įrankis naudojamas sukurti hidrologiškai teisingiems skaitmeniniams aukščio modeliam (angl. *Digital Elevation model*). Didžiausias šio metodo privalumas, tai kad jis sukurtas, taip, kad galėtų panaudoti visas įvesties duomenų tipo savybes. Tai reiškia, kad interpoliuojant paviršiaus modelį, skirtingi įvesties duomenys, tokie kaip aukščio taškai, kontūrinės linijos ir kiti gali būti panaudoti vienu metu.

Interpoliacijos metodams patikrinti iš bendro išmatuotų taškų duomenų kiekio buvo pasirinkti penki atsitiktiniai taškai taip, kad kiekvienas būtų skirtingose interpoliuojamo poligono dalyse. Kiekvienas pasirinktas taškas buvo eliminuotas ir interpoliacija buvo sudaryta be jo. Naujai sukurto modelio reikšmė jo vietoje palyginta su faktine.



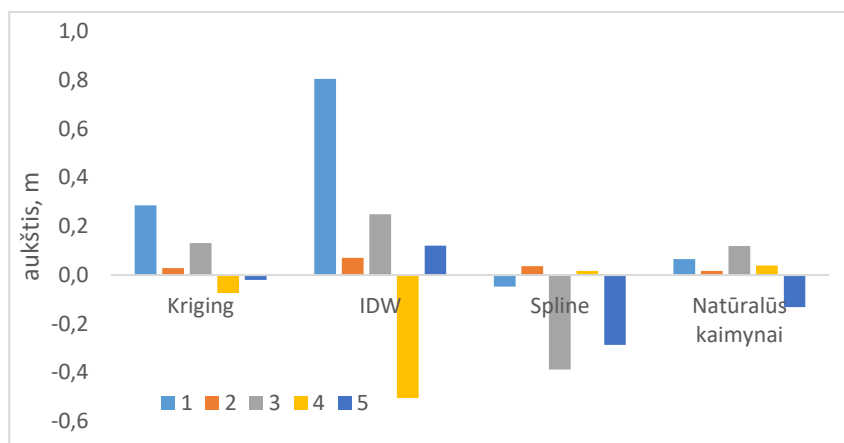
9 pav. Modelio fragmento pavyzdys su patikrinimui parinktais taškais (Kaminskas, 2018)

„Krigingo“ metodas dideliu tikslumu nepasižymėjo, nes tiksliausiai apskaičiuota reikšmė buvo, tik 5 taške (10 pav.)

IDW interpoliacijos modelis taip pat atvaizdavo aukščius gan netiksliai. Didžiausia paklaidą tarp visų analizuojamų taškų padarė IDW modelis, pirmame taške reljefo aukštį suprognozavęs 0,8 m aukščiau, nei yra iš tikrųjų (10 pav.). Iš visų modelių antrame ir ketvirtame taškuose IDW modelis reljefo aukštį taip pat atvaizdavo aukštį itin netiksliai.

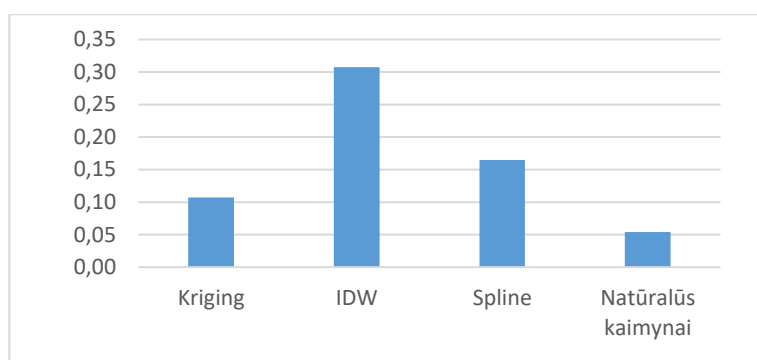
Splaino modelis pasižymėjo dideliu kontrastingumu (10 pav.). Splainas pirmame ir ketvirtame taške reljefą atvaizdavo tiksliausiai, trečiame ir penktame blogiausiai.

Natūralių kaimynų metodas pasižymėjo mažomis paklaidomis. Antrame ir trečiame taškuose iš visų modelių atliko pačią mažiausią paklaidą (10 pav.).



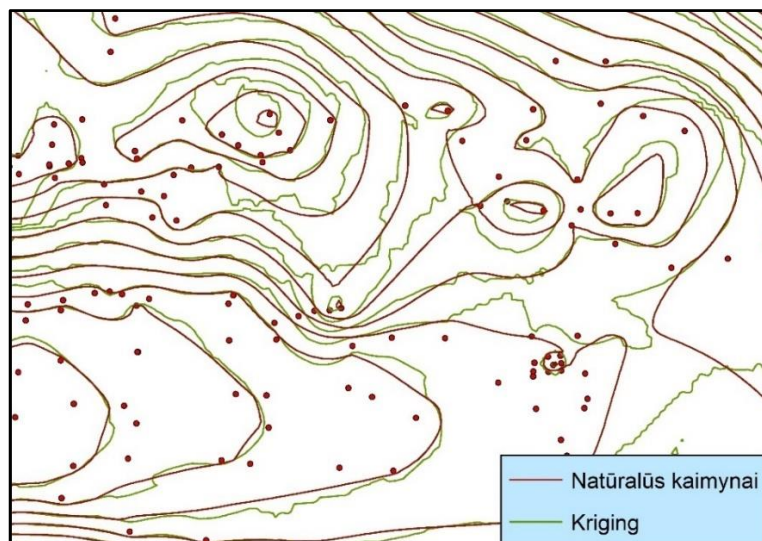
10 pav. Skirtumai tarp interpoliacijos modelio apskaičiuotų ir realių reikšmių (Kaminskas, 2018)

Apibendrinus rezultatus, paskaičiavus standartinį nuokrypį pastebėta, kad pagal pasirinktus taškus geriausias interpoliacijos metodas yra natūralių kaimynų (11 pav.).



11 pav. Standartinio nuokrypio reikšmės pagal interpoliacijos metodais apskaičiuotų taškų reikšmių ir faktinių taškų reikšmių skirtumo modulius. (Kaminskas, 2018)

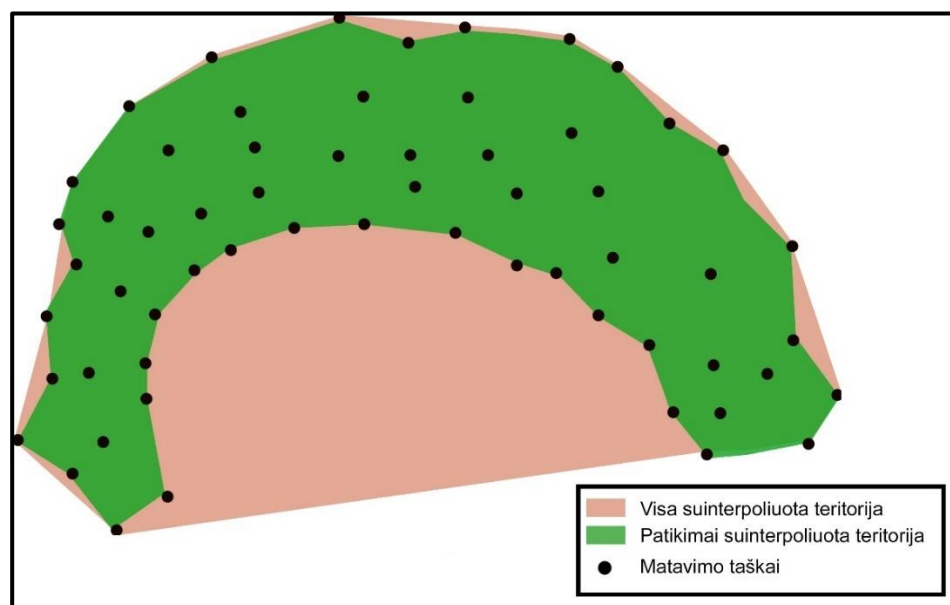
Ekspirimentiniu interpoliacijos metodų bandymų metu pagal Krigingo ir Natūralių kaimynų suinterpoliuotus reljefo modelius buvo sudarytos horizontalės parodančios reljefo aukštį. Pastebėta, kad Krigingo metodu sudarytos horizontalės pasižymi tiriamam reljefui nebūdingomis savybėmis. Horizontalės pasižymi (12 pav.) vingiuotumu, išskirta daug mikro reljefo formų. Taip yra dėl nepakankamai detalaus išmatuotų duomenų kiekio. Teritorijose kur išmatuotų taškų nėra daug, Kriging modelis nėra tinkamas. Natūralių kaimynų metodu sudarytos horizontalės yra glotnesnės. Tačiau Natūralių kaimynų metodu suinterpoliuoto paviršiaus tęstinumas (12 pav.) lyginant su kitais interpoliacijos metodais apima mažesnę teritoriją.



12 Pav. Natūralių kaimynų ir Kriging metodais sudarytų horizontalių (Kaminskas, 2018)

Tiriamą teritoriją apribojantys poligonai

Naudojant interpoliacijos metodus dėl netolygaus matuotų taškų išsidėstymo būtina panaudoti specialius poligonus skirtus „apkirpti“ daliai teritorijos (angl. *Clip polygon*). Šis poligonas nurodo analizuojamos teritorijos ribas, ypačingai tais atvejais, kai arealai yra netaisyklingos formos (13 pav.). Nenaudojant apribojamo poligono, duomenys tam tikrose vietose, gali būti interpoliuoti klaidingai ir neatspindėti realios žemės paviršiaus situacijos.



13 pav. Natūralių kaimynų interpoliacijos metodu paremtas netaisyklingos formos teritorijos kartografavimas. (Kaminskas, 2018)

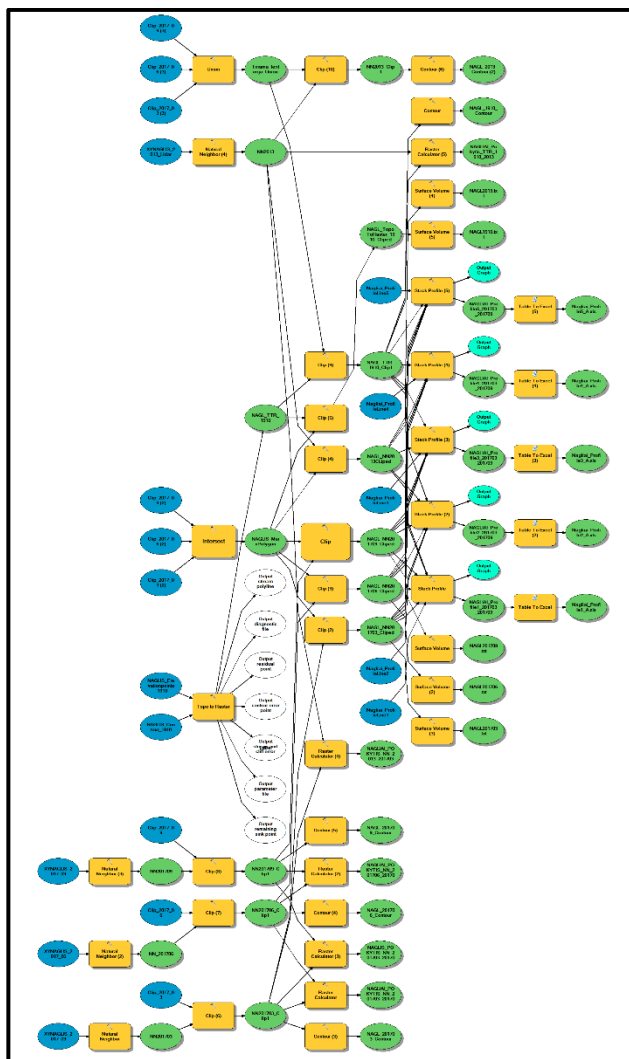
Ekspedicijų metu teritorija kur buvo išmatuoti aukščio taškai yra netaisyklingos formos. Tad kiekvieną kartą prieš interpoliuojant duomenis pagal išmatuotą taškų kiekį ir jų išsidėstymą buvo parinkti poligonai su „kirpimo ribomis“. Jie parinkti taip, kad aprėptų, tik tą teritoriją kur taškų yra

išmatuota pakankamai. Tikslus skaičiaus kiek turėtų būti išmatuota taškų nėra pastovus. Taškų turi būti išmatuota tiek, kad pagal juos sudarius suinterpoliuotą reljefo modelį būtų atspindėta reali situacija. Tai reikalauja ir matuotojo kompetencijos, bei susipažinimo su tiriamu objektu. Kadangi plokščią teritoriją, be sudėtingų reljefo formų atvaizduoti pakanka kur kas mažiau taškų, nei kalvotą, su staigiais aukščio skirtumais.

„Model Builder“ panaudojimas

Model Builder, tai vaizdinė programinė kalba skirta geografinės informacijos apdorojimui. Geografinės informacijos apdorojimo modeliai automatizuoja ir dokumentuoja erdvinės analizės ir duomenų valdymo procesus. Model builder aplinkoje galima kurti ir modifikuoti erdvinės informacijos valdymo modelius. Pats modelis pateiktas, kaip schema apjungianti įrankius, duomenis ir ryšius tarp jų. Naudoti Model Builder yra patogiu, nes jis suteikia geras galimybes įvykdyti patį modelį iš naujo panaudojant kitus parametrus.

Tyrimo metu panaudota daug įvairių įrankių skirtų geografinės informacijos apdorojimui. Dauguma jų, tokių kaip iškirpimas (angl. *clip*), sąjunga (angl. *union*.), natūralių kaimynų metodu paremta interpoliacija buvo pakartoti kelis kartus. Tad buvo nuspręsta, patį procesą paspartinti automatizuojant kai kurių funkcijų atlikimą. Naudojant „Model Builder“ sukurti geografinės informacijos modeliai Naglių ir Parnidžio kopoms tirti (14 pav), taip pat elektroniniuose prieduose.

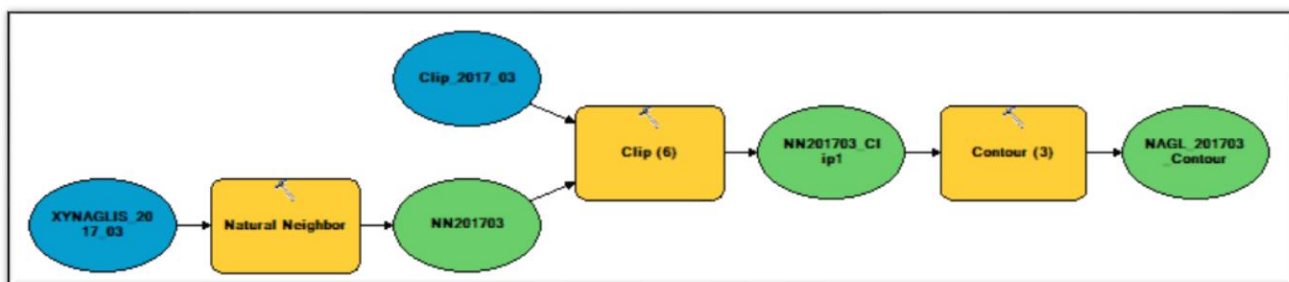


14 pav. Naglių kopos kopų kartografavimo veiksmų modelis (Kaminskas, 2018)

Kopų reljefo 2D žemėlapių sudarymas

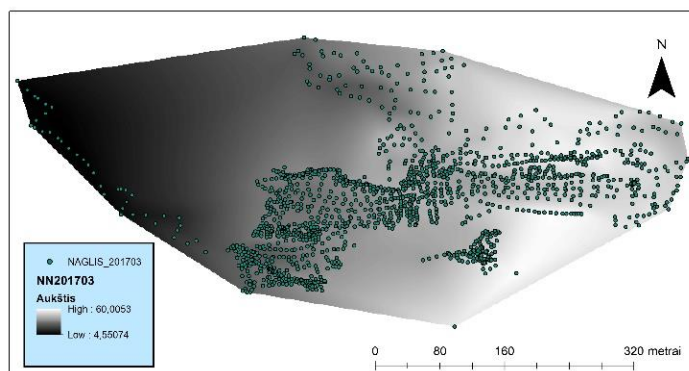
Kadangi atlikti tyrimai parodė (11 pav.), kad "Natūralių kaimynų" interpoliavimo metodas labiausiai tinkamas, todėl jis ir buvo panaudotas kopų reljefo modeliavimui. Taip pat, kaip jau buvo minėta anksčiau (13 pav.) norint išvengti interpoliavimo klaidų buvo pritaikyti poligonai ribojantys modeliuojamą teritoriją

Visi ekspediciniais duomenimis paremti reljefo modeliai buvo sukurti pagal analogišką schemą pateiktą 15 paveikslėlyje.



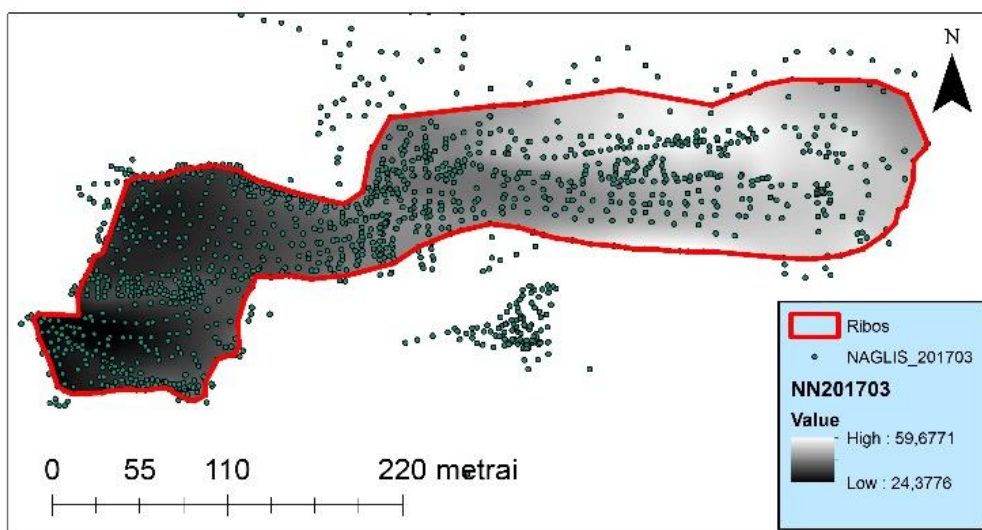
15 pav. Pagal 2017 m. kovo mėnesį išmatuotus ekspedicinius duomenis reljefo žemėlapiu sudarymas (Kaminskas, 2018)

Mėlynai atvaizduoti pradiniai duomenys, išmatuoti aukščio taškai ir teritoriją apribojantys sluoksniai. Pagal išmatuotus aukščio taškus, panaudojus natūralių kaimynų interpoliacijos įrankį sudaromas reljefo modelis. Nustatytas rastrinio sluoksnio ląstelės dydis – 1 metras.



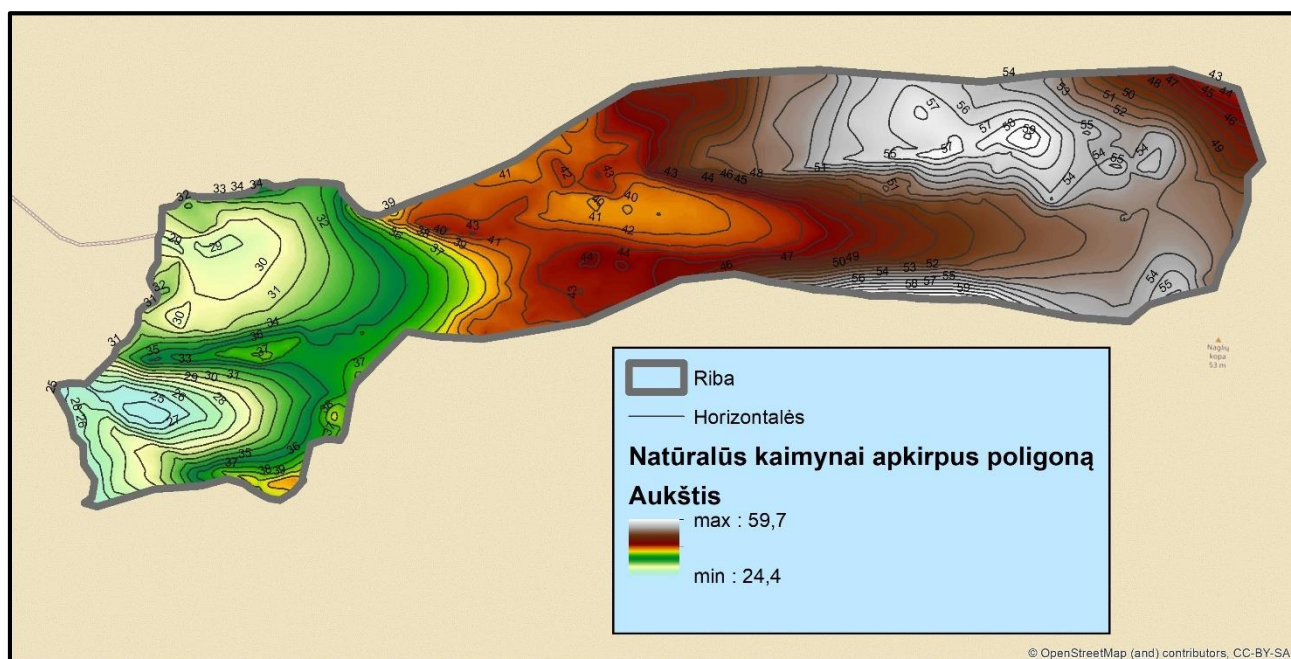
16 pav. Ekspediciniais duomenimis sudarytas 2017 m. kovo mėn. reljefo modelis pagal natūralių kaimynų interpoliacijos metodą (Kaminskas, 2018)

Naudotas interpoliacijos įrankis (Natural Neighbor 16 paveiksluke) sukūrė rastrinį paviršiaus aukščio modelį pagal turimus taškus. Tačiau, turimi taškai išsidėstę netolygiai. Dalis teritorijos sudaryta remiantis taškais labai nutolusiais nuo interpoliuotos teritorijos. Tokios interpoliuotos teritorijos patikimumas yra abejotinas. Dėl šios priežastis, kiekviena suinterpoliuoto modelio teritorija buvo „apkirpta“ pagal specialiai sukurtą poligoną (17 pav.).



17 pav. „Apkirptas“ ekspediciniais duomenimis sudarytas 2017m. kovo mėn. reljefo modelis pagal natūralių kaimynų interpoliacijos metodą (Kaminskas, 2018)

Pagal sudarytą 2D žemėlapių modelį (17 pav.) vertinti reljefo aukštį žemėlapiu vartotojui gali būti sudėtinga. Dėl šios priežasties padidinti informatyvumui buvo sukurtos horizontalės (pav. 18). Tam panaudotas kontūrinių linijų sudarymo įrankis (angl. *Contour*). Pasirinktas optimalaus dydžio horizontalių laiptas – 1 metras leidžiantis suvokti kopų reljefo savybes. Parinktas spalvų derinys, kurį rekomenduojama naudoti atvaizduojant aukščius. Galutinio 2017 m. kovo mėn. išmatuoto reljefo modelio fragmentas pateiktas 18 paveiksluke.

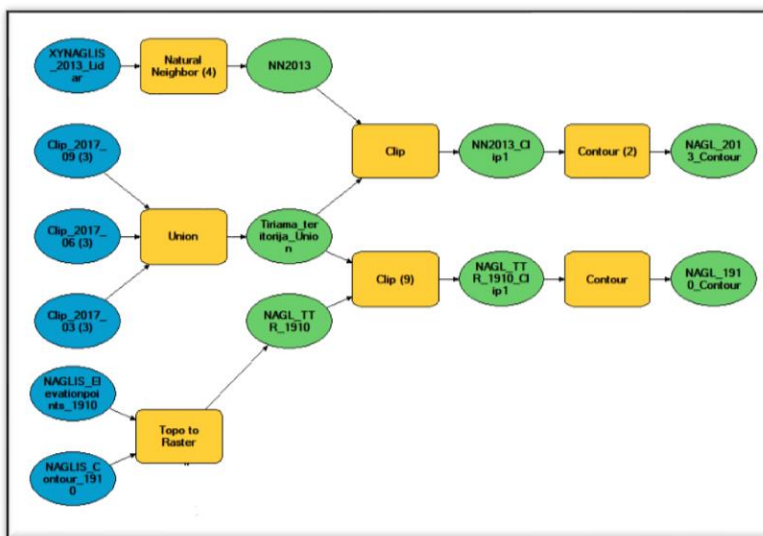


18 pav. „Apkirptas“ ekspediciniais duomenimis sudarytas 2017m. kovo mėn. reljefo modelis pagal natūralių kaimynų interpoliacijos metodą su horizontalėmis (Kaminskas, 2018)

Pagal LIDAR duomenis reljefo modelis sudarytas, naudojant natūralių kaimynų interpoliacijos metodą. Pagal skaitmenizuotus 1910 metų žemėlapių duomenis kopų reljefas

sudarytas panaudojus topografinių duomenų perkėlimo į rastrą interpoliacijos įrankį (angl. *Topo to raster*). Šiuo atveju, „*Topo to raster*“ įrankis yra parankesnis, nes jis yra pritaikytas panaudoti kontūrinių linijų ir taškų duomenis kartu.

Kadangi pradinių išmatuotų taškų kiekis yra didelis, o tai apsunkina kompiuterio darbą ir reikalauja daugiau resursų, tad buvo nuspręsta apriboti tirama teritorija. Panaudotas sanglaudos (angl. *union*) įrankis apjungia visas aktualias teritorijas, kurios buvo išmatuotos ekspedicinių matavimų metu. Kontūrinių linijų sudarymo įrankis panaudotas kuriant horizontales.



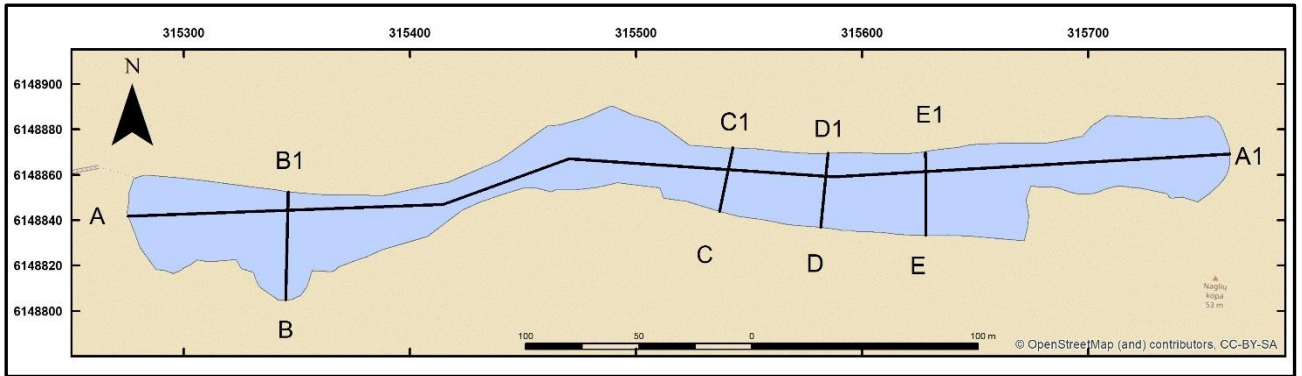
19 pav. Pagal LIDAR ir skaitmenizuoto žemėlapiu duomenis Naglių kopos reljefo modelio algoritmo seka (Kaminskas, 2018)

Reljefo profilių sudarymas

Norint išskirti aktualius ir tyrimui svarbius reljefo fragmentus vien horizontalių metodo nepakanka, todėl buvo panaudotas išskirtinių vietų profiliavimas. Reljefo profilius pateikiant kartu su reljefo modeliais palengviną kartografinių duomenų suvokimą ir analizę. Nors šis būdas taikomas jau seniai, dar prieš atsirandant skaitmeninėms vaizdavimo galimybėms, tačiau kartu su GIS technologijoms tai galima atlikti kur kas sparčiau.

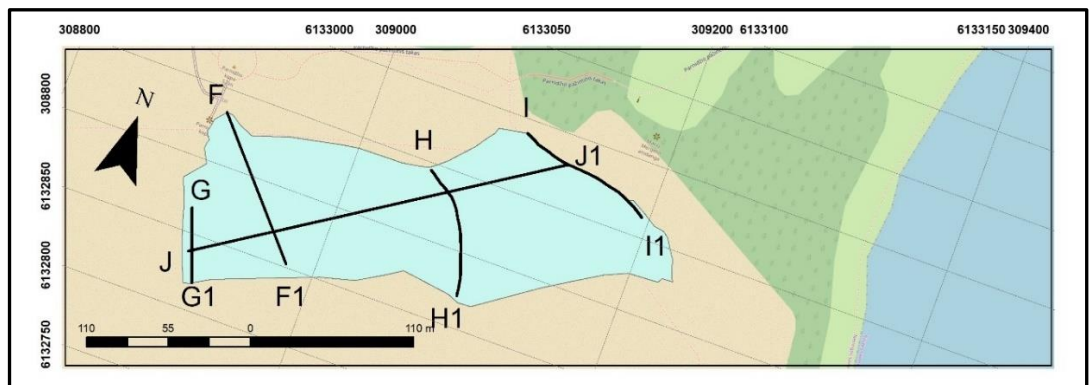
Reljefo profiliams sukurti turi būti naudojami jau prieš tai sudaryti reljefo modeliai (šiuo atveju 2017 m. kovo, birželio ir rugsėjo mėn. laikotarpių), bei specialiai sukurtas linijinis sluoksnis su atkarpa, toje vietoje kurios reljefo profilių norima sudaryti.

Tiriant Naglių kopas sukurti penki linijiniai sluoksniai, tose vietose (20 pav.) kuriose norima sudaryti kopų reljefo profilį. A–A1 profilis parinktas taip, kad eitų išilgai per visą lankytojams lankomą teritoriją. B–B1 profilio atkarpa – apima labiausiai lankytojų lankomą teritoriją ir dalį apsauginėmis priemonėmis apsaugotą. C–C1, D–D1 ir E–E1 profiliai apima vėjo ardomo šlaito zoną.



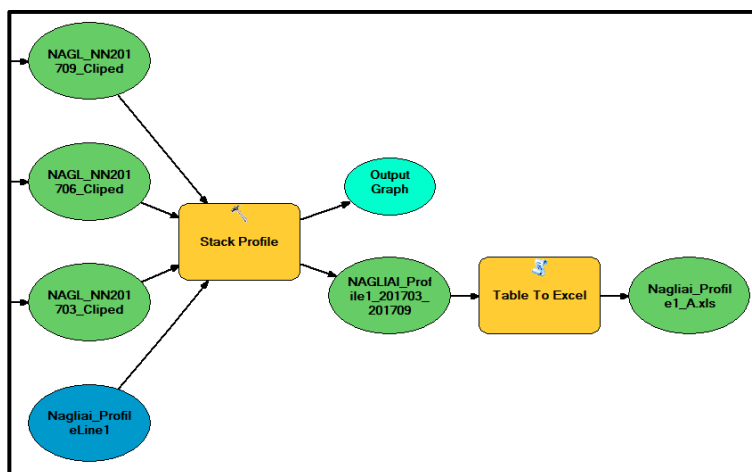
20 pav. Specialiai sudaryti linijiniai sluoksniai vietose kurių profilį norima sudaryti Naglių kops pavyzdžiu (Kaminskas, 2018)

Ties Parnidžio kopa (21 pav.) taip pat pasirinkta sudaryti penkis profilius. F–F1 profilis kerta vieną aukščiausių vietų Parnidžio kopoje, netoli apžvalgos aikštelės kuri yra aktyviai lankoma turistų, ties stačiu šlaitu. G–G1, H–H1 ir I–I1 profiliai parinkti, ties įrengtomis kuoliukų eilėmis (32 pav.), kurie įrengti tam, kad sustabdytų vėjo pustymą ir stabilizuotų kopą. J–J1 profilis išilgai apima didelę dalį teritorijos, profilio kryptis sutampa su vyraujančių vėjų kryptimis.



21 pav. Specialiai sudaryti linijiniai sluoksniai vietose kurių profilį norima sudaryti Parnidžio kops pavyzdžiu (Kaminskas, 2018)

Panaudotas įrankis skirtas suskaičiuoti aukščio reikšmėms profilio linijoje (angl. *Stack Profile*) pateikia reikšmes atributinėje lentelėje. Atributinėje lentelėje pateikta informacija gali būti panaudojama grafiniam profilio sudarymui arba kitiems skaičiavimams.



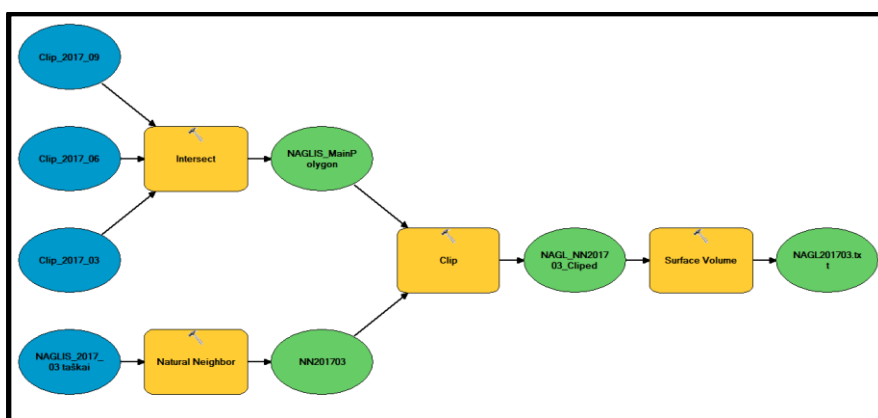
22 pav. Reljefo profilio sudarymo algoritmo schema Naglių kopos pavyzdžiu (Kaminskas, 2018)

Kadangi MS Excel programinė įranga suteikia platesnes galimybes tvarkyti, analizuoti ir atvaizduoti duomenis, tad atributinėje lentelėje sukurtus duomenis nuspręsta perkelti į Excel programą. Tam panaudotas įrankis „Table to Excel“.

Tokiu būdu panaudojus kartografinius metodus, norimoje vietoje išmatuotos kopų reljefo aukščio reikšmės. Ši informacija yra itin naudinga vertinant kopų dinaminis pokyčius, dėl eolinių, antropogeninių ar apsauginių priemonių poveikio.

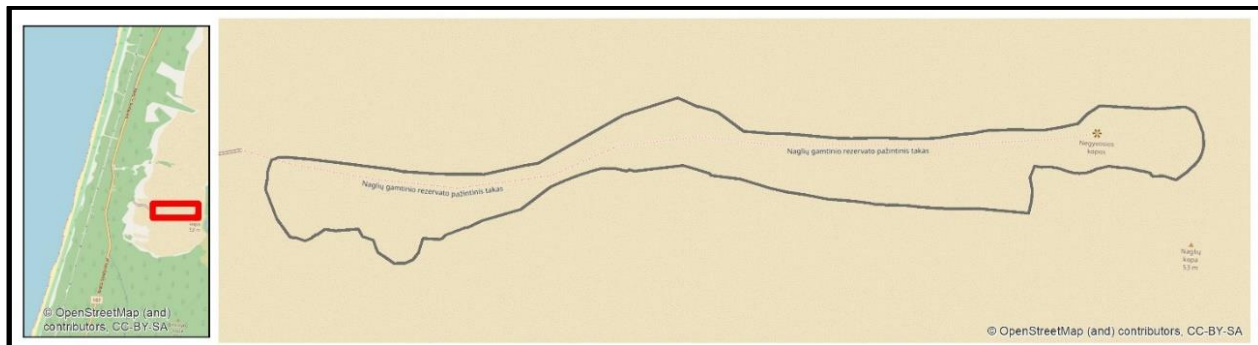
Kopų tūrio skaičiavimas

Skaičiuojant kopų tūrį svarbu apibrėžti kokio ploto teritorijoje tūris bus apskaičiuotas. Kitu atveju, skirtingais laikotarpiais apskaičiuotus tūrius tarpusavyje lyginti būtų netikslinga. Dėl šios priežasties sukurta po vieną bendrą poligoną Naglių ir Parnidžio kopoms, kurie apima visuose ekspediciniuose matavimuose teisingai išmatuotą teritoriją.



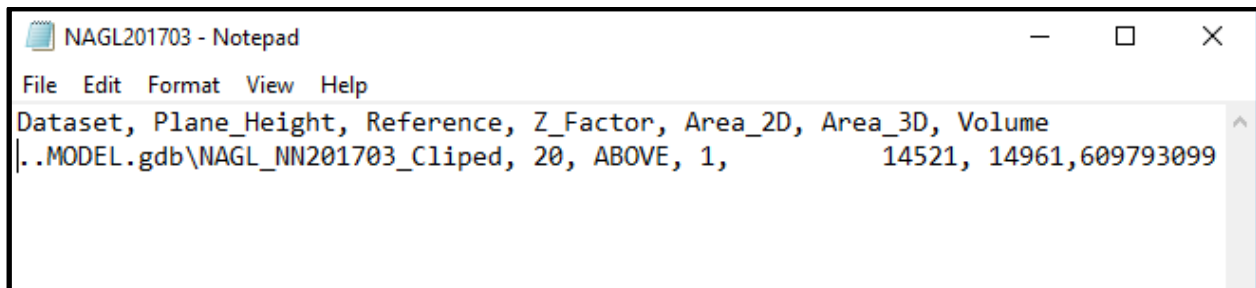
23 pav. 2017 m. kovo mėn. kopų tūrio apskaičiavimo algoritmo schema (Kaminskas, 2018)

Pavyzdyje (24 pav.) pateiktas 2017 m. kovo mėnesio Naglių kopos tūrio apskaičiavimas. Susikirtimo (angl. *Intersect.*) įrankis pagal specialiai sukurtus išmatuotų teritorijų poligonus sukuria vieną bendrą poligoną, kuriame teritorija persidengia visuose tirtuose sluoksniuose.



24 pav. Teritorija kurioje paskaičiuotas kopų tūris (Kaminskas, 2018)

Kaip ir ankstesniuose etapuose naudojamas Natūralių kaimynų interpoliacijos metodas. Panaudotas kirpimo (angl. *clip*) įrankis apkerpa suinterpoliuotą reljefo modelį pagal persidengiančios tiriamos teritorijos plotą. Tūrio skaičiavimui naudojamas įrankis „Paviršiaus tūris“ (angl. *Surface Volume*). Šis paviršius paskaičiuoja tūrį nuo paviršiaus iki menamos plokštumos (Naglių ir Parnidžio atveju menama plokštuma pasirinkta – 20 metrų virš jūros). Skaičiuojant Naglių ir Parnidžio kopų tūrius menama plokštuma buvo parinkta, ties jūros lygiu – 0 metrų. Apskaičiuotas kopų tūris pateikiamas tekstiniame formate (25 pav.).



25 pav. Arcmap programinę įrangą pagal 2017m. kovo mėn. duomenis apskaičiuotos reljefo reikšmės pateiktos tekstiniu formatu (Kaminskas, 2018)

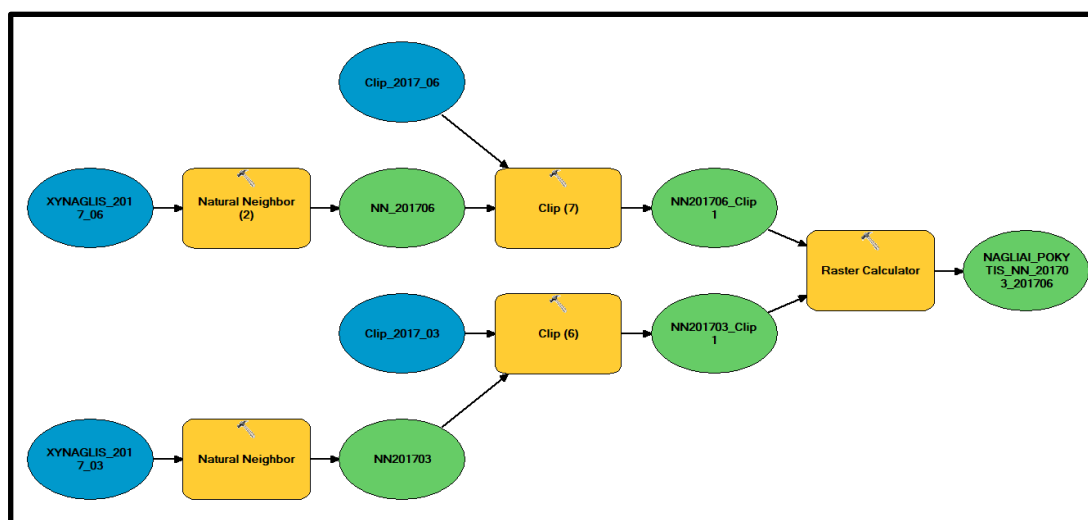
Tolimesni kopų tūrio dinaminių pokyčių skaičiavimai atlikti naudojant excel programinę įrangą.

Dinaminių pokyčių kartografavimas

Lyginant skirtingų laikotarpių kopų reljefo profilius ar paskaičiuotas tūrių reikšmes galima spręsti apie dinaminis pokyčius, tačiau šios informacijos nepakanka. Paskaičiuoti kopų tūriai pateikia, tik abstrakčią informaciją, kuri parodo bendrą tendenciją, bet apie konkrečias vietas spręsti

platesnių galimybių nesuteikia, o tai ir yra svarbiausia išskiriant problemines vietas, kuriose kopos nyksta labiausiai, bei vertinant apsauginių priemonių poveikį.

Sudarinėjant reljefo pokyčių skirtumų modelį tarp dviejų laikotarpių, naudojamas įrankis skirtas atlikti rastrinio sluoksnio skaičiavimams (angl. *Raster Calculator*). Pokytis paskaičiuotas pagal atitinkamą formulę iš vieno rastrinio sluoksnio atimant kitą ankstesnio laikotarpio sluoksnį.



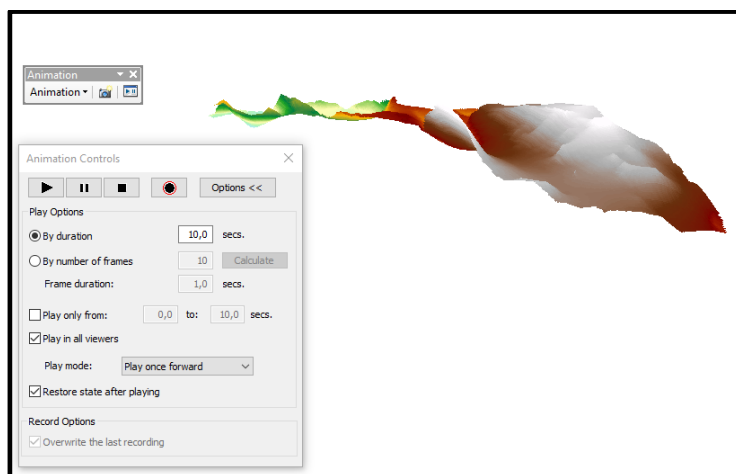
26 pav. Naglių kopos reljefo pokyčio tarp 2017 m. kovo ir birželio mėnesių modelio algoritmo schema (Kaminskas, 2018)

Gautas reljefo pokyčių sluoksnis parodo kuriose vietose tuo laikotarpiu kopos reljefo pokyčiai buvo teigiami, ir kuriose neigiami. Taip pat pritaikius specialiai sudarytą spalvų derinį sudaromos galimybės, šią informaciją pateikti vizualiai patraukliai.

3D modeliavimo galimybės

Pasinaudojus sukurtais rastriniais kopų reljefo modeliais galima atvaizduoti kopų reljefą ir kopų dinaminius pokyčius vaizdingais 3D modeliavimo būdais. Tam buvo panaudotas ArcGIS programinės įrangos priedas ArcScene.

ArcScene, tai 3D vizualizacijos programa kuri leidžia vartotojui perdengti daugybę sluoksnių. Objektai yra pateikti pagal geometrinių savybių aukščio reikšmių, objektų atributinę informaciją, sluoksnio nustatymus, pasirinktą 3D paviršių. Be to, kiekvienas sluoksnis gali būti tvarkomas atskirai. ArcScene taip pat turi integruotą geografinės informacijos valdymo aplinką, suteikiančią prieigą prie daugybės įrankių.



27 pav. 3D kopų modeliavimas (Kaminskas, 2018)

Modeliai buvo sudaryti pagal rastrinius sluoksnius panaudojant ArcScene programinę įrangą. Jų pagalba vizualiai galima pamatyti kaip kopų reljefas pakito per daugiau nei 100 metų.

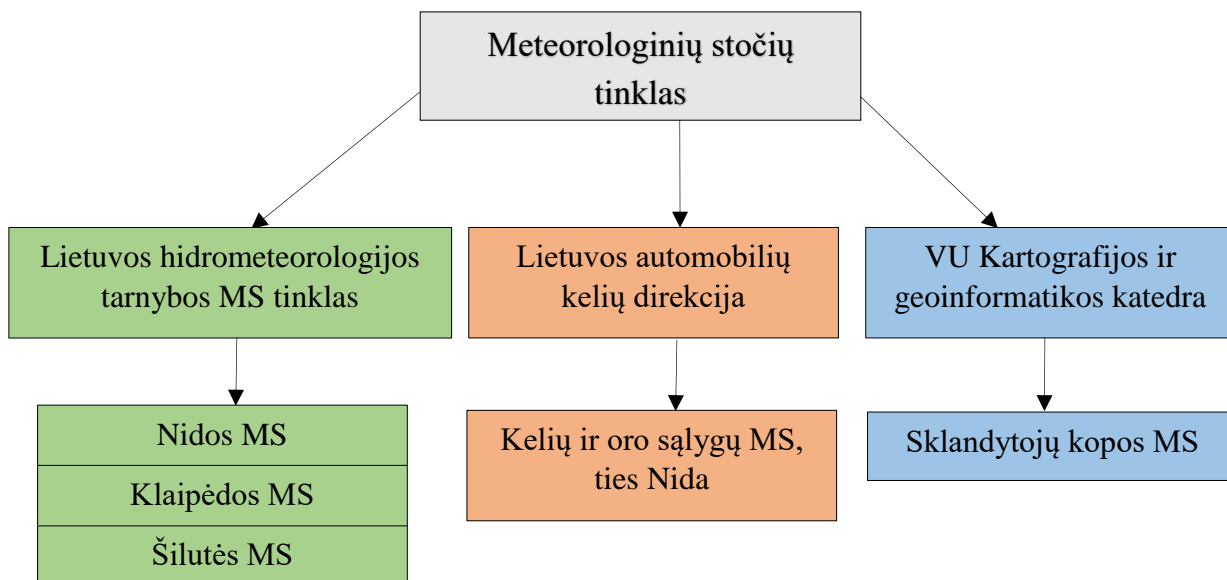
ArcScene įrankis skirtas kurti animacijas (angl. *animation*) suteikia galimybes kopų atvaizdavimą perkelti į kitą lygį. Tai yra puikus pavyzdys kaip, neturint video montavimo žinių, naudojant, tik GIS programinę įrangą kartografinę informaciją galima pateikti vaizdo įrašo formatu.

Taip pat papildomai panaudota „Adobe Premiere“ video redagavimo programa, informacinių tekstų sukūrimui, bei atliekant video montavimo darbus.

2.3 Meteorologinių duomenų vertinimas

Kadangi kopų reljefo pokyčiai smarkiai priklauso nuo meteorologinių reiškinių, tokių kaip vėjo greitis, vėjo kryptis. Tad į tiriamąjį darbą įtraukta ir meteorologinių duomenų analizė.

Pagrindinė organizacija kuri Lietuvoje kaupia meteorologinius duomenis yra LHMT (Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba). Artimiausios tiriamam objektui LHMT meteorologijos stotys yra Nidoje, Klaipėdoje ir Šilutėje. Netoli Sklandytojų kopų yra Lietuvos automobilių kelių direkcijos įrengta kelio meteorologinė stotelė. Taip pat VU Kartografijos ir geoinformatikos katedros ekspedicinė meteorologinė stotelė Sklandytojų kopose.



28 pav. Meteorologinės stotys (Kaminskas, 2018)

Lietuvos automobilių kelių direkcija, ties Nidos – Smiltynės plentu yra įrengusi meteorologinę stotelę. Kelių oro sąlygų stotelė turi jutklius matuojančius kelių būklę, kuri reikalinga eismo sąlygoms aktualią informaciją (kelio dangos paviršiaus ir oro temperatūrą, oro santykinę drėgmę, rasos tašką, vėjo kryptį, greitį ir gūsius, kritulių intensyvumą ir tipą, matomumą, kelio dangos būklę, kelio konstrukcijos įšalo gylį ir kt.) Nors ši stotelė yra visai šalia Parnidžio kopos, tačiau jos tinkamumas reprezentuoti kopas yra abejotinas. Stotelė įrengta ties plentu, apsukta medžių, tad išmatuoti meteorologiniai duomenys atspindi lokalią teritoriją, o ne bendrą situaciją. Be to stotelė yra be pastovios priežiūros, nesaugoma. Tad jos duomenis gali iškraipyti pašaliniai objektai.



29 pav. Kelio meteorologinė stotelė Kuršių Nerijoje (Kaminskas, 2018)

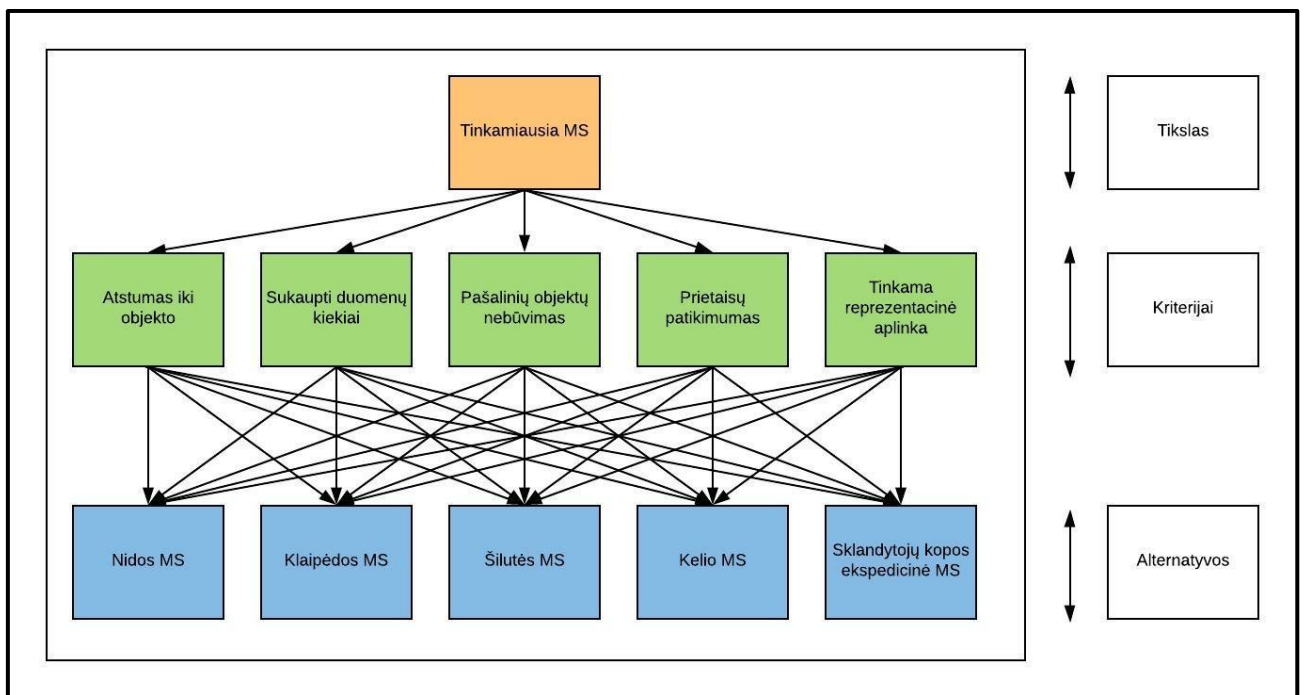
Nuo 2017 birželio mėn. 14 d. sklandytojų kopose yra įrengta speciali kopų dinamiškai stebėti skirta meteorologinė stotis. Įrengta meteorologinė stotis reprezentuoja kopų aplinką. Matuoja vėjo

kryptį, vėjo greitį, kritulių kiekį. Tokia stotelė yra vienintelė Lietuvoje kuri įrengta būtent kopose. Deja dėl techninių kliūčių, per analizuojamąjį laikotarpį susidarė duomenų trūkiai.



pav. 30 Meteorologinė stotis Sklandytojų kopoje (Kaminskas, 2018)

Siekiant išsiaiškinti kurios meteorologinės stoties duomenys labiausiai tinka vertinti Naglių ir Parnidžio kopų dinamiką buvo nuspręsta panaudoti AHP (angl. *Analytic hierarchy process*) kompleksinių sprendimų metodą. AHP metodas, tai struktūrizuota kompleksinių sprendimų organizavimo ir analizavimo technika, paremta matematiniais principais. (Saaty T. L., Peniwati K., 2008). Šis metodas yra plačiai taikomas įvairiose srityse. Taip pat naudojamas įvairiuose darbuose kartu su GIS analize. (Chaundhar P. ir kt., 2015) Pasirinktų kriterijų įverčiai ir AHP metodo skaičiavimai pateikti elektroniniuose prieduose.

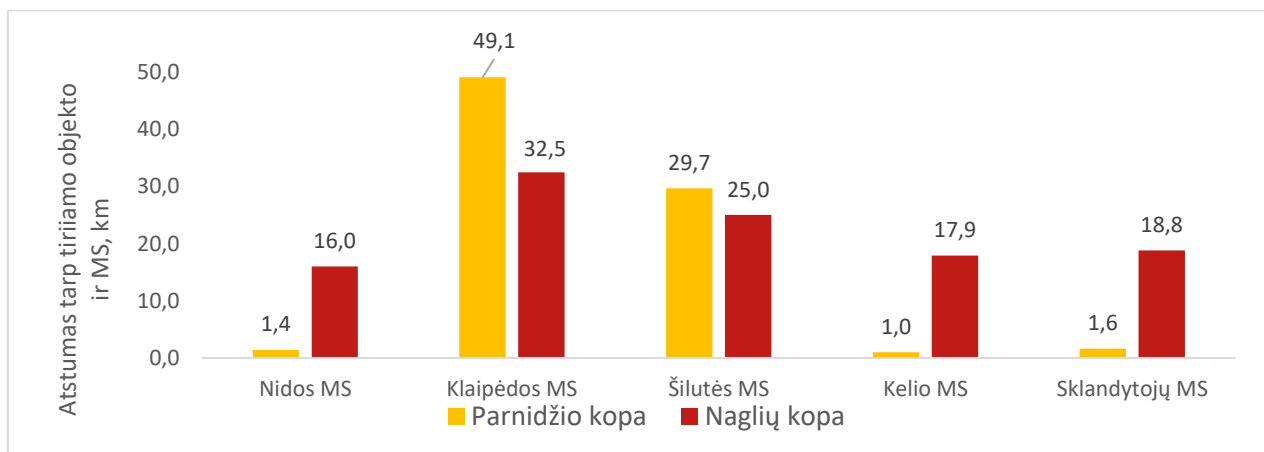


31 pav. AHP metodo schema (Kaminskas, 2018)

AHP metodo tikslas yra atrasti labiausiai tinkančią meteorologijos stotį. Alternatyvos – jau ankščiau išvardintos esančios stotys. Norint iš esamų alternatyvų parinkti geriausia buvo sukurti kriterijai pagal kuriuos buvo vertinama kiekviena meteorologijos stotis.

Pasirinkti kriterijai:

1. **Atstumas iki kopų.** Vertinant tinkamiausią meteorologinę stotelę svarbus veiksnys yra atstumas iki kopų. Artimesnės meteorologinės stotelės geriau atspindės kopose vyraujančią meteorologinę situaciją.



32 pav. Atstumas tarp meteorologinės stotelės ir tiriamų objektų (Kaminskas, 2018)

2. **Sukaupti duomenų kiekiai.** Meteorologinius duomenis su dideliais trūkiais vertinti netikslinga. Stengtasi parinkti tokią MS kuri trūkių neturi.

3. **Pašalinių objektų poveikis.** Pagal PMO (angl. *WMO – World meteorology organisation*) Pašaliniai objektai tokie kaip medžiai, pastatai ir kiti aukšti objektai neturėtų būti šalia meteorologinių stočių. Šešėliai nuo kliūčių neturi kristi ant prietaisų. Nustatyta meteorologijos stoties apsaugos zona –200 metrų aplink aikštelės ribą.

4. **Prietaisų patikimumas.** Meteorologinės stoties prietaisai turėtų būti tvarkingi ir atlikti korektiškus matavimus.

5. **Tinkama reprezentacinė aplinka.** Reprezentacinė aplinka kurioje įrengta meteorologinė stotelė turėtų reprezentuoti kopų aplinką arba, jei tokių galimybių nėra būti neutrali, t.y. neatvaizduoti kitokios aplinkos pvz. miško, urbanizuotos teritorijos.

AHP metodu principu buvo atliekami poriniai palyginimai tarp esančių alternatyvų, pagal kiekvieną parinktą kriterijų. Šių palyginimų esmė – nurodyti santykinį vienos ar kitos meteorologinės stoties pranašumą lyginant su kita. Tokie palyginimai atlikti pagal kiekvieną kriterijų. Atlikus palyginimus, paskaičiuojamas kiekvienos alternatyvos bendras rezultatas.

Parinkus tinkamiausią meteorologinę stotelę pagal joje išmatuotus meteorologinius duomenis naudojant MC Excel programinę įrangą sudarytos vėjų rožės kurių laikotarpis atitinka tarp

ekspedicinių kartografinių matavimų laikotarpius. Sukurtose vėjo rožėse atvaizduojama vyraujanti vėjo kryptis.

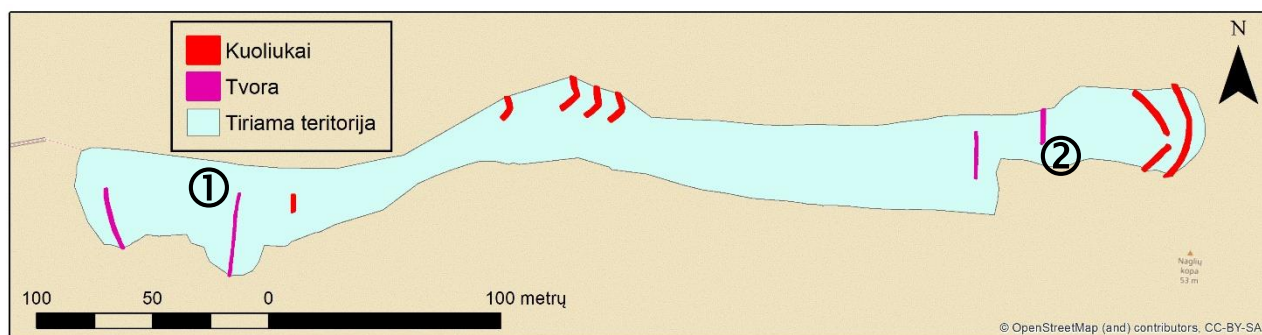
2.4 Apsauginių priemonių atranka vertinimui

Smėlio judėjimas gali būti stabdomas šakų ir medinių kuolų užtvaramis, dar kitaip vadinamomis „smėlio šukomis“. Kuršių Nerijos nacionalinis parkas atsižvelgus į mokslininkų rekomendacijas, siekiant sustabdyti kopų defliaciją 2016 – 2017 metais įrengė „smėlio šukų“ tinklą. Šios priemonės įrengtos Parnidžio ir Naglių kopose. Vizualiai buvo pastebėta, kad kai kuriose vietose priemonės pasiteisino ir smėlis, ties šiais plotais pradėjo akumuliuoti, tačiau kiekybiškai šis naujai įrengtų priemonių poveikis nebuvo įvertintas.



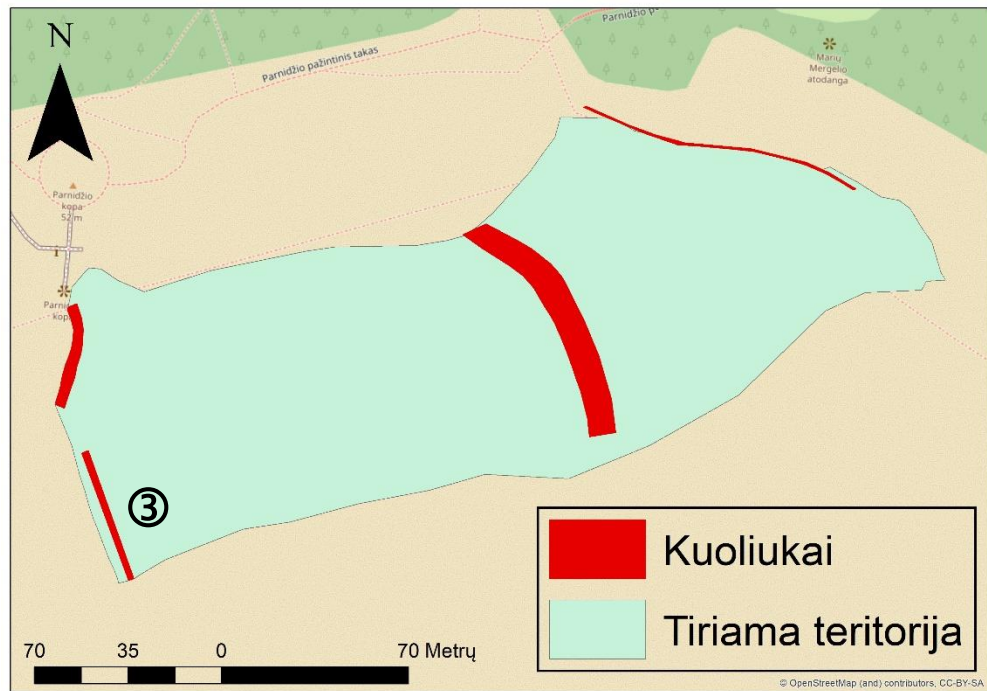
33 pav. Šakų tvoros ir kuoliukų užtvaros – „smėlio šukos“. (Kaminskas, 2017)

Iš viso ties Naglių kopa įrengta 12 apsauginių priemonių, kurių bendras plotas sudaro 280 m². Apsauginės priemonės įrengtos taip, kad sustabdytų vakarų vėjo pustomą smėlį.



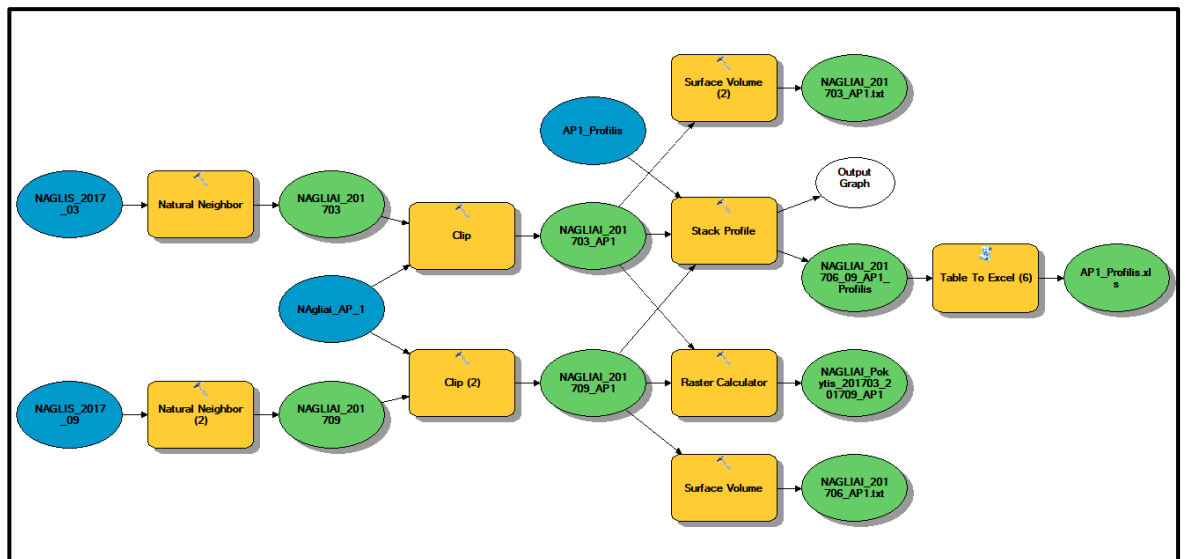
34 pav. Apsauginių priemonių užtvaros Naglių kopoje (Kaminskas, 2018)

Parnidžio kopose įrengtos apsauginės priemonės užima 1356 m² plotą. Skirtingai, nei Naglių kopose kur lankytojams prieinama teritorija yra apribojama, Parnidžio kopose lankytojai gali vaikščioti visoje tiriamoje teritorijoje.



35 pav. Apsauginių priemonių užtvartos Parnidžio kopose (Kaminskas, 2018)

Jau prieš tai sukurta kopų kartografavimo metodika pritaikyta vertinant atskirų apsauginių priemonių poveikį. Dėl šios priežasties buvo pasirinkti du apsauginių priemonių objektai Naglių ir vienas Parnidžio kopose. Pasirinktų apsauginių priemonių reljefo pokyčiai atvaizduoti stambesniu masteliu. Sinterpoliuoto rastro laštelė pasirinkta 0,5 m. Tūriai skaičiuoti nuo matavimo metu užfiksuotos žemiausios reljefo altitudės (žiūrėti skyrius 3.7).



36 pav. Apsauginių priemonių vertinimo algoritmo schema (Kaminskas, 2018)

3. MATAVIMO REZULTATŲ ANALIZĖ

Tiesioginiai kartografavimo darbai reguliariai buvo vykdomi nuo 2016 m. gruodžio mėn. iki 2018 m. vasario mėn. Tačiau apsauginių priemonių poveikį kopoms vertinti pasirinktas, 2017 m. kovo – rugsėjo mėn. laikotarpis. Kadangi šiais laikotarpiais išmatuotų duomenų kiekis ir teritorija buvo didžiausi. Taip pat tirtos apsauginės priemonės buvo įrengtos, tik nuo 2017 m. kovo mėnesio. Tiesioginių kartografavimo darbų metu išmatuotų aukščio taškų ir iš kitų šaltinių surinkti duomenys pavaizduoti 2 lentelėje. Visi tyrime sudaryti kartografiniai darbai pateikti magistrinio darbo elektroniniuose prieduose – skaitmeniniu formatu

2 lentelė. Sukaupiti kartografiniai duomenys

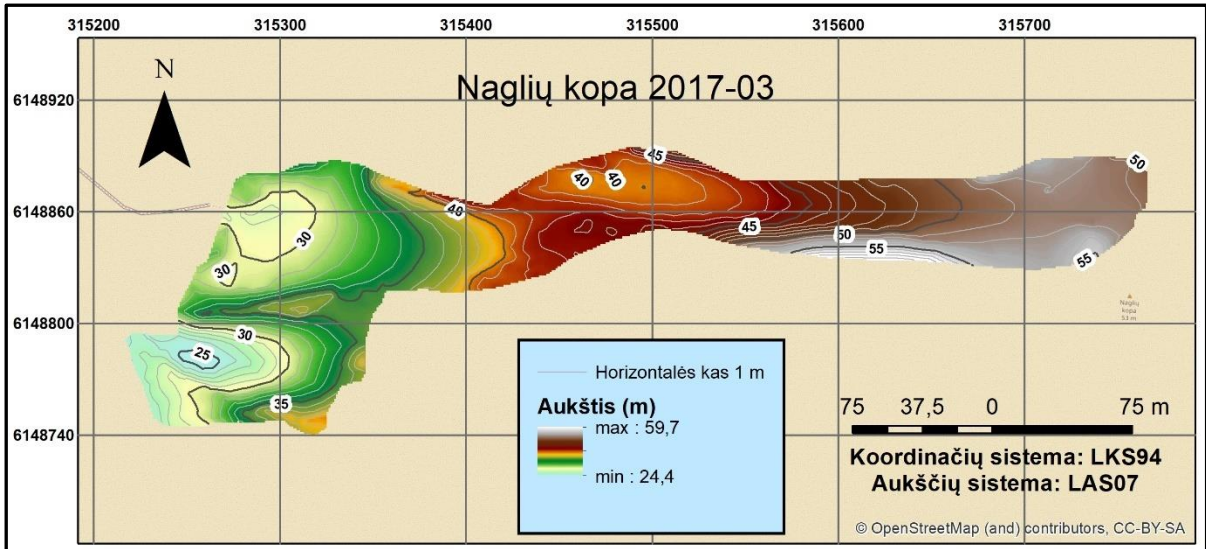
| | Žemėlapis | Lidar | Ekspediciniai duomenys | | | | |
|--------------|-----------|-------|------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | 1912 | 2013 | 2016/12 | 2017/03 | 2017/06 | 2017/09 | 2018/02 |
| Naglis | + | + | - | + | + | + | + |
| Parnidis | + | + | - | + | + | + | + |
| Sklandytojai | + | - | + | + | + | - | - |

3.1 Kopų reljefo 2D modeliai

Pagal sukauptus duomenis buvo sudaryti 2D reljefo modeliai. Modeliai pateikti atsižvelgus į esminius žemėlapių sudarymo principus. Žemėlapis orientuotas į šiaurę. Sinterpoliuotos modelio aukščių reikšmės atvaizduotos specialiai reljefui vaizduoti pritaikytu spalvų deriniu. Žemėlapių informatyvumui padidinti kartu pateiktos horizontalės. Siekiant išvengti per didelės žemėlapių apkrovos, paryškintos, tik horizontalės kas 5 metrus. Likusios horizontalės atvaizduotos plonesnėmis linijomis. Pridėtas mastelis parodantis, kiek kartų atvaizduojama vietovė sumažinta žemėlapyje. Geografinis tinklėlis padedantis nustatyti tam tikros vietovės koordinatas. Kaip fonas panaudotas atviro kodo OpenStreetMap žemėlapis.

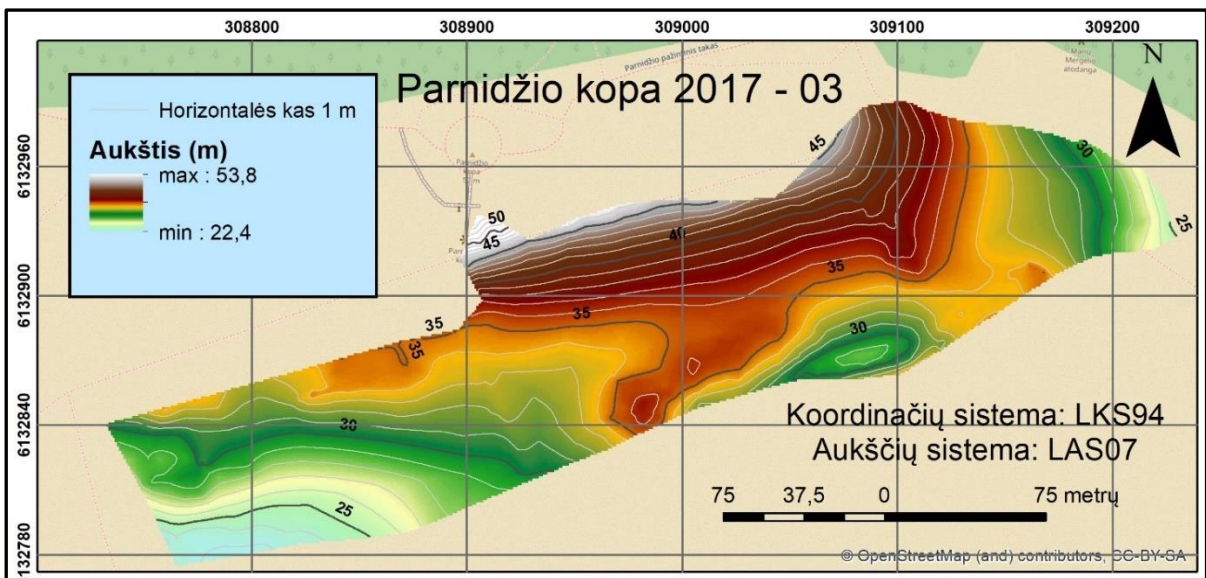
Tokie skirtingų analizuojamų laikotarpių 2D kopų reljefo žemėlapiai sudaryti Naglių ir Parnidžio kopų pavyzdžiais.

Visi Naglių kopos reljefo žemėlapiai pateikti 1 priede ir magistrinio darbo elektroniniuose prieduose – CD diske.



37 pav. Pagal išmatuotus ekspedicinius duomenis sudarytas Naglių kopos reljefo modelis (2017 m. kovo mėn. duomenų pavyzdžiu) (Kaminskas, 2018)

Visi Parnidžio kopos reljefo žemėlapiai pateikti 2 priede ir skaitmeniniu formatu magistrinio darbo CD diske.

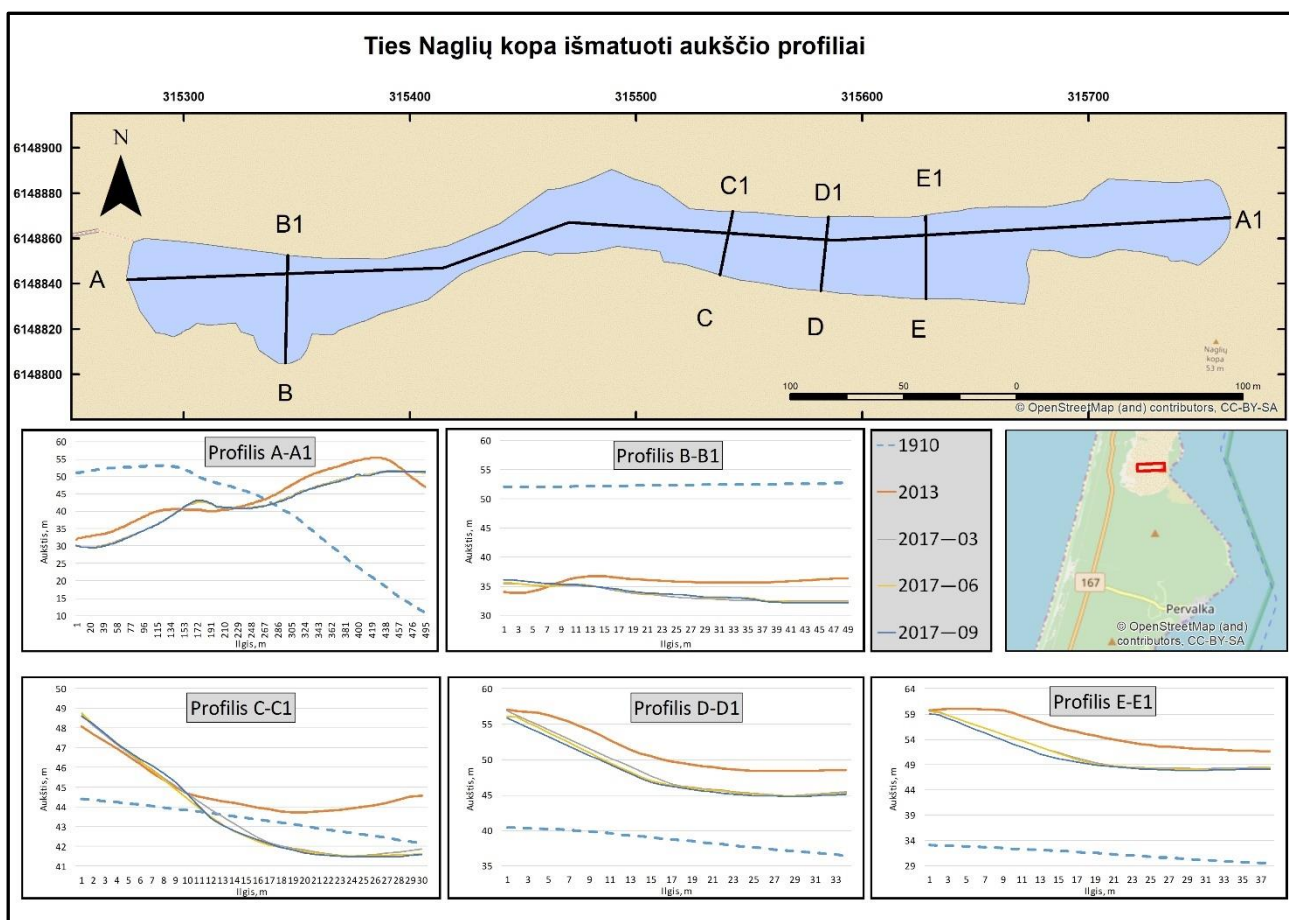


38 pav. Pagal išmatuotus ekspedicinius duomenis sudarytas Parnidžio kopos reljefo modelis (2017 m. kovo mėn. duomenų pavyzdžiu) (Kaminskas, 2018)

3.2 Reljefo profiliai

Vertinant profilį A–A1 pastebėta (39 pav.), kad lankytojų teritorijoje aukščiausia vieta ties profilio linija juda rytų kryptimi. Taip atsitinka dėl nuolat vyraujančio vakarų vėjo kuris nupusto smėlio daleles. 1910 metais šiame profilyje viršūnė siekė 53,1 m, 2013 metais – 55,4 m. Po to viršūnės aukštis pastoviai vis mažėjo, 2017 m. atliktų ekspedicinių matavimų metu kovo mėn. – 51,7 m., birželio mėn. – 51,5 m., rugsėjo – 51,4 m. Reljefo pasikeitimai per tokį trumpą laiką yra itin

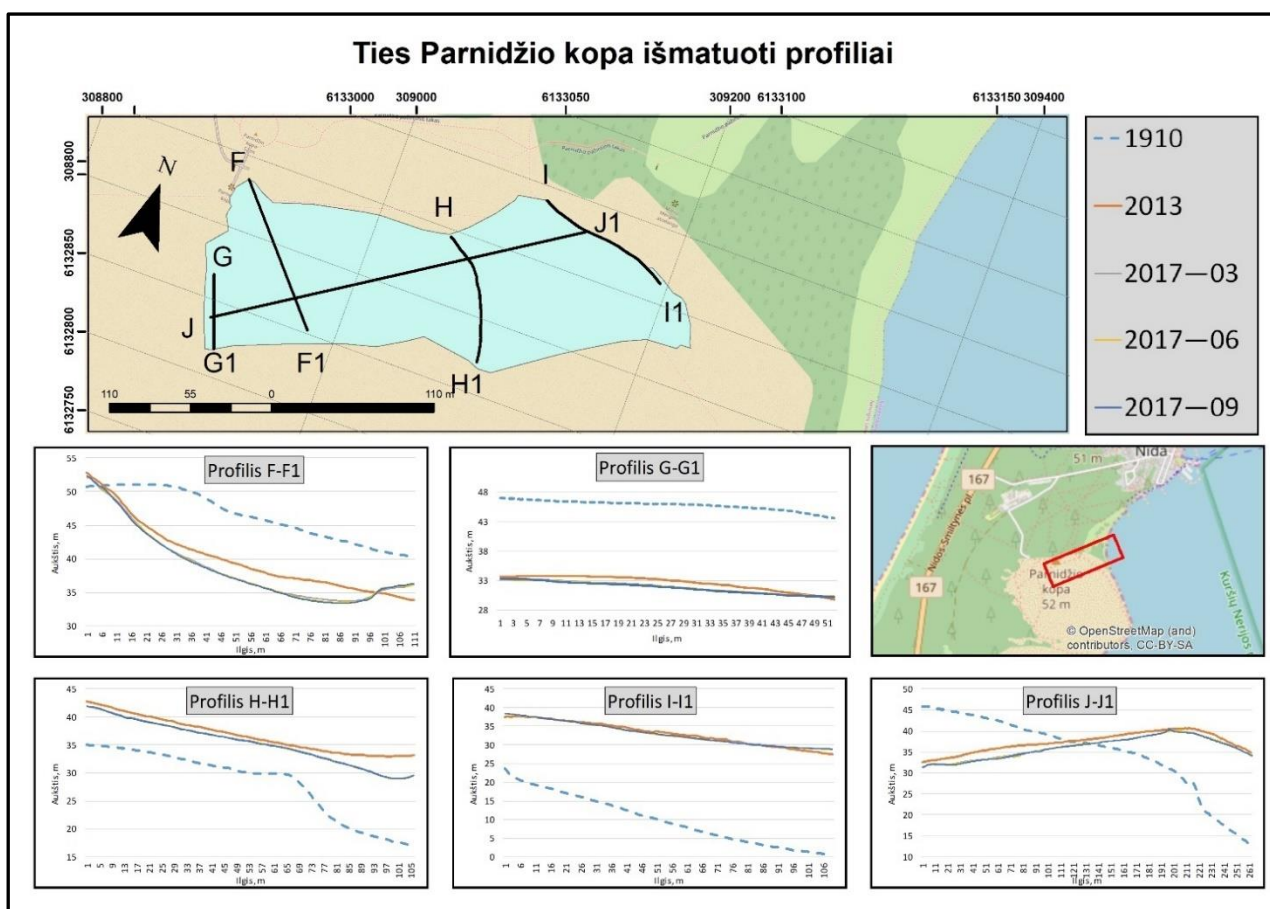
dideli. Tai lemia didelę vėjo pernašą. Ties B-B1 profiliu kopos aukštis buvo daugiau nei 15 metrų aukštesnis, nei dabar. Nuo 1 iki 7 metrų ilgio atkarpoje 2017 m. reljefo aukštis išaugo, nei 2013. Likusioje atkarpos dalyje pastebima, kad kopos aukštis sumažėjo. Ties C-C1, D-D1 ir E-E1 profiliais esančio šlaito aukštis per 2013 – 2017 m. laikotarpį ženkliai sumažėjo. Tai gali lemti eolodinaminiai procesai, bei antropogeninė veikla. Ši vieta kurioje reljefo aukštis sumažėjo yra gausiai lankoma turistų, kurie vaikščiodami kopose mindo smėlį, taip sudarydami palankesnes sąlygas vykti vėjo erozijai. Tai galėtų būti pagrindinė priežastis, kodėl reljefo aukštis nuo 2013 m. vietose sumažėjo, net iki 5 m aukščio.



39 pav. Naglių kopos aukščių pokyčių profiliai (Kaminskas, 2018)

Ties Parnidžio kopa aukščiausia vieta išmatuota ties F-F1 profilyje išmatuota 2013 metais – 52,8 m. 1910 m. ties šia vieta siekė – 51,1 m. F-F1 profilyje (ties 20 – 110 m.) esančia atkarpa 1910 m. reljefas buvo 4 m aukštesnis. Ties 0 – 98 m. esančia atkarpa 2013 m. reljefas buvo aukštesnis, nei 2017 m. ekspedicinių matavimų metu. Didžiausias aukščio skirtumas siekė iki 3 m. G-G1 profilis parodo, kad 1910 m. reljefo aukštis buvo, net iki 12 metrų aukštesnis. Beveik visoje G-G1 profilio atkarpoje 2013 m. reljefas buvo aukštesnis, nei 2017 m. Maksimalus skirtumas siekė 3 metrus. H-H1 profilis parodo, kad tarp visų laikotarpių 2013 m. kopos aukštis buvo didžiausias – 42,8m., visoje

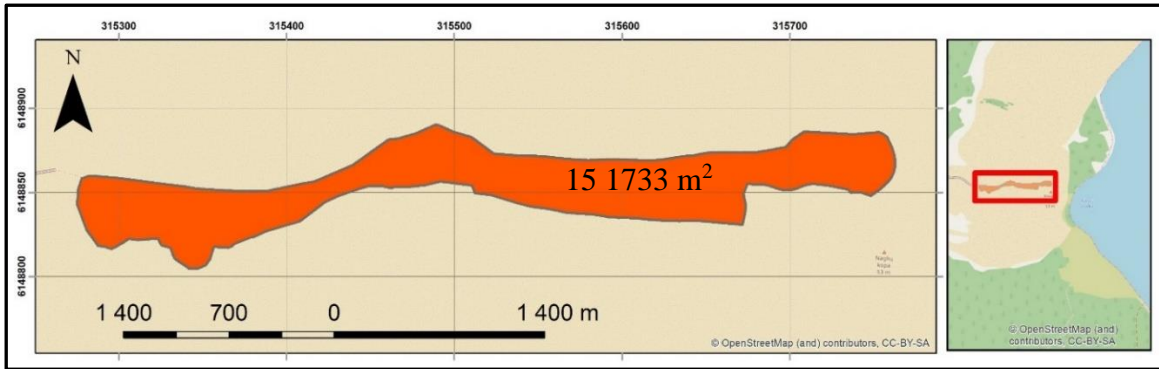
profilio atkarpoje 2017 m. buvo išmatuotos žemesnės profilio reikšmės, nei 2013 m. Žemiausios aukščio reikšmės buvo 1910 m. (minimalus aukštis siekė iki 17 m.). I–I1 profilis būdingas, tuo, kad 2013 m. ir 2017 m. pasižymi artimomis aukščio reljefo reikšmėmis. Skirtumas, tarp 1910 m. ir kitais laikotarpiais išmatuotų sluoksnių siekia nuo 15 iki 27 metrų. Išilginis J–J1 profilis parodo, kaip ir, ties Nagliais parodo, kad kopa juda vakarų kryptimi. Maksimalus aukštis, ties J–J1 profiliu išmatuotas, 1910 m. – 45,9 m., kuris iki 2013 m. sumažėjo iki – 40,6 m., 2017 m. ekspedicinių matavimų metu kovą – 40,5 m., birželį – 40,2 m., rugsėjį – 40,3 m.



40 pav. Parnidžio kopos aukščių pokyčių profiliai (Kaminskas, 2018)

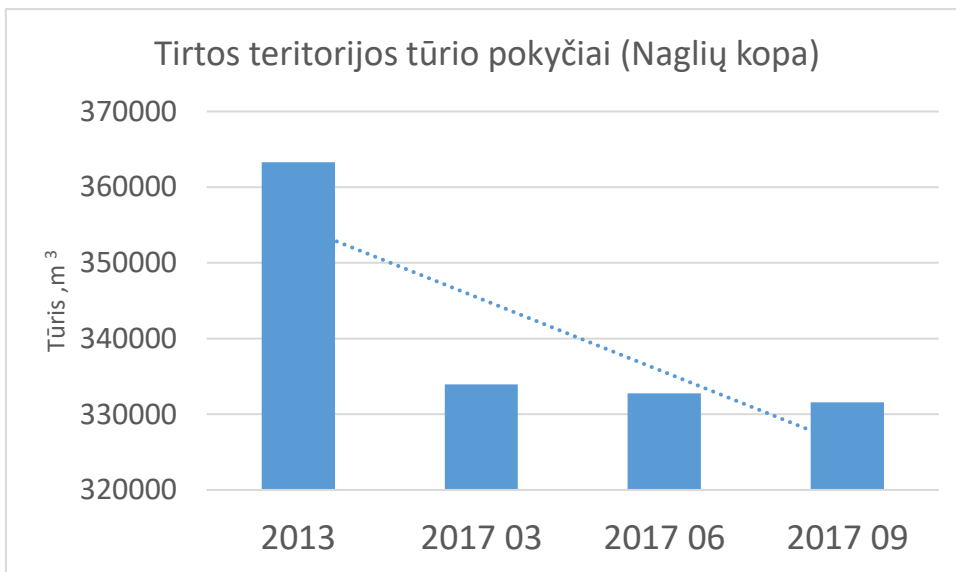
3.3 Kopų tūriai tiriamose teritorijose

Naglių kopose tūris apskaičiuotas 15 1733 m² ploto teritorijoje (38 pav.) Tai apima visą turistams prieinamą teritoriją.



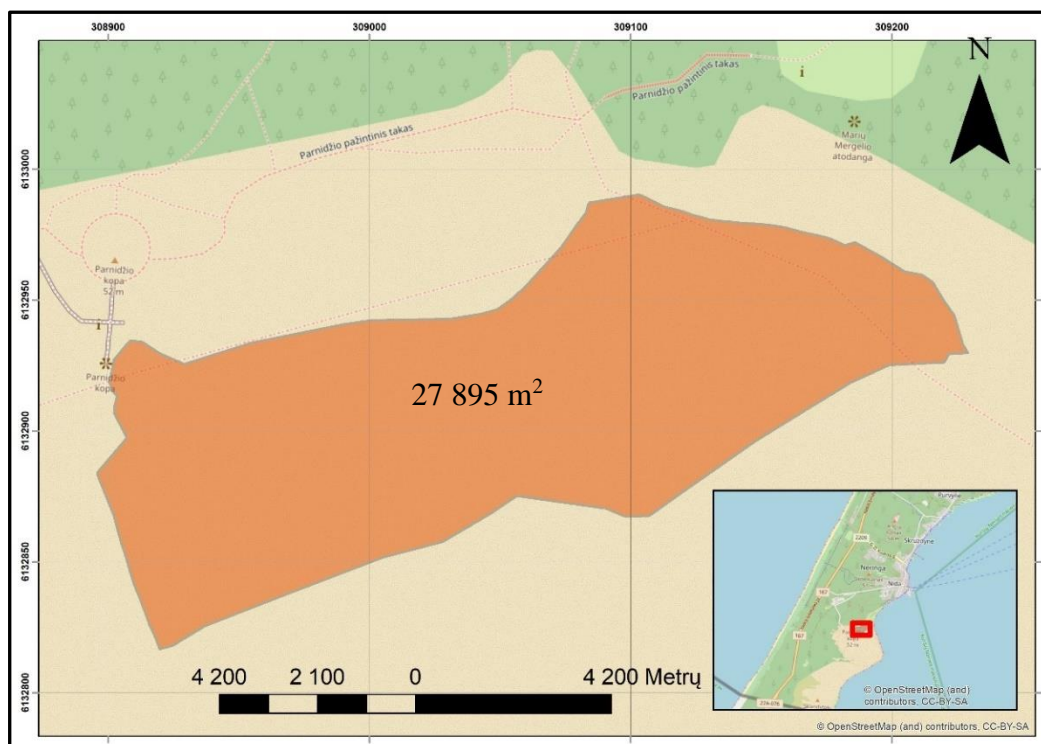
41 pav. Naglių kopos teritorija kurioje buvo apskaičiuotas kopų pokyčių tūris skirtingai laikotarpiais (Kaminskas, 2018)

Apskaičiavus tirtos teritorijos tūrį, ties Naglių kopa 2013 metais smėlio buvo daugiausia – 363319m³ (42 pav.). Per daugiau, nei keturis metus kopos tūris sumažėjo 29365 m³. 2017 m. kovo mėnesį toje pačioje teritorijoje smėlio tūris siekė – 333954 m³. Ekspedicinių tyrimų metu pastebta smėlio tūrio mažėjimo tendencija. 2017 m. birželį jo sumažėjo iki – 332757 m³, rugsėjį – 331572 m³. Atlikus empirinius skaičiavimus paskaičiuota, kad nuo kovo iki birželio vidutiniškai smėlio sumažėdavo 13,6 m³/d, nuo birželio iki rugsėjo apie 12,0 m³/d.



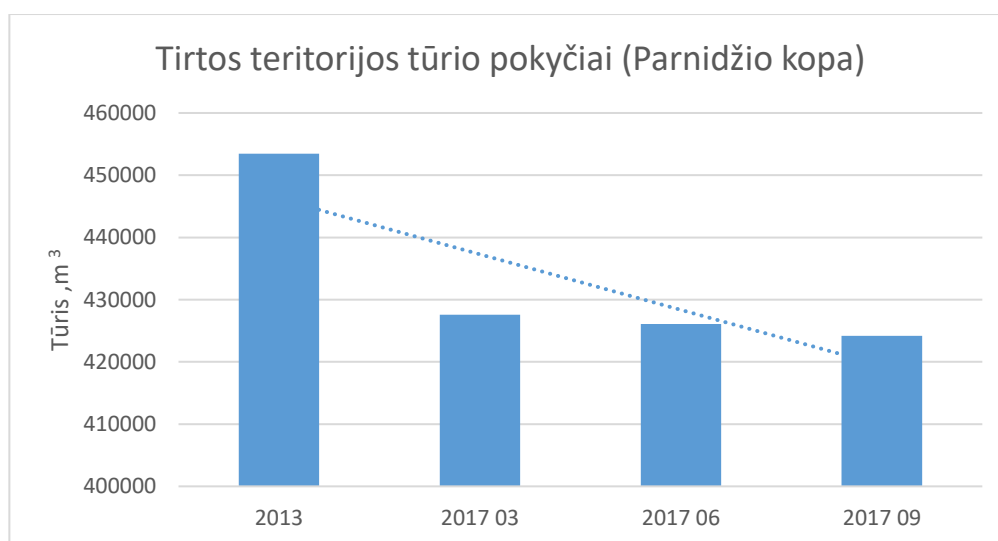
42 pav. Tiriamoje teritorijoje Naglių kopose apskaičiuoti įvairių laikotarpių Naglių kopų tūriai (Kaminskas, 2018)

Parnidžio kopos tūris buvo išmatuotas 27 895 m² ploto teritorijoje (43 pav.).



43 pav. Parnidžio kopų teritorija kurioje buvo apskaičiuoti tūriai skirtingais laikotarpiais (Kaminskas, 2018)

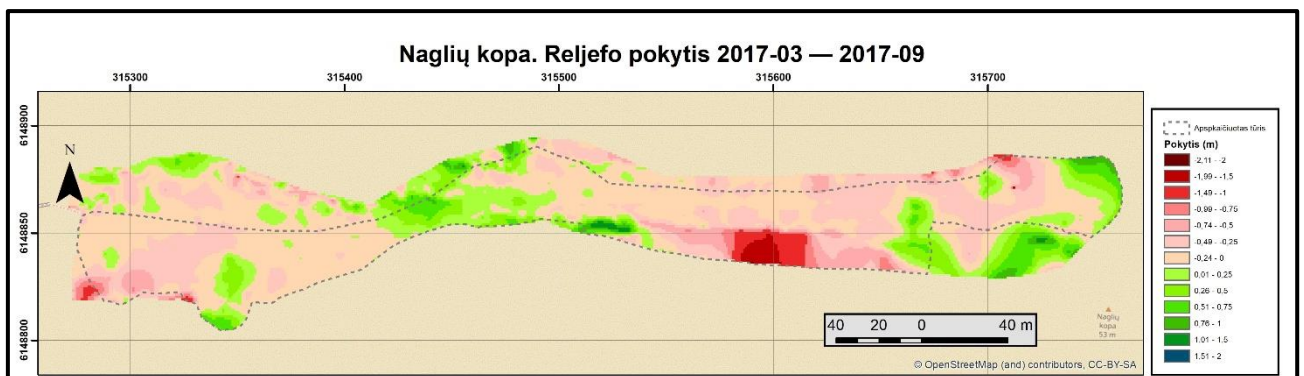
Apskaičiavus tirtos teritorijos tūrį, ties Parnidžio kopa 2013 metais smėlio buvo daugiausia – 453443 m³. (44 pav.). Iki 2017 m. kovo mėnesio šioje vietoje tūris sumažėjo iki 427584 m³. Ekspediciniai tyrimai parodė, kad 2017 m. sėlis tūris pastoviai mažėjo, birželį tūris sumažėjo iki 426095 m³, rugsėjį jo liko – 424174 m³, tai galėjo susidaryti dėl vėjo smėlio pernašos. Atlikus empirinius skaičiavimus paskaičiuota, kad nuo kovo iki birželio vidutiniškai smėlio sumažėdavo 16,4 m³/d, nuo birželio iki rugsėjo, net 20,2 m³/d.



44 pav. Tiriamoje teritorijoje Parnidžio kopose apskaičiuoti įvairių laikotarpių Naglių kopų tūriai (Kaminskas, 2018)

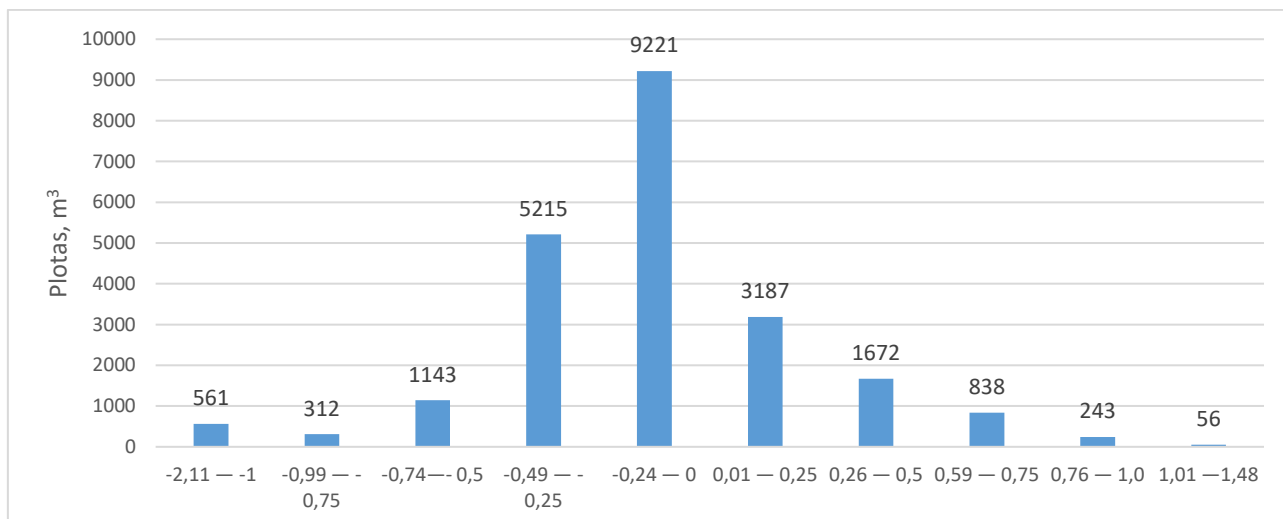
3.4 Dinaminių pokyčių kartografavimas

Sudarius Naglių kopos reljefo pokyčių žemėlapi, galima išskirti vietas kuriose smėlis per analizuojamąjį laikotarpį akumuliuosi arba buvo nupustytas. Dideli akumuliuoto smėlio kiekiai 2017 m. nuo kovo iki rugsėjo mėnesio susiformavo vakarinėje dalyje, kurios koordinatės (y315725, x6148846) ir (y315749, x6148886) (pav. 45), kopa šiose vietose išaugo virš 1 metro. Taip pati didelė akumuliacijos zona pastebima, centrinėje tiriamo ploto dalyje (y315447; x6148866). Reljefo aukštis taip pat išaugo virš 1 metro, nepaisant to, kad tai yra vieta smarkiai veikiama antropogeninės veiklos, kadangi turistų smarkiai lankomas pažintinis takas eina būtent per šią akumuliacinę zoną. Taip pat verta paminėti, dvi akumuliacines zonas, kurios susidarė dėl apsauginių priemonių: pietryčiuose esanti (y315346; x6148830) akumuliacinė zona, kur reljefo aukštis išaugo iki 50 cm, ir pietvakariuose (y315666, x6148852) reljefo aukštis išaugo iki 65 cm. Nepaisant to, kad buvo įrengiamos apsauginės priemonės, palyginus šios teritorijos reljefo modelius pastebtą, kad nuo kovo iki rugsėjo mėn., net 73 % viso ploto teritorijos reljefo aukštis sumažėjo. Didžiausi reljefo aukščio sumažėjimai pastebimi ties pietryčiuose esančiu šlaitu (y315593; x6148840). Šioje vietoje reljefo aukščiai sumažėjo, net iki 2 metrų. Tokio staigaus reljefo aukščio pasikeitimų priežastis yra erozija ir eolodinaminiai procesai.



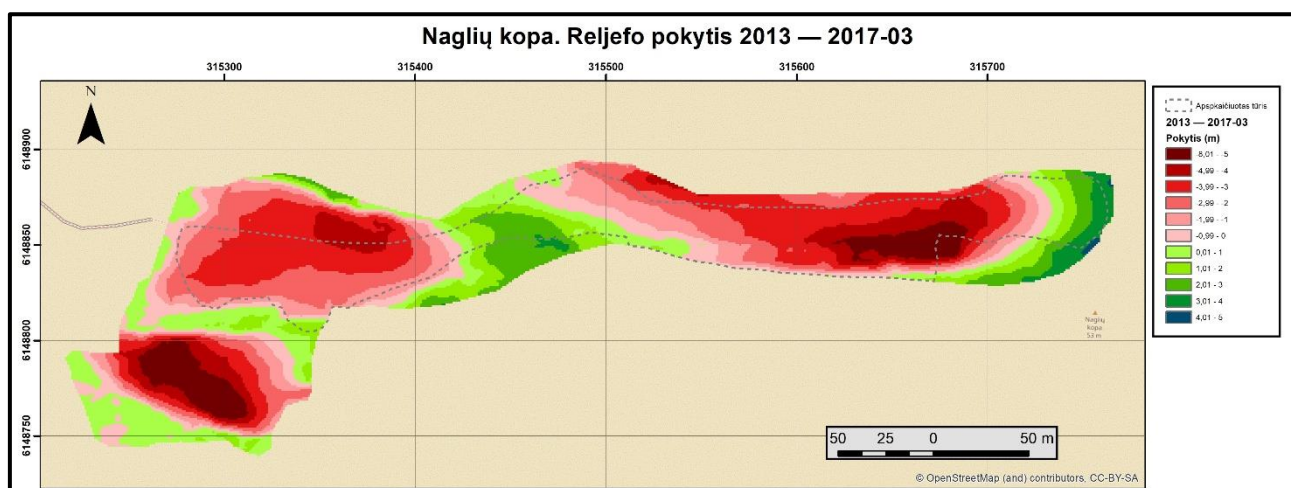
45 pav. Naglių kopos dinaminiai reljefo pokyčiai 2017-03 — 2017-09 laikotarpiu (Kaminskas, 2018)

Palyginus 2017 m. kovo ir rugsėjo mėnesių reljefo modelius, pastebėta, kad 22448 m² tirtame plote 73 % viso ploto pasižymėjo neigiama tendencija (46 pav.). Didžiausia dalis – 9221 m² pasižymėjo nedidele mažėjimo tendencija, kur plotas sumažėjo ne daugiau 0,24 cm. Didžiausi ekstremumai siekia daugiau, nei 1 m pokyčius. 561 m² plotas pasižymėjo neigiama tendencija (nuo -2,11 iki -1,0 m), didžiausia teigiama tendencija siekia, tik 56 m² plotas (reljefas išaugo nuo 1,0 iki 1,48 m.).



46 pav. Bendras reljefo pokytis tiriamoje Naglių kopos teritorijoje nuo 2017 m. kovo iki rugsėjo mėn. (Kaminskas, 2018)

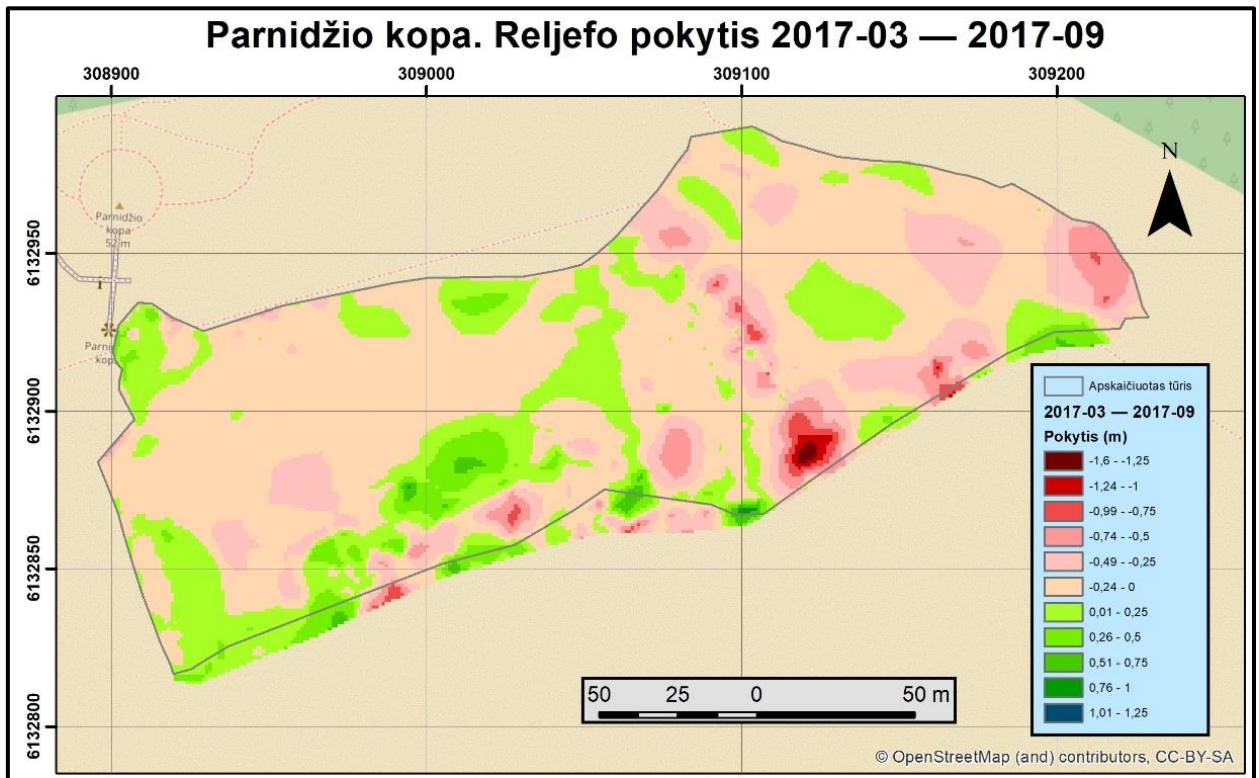
Panaudojus GIS galimybes ir sudarius 2013 m. ir 2017 m. reljefo pokyčių žemėlapius, atsiranda galimybė išskirti teritorijas kurios pasižymėjo neigiama reljefo pokyčių tendencija, bei ją įvertinti kiekybiškai. Pastebimos trys zonos pasižyminčios neigiamu reljefo pokyčiu (47 pav.). Pietrytinėje zonoje (y315280; x6148773) reljefo aukštis sumažėjo, net iki 6 metrų. Kitoje šiaurės rytuose esančioje zonoje reljefo aukštis sumažėjo iki 4,5 m. Trečiojoje zonoje vakaruose centrinėje – vakarinėje dalyje (y315670; x6148850) reljefas sumažėjo iki 6,5 m. Tačiau pastebimos ir akumuliacinės zonos. Dviejų tokių zonų padėtis sutampa su 2017 m. kovo – birželio mėnesių reljefo pokyčių žemėlapiu (45 pav.). Centrinėje dalyje esančioje akumuliacinėje zonoje reljefo aukštis išaugo iki 3 m (y315470; x61488520). Vakarinėje link iki 4 metrų (y315755; x6148851).



47 pav. Naglių kopos dinaminiai pokyčiai 2013 — 2017-03 laikotarpiu (Kaminskas, 2018)

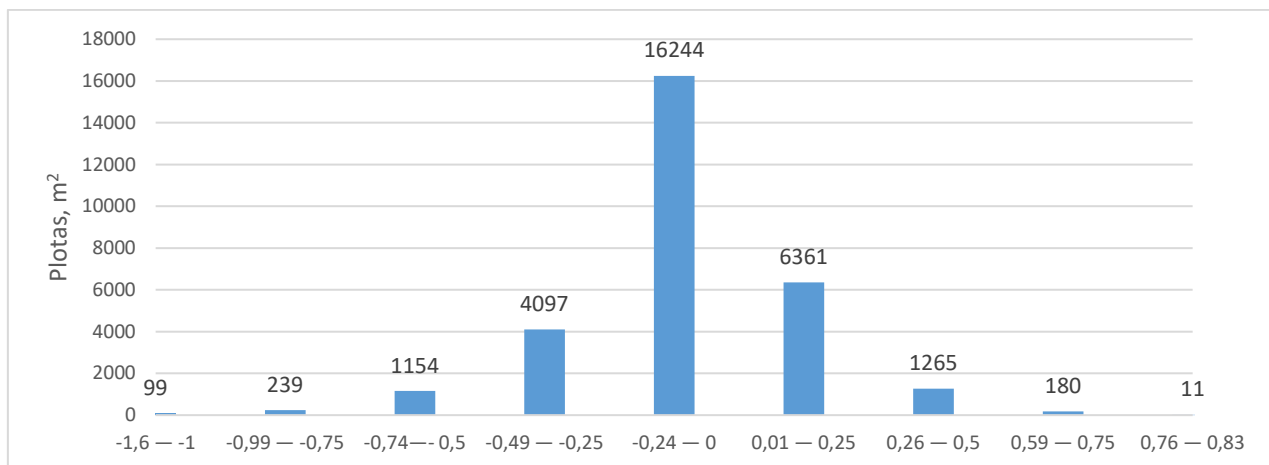
Bendras 2017 m. kovo – rugsėjo mėnesiais išmatuotos Parnidžio kopos plotas siekia 29650 m² (48 pav.). Iš viso šio ploto 73,6 % pasižymėjo neigiama tendencija. Išsiskiria pietryčiuose

esanti akumuliacinė zona (y308923; x6132848). Jos forma sutampa su apsauginių kuoliukų išsidėstymu, tad šios akumuliacinės zonos susiformavimo priežastis tikriausiai yra apsauginės priemonės. Taip pat išsiskiria neigiama reljefo aukščio pokyčio tendencija pasižyminti zona centrinėje dalyje (y309120; x6132886), nors šioje zonoje taip pat yra įrengtos apsauginės priemonės, bet jos nėra veiksmingos.



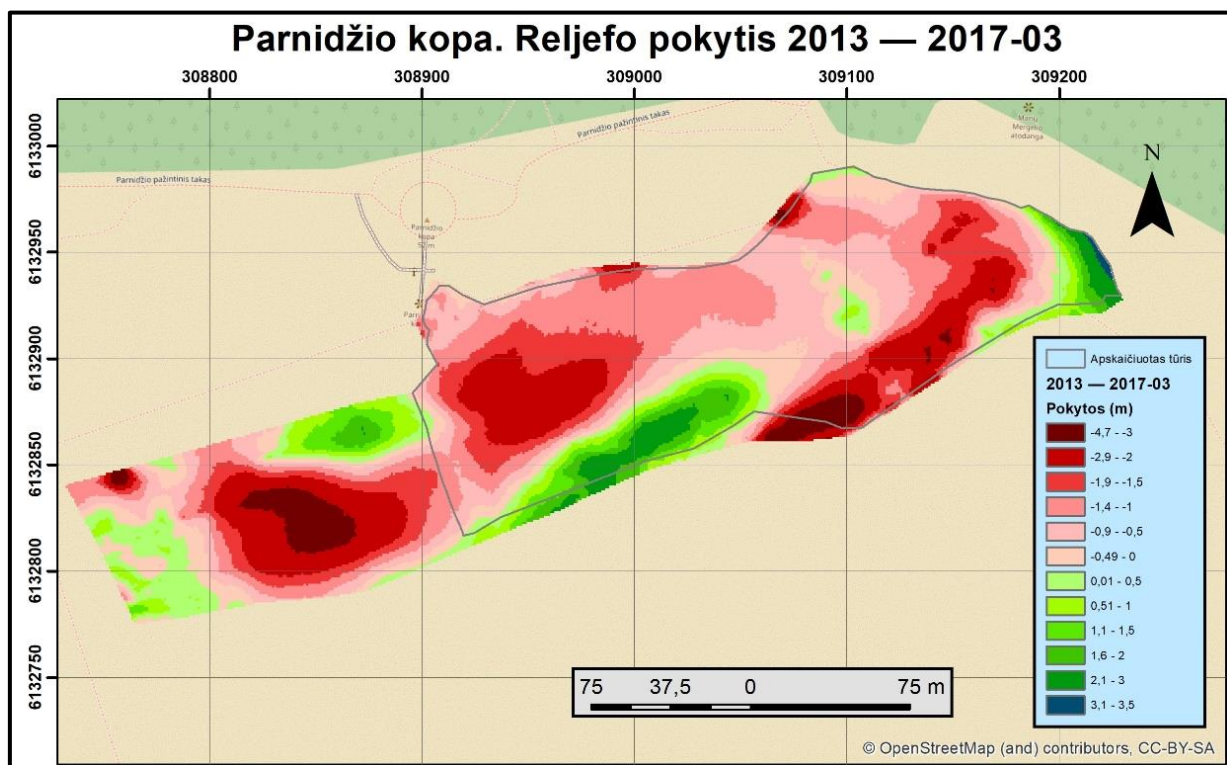
48 pav. Parnidžio kopos dinaminiai reljefo pokyčiai 2017-03 — 2017-09 laikotarpiu (Kaminskas, 2018)

Iš viso 29650 m² tirta Parnidžio kopos plotas, daugiau nei pusė 16244 m² pasižymėjo neigiama (-0,24 – 0) tendencija. 99 m² plotas pasižymėjo itin didelėmis neigiamais pokyčiais, kurie siekė nuo -1,6 iki -1,0 m. Tokių tendencijų, kuriose aukštis per analizuotą laikotarpį išaugtų, daugiau, nei 1,0 metras – nebuvo.



pav. 49 Bendras reljefo pokytis tiriamoje Parnidžio kopos teritorijoje nuo 2017 m. kovo iki rugsėjo mėn. (Kaminskas, 2018)

Ties Parnidžio kopa pastebimos trys didelės zonos pasižyminčios neigiamu reljefo pokyčiu per 2013 – 2017 m. laikotarpį. Pietryčiuose esančioje zonoje (y308835; x6132832) reljefo aukštis sumažėjo iki 3,7 m. Šiaurinėje – centrinėje dalyje esančioje netoli apžvalgos aikštelės (y308971, x6132878) reljefo aukštis sumažėjo iki 2,7 m. Taip pat didelė zona vakarinėje dalyje nusitęsusi šiaurės vakarų link. Reljefo aukštis sumažėjo, net iki 4,4 m. (y309073; x6132864). Vakarinėje dalyje susidariusioje akumuliacinė zonoje (y309220; x6132947) reljefo aukštis išaugo iki 4,4 m.

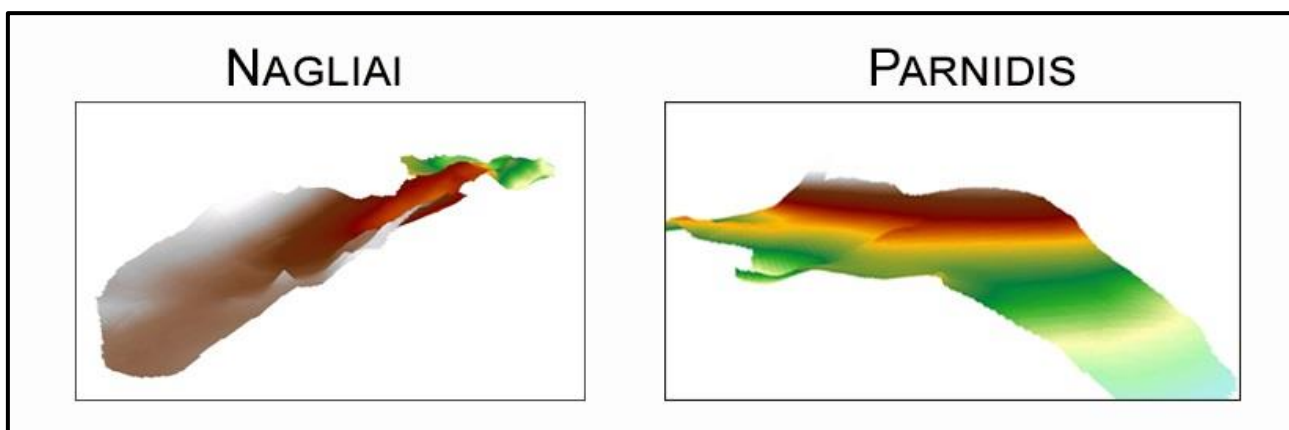


50 pav. Parnidžio kopos dinaminiai pokyčiai 2013 — 2017-03 laikotarpiu (Kaminskas, 2018)

3.5 3D modeliai

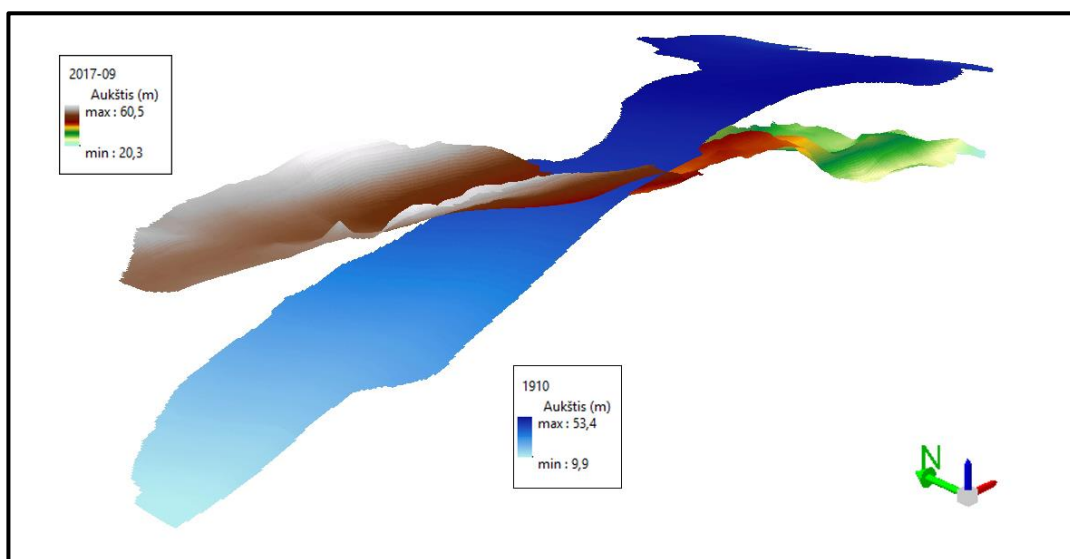
Panaudojant 3D galimybes buvo sudaryti tirtų teritorijų 3D Naglių ir Parnidžio reljefo modeliai:

1. Statiškas su pasirinktu kameros stebėjimo tašku (51 pav.)
2. Statiški skirtingų laikotarpių paviršiaus modeliai (52 pav.)
3. Animuoti persidengiantys modeliai su pasirinktu stabiliu kameros stebėjimo tašku (53 pav.)
4. Animuoti modeliai su dinaminio kameros stebėjimo tašku (54 pav.)



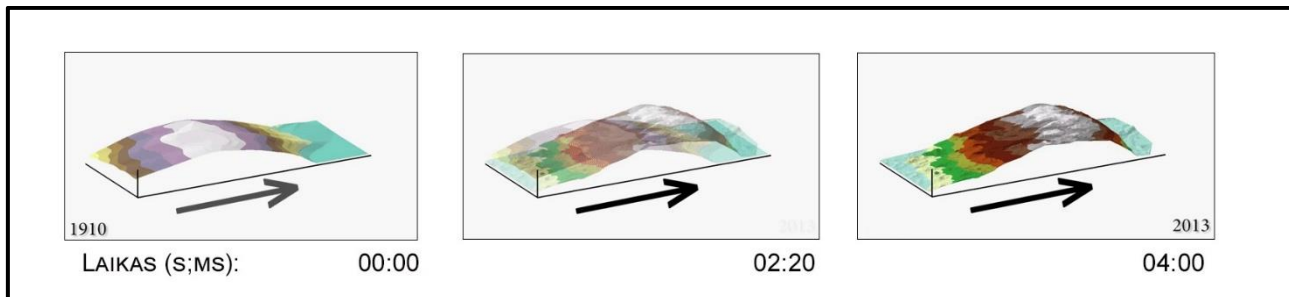
51 pav. Naglių ir Parnidžio kopų modeliai (Kaminskas, 2018)

Sukurti skirtingų laikotarpių (1910 ir 2017 m.) 3D modeliai perdengiami taip sudarant galimybę vizualiai palyginti kaip kopa pakito per analizuojamąjį laikotarpį.



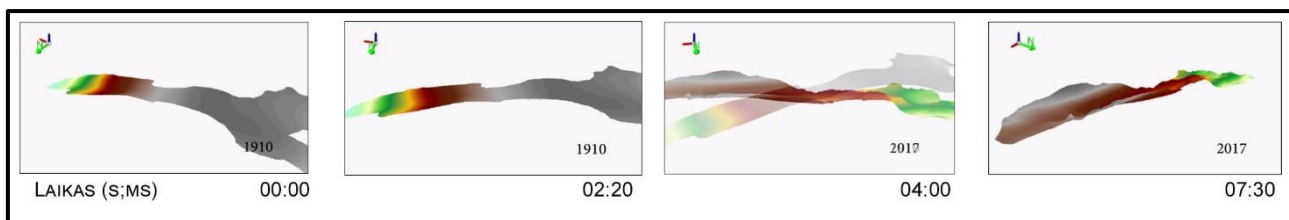
52 pav. Persidengiantys 1910 m. ir 2017 m. kovo mėn. Naglių kopos 3D modeliai (Kaminskas, 2018)

Taip pat panaudojus GIS vizualizavimo galimybes sudaryti kartografinės animacijos fragmentai, parodantys dinامينius pokyčius. Bendra kartografinės animacijos trukmė 2 minutės, iš kurių paimti trys kadrai (48 pav.) kurie akcentuoja Naglių kopos dinامينius pokyčius.



53 pav. Naglių kopos 3D modelio animuoto kartografinio modelio kadrai (Kaminskas, 2018)

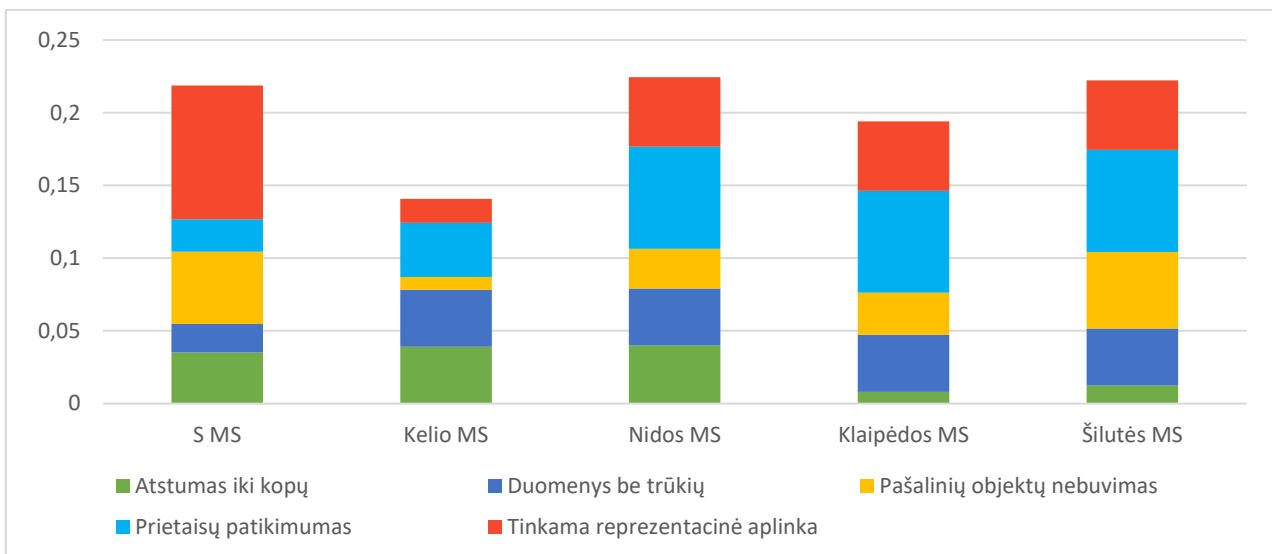
Norint sukurti žiūrovui labiau suvokiamą kopos dinامينių pokyčių vizualizaciją, galima atvaizduoti kopas ir keičiant stebėjimo tašką (nuo 0^0 iki 360^0). 49 pav. pateiktas 4 kadrų fragmentas parodantis kaip kopų dinamika yra atvaizduoti iš skirtingų stebėjimo taško kintant rakursui nuo 122^0 iki 247^0 .



54 pav. Naglių kopos 3D modelio animuoto kartografinio modelio kadrai (Kaminskas, 2018)

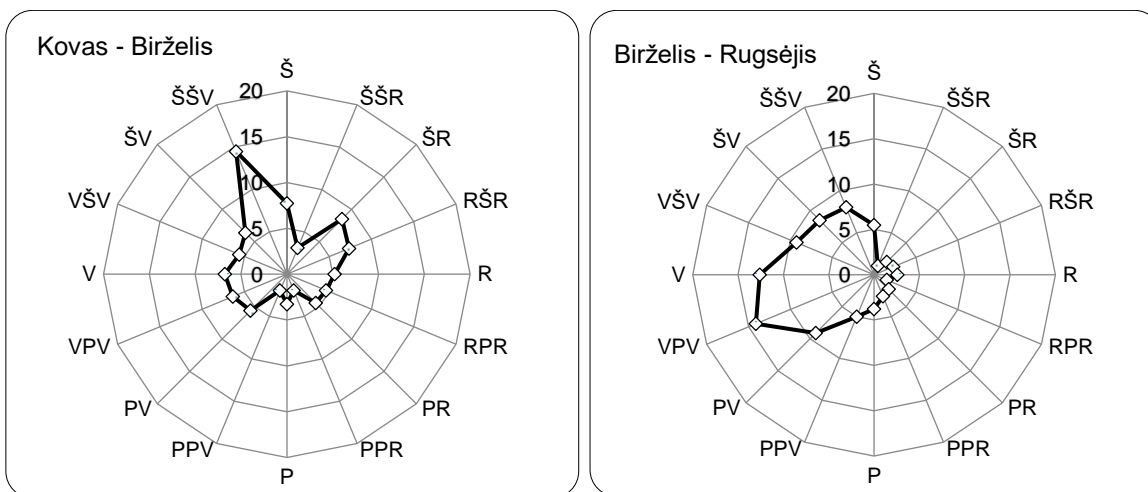
3.6 Meteorologinių veiksnių poveikis kopų dinamikai

Pagal pasirinktus kriterijų įverčius visos penkios meteorologijos stotys buvo įvertintos AHP metodu (55 pav.). Gauti rezultatai parodė, kad tinkamiausia yra Nidos meteorologijos stotis. Tai lėmė gerai įvertintas prietaisų patikimumas ir duomenų trūkių nebuvimas. Šilutės meteorologinė stotis įvertinta, kaip antra pagal tinkamumą. Sklandytojų kopos meteorologinė stotis taip pat pasižymėjo aukštomis reikšmėmis, tačiau dėl per tiriamąjį laikotarpį atsiradusių duomenų trūkių, šios meteorologinės stoties duomenų naudojimas buvo įvertintas prasčiau. Klaipėdos MS duomenys, pagal vertinimą yra ketvirtai, taip yra dėl to, kad Klaipėdos MS yra toli nutolusi nuo tiriamų objektų. Kelio MS įvertinta prasčiausiai, nors pati meteorologinė stotis ir yra netoli tiriamų objektų, tačiau dėl šalia esančių medžių ir kelio ši MS buvo įvertinta blogai.



55 pav. AHP metodo taikymo rezultatas (Kaminskas, 2018)

Pagal atliktos tinkamiausios meteorologinės stoties atrankos rezultatus buvo pasirinkta kurios MS duomenis bus panaudoti kaip papildomi duomenys šalia vertinant dinaminių pokyčių žemėlapių. Sudarytos vėjų rožės parodančios vėjo greitį ir kryptį vyrausią per matuojamą laikotarpį. Vėjų rožės sudarytos pagal Nidos MS duomenis.

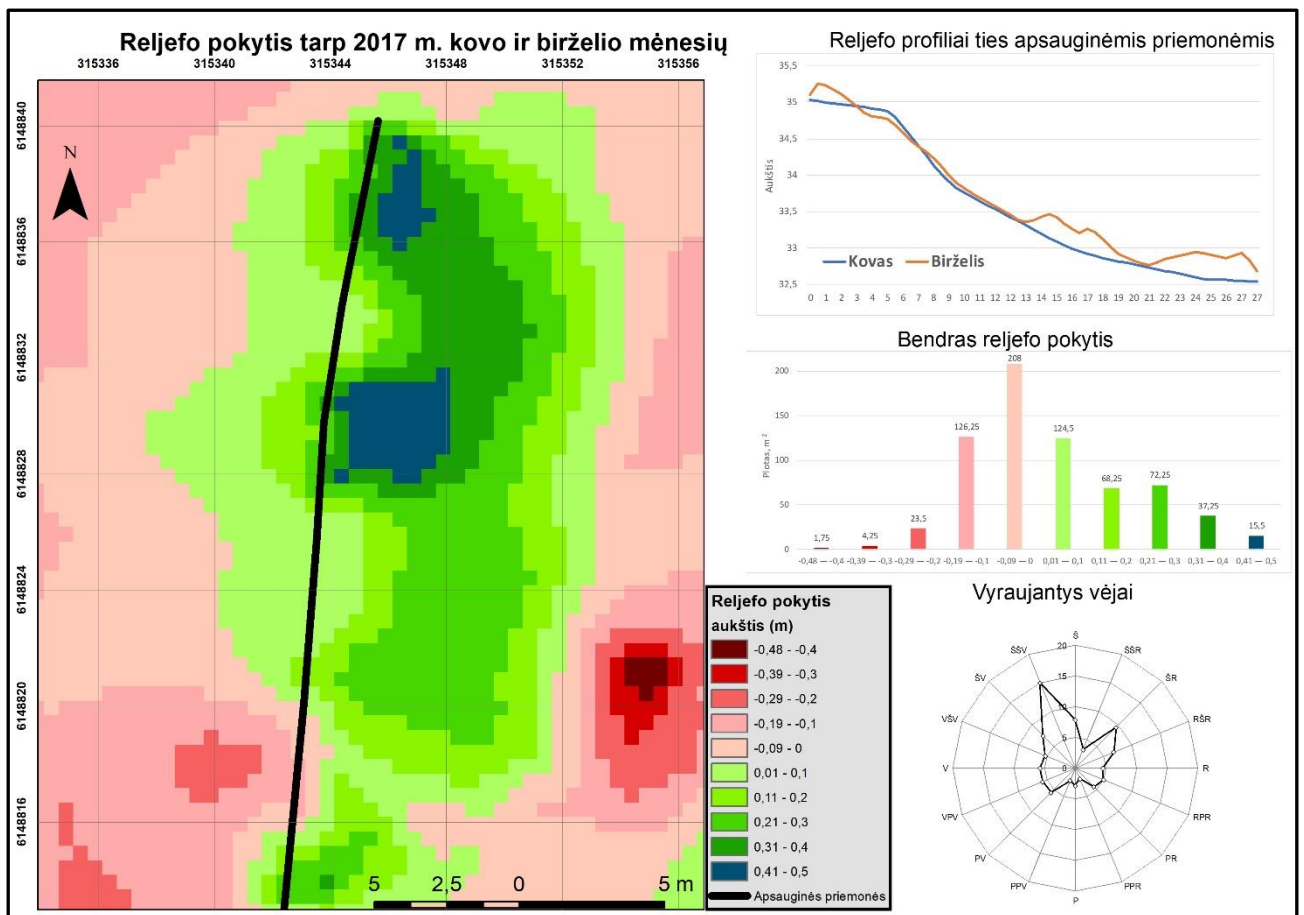


56 pav. Sudarytos vėjų rožės pagal Nidos MS (Kaminskas, 2018)

Pagal sudarytas vėjų rožes pastebima, kad didžiausi vėjai kovo–birželio laikotarpiu vyravo iš šiaurės šiaurės vakarų krypties. Nuo birželio iki rugsėjo dominavo vakarų vėjai.

3.7 Apsauginių priemonių poveikio kopų reljefui analizė

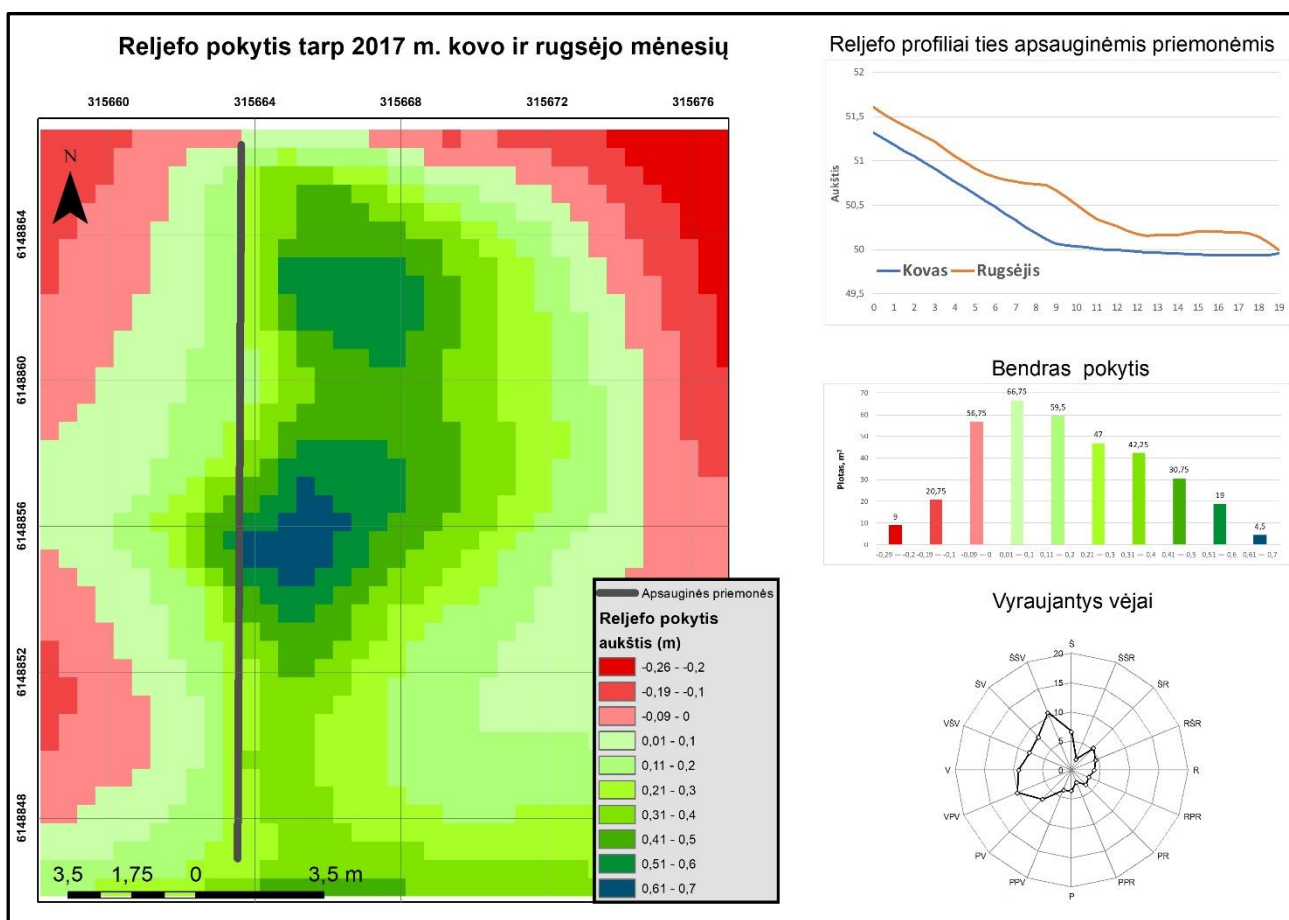
Pirmoji apsauginė priemonė Nagliuose yra 28 metrų ilgio medžių šakų tvora. Vertinant reljefo pokyčius buvo sudarytas 680 m² ploto reljefo pokyčių žemėlapis. Šis žemėlapis leidžia vizualiai pamatyti kur smėlis akumuliuosi. Ties šiaurės vakarine dalimi susiformavo didžiausia akumuliacinė zona, turinti dvi aukščio viršūnės. Per tris mėnesius ties šia vieta reljefo aukštis išaugo, net iki 40 cm. Tačiau periferinėse dalyse esančiose per nutolusiose iki 9 metrų nuo apsauginės priemonės, pastebima smėlio erozija. Sudarytas reljefo pjūvis parodo, kaip ties apsaugine tvora pakito smėlio reljefas. Didžiojoje profilio dalyje kopos aukštis išaugo. Iš viso per kovo – birželio laikotarpį, ties apsaugine priemone esančia teritorija 318 m² plote pastebima smėlio akumuliacija. Pastebėta (57 pav.), kad smėlio sankaupa kaupiasi vyraujančia vėjo kryptimi (ŠŠV). Tūriai skaičiuoti nuo žemiausios reljefo altitudės (31,60 m.). Bendras tūris išaugo nuo 1290 m³ iki 1345 m³.



57 pav. Apsauginių priemonių Nr. 1 vertinimas (Kaminskas, 2018)

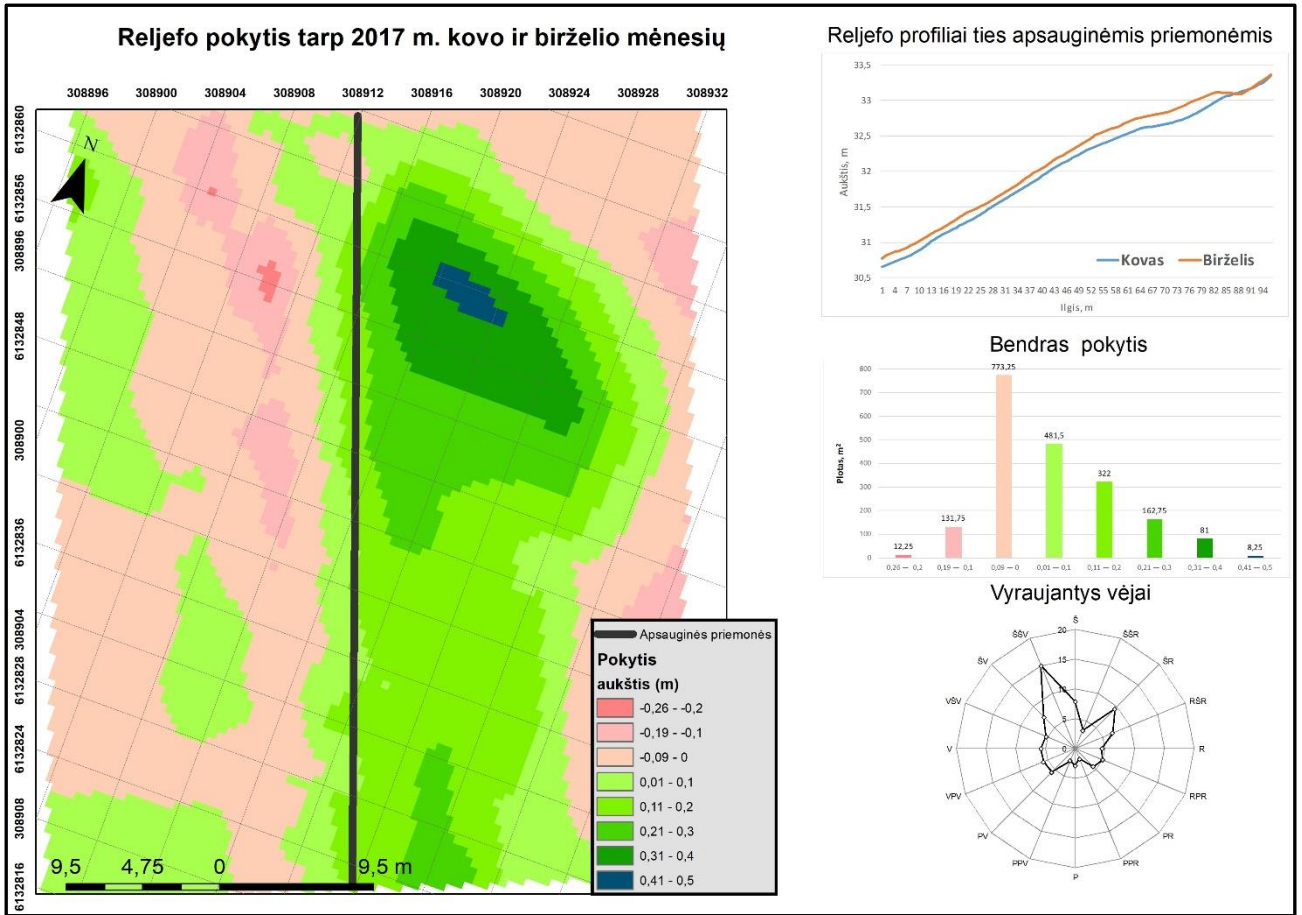
Antrosios apsauginės priemonės ilgis – 20 metrų (58 pav.). Sudarius 2017 m. kovo – rugsėjo mėn. pokyčių žemėlapi galima nustatyti, kad aplink apsauginę priemonę 356 m² plote, net 75% (270 m²) teritorijos pasižymėjo augančia reljefo aukščio tendencija. Centrinėje žemėlapi dalyje

pastebima didžiausia akumuliacinė zona, kurioje per analizuojamąjį laikotarpį reljefo aukštis išaugo, net iki 68 cm (y315664; x6148855). Bendrai reljefo pokytis kito nuo $-0,26$ iki $0,67$ cm. Sudarytas reljefo profilis, palei apsauginių priemonių eilę, parodo, kad visose profilio dalyse reljefo aukštis išaugo. Tūriai skaičiuoti nuo žemiausios reljefo altitudės ($49,60$ m.). Bendras tūris išaugo 58 m³. Kovą išmatuotas tūris siekė -337 m³ rugsėjį – 395 m³.



58 pav. Apsauginių priemonių vertinimas Nr. 2 (Kaminskas, 2018)

Vertinant apsauginių priemonių Nr. 3 poveikį reljefui Parnidžio kopose sudarytas žemėlapis, atvaizduojantis reljefo pokyčius, ties apsaugine priemone (59 pav.). Daugiau, nei pusė ($53,5$ %) viso aplink apsaugines priemones esančio ploto nuo kovo iki birželio mėnesio išaugo. 1972 m² ploto teritorijoje pastebėta, kad per analizuojamąjį laikotarpį 1056 m² teritorijos plotas pasižymėjo augančia reljefo aukščio tendencija. Reljefo aukštis išaugo iki $0,43$ cm aukščio (y308922, x6132859). Sudarytame reljefo profilių, ties apsaugine priemone priede pastebima, kad beveik visoje atkarpoje reljefo aukštis išaugo. Tūriai skaičiuoti nuo žemiausios reljefo altitudės ($29,21$ m.). Bendras tūris išaugo 103 m³. Kovą išmatuotas tūris siekė -5280 m³ rugsėjį – 5383 m³.



59 pav. Apsauginių priemonių vertinimas Nr. 3 (Kaminskas, 2018)

IŠVADOS

1. Atlikus literatūros apžvalgą pastebėta, jog daugelyje pasaulio šalių, kuriose yra susiformavusios kopos, vykdomi įvairūs kopų dinamikos ir stabilizavimo tyrimai vis plačiau taikant GIS technologijas, kurios palengvina sukauptų duomenų analizę. Apžvelgtuose literatūros šaltiniuose pabrėžiama (pvz, Levin N ir kiti, 2017), kad norint nustatyti kopų dinamikos tendencijas, būtini pastovūs ir ilgalaikiai (ne trumpesni, nei dešimties metų) tyrimai, todėl galima teigti, kad visapusiškam procesų vertinimui iki šiol atliktų tyrimų Kuršių nerijos kopose dar neužtenka.
2. Atliekant tiesioginius kartografinius matavimus duomenys buvo kaupiami nuo 2016 m gruodžio iki 2018 m. kovo. Iš viso sukaupta erdvinės informacijos, kuri apima 982 017 m² kopų paviršiaus plotą (Nagliai – 46 092 m², Parnidis 52 115 m²). Tūrių skaičiavimams panaudota, tik persidengianti teritorija Nagliuose – 15 1733 m², Parnidyje – 27 895 m². Vertinant reljefo pokyčius įvykusius praeityje Kuršių Nerijoje, būtina analizuoti ne tik paskutinių matavimų duomenis, bet ir duomenis sukauptus iš kitų šaltinių, todėl šiame darbe panaudoti LIDAR 2013 m. duomenys ir skaitmenizuotas 1910 m. topografinis žemėlapis, kuriame pateikta pakankamai detali informacija apie reljefą.
3. Panaudojant pasirinktus kartografinius modeliavimo metodus, sudaryti skirtingų laikotarpių 2D reljefo modeliai (18, 37 ir 38 pav.) ir reljefo profiliai charakteringose kopų vietose (22, 39, 40 pav.). Pokyčių tendencijos vizualizavimui panaudotas 3D modeliavimas, perdengiant įvairių laikotarpių paviršių sluoksnius (27, 52 pav.). Informatyviausias kopų reljefo pokyčių atvaizdavimo būdas yra reljefo dinaminis pokyčių žemėlapiai – (26, 45, 47 pav.), nes jie kiekybiškai parodo pokyčius vykstančius kiekviename kopų paviršiaus sudaryto modelio ląstelėje (angl. *cell*). Kompleksinis šių priemonių pateikimas padidina informatyvumą apie kartografuojamus kopų reljefo dinamikos procesus.
4. Atlikus duomenų analizę, panaudojant persidengiančios teritorijos paviršiaus modelius, apskaičiuotos skirtingų laikotarpių tūrių reikšmės, kurios leidžia kiekybiškai vertinti vykstančius pokyčius. Pastebėta, kad Naglių ir Parnidžio tirtuose plotuose būdinga kopų tūrio mažėjimo tendencija (42, 44 pav.). Apibendrinus atliktus tūrio skaičiavimus nustatyta, kad 2017 metais, Nagliuose nuo kovo iki rugsėjo vidutiniškai smėlio sumažėdavo 12,8 m³/dieną, o Parnidžio kopoje – 18,3 m³/dieną.
5. Pasirinktų metodų veiksmingumas buvo patikrintas vertinant apsauginių priemonių poveikį kopų dinamikai. Bendras analizuotas plotas vertinant apsaugines priemones ~3000 m². Pastebėta, kad smėlis akumuliuosisi 1643 m² plote, aplink analizuotas apsaugines priemones. Nagliuose ties apsaugine priemone Nr. 1 (34, 57 pav.) per 3 mėnesius tūris išaugo – 43 m³, ties Nr. 2 (34, 58 pav.) per 6 mėnesius – 58 m³. Parnidžio kopoje, ties apsaugine priemone Nr. 3 (35, 59 pav.) per 3 mėnesius išaugo – 103 m³.

6. Apibendrintus visus šiame darbe atliktus tyrimus galima teigti, kad pasirinkti kartografinio modeliavimo metodai, tinka ne tik didelių teritorijų analizei, bet ir lokalių reljefo formų kartografavimui. Panaudotos GIS technologijos praplečia kartografinio pritaikomumo galimybes, leidžia vertinti kopų dinamikos ir stabilizavimo procesus, nustatyti ir vizualizuoti erdvinius ryšius. Kitomis priemonėmis, tai atlikti būtų sudėtinga.

LITERATŪROS IR INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

Knygos:

- Bandžiulienė. R., Kazlauskas. R., Minkevičius. V. 1983. *Kuršių Nerija*. Vilnius: Mokslas.
- Bird. E. 2008. *Coastal geomorphology*. Chippenham: John Wiley & Sons.
- Chapman D.M., Geary. M., Roy. P.S, Thom. B.G., 1982. *Coastal evolution and coastal erosion in New South Wales*. New South Wales. ISBN 13: 9780724065820
- Čepulytė. V., 1957. *Lietuvos žemės paviršius*. Vilnius: Valstybinė politinės ir mokslinės literatūros leidykla.
- Česnulevičius. A., 2010. *Geomorfologija*. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla.
- Gudelis. V. 1998. *Lietuvos įjūris ir pajūris*. Vilnius: „Lietuvos mokslas“
- Holden. J. 2012. *An introduction to physical geography and the environment*. Pearson education limited.
- Hugget. R.J., 2007. *Fundamentals of geomorphology*. Abingdon:Routledge
- J. Pronckus, 1923m. Lietuvos Sachara – Kuršių užmaris. Klaipėda: Rytas
- Jarmalavičius. D., Minkevičius. V., Žilinskas. G., 2001. *Eoliniai procesai jūros krante*. Vilnius. Geografijos institutas.
- Kuršių Nerija, H. Kristapavičius, 1964 m., Gamtos apsaugos komitetas prie Lietuvos TSR Ministrų tarybos, Vilnius
- Lietuvos mokslų akademija. 2011. *Akademikas Vytautas Gudelis*. (Sudarė A. Grigelis). Klaipėdos universitetas. 366.
- Marsh. W.M., 1987. *Earthscapes: a physical geography*. New Yourk. ISBN 0471850551
- Saaty T. L., Peniwati K., 2008. *Group Decision Making: Drawing out and Reconciling Differences*. Pittsburgh, Pensnsylvania. RWS Publications. ISBN 978-1-888603-08-8
- Publikacijos straipsnių rinkiniuose ir periodiniuose leidiniuose:
- Anderson. R.S. ir Haff. P.K. *Simulation of eolian saltation*. Science
- Andrews B., Gares P.A., Colby J.D., 2002. *Techniques for GIS modelling of coastal dunes*. Elsevier.
- Chaundhar P., Chhetri S.K., Joshi K.M., Shrestha B.M., Kayastha P., 2015. *Application of an Analytic Hierarchy Process (AHP) in the GIS interface for suitable fire site selection: A case study from Kathmandu Metropolitan City, Nepal*. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2015.10.001>
- Česnulevičius. A., Izmailow. B., Morkūnaitė. R., 2006. *Defliacinių daubų dinamika Kuršių nerijos Didžiajame kopagūbryje*. Vilnius. Lietuvos mokslų akademijos leidykla.
- Jarmalavičius. D., Minkevičius. V., Žilinskas. G., 2001. *Eoliniai procesai jūros krante*. Vilnius. Geografijos institutas.
- Knutson P.L. ir Finkelstein K. 1987. *Environmental considerations for dune stabilization projects, technical report*. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Research Station.
- Levin N., Jablon P., Phinn S., Collins K., 2017. *Coastal dune activity and foredune formation on Moreton island, Australia, 1944–2015*. Elsevier:

Michaliukaitė, E., 1967. Kuršių nerijos krantų ir kopų dinamika per pastaruosius 100 metų. *Geografinis metraštis* 8. 97-117

Morkūnaitė, R., 2011. Investigation of coastal dunes of Lithuania in historical retrospective. *Báltica, Vol. 24, Special Issue II Geosciences in Lithuania: challenges and perspectives*. Vilnius. 143-146.

O'Connell Jim. 2008. *Coastal dune protection & restoration, using 'Cape' American Beach Grass and Fencing*. Woods hole sea Grant Program and Barnstable County's Cape Cod Cooperative Extension.

Paškauskas, S. ir Vekeriotienė, I. 2009. *Defliacijos eksperimentiniai tyrimai: kritinio vėjo greičio matavimai*. Vilnius. Geologijos ir geografijos institutas. ISSN 1822-6701

Rodriguez I., Montoya I., Sanchez M.J., Carreno F., *Geographic Information Systems applied to Integrated Coastal Zone Management*. Elsevier

Savage, R.P. ir Woodhouse, W.W. 1968, *Creation and stabilization of coastal barrier dunes*. <https://doi.org/10.9753/icce.v11.%25p>

Walker, H.J., 1988. *Artificial structures and shorelines*. Dordrecht: Kluwer.

Jonas Kaminskas

Kartografinių modeliavimo metodų taikymas vertinant Kuršių nerijos kopų dinamiką

Santrauka

Kuršių nerija pasižymi išskirtinai unikaliu kraštovaizdžiu. Kuršių nerijos kopos nuo 2000 m. yra įrašytos į UNESCO pasaulinio kultūros paveldo sąrašą. Ši teritorija Lietuvoje yra populiari turistų traukos vieta. Kasmet aplankyti kopų atvyksta tūkstančiai turistų. Deja dėl nevaržomo lankytojų srauto, bei dėl meteorologinių reiškinių sukeltų defliacijos procesų, Kuršių nerijos kopos pradėjo sparčiai nykti. Dėl sparčių dinaminių pokyčių kartografuoti kopas yra sudėtinga. Siaučiant audroms kopų forma gali ženkliai pasikeisti, net per itin trumpą lako tarpą.

Atlikus literatūros šaltinių analizę ir įvertinus įvairiuose šalyse (tame tarpe ir Lietuvoje) atliekamus mokslinius tyrimus susijusius su kopų dinamikos stebėjimais, bei išsaugojimo darbais daugelis autorių teigia, kad tokie tyrimai turėtų vykti ne trumpesniu, nei 10 metų laikotarpiu, kad būtų galima išskirti vyraujančias reljefo pokyčių tendencijas, vertinti apsauginių priemonių poveikį.

Pagrindinis magistrinio darbo tikslas – pritaikyti kartografinių modeliavimo metodus vertinant Kuršių Nerijos kopų dinamiką.

Šiame tyrime panaudoti ekspediciniai 2017 m. kovo – rugsėjo mėnesių duomenys, bei papildomi ankstesnių matavimų sukaupta kartografinė medžiaga (1910 m. topografinis žemėlapis ir 2013 m. LIDAR duomenys). Pasirinkta kartografinė projekcija – LKS94.

Kartografiniai modeliavimo metodai paremti geografinių informacinių sistemų technologijomis. Šiame darbe panaudojus GIS technologijas buvo parinkti metodai tinkantys išreikšti kopų reljefą ir jo dinaminius pokyčius sudarant reljefo: 2D žemėlapius, profilius, dinaminių pokyčių žemėlapius, 3D modelius, bei apskaičiuojant skirtingų laikotarpių tūrių reikšmes. Dalis atliktos analizės, dėl GIS galimybių buvo automatizuotos panaudojant „Model Builder“ įrankį.

Sukurti kartografinio modeliavimo metodai pritaikyti vertinant naujai 2017 m. įrengtų apsauginių kopų stabilizavimo priemonių poveikį reljefui. Sudaryti specialūs stambaus mastelio žemėlapiai su kartu pateikta aktualia kompleksine informacija – reljefo pokyčių žemėlapiu, bendru teritorijos pokyčių, reljefo profilio ties apsaugine priemone reikšmėmis ir meteorologine informacija.

Gauti rezultatai yra svarbūs Kuršių nerijos kopų stabilizavimo priemonių vertinimui, dinaminių pokyčių tendencijų vertinimui, bei kopų modeliavimo efektyvumo gerinimui.

Reikšminiai žodžiai: GIS, kartografija, Kuršių nerija, kopos, kopų dinamika, reljefo modelis

Jonas Kaminskas

Application of cartographic modelling methods in the evaluation of dynamics of the Curonian spit dunes

Summary

The Curonian spit distinguishes itself for its unique landscape. From 2000, the Curonian spit is in UNESCO world heritage list. This place is very popular among tourists. Every year thousands of people come to visit it. Unfortunately, because of many tourists and the deflation process caused by meteorological phenomena, sand dunes in the Curonian spit started to decrease rapidly. It is difficult to map dunes because of fast dynamical changes. Because of storms, the shape of dunes can change extremely even in a short period of time.

Scientists agree that it is necessary to continue monitoring the sand dunes surface for more than 10 years to get reliable conclusions of long-term periods. Then it will be possible to distinguish prevailed surface changes trends.

The main goal of this master thesis research is to apply cartographical modelling methods in the evaluation of dynamics of the Curonian spit dunes.

Expedition data of 2017 March – September and additional cartographical data of the earlier period (topographical map of 1910 and LIDAR data of 2013) were used in this research. Cartographical projection – LKS94.

Cartographical modelling methods are based on geographical information systems technologies. The relief of sand dunes is represented by 2D maps, topographic profiles, maps of dynamics, 3D models and the evaluation of the surface volume in different periods of time. “Model builder” was used to automate and document spatial analysis and data management processes.

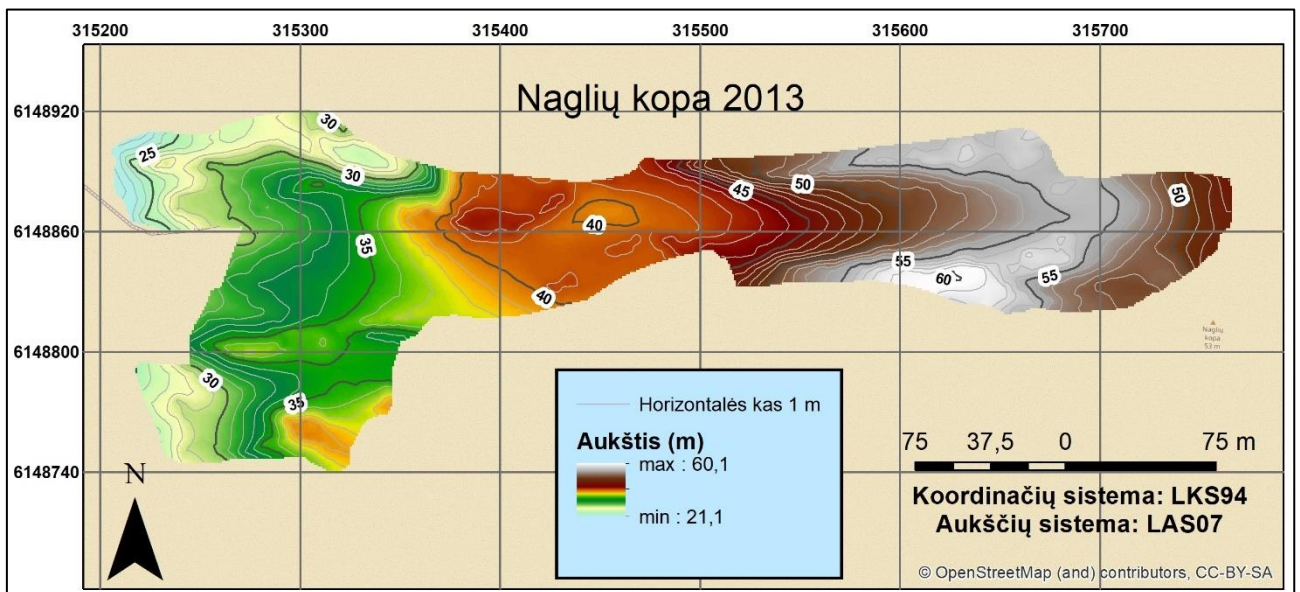
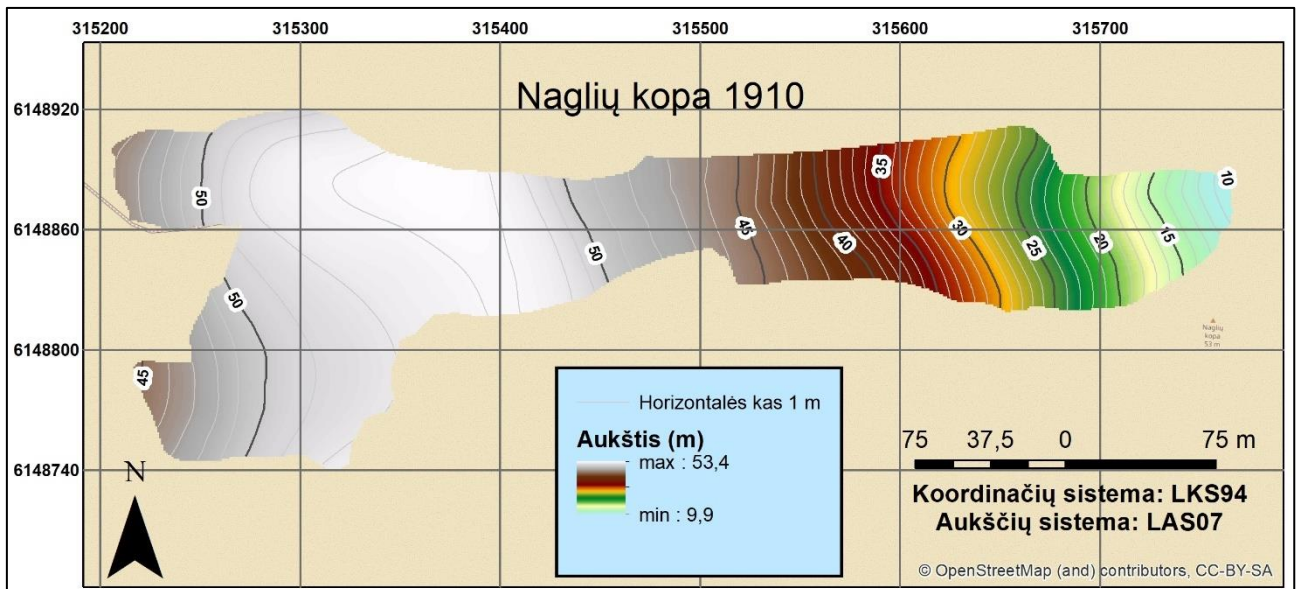
The cartographic modelling was applied to estimate the impact of fencing in surface dynamical changes. Created maps shows the complex information of dynamical changes of the surface, the profile near the fencing area and the meteorological information – wind direction.

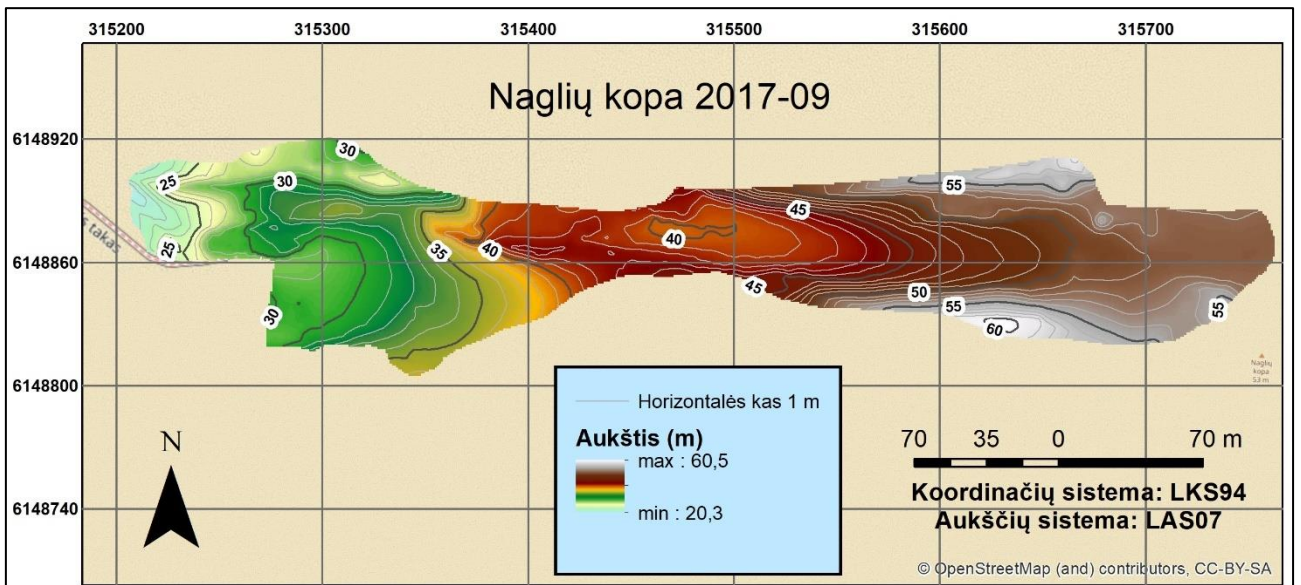
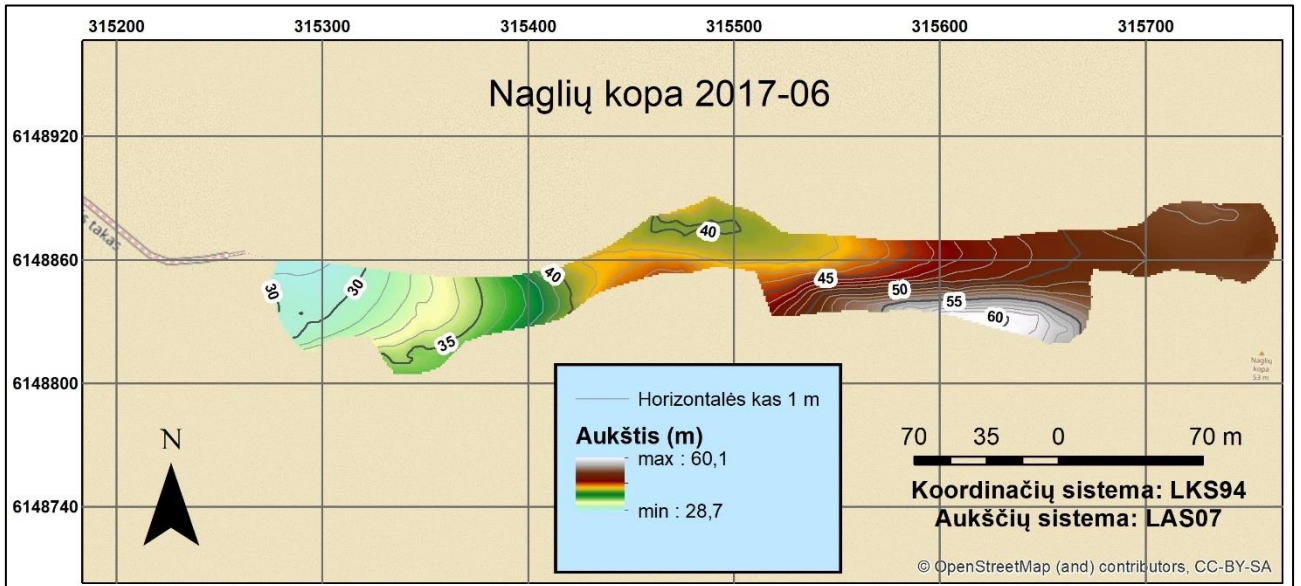
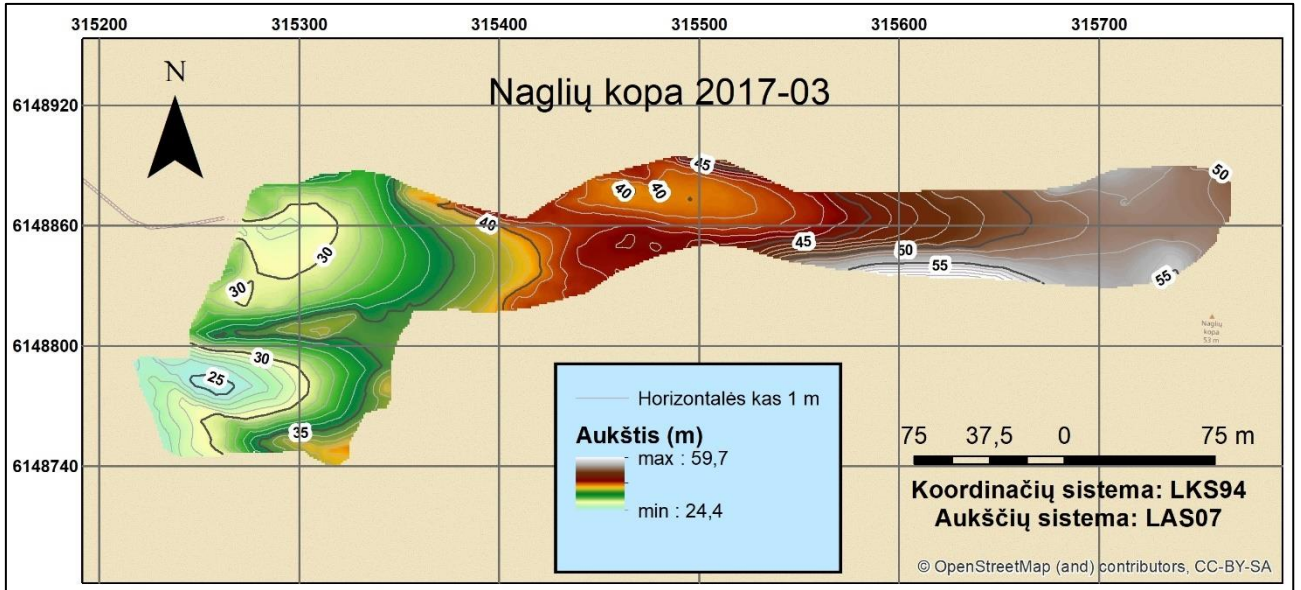
The results are import to estimate the fencing impact to the surface in the Curonian spit dunes, to estimate dynamical changes trends and to improve the modelling of sand dunes.

Key words: GIS, cartography, Curonian spit, dunes, dynamical changes of dunes, surface model

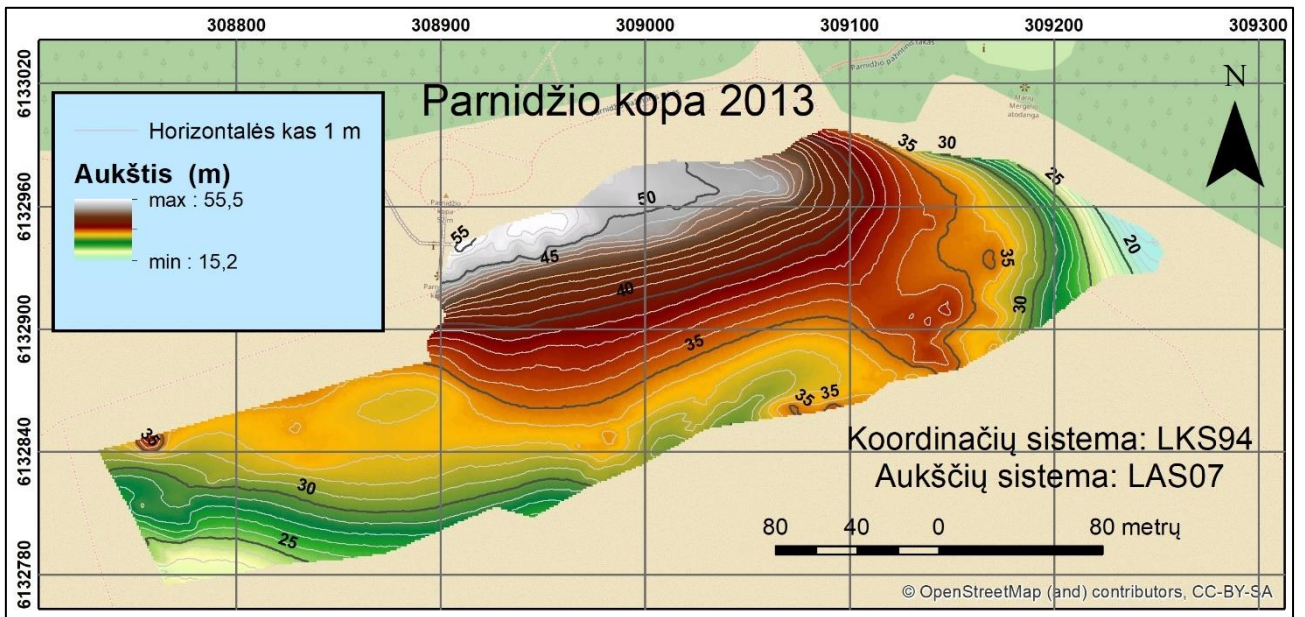
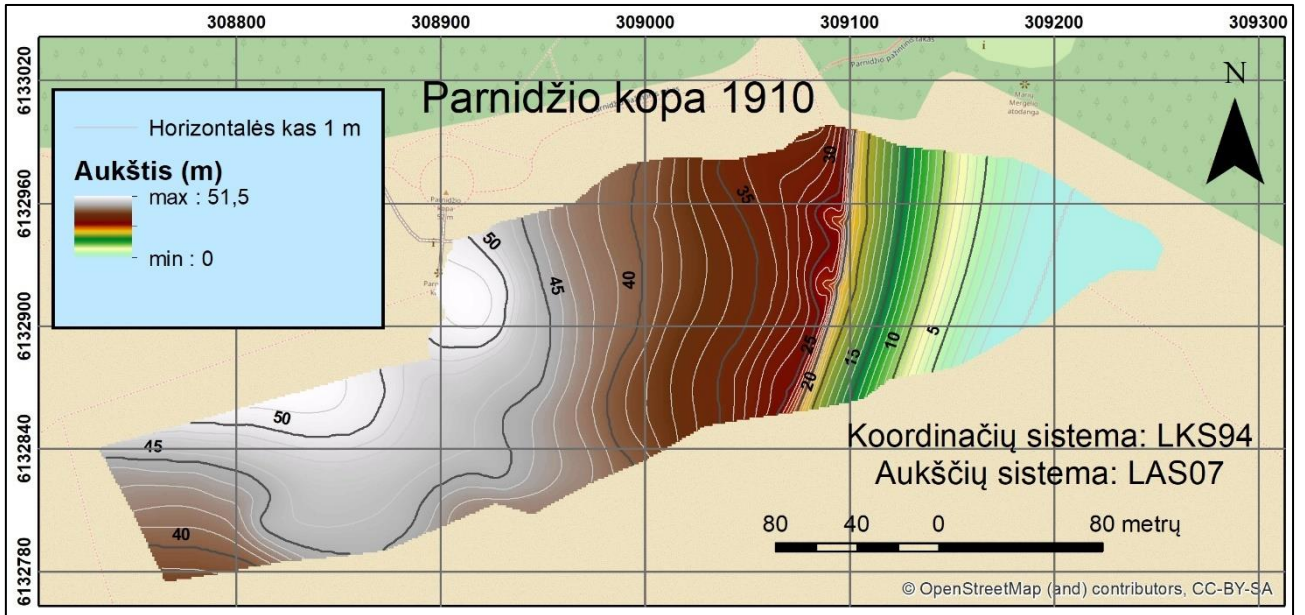
PRIEDAI

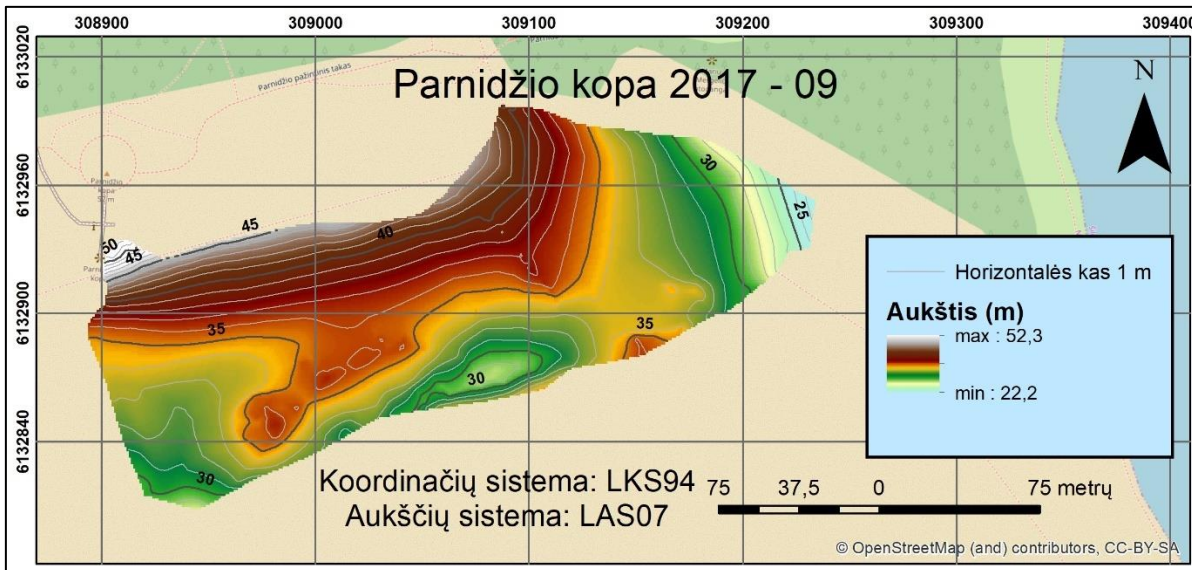
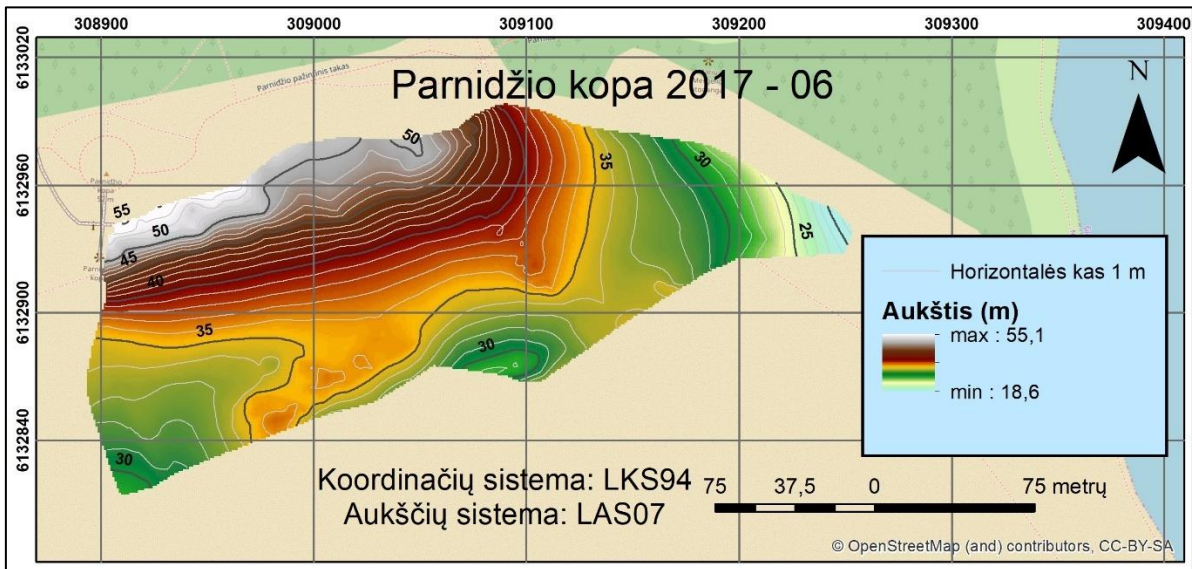
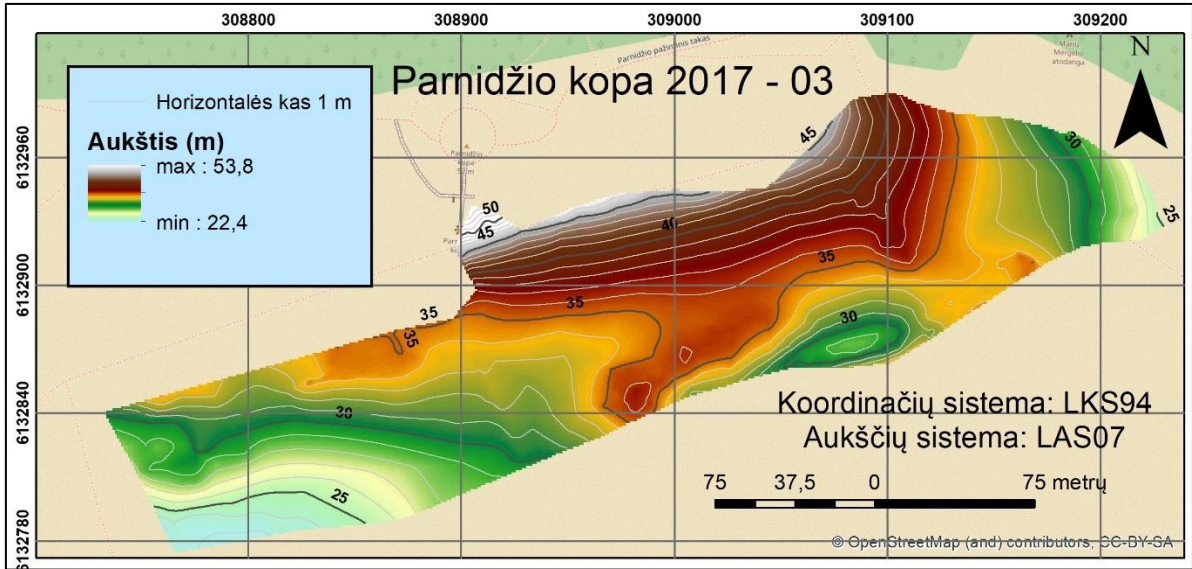
1 priedas.





2 Priedas.





BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO VERTINIMO LAPAS

Darbo autorius:
(parašas) (vardas, pavardė)

Mokslinis darbo
vadovas:
(mokslinis laipsnis, mokslinis vardas, vardas, pavardė)
(parašas)

Recenzentas:
(mokslinis laipsnis, mokslinis vardas, vardas, pavardė) (parašas)

Kartografijos ir geoinformatikos
katedros vadovas:
(mokslinis laipsnis, mokslinis vardas, vardas, pavardė) (parašas)

Darbo gynimo data:

Darbo įvertinimas:
(balas skaičiumi, balas raštu)

Baigiamųjų darbų gynimo
komisijos pirmininkas:
(mokslinis laipsnis, mokslinis vardas, vardas, pavardė) (parašas)

Baigiamųjų darbų gynimo
komisijos sekretorius:
(parašas) (vardas, pavardė)



Vilniaus universitetas
Chemijos ir geomokslų fakultetas
Kartografijos ir geoinformatikos katedra

BAIGIAMOJO DARBO KONTROLINIS LAPAS

1. Baigiamąjį magistro darbą tema

.....
.....
.....

parengiau

Darbo autorius:.....

.....

(vardas, pavardė)

(parašas)

2. Darbą rekomenduoju/nerekomenduoju ginti

Darbo vadovas:.....

.....

(mokslinis laipsnis, mokslinis vardas, vardas, pavardė)

(parašas)

Katedros vedėjas:.....

.....

(mokslinis laipsnis, mokslinis vardas, vardas, pavardė)

(parašas)