



**VILNIAUS UNIVERSITETAS  
CHEMIJOS IR GEOMOKSLŲ FAKULTETAS  
KARTOGRAFIJOS IR GEOINFORMATIKOS KATEDRA**

**Irmina Kaminskaitė**

**LiDAR TAIKYMO ARCHEOLOGINIUIOSE TYRIMUOSE METODINĖ  
ANALIZĖ IR OPTIMIZAVIMAS**

**METHODICAL ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF LIDAR  
APPLICATION IN ARCHAEOLOGICAL RESEARCH**

**Baigiamasis magistro darbas**

**Studijų programa – Kartografija**

**Vadovas: lekt. dr. L. Bevainis**

**Vilnius 2018**

**Kaminskaitė I.** LiDAR taikymo archeologiniuose tyrimuose metodinė analizė ir optimizavimas. Magistro darbas. Vilnius: VU. 2018.

**Anotacija.** LiDAR duomenų vizualizacijos metodų analizė gali padėti atskleisti informatyvesnius ir vizualesnius archeologinių objektų atskleidimo metodus. Šio darbo tikslas - išanalizuoti LIDAR duomenų apdorojimo metodus archeologinių objektų nustatymui ir parengti rekomendacijas. Šiam tikslui pasiekti keliami uždaviniai: išnagrinėti LiDAR duomenų apdorojimo ir parengimo archeologinių objektų analizei procesus; išnagrinėti archeologijoje taikomus LiDAR duomenų vizualizacijos metodus; įvertinti LiDAR duomenų taikymo galimybes archeologiniams objektams nustatyti Lietuvoje; parengti rekomendacijas LiDAR duomenų taikymo archeologiniuose tyrimuose optimizavimui. Darbe analizuojami LiDAR duomenų vizualizacijos metodai siekiant įvertinti Melno taikos sutartimi nustatytos LDK valstybinės sienos identifikavimo galimybes ir nustatyti vizualizacijos metodų informatyvumą. Darbe naudoti keturi LiDAR duomenų vizualizacijos metodai (įprastas Reljefo šešėlinimas, Šveicariškas reljefo šešėlinimas, Daugiakryptis reljefo šešėlinimas, Vietinis reljefo modeliavimas). Atlikus šių metodų analizę nustatyta, kad vizualizacijos metodų informatyvumas skiriasi. Tam turi įtakos archeologinio objekto dydis, jo forma ir objektą supančio reljefo forma. Kiekvienas kraštovaizdis ir archeologinė vietovė turi unikalių savybių, tad nėra vieno vizualizacijos metodo tinkamo visiems atvejams. Todėl, priklausomai nuo tyrimų masto ir tikslo, patariama taikyti ne mažiau kaip du skirtingus LiDAR duomenų vizualizacijos metodus informatyvesniam archeologinių objektų atskleidimui.

Tekstas 50 psl., priedai 4 psl., 30 pav., 2 lentelės. Santrauka lietuvių ir anglų kalbomis.

**Reikšminiai žodžiai:** LiDAR, Archeologija, Reljefo šešėlinimas, Šveicariškas reljefo šešėlinimas, Daugiakryptis reljefo šešėlinimas, Vietinis reljefo modeliavimas.

## TURINYS

Anotacija	
IVADAS	4
1. TYRIMŲ APŽVALGA	6
1.1. LiDAR reikšmė archeologijoje	6
1.2. LiDAR taikymas archeologiniuose tyrimuose užsienyje	9
1.3. LiDAR taikymas Lietuvos archeologijoje	13
2. LiDAR DUOMENŲ VIZUALIZAVIMO METODAI	18
2.1. Klasikiniai vizualizavimo metodai	18
2.1.1. Reljefo šešėlinimas	18
2.1.2. Šlaitų analizė	20
2.1.3. Spalvinis vaizdavimas	20
2.2. Šiuolaikiniai vizualizavimo metodai	21
2.2.1. Dangaus matomumo faktorius	21
2.2.2. Atvirumas	22
2.2.3. Vietinis reljefo modeliavimas	23
3. DARBO METODIKA	24
3.1. Naudojami duomenys	25
3.2. LiDAR duomenų apdorojimas	27
3.2.1. Reljefo šešėlinimo modeliai	28
3.2.2. Vietinis reljefo modelis	30
4. REZULTATAI	32
4.1. Vizualizavimo metodų analizė	32
4.1.1. Pagal archeologinių objektų formą	32
4.1.2. Pagal reljefo formas	35
5. Rekomendacijos	38
Išvados	40
ŠALTINIŲ IR LITERATŪROS SĄRAŠAS	42
SANTRAUKA LIETUVIŲ KALBA	49
SANTRAUKA ANGLŲ KALBA	50
PRIEDAI	51
LiDAR duomenų vizualizacijos metodų taikymo archeologiniuose tyrimuose suvestinė lentelė	51
Naujai aptiktos Melno sutartimi nustatytos LDK sienos struktūros	53
Jono Vladislovo Suchodolec Prūsijos karalystės žemėlapis, I lapas (1732)	54

## IVADAS

XX – XXI a. pastebima sparti mokslo pažanga, kurios dėka išsivystę technologiniai pasiekimai suteikia naujos informacijos ir įgalina naujus tyrimų metodus daugelyje mokslo sričių. Archeologija šiuo atveju ne išimtis, kadangi tokios technologijos kaip aerofotografija, globaliosios padėties nustatymo sistemos (GPS), geografinės informacinės sistemos (GIS) ar įvairūs preciziškai tikslūs geodeziniai matavimo prietaisai iš esmės pakeitė kultūros paveldo tyrimus atverdami naujas galimybes praeities visuomenių palikimui nagrinėti. Viena iš tokių technologijų yra Žemės paviršiaus lazerinio skenavimo metodas (LiDAR) (*angl. Light Detection and Ranging*).

LiDAR technologija ypatinga tuo, jog informaciją apie erdvinį žemės paviršių galima kaupti nuotoliniu būdu. Lazerinio spindulio impulsais apšviečiamas objektas, sensoriumi matuojamas atspindys ir tokiu būdu skaitmeninėje erdvėje kuriamas objekto atvaizdas. Apdorojus gautus duomenis paruošiamas tiriamo objekto skaitmeninis reljefo modelis. Būtent specifiniai reljefo požymiai dažnai padeda identifikuoti archeologinius objektus. Tad LiDAR technologija yra ypatingai aktuali šios kultūros paveldo rūšies tyrimuose, kadangi suteikia galimybę nuotoliniu būdu pastebėti palaidotų archeologinių liekanų sukeltus žemės paviršiaus pokyčius, kai tuo tarpu įprasti archeologiniai žvalgymai dažnai reikalauja didelių laiko sąnaudų. Išskirtini šie pagrindiniai LiDAR technologijos suteikiami privalumai archeologinių objektų tyrimuose:

- **Prieinamumas.** Taikant LiDAR duomenis galima sukaupti tikslią informaciją apie reljefą vietovėse, kuriose archeologinės liekanos prastai išlikusios ar sunkiai išvelgiamos žemės paviršiuje, taip pat didelėse ar sunkiai prieinamose miškingų vietovių teritorijose.
- **Ekonomiškumas.** Lazerinis skenavimas palengvina objektų atpažinimą, sumažina darbų vietovėje trukmę, todėl yra itin efektyvus laiko ir finansinių sąnaudų atžvilgiu.
- **Tikslumas.** LiDAR sistemos komponentų dėka atliekant skenavimą gaunamas labai tikslus ir tankus taškų debesis, atitinkantis žemės paviršių.
- **Patogumas.** Duomenų kaupimas atliekant lazerinį skenavimą labai efektyvus būdas, kadangi gali būti atliekamas virš vietovių iš orlaivio, tad šis metodas labai patogus kultūros paveldo objektams inventorizuoti bei techninei dokumentacijai rengti.
- **Vizualumas.** Galimybė konvertuoti taškų debesį į įvairių tipų rastrinius vaizdus padeda sukurti tikrovišką žemės paviršiaus vaizdą.

*Temos aktualumas.* Atsižvelgiant į žemės paviršiaus lazerinio skenavimo technologijos privalumus akivaizdu, jog šis nuotolinių tyrimų metodas archeologijoje yra itin perspektyvus, todėl

išsamesnė analizė gali padėti atskleisti informatyvesnius ir vizualesnius archeologinių objektų atskleidimo metodus.

*Problema.* Archeologijos žinios apie praeitį yra kaupiamos remiantis kraštovaizdyje sukauptais empiriniais antropogeninės veiklos įrodymais. Šių įrodymų svarba skatina tyrėjus ieškoti įvairių naujų metodų jų atskleidimui, tačiau praeities bendruomenių veiklos pėdsakai skirtinguose kraštovaizdžiuose gali pasireikšti skirtingomis formomis. Tad svarbu išsiaiškinti kaip LiDAR metodas gali būti panaudojamas kuo informatyvesniam archeologinių duomenų atskleidimui.

Šio *darbo tikslas* - išanalizuoti LiDAR duomenų apdorojimo metodus archeologinių objektų nustatymui ir parengti rekomendacijas. Šiam tikslui pasiekti keliami *uždaviniai*:

- 1) išnagrinėti LiDAR duomenų apdorojimo ir parengimo archeologinių objektų analizei procesus;
- 2) išnagrinėti archeologijoje taikomus LiDAR duomenų vizualizacijos metodus;
- 3) įvertinti LiDAR duomenų taikymo galimybes archeologiniams objektams nustatyti Lietuvoje;
- 4) parengti rekomendacijas LiDAR duomenų taikymo archeologiniuose tyrimuose optimizavimui.

*Darbo naujumas.* Nekilnojamojo kultūros paveldo specialistai Lietuvoje jau yra susipažinę su LiDAR technologijomis ir taiko jas savo tyrimuose, tačiau tai daugiausiai pavienės iniciatyvos ir mokslinėje literatūroje vis dar jaučiamas išsamesnės metodinės analizės trūkumas.

*Darbo pritaikomumas.* Įvertinus LiDAR duomenų taikymo galimybes archeologinių objektų nustatymui Lietuvoje ir išanalizavus vizualizacijos metodus šio darbo rezultatai gali būti plačiai pritaikomi įvairiems archeologiniams objektams analizuoti. Tad šis darbas gali paskatinti efektyvesnių ir ekonomiškesnių archeologinių tyrimų projektų rengimą pasitelkiant kartografinius metodus.

*Darbo struktūra.* Magistro baigiamąjį darbą sudaro įvadas, tyrimų apžvalga, vizualizavimo metodų apžvalga, darbo metodika, rezultatai, analizės pagrindu suformuluotos rekomendacijos ir išvados. Pabaigoje pateikiamas naudotos literatūros sąrašas, santrauka lietuvių ir anglų kalbomis. Iš viso darbe pateikiamos 2 lentelės, 30 paveikslėlių bei 3 priedai.

Nuoširdžiai dėkoju magistrinio darbo vadovui lekt. dr. L. Bevainiui už pagalbą rengiant šį darbą bei idėjos palaikymą siekiant galutinio rezultato.

# 1. TYRIMŲ APŽVALGA

## 1.1. LiDAR reikšmė archeologijoje

Pastaraisiais metais skaitmeniniai reljefo modeliai (SRM) sudaryti orlaivių LiDAR gautų duomenų pagrindu, tapo vienu pagrindinių duomenų šaltiniu archeologinių vietų žvalgymui, žemėlapių sudarymui ir stebėjimui.

Istoriškai aerofotografija buvo pirmasis nuotolinių tyrimų metodas panaudotas archeologinių liekanų paieškai žemės paviršiuje. Tačiau šis metodas turi tam tikrų apribojimų, kadangi mikroreljefo matomumas priklauso nuo daugelio veiksnių, pvz., surinktų aerofotografijų peržiūros kampo, gavimo laiko, saulės apšvietimo kampo, žemės paviršiaus charakteristikos ar augmenijos (Masini ir kt., 2011). Nors šiuolaikinės LiDAR technologijos pirmieji bandymai siejami su XX a. šeštajame dešimtmetyje JAV pasirodžiusia karine įranga, tačiau prieš sukuriant palydovinės padėties nustatymo sistemas, orlaivių lazerinis skenavimas nebuvo plačiai pritaikomas. Tik nuo XX a. dešimtojo dešimtmečio vidurio GPS (*angl. Global Positioning System*) atsiradimo kartu su IMU (*angl. Inertial Measurement Unit*) plėtra, LiDAR atvėrė naujas galimybes daugelyje sričių, taipogi ir archeologijoje (Crutchley, Crow, 2010). Atsiradus lazerinio skenavimo galimybei surinkti tikslius duomenis apie žemės paviršių iš orlaivio, LiDAR metodas įgavo didžiulį pranašumą prieš iki tol naudotus tradicinius metodus. Nuo to laiko lazerinio skenavimo technologijų naudojimas smarkiai išaugo, o pastaruoju metu LiDAR atlieka svarbų vaidmenį daugelyje pasaulio šalių vykdomų mokslinių tyrimų. Archeologiniuose tyrimuose naudojami keli skirtingi LiDAR tipai:

- 1) orlaivio LiDAR (*angl. airborne LiDAR*), kad ištirtų žemės paviršių ir ant jo esančius objektus;
- 2) antžeminį LiDAR (*angl. terrestrial LiDAR*), kad gautų detalų objektų požymių nuskaitymą;
- 3) batimetrinį LiDAR (*angl. bathymetric LiDAR*), kuriuo gaunama informacija apie objektus, esančius po vandeniu;
- 4) mobilų LiDAR (*angl. Mobile LiDAR*), kuriuo duomenys gali būti surenkami labai greitai tiesiai iš tyrimų vietos.

**Orlaivio LiDAR** (*angl. Light Detection And Ranging, Airborne Laser Scanning (ALS)*) archeologijoje naudojama plačiausiai. Tai aktyvi nuotolinių tyrimų technologija, kai žemės

paviršius nuskenuojamas iš orlaivio platformos (dažniausiai lėktuvo ar sraigasparnio) didelės spartos lazerio spindulio siunčiamais impulsais. Ši lazerio spinduliuotė atsispindi nuo žemės paviršiaus ar augmenijos dangos, o atstumas tarp siųstuvo ir atsispindėjusios dangos nustatomas pagal lazerio signalo skrydžio laiką. Ši technologija kartu su GPS/IMU sistemų kombinacija bei lazerio spindulio kampo fiksavimu leidžia sukurti aukštos kokybės skaitmeninius kraštovaizdžio modelius (Wehr, Lohr, 1999) ir yra sėkmingai pritaikyta tirti istoriniams kraštovaizdžiams visame pasaulyje. Paprastai fiksuojami pirmojo ir paskutinio atspindžio impulsai, tačiau pastaraisiais metais išpopuliarėjo pilnosios bangos (angl. Fullwave) skaitytuvai, registruojantys kur kas daugiau atspindžių ir skaitmeninantys kiekvieno impulso pilną bangos formą. Tokiu būdu galima pagerinti reljefo ir vietovių objektų, pvz., žemos augmenijos, pastatų ir kitų dirbtinių konstrukcijų, esančių ant žemės paviršiaus, klasifikaciją (Doneus ir kt., 2008).

Šiuo metu dauguma paskelbtų tyrimų yra skirti archeologinių paminklų valdymui paveldosauginiais tikslais (Barnes, 2003), kraštovaizdžio tyrimams (Challis, 2006) ir archeologinių struktūrų atskleidimui atvirose ar miškingose vietovėse (Sittler, 2004; Devereux ir kt., 2005; Crutchley, 2006). Europoje kraštovaizdžių tyrimai turi ilgą tradiciją, tad LiDAR duomenys dažnai papildoma rašytinių šaltinių duomenis ir suteikia išsamesnę informaciją apie archeologinių objektų savybes. Vidurio Amerikoje ir pietryčių Azijoje LiDAR smarkiai pakeitė nežinomų kraštovaizdžių suvokimą, padedant dokumentuoti ir gyvenvietės, ir erdvinius antropogeninės veiklos požymius, slypinčius po tankia augalija (Chase ir kt., 2011). Taigi, LiDAR taikymas ir poveikis archeologiniams duomenims skiriasi įvairiose pasaulio dalyse. Europoje LiDAR dažniau naudojamas patikslinti archeologines savybes ar vietas, kurios istoriškai jau žinomos ar identifikuotos, kai tuo tarpu centrinėje Amerikoje LiDAR suteikia visiškai naujų duomenų apie senovinių gyvenviečių struktūrą ir išsidėstymą (Venter ir kt., 2017; Chase ir kt., 2011).

Lazerinis skenavimas gali būti vykdomas ne tik iš orlaivių, bet ir su antžeminiais prietaisais. *Antžeminiai LiDAR* pateikia aukštos kokybės duomenis, todėl dažniausiai apima konkrečių žinomų objektų - paminklų, pastatų ar kitų konstrukcijų lazerinį nuskaitymą (Kersten ir kt., 2010), bet taip pat naudojamas ir plačios apimties archeologinių vietovių tyrimuose (Engström, Johansson, 2009; Weber, Powis, 2014). Antžeminis LiDAR taip pat naudojamas itin tiksliai matuoti stratigrafinių sluoksnių morfologiją (Lercari, 2016). Tad didžiausias šios technologijos privalumas yra galimybė gauti labai išsamius ir tikslus 3D duomenų rinkinius, tačiau tankia augmenija pasižymintiose vietovėse gautų duomenų apdorojimo procedūros gali atimti daug laiko.

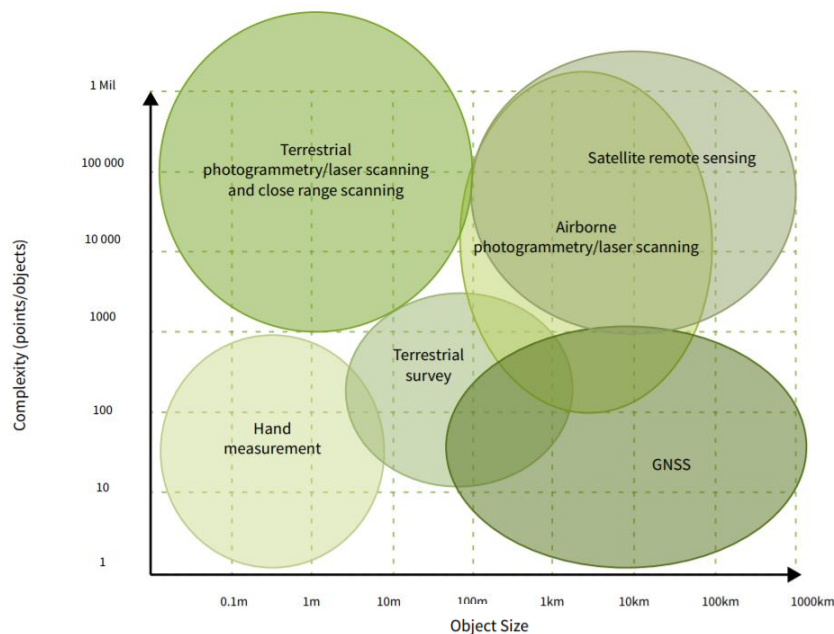
LiDAR taip pat suteikia galimybę sistemingai atlikti didelio masto archeologinius vandens telkinių aplinkos tyrimus. Žinios apie povandeninę topografiją yra labai svarbios siekiant suvokti archeologinių vietovių struktūrą ir paskirstymą. Ypatingas dėmesys turi būti skiriamas pakrančių zonoms, kuriose vandens lygis pakitęs, o daugelis buvusių pakrančių vietų dabar yra apsemtos. Todėl svarbu pavaizduoti detalią pakrančių topografiją buvusių pakrančių rekonstravimui, archeologinių struktūrų ir galimų buvusių uosto vietų nustatymui. **Batimetriniai** lazeriniai skeneriai gali detalai išmatuoti paviršių ir po vandeniui, o naudojant labai trumpus ir siaurus lazerio impulsus, net atskleidžiamos negiliai panardintos nuskendusios archeologinės struktūros (Doneus ir kt., 2015).

**Mobilusis LiDAR** apima įmontuotus įrenginius ant transporto priemonių, o pastaraisiais metais pradėti naudoti ir nešiojami delniniai ar kuprinės tipo skeneriai suteikia galimybę rinkti duomenis tyrėjui tiesiog vaikstant vietovėje (Barber, Mills, 2007). Nekilnojamojo kultūros paveldo kontekste mobilusis LiDAR transporto priemonėmis naudojamas kuriant senovinių teritorijų ir gatvių vaizdų 3D modelius, tačiau šio metodo galimybės gana ribotos, kadangi išsamesniems vietovių tyrimams gautų duomenų tikslumas ir taškų tankis nepakankamas. Taipogi prieinamumas prie istorinių objektų ribojamas dėl transporto priemonės dydžio. Rankinėmis nešiojamomis LiDAR sistemomis surinktų duomenų tikslumas taip pat nėra didelis, tačiau tai kompensuoja greitis, per kurį duomenys gali būti renkami didelėse teritorijose ir galimybė patekti į nepatogias vietas, pvz. urvus arba surinkti duomenis apie istorinių pastatų interjerus (Ten pat.).

Informacijos surinkimas apie archeologinio objekto vietovės padėtį, užimamą teritoriją, formą ir vertingųjų savybių identifikavimą yra vienas pagrindinių kultūros paveldo išsaugojimo procesų. Ši informacija svarbi įvertinant archeologinio objekto reikšmę bei numatant tolimesnius žingsnius objektui išsaugoti. Tinkamiausio tyrimų metodo pasirinkimas gali priklausyti nuo archeologinio objekto sudėtingumo ir dydžio (1 pav.). Antžeminiai matavimai yra naudingi kai objekto užimama teritorija nedidelė, tačiau didesnės apimties tyrimams vykdyti šis metodas nėra efektyvus. Tuo tarpu fotogrametriniai ir lazerinio skenavimo metodai yra puikus pasirinkimas masiniams duomenims gauti net ir platesnių apimčių tyrimuose, kadangi gali greitai surinkti milijonus taškų. Tobulėjančios lazerinio skenavimo technologijos padeda gauti tikslų žemės paviršiaus trimatį vaizdą ir nustatyti net ir nežymius topografinius požymius ne vien atvirose, tačiau ir povandeninėse ar tankia augmenija pasižyminčiose vietovėse. Tad archeologiniai tyrimai tampa vis labiau priklausomai nuo LiDAR technologijos, kuri padeda žymiai pagerinti istorinių



kraštovaizdžių ir archeologinių objektų atskleidimą ir prisideda prie nekilnojamojo kultūros paveldo išsaugojimo.



1 pav. Archeologinio paveldo tyrimų metodai pagal objekto sudėtingumą ir užimamos teritorijos dydį (Barber, Mills, 2007)

## 1.2. LiDAR taikymas archeologiniuose tyrimuose užsienyje

LiDAR technologijų taikymas archeologijoje mokslininkus visų pirma domina taikomojo aspektu, todėl tarp publikacijų vyrauja taikomojo pobūdžio ir „gerosios praktikos“ pavyzdžiai. Vienas iš pirmųjų LiDAR panaudojimo atvejų priskiriamas Romėniškų įtvirtinimų nustatymui **Anglijoje**, Vakarų Jorkšyre (Holden ir kt., 2002). Lidar padėjo nustatyti žemesnes nei 1 m aukščio struktūras, kurių anksčiau neavyko užfiksuoti tradiciniais aerofotografijos metodais. 2003 m. pietinėje Anglijos dalyje atlikti labai plačios apimties kompleksiniai tyrimai, atskleidę puikią multispektrinių vaizdų ir LiDAR metodų kombinaciją archeologinių objektų nustatymui (Barnes, 2003). 2005 m. pristatyti tyrimai ir garsiojo Stounhendžo aplinkoje. Čia ne tik patikslintas jau žinomų archeologinių objektų išsidėstymas, bet ir nustatyta naujų nežinomų objektų vietų, akcentuojant LiDAR kaip naujo efektyvaus metodo panaudojimą paveldosaugos tikslais (Bewley ir

kt., 2005). B.J. Devereux su kolegomis analizuodami Stounhendžo aplinkoje esančius kitus objektus nustatė, kad naudojant LiDAR duomenis kartu su reljefo šešėlinimo metodais, pakeičiant apšvietimo šaltinio kryptį ir aukštį, galima efektyviau aptikti archeologines struktūras. Taip pat augalijos šalinimo algoritmai padeda atskleisti reljefo požymius, kurie paslėpti po augalija ir neįžiūrimi aerofotografijose (Devereux ir kt., 2005). S. Crutchley išnagrino keturis skirtingus atvejų tyrimus, kurie parodė, kad LiDAR aiškiai turi potencialą platesnės apimties kraštovaizdžių tyrimuose, tačiau jis pabrėžė, kad svarbu naudoti ir kitus prieinamus tyrimo šaltinius (Crutchley, 2006). K. Challis ir kt. įvertino LiDAR potencialą papildyti Dove upės slėnio istorinius įrašus. Apie 84,4% LiDAR tyrimo metu užfiksuotų archeologinių vertybių anksčiau nebuvo žinoma. Nors kai kas buvo ir praleista, tačiau nustatyta, jog LiDAR atskleidžia daugiau duomenų lyginant su aerofotografijomis (Challis ir kt., 2008). Taip pat svarbūs šio autoriaus darbai, susiję su lazerio pulso atsispindėjimo intensyvumo reikšmių panaudojimu, kas iki tol buvo mažai nagrinėta (Challis ir kt., 2006).

LiDAR duomenys sėkmingai pritaikomi archeologiniuose tyrimuose ne tik Anglijoje, bet ir kitose Europos šalyse. Vienas pirmųjų LiDAR tyrimų **Vokietijoje** padėjo atskleisti istorinius kraštovaizdžius su išlikusiais senųjų laukų pėdsakais, slypėjusiais po miško danga (Sittler, 2004). Atlikta analizė padėjo nustatyti ir aptiktų struktūrų dydžius: plotą, tūrį, ilgį, plotį, paviršiaus šiurkštumą ir banguotumą. **Olandijoje** atliktas senovinių žemdirbystės laukų LiDAR duomenų vizualizavimas taikant geostatistinį filtravimo metodą, kuris pašalina neapdorotą topografiją iš duomenų rinkinio tokiu būdu, kad lieka tik smulkūs reljefo požymiai, įskaitant senovinius keltų laukus. Ši vizualizacija ne tik sustiprino jau žinomų objektų vaizdus, bet ir atskleidė, kad laukų sistemų erdvinis išplėtimas yra didesnis nei tikėtasi (Humme ir kt., 2006).

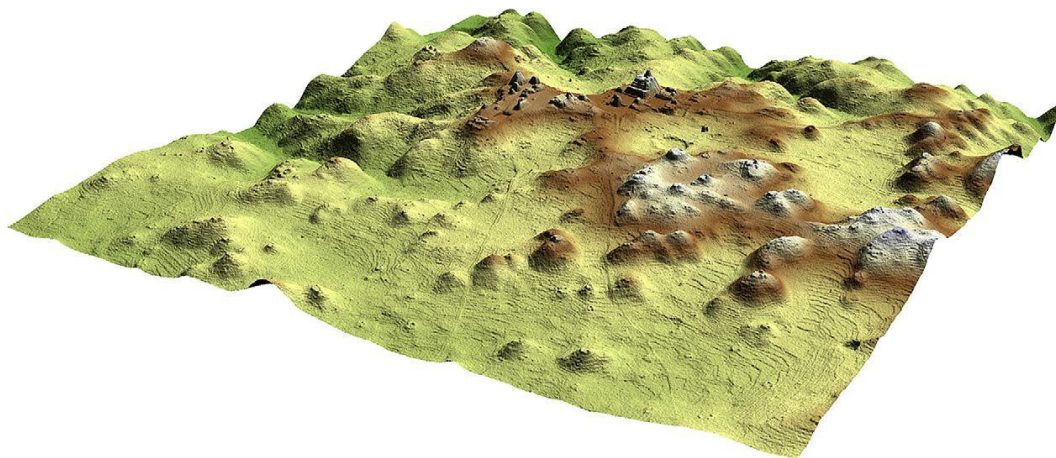
Rytinėje **Kretos** dalyje atliktas tyrimas padėjo lokalizuoti archeologines liekanas panaudojant kompleksinių nuotolinių tyrimų duomenis (LiDAR, geofizikinių, daugiaspektrių ir hiperspektrinių vaizdų) (Rowlands, Sarris, 2007). **Italijoje** R. Lasaponara ir N. Masini daugiausia dėmesio skyrė naujausios kartos orlaivių Lidar galimybėms aptikti ir išskirti mikrotopografinius reljefus, susijusius su archeologinėmis liekanomis. Tyrimai vykdomi viduramžių apleistuose kaimuose ir etruskų gyvenvietėje, taip pat naudojant kitus nuotolinių tyrimų metodus, įskaitant infraraudonųjų spindulių termografiją ir palydovines daugiaspektines nuotraukas (Masini, Lasaponara, 2012).

LiDAR duomenų pagrindu sugeneravus skaitmeninius žemės paviršiaus modelius ir pritaikant įvairius algoritmus vykdomi automatiniai archeologinių objektų atpažinimo tyrimai.

Koncepcija grindžiama tuo, kad taisyklingos geometrinės formos (tiesios linijos, kvadratai ar apskritimai) retai pasitaiko natūraliame kraštovaizdyje ir todėl gali būti siejamos su žmogaus sukurtais objektais. Tuo remiantis atlikti tyrimai pilkapių paieškai **Olandijoje** (De Boer ir kt., 2008), priešistorinių medžioklės spąstų tyrinėjimai **Norvegijoje** (Trier, Pilø, 2012) ir anglies degimo krosnių **Vokietijoje** (Schneider kt., 2015).

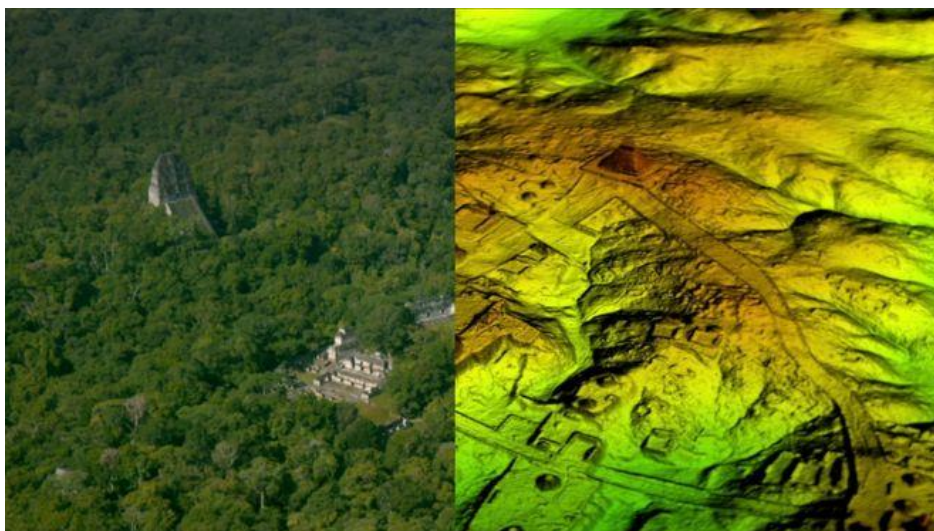
Nuotolinių metodų panaudojimas pasitelkiant lazerines technologijas aktualus ir už Europos ribų. LiDAR duomenys buvo panaudoti ir archeologinių vietų nustatymui Karališkosios salos nacionaliniame parke (Mičiganas, **JAV**) (Gallagher ir Josephs, 2008). 7 iš 32 aptiktų objektų buvo patvirtinti kultūrinėmis vertybėmis ir pirmą kartą užregistruoti šio tyrimo metu. Nepaisant teigiamų rezultatų, autoriai pabrėžia, jog archeologijoje LiDAR nėra išimtinis tyrimo metodas, tačiau jis turėtų būti dalimi išsamios mokslinių tyrimų strategijos, kuri taip pat apimtų lauko, laboratorijų ir archyvų tyrimus, kad būtų galima kuo geriau interpretuoti archeologinius duomenis.

Lazerinio skenavimo technologijų pranašumai ypač aktualūs **Centrinės Amerikos** senųjų civilizacijų tyrimuose (2 pav.). Didelė dalis senovinių miestų teritorijų šiandien slypi po tankia tropinių miškų danga ir yra sunkiai prieinama. Šiuo atveju pasitelkus LiDAR technologijas buvo pasiekta puikių rezultatų. Vieni pirmųjų tokių sėkmingų tyrimų buvo atlikti Karakolyje – 200 km<sup>2</sup> plotą užimančiame senoviniame majų mieste dabartiniame Belize (Chase ir kt., 2011). LiDAR gautuose vaizduose tiksliai vaizduojama ne tik kraštovaizdžio topografija, bet ir statiniai, keliai ir žemės ūkio terasos. Atsižvelgiant į laiką ir intensyvias pastangas kuriant tradicinius didelio masto žemėlapius, buvo suvokta, jog LiDAR technologijos naudojimas analizuojant praeities gyvenviečių ir kraštovaizdžio modifikacijas atogrąžų regionuose ekonomiškai yra žymiai efektyvesnė priemonė ir galiausiai pakeis tradicinius kartografavimo metodus.

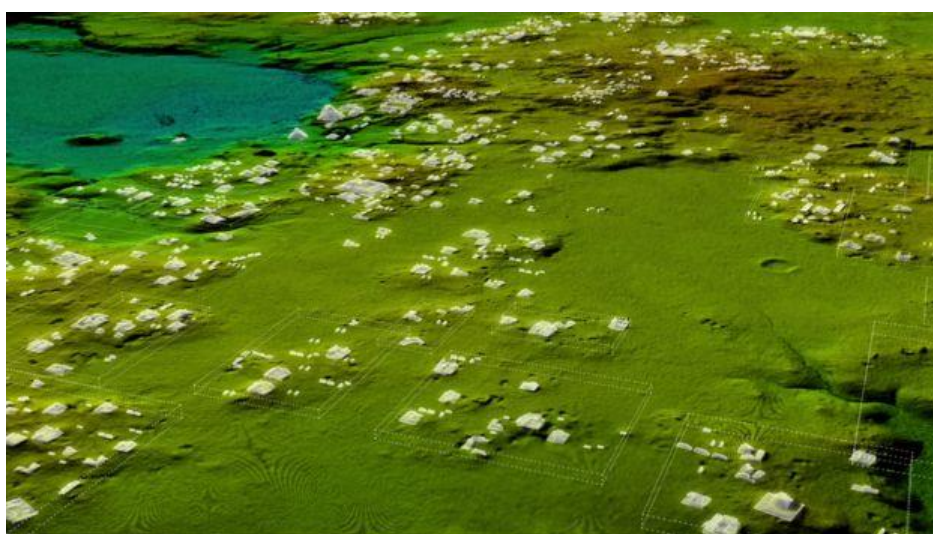


2 pav. LiDAR sugeneruotas Karakolio gyvenvietės epicentras (Chase ir kt., 2011)

Naujausias ir, pasak dalyvavusių mokslininkų, vienas iš svarbiausių protrūkių per pusanthro amžiaus archeologinių majų tyrinėjimų istoriją - Gvatemalos džiunglėse majų civilizacijos statinių griuvėsių atradimas (3 pav.) (<http://www.bbc.com/news/world-latin-america-42916261>). Mokslininkams pavyko sudaryti žemėlapius, apimančius ~ 2000 km<sup>2</sup> plotą ir užfiksuoti per 60 tūkstančių naujų statinių. Šioje džiunglių dalyje aptikti namai, rūmai, keliai ir gynybiniai statiniai (4 pav.). LiDAR technologijos dėka gauti duomenys atskleidė, kad visas šis regionas sudarė ištiesą miestų bei gyvenviečių sistemą, kurios mastas ir gyventojų tankumas iki šiol buvo nepakankamai įvertintas.



3 pav. LiDAR technologijos padėjo nustatyti žmonių statytas struktūras po tankia tropinio miško danga (<http://www.bbc.com/news/world-latin-america-42916261>)



4 pav. Naujai aptiktos pastatų struktūros (<http://www.bbc.com/news/world-latin-america-42916261>)

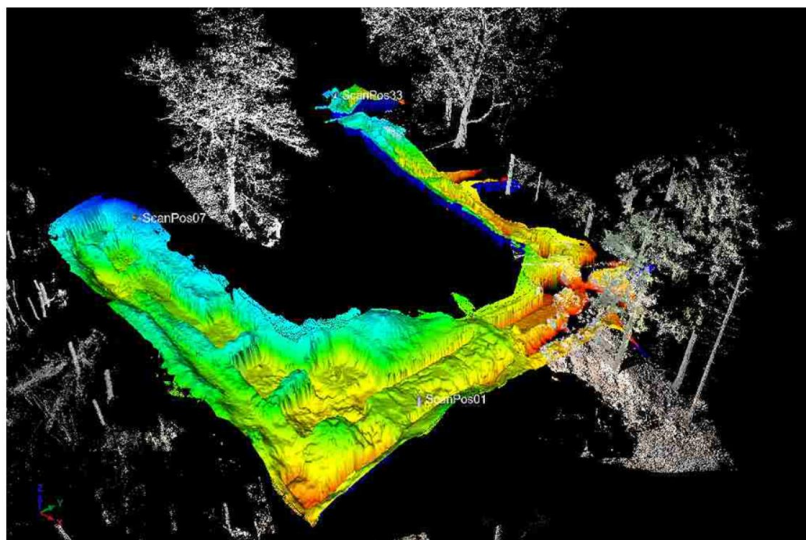
Nemažai straipsnių skiriama metodikos tobulinimui siekiant sukurti kuo tikslesnius skaitmeninius reljefo modelius (SRM) ir kuo aiškiau pavaizduoti žemės paviršių. Visų pirma akcentuojama augmenijos įtaka ir galimybė filtruojant LiDAR duomenis išskirti žemės dangos taškus pašalinant augaliją. Mokslininkai naudoja įvairius filtravimo algoritmus, klasifikuojančius žemės paviršiaus atspindžius reikalingus tolimesnei analizei. Ši galimybė suteikia LiDAR aiškų pranašumą prieš tradicinę aerofotografiją miškingose tyrimų vietovėse. Skirtingos augalijos klasifikacijos ir pašalinimo algoritmų palyginimai (Sithole ir Vosselman, 2004) palengvino Europos mokslininkų LiDAR panaudojimą archeologijoje (Devereux ir kt., 2005; Risbøl ir kt., 2006; Sittler, 2004). J.M. Harmon su kolegomis skaitmeniniam vietovės modeliui sukurti panaudoja pirmojo atspindžio impulso duomenis, o skaitmeniniam reljefo modeliui paskutiniojo (Harmon ir kt., 2006). J. Stal ir kitų tyrėjų grupė savo darbe pristatė keletą skirtingų filtravimo metodų naudojant sąsūkos matricą (angl. Convolution matrix) (Stal ir kt., 2010). R. Hesse pasiūlė naują archeologinių objektų nustatymo metodą - Vietinį reljefo modelį (angl. Local Relief Model), pagrįstą plačios apimties kraštovaizdžio formų pašalinimu iš duomenų (Hesse, 2010). R. Bennett su kolegomis analizavo įvairius LiDAR duomenų vizualizacijos metodus, įskaitant *Šlaitų analizę*, *Ekspoziciją*, *Pagrindinių komponentų analizę* (PKA), *Vietinį reljefo modelį* (VRM) ir *Dangaus matomumo faktorių* (DMF). Naudojant vieną vizualizacijos metodą nustatyta tik kiek mažiau nei 77% archeologinių požymių nei renkantis kombinuotą metodiką (Bennett ir kt., 2012).

Technologijų inovacijos, augantis skaičius atvejo tyrimų pritaikant LiDAR duomenis tiek paveldosauginiams, tiek moksliniams tikslams, tobulėjantys tyrimų ir duomenų apdorojimo metodai rodo vis platesnes LiDAR duomenų panaudojimo archeologijos srityje galimybes bei proveržį archeologijos mokslo duomenų fiksavimo, tyrimo ir komunikacijos procesuose.

### **1.3. LiDAR taikymas Lietuvos archeologijoje**

Pirmieji bandymai Lietuvos archeologijoje taikyti lazerinio nuskaitymo metodiką buvo atlikti 2007 m. Rokantiškių piliavietėje (5 pav.). Tam buvo naudojamas antžeminis lazerinis skaitytuvas (angl. Terrestrial Laser Scanning (TLS)). Vėliau trimatis nuskaitymas vykdytas Dubingių piliavietėje buvusioje evangelikų reformatų bažnyčioje ir buvusiuose Radvilų rūmuose, Trakų parapiinės bažnyčios, Senųjų Trakų piliavietės, Klaipėdos piliavietės, Kretingos sinagogos pamatų,

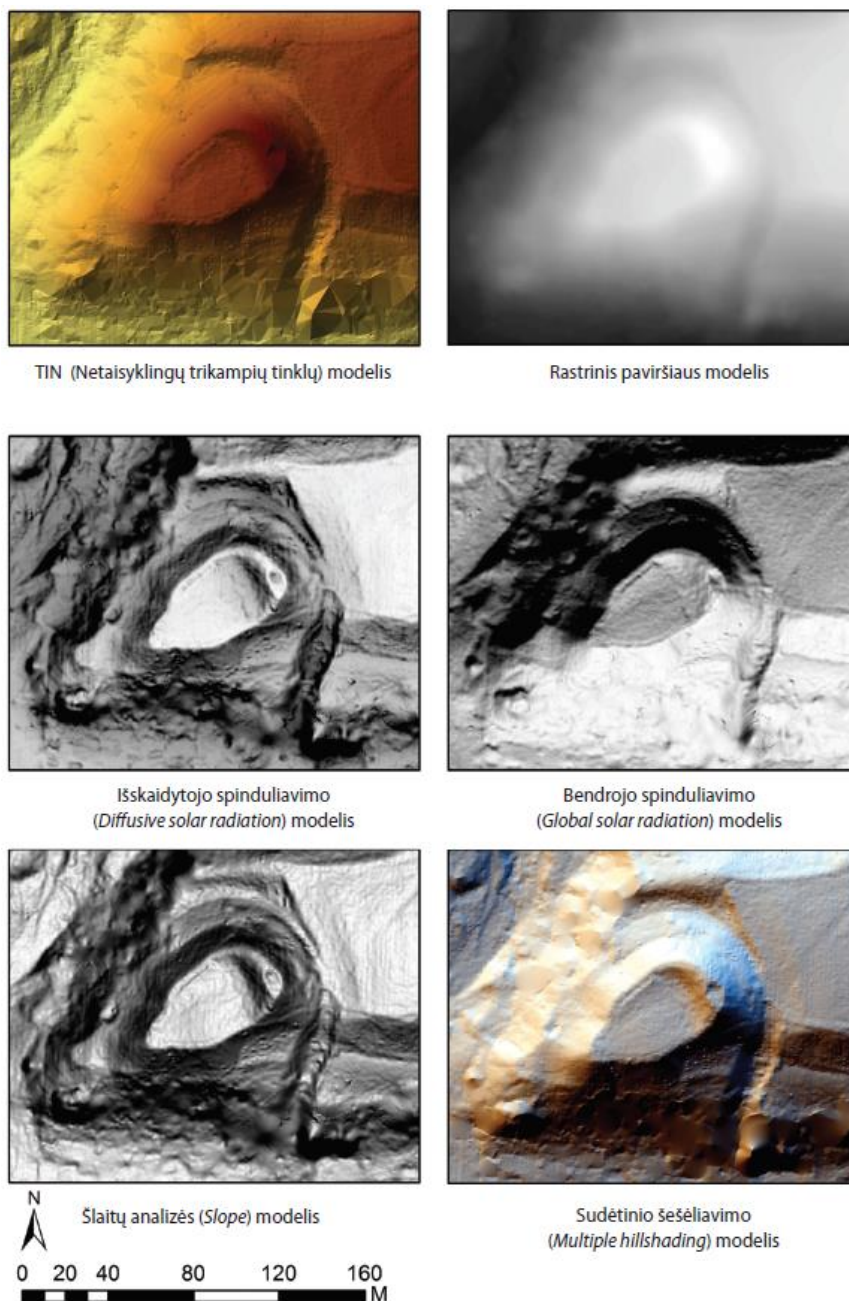
Vilniaus Didžiosios sinagogos archeologinių tyrinėjimų metu (Kuncevičius ir kt., 2012). Tačiau šie tyrimai vykdyti paveldosauginiais tikslais ir rezultatai išsamiau nepristatinėti.



5 pav. Rokantiškių piliavietės 3D modelis (<http://kpip.lt/piliavietes.html>)

Mokslinėje literatūroje pirmasis LiDAR pritaikymo archeologiniuose tyrimuose atvejis pristatytas 2012 metais (Ten pat). Straipsnyje pristatomi Jutonių (Dubingių) pilkapyne (Švenčionių r. sav.) atlikti matavimai tacheometru ir GPS priemonėmis, LiDAR ir 3D antžeminiu lazeriniu skaitytuvu. Renkantis vieną iš minėtų matavimo būdų buvo įvertintos kiekvieno metodo galimybės, laiko ir finansinės sąnaudos. Nustatyta, jog dabartiniai turimi Lietuvos LiDAR duomenys nėra tinkami detaliau tirti pavienius archeologinio paveldo objektus, o tinkamiausias matavimo metodas yra atliekamas antžeminiu 3D lazeriniu skaitytuvu. LiDAR duomenys gali būti naudingi tik didesnėms teritorijoms analizuoti stambesniu masteliu – naujų archeologinio paveldo objektų paieškai ar vietovių reljefo analizei.

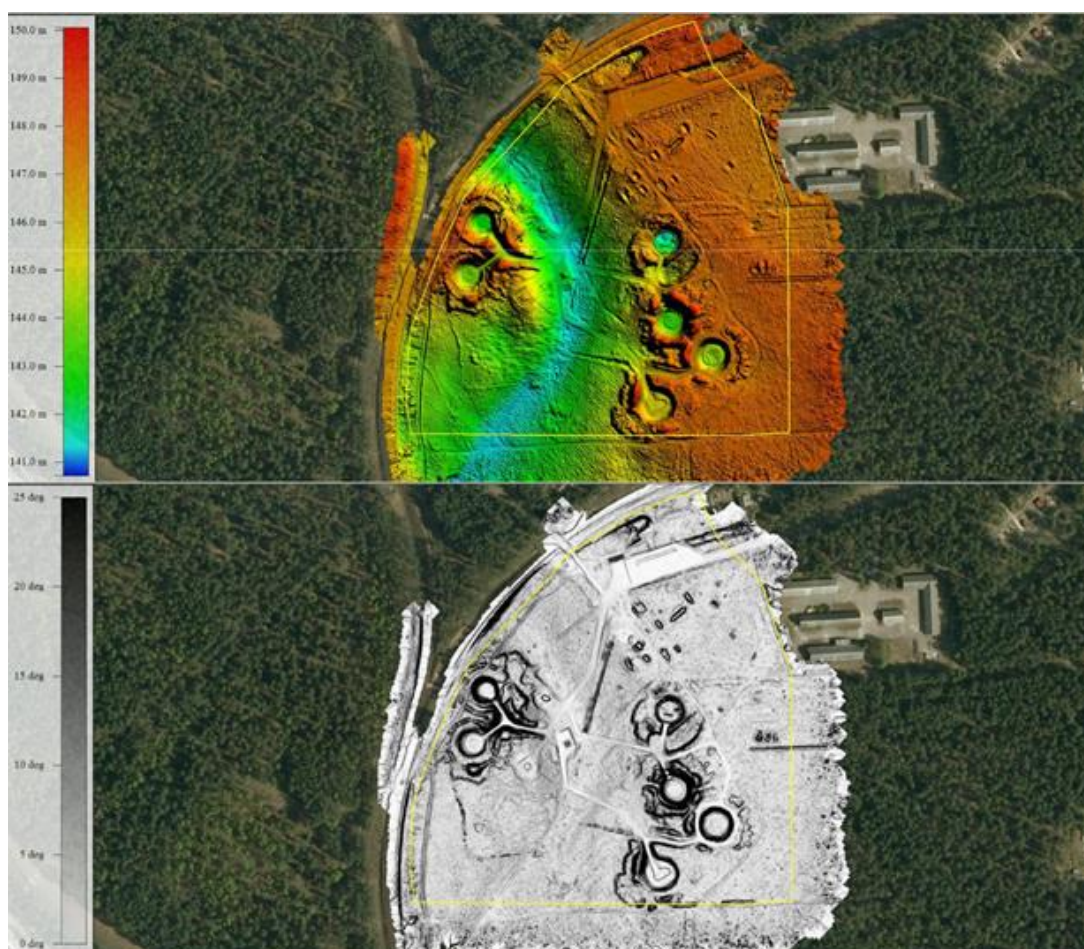
Sekančiais metais pasirodė straipsnis, pristatantis Lietuvos teritorijos LiDAR duomenis, jų panaudojimą archeologinių objektų paieškai ir analizei, parodomos skirtingos vizualizacijos galimybės (Tamulynas ir kt., 2013). Šiame straipsnyje akcentuojami LiDAR technologijos privalumai. Priešingai nei anksčiau aptartame straipsnyje teigiama, jog LiDAR metodas gali būti sėkmingai taikomas ir pavieniams objektams atvirose vietovėse tirti.



6 pav. Seredžiaus piliakalnis taikant įvairius rasto analizės metodus (Tamulynas ir kt., 2013)

2016 m. 3D paviršiaus skenavimo darbai buvo atlikti Panerių memoriale Valstybinio Vilniaus Gaono žydu muziejaus užsakymu (3D žemės paviršiaus skenavimas Panerių memoriale ataskaita, 2016). Pagrindiniu tyrimų tikslu buvo detalaus žemės paviršiaus reljefo 3D modelio

sudarymas. Paviršiaus reljefo vaizdavimas pateikiamas spalvinėje ir šlaitų statumo skalėje (7 pav.). Itin mažų reljefo ypatumų išskyrimui buvo pasitelktas erdvinis paviršiaus reljefo vaizdavimo būdas perdengiant esamą reljefą turimomis, tiksliai pozicijuotomis senomis aerofoto nuotraukomis. Pagal gautus duomenis buvo išskirti reljefo paviršiuje stebimi taisyklingų formų objektai, kurie galėjo atitikti buvusią memorialo infrastruktūrą: apskritimai – buvusios laidojimo ir/ar deginimo duobės, stačiakampiai – buvę pastatai ar bunkeriai, tiesios linijos – tranšėjos, keliai ar kt.



7 pav. Paviršiaus reljefo vaizdavimas spalvinėje skalėje (A) bei šlaitų statumo skalėje (B) (3D žemės paviršiaus skenavimas Panerių memoriale ataskaita, 2016)

Naujausias straipsnis, kuriame aptariamas lazerinio skenavimo technologijų taikymas kultūros paveldo srityje pasirodė 2017 m (Laužikas ir kt., 2017). Straipsnyje pristatytas pilkapių automatinės paieškos programinis įrankis. Nustatyta, jog LiDAR duomenų pagrindu sugeneruoti



žemės paviršiaus modeliai yra tinkami ne tik didelėms teritorijoms analizuoti, bet ir automatiniam paveldo monitoringui atlikti, tačiau pusiau automatinei archeologinių struktūrų paieškai atlikti turėtų būti naudojami gerokai aukštesnės rezoliucijos skaitmeniniai žemės paviršiaus modeliai, tad reikalingas detalesnis Lietuvos teritorijos LiDAR nuskaitymas.

Nors šie pavyzdžiai vaizduoja reikšmingą nuotolinių metodų pritaikymo Lietuvos archeologijos tyrimuose žingsnį, vis dar egzistuoja metodinių žinių trūkumas taikant LiDAR duomenų rinkinius archeologiniams uždaviniams spręsti.

## 2. LIDAR DUOMENŲ VIZUALIZAVIMO METODAI

Vienas iš pagrindinių LIDAR pranašumų yra galimybė iš LiDAR duomenų generuoti didelės skiriamosios gebos skaitmeninius reljefo modelius (SRM). SRM yra rastriniai duomenų rinkiniai, kuriuose yra saugomos aukščio vertės. Kadangi šie skaitmeniniai rinkiniai negali būti skaitomi kaip tokie, vizualizavimo metodai yra būtini tam, kad SRM būtų paversti tyrėjui suprantamais vaizdais. Tad efektyviam SRM interpretavimui reikalinga tinkama duomenų vizualizacija. LiDAR duomenys gali būti transformuoti į SRM ir vizualizuoti keliais skirtingais būdais. Skirtingų vizualizacijos metodų panaudojimas yra skirtas išsamesniam vizualinių duomenų nagrinėjimui. Tad skirtingų vizualizacijos metodų taikymas palengvina reljefo duomenų interpretavimą ir supaprastina archeologinių objektų nustatymą. LiDAR duomenų vizualizacijos metodai archeologijoje pagal sudėtingumą skirstomi į klasikinius ir šiuolaikinius (Mayoral ir kt., 2017).

### 2.1. Klasikiniai vizualizavimo metodai

#### 2.1.1. Reljefo šešėlinimas

Vienas labiausiai paplitusių reljefo vaizdo pateikimo būdų yra **Reljefo šešėlinimas** (angl. *Relief shading, Hillshading, shaded relief*). Tai SRM apdorojimo metodas, kuris imituoja tradicinę aerofotografavimo techniką, kai tam tikras kraštovaizdis yra fotografuojamas dienos metu, kai saulės šviesa krenta žemu kampu lyginant su žemės paviršiumi. Dėl mažo šviesos šaltinio kampo, bet kokie reljefo pokyčiai mes šešėlių, kurie yra matomi nuotraukose. Šie pokyčiai kartais rodo archeologinius požymius ir gali būti naudingi tolimesniam tyrimui. Šešėliuotas reljefas ir aerofotografijos palengvina objektų interpretaciją, o šie abu metodai dažnai naudojami kartu skirtingų duomenų palyginimui (Bofinger ir kt., 2006; Challis, 2006; Challis ir kt., 2008). Šešėliai pabrėžia aukščio skirtumus, atskleidžiančius natūralias kalvas ar žmogaus sukurtus darinius, kurie paprastai yra taisyklingesnių formų nei natūralūs gamtos dariniai. Naudojant duotą saulės azimutą ir aukštį, apskaičiavimais nustatoma šlaito padėtis saulės atžvilgiu. Jeigu šlaitas yra visiškai nukreiptas į saulę, jam priskiriama didžiausia reikšmė, o jei šlaitas yra visiškai nukreiptas nuo

saulės, jam suteikiama mažiausia reikšmė. Tarp šių kraštutinių reikšmių esantiems šlaitams, norint sudaryti apšviestumo įspūdį, reikšmė priskiriama pagal šlaito padėtį saulės atžvilgiu (Challis ir kt., 2011). R.H. Bewley ir kitų mokslininkų atliktas tyrimas parodė, kad toks šešėlinimo metodas dažnai atskleidžia žymiai daugiau žemės paviršiaus požymių nei aerofotografijos (Bewley ir kt., 2005). Tačiau svarbus šio metodo apribojimas archeologijoje susijęs su problema, jog iš vienos pusės apžviesti archeologiniai objektai, išdėstę lygiagrečiai saulės apšvietimo kampui, ne visada meta šešėlį, todėl tyrėjai gali juos praleisti. Šiuolaikinės GIS programos suteikia galimybę pašalinti šią problemą, kadangi įgalina sukurti tikslus SRM ir suteikia įrankius apšvietimą automatiškai valdyti pasirenkant skirtingus azimutus ir aukščius. Tai reiškia, kad tyrėjas gali laisvai kontroliuoti apšvietimo sąlygas nepriklausomai nuo duomenų surinkimo laiko ir datos, tad šiuo būdu šis metodas yra pranašesnis už tradicinę aerofotografiją. B. J. Devereux su kitais tyrėjais pasiūlė modernesnę reljefo šešėlinimo būdą, panaudojant statistinį metodą vadinamą *Pagrindinių komponentų analize (PKA)* (angl. Principal component analysis) (Devereux ir kt., 2008). Šiuo būdu tos pačios teritorijos rastriniai vaizdai, kuriuose pateikiami skirtingi apšvietimo šaltinio azimutai, yra apjungiami į bendrą produktą su pašalintais pasikartojimais. S. Crutchley savo tyrime nustatė, jog kiekvienos vietovės šešėlį reikėtų įvertinti iš mažiausiai keturių azimutų (Crutchley, 2006). Toks metodas vadinamas *daugiakrypčiu reljefo šešėlinimu* (angl. Multi-directional hillshading, multiple hillshading). Šį metodą 1992 m. pristatė R. Mark. Šešėliuoto reljefo atvaizdas sukuriamas iš 225 °, 270 °, 315 ° ir 360 ° azimutų (Mark, 1992). Kaip ir įprastame reljefo šešėlinimo metode, šiame taip pat imituojamas apšvietimas, tačiau, skirtingai nuo realaus apšvietimo, jungia daugybę šviesos šaltinių. To pasekoje žemės paviršiaus požymiai yra apšviečiami nepaisant to, kaip jie išsidėstę šviesos šaltinio atžvilgiu. Šiuo metodu sugeneruotus vaizdus gali būti neįprasta žiūrėti, nes jie neatitinka vaizdo realiame pasaulyje, tačiau tai yra gera priemonė kraštovaizdžiui analizuoti (Crutchley, 2006).

Kita problema, su kuria susiduriama pasirinkus įprastą reljefo šešėliavimo metodą – šlaituose esančios archeologinės struktūros gali būti šešėlyje ir todėl taip pat gali likti nepastebėtos (Devereux ir kt. 2005). Tai galima spręsti suderinus keletą šešėlinimo krypčių ir apšvietimo ryškumą. Taip vietovės tamsios zonos pašviesėja, o ryškios sritys sušvelninamos. Tokiu būdu galima sumažinti archeologinių požymių praleidimo riziką, jei jie yra atsidūrę šešėlyje arba ryškiai apšviestose srityse. Šį metodą pristatė E. Imhof 2007 m. ir jis vadinamas *Šveicarišku reljefo šešėlinimu* (angl. *Swiss hillshading*) (Imhof, 2007), kadangi kartografai jį pirmą kartą panaudojo reljefo pavaizdavimui Šveicarijos Alpėse (Poirier ir kt., 2013).

### 2.1.2. Šlaitų analizė

Kitas metodas archeologiniams objektams identifikuoti yra *Šlaitų* (angl. *Slope, Slope analysis*) analizavimas, kuriuo naudojantis reljefo savybes galima aiškiai atskirti pasikeitus nuolydžiui nepriklausomai nuo apšvietimo šaltinio. *Šlaitų* metodas rodo pasikeitimą tarp kiekvienoje gardelėje ir šalia esančiose gardelėse saugomų aukščio reikšmių. Šlaitų statusas gali būti apskaičiuojamas nuolydžio procentais arba laipsniais. Šio metodo panaudojimą archeologinių objektų nustatymui išsamiai pristatė M. Doneus ir C. Briese 2011 m. M.D. McCoy ir kolegės pristatė išsamų patobulintą *Šlaitų analizės* metodą ir išskyrė dirbtinius ir natūralius šlaitus, kuriuose galima nustatyti archeologinius požymius. *Šlaitų analizėje* pirmiausia apskaičiuojamas nuolydis ir tada rastriniame paviršiuje suskirstomas į atskiras klases, pvz. plokščias, žemas ar aukštas (McCoy ir kt., 2011). Toliau šis rastras vektorizuojamas į poligonus, vaizduojančius mikrotopografinius regionus, kad būtų galima lengvai atskirti tam tikrų tipų statinių formas natūraliame kraštovaizdyje, ypač dirbtinai plokščių paviršių ir stačių pylimų. K. Challis su kitais mokslininkais išskyrė Šlaitų analizę kaip geriausią vizualizavimo metodą lyginant su kitais jų tyrime panaudotais metodais (Challis ir kt., 2011). Pagrindinė problema naudojant šlaitų atvaizdavimą yra ta, kad be papildomos informacijos neįmanoma nustatyti, ar šlaitas kyla ar krinta, t. y. ar matomas pakilimas ar įdubimas, nes nes nuolydžiai nepriklausomai nuo jų kilimo ar kritimo pateikiami ta pačia spalva.

### 2.1.3. Spalvinis vaizdavimas

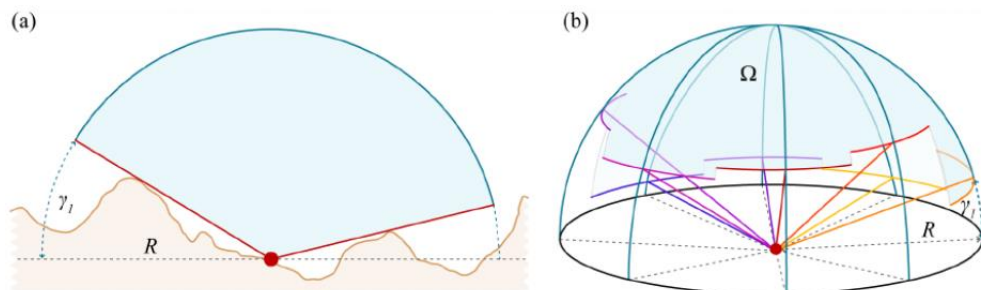
Spalvinis vaizdavimas (angl. *Colour cast, colour coding*) (dar vadinamas Aukščio diferencijavimu (angl. *Elevation differentiation*)) dažnai naudojamas reljefui vizualizuoti, tad dažnai naudojamas ir archeologinių objektų vizualizacijai (Holden ir kt., 2002; Sittler, 2004; Carey ir kt., 2006; Challis, 2006; Challis ir kt., 2006; Challis ir kt., 2008; Chiba, Yokoyama, 2009; Kokalj ir kt., 2013). Šiuo metodu yra kontroliuojamos reljefo aukščių vertės, kurios pateikiamos spalvotais ar pilkais atspalviais. Spalvų skalės yra dirbtinės, tačiau tinkamai suplanuotos spalvos gali būti naudojamos norint pabrėžti specifinius reljefo požymius. Tai vienintelis būdas išsaugantis pradines aukščio vertes ir yra labai naudingas plokšties kraštovaizdžiams, bet visiškai netinkamas raižytam reljefui (Challis, 2006). Naudojantis šiuo metodu yra patogų įvertinti žinomus ir aiškiai

išsiskiriančius archeologinius požymius, tokius kaip grioviai, pylimai ir kt. Tačiau net su nežymiais vietovės reljefo aukščio skirtumais šis metodas tampa mažiau naudingas, nes nežinomos archeologinės struktūros dažnai sunkiai atskiriamos dėl didelės reljefo įvairovės.

## 2.2. Šiuolaikiniai vizualizavimo metodai

### 2.2.1. Dangaus matomumo faktorius

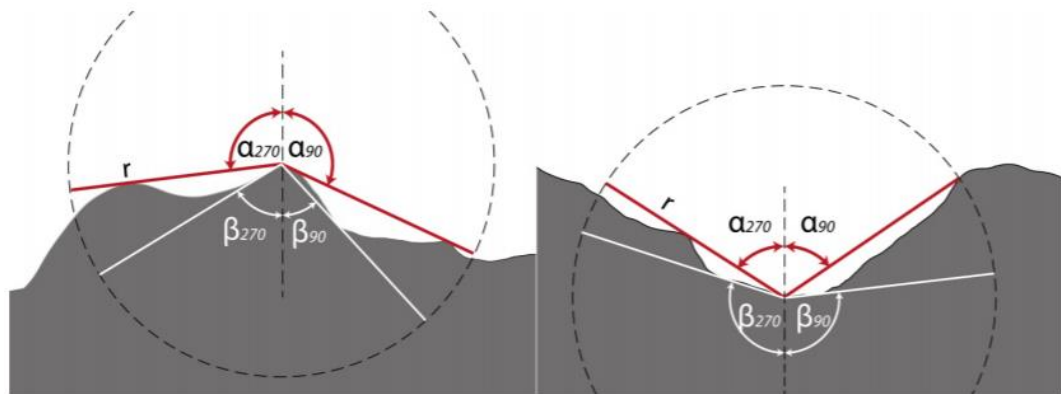
Daugeliu atvejų tyrėjai analizuoja reljefo šešėlinimo metodus archeologinių objektų vizualizacijai, tačiau ieškoma ir efektyvesnių metodų, kurie padėtų pašalinti apšvietimo krypties pasirinkimo problemas. K. Zakšek ir kolegų darbe pristatomas galimas šios problemos sprendimas ir alternatyvus metodas reljefo šešėlinimui įvedant Dangaus matomumo faktorių (DMF) (Zakšek ir kt., 2011). Įprastas šešėlinimo metodas naudoja taškinį šviesos šaltinį, rodantį žemės paviršiaus savybes. DMF imituoja išsklaidytą šviesą apskaičiuojant, kiek dangaus matosi iš kiekvieno žemės paviršiaus taško (8 pav.). Paviršius sušyla arba atvėsta greičiau ten, kur matosi didesnė dangaus skliauto dalis. Todėl iškilios žemės paviršiaus vietos, kurios gauna daugiau apšvietimo, visada paryškinamos, o įdubusios dalys yra tamsesnės, nes jos gauna mažiau apšvietimo (Kokalj ir kt., 2011). DMF taikymas vizualizavimo tikslais suteikia pranašumą prieš kitus metodus, nes jis atskleidžia smulkius reljefo požymius. Naudojant DMF procedūros atiekamos sparčiau, reikia analizuoti tik vieną vaizdą ir atskleidžiama daugiau archeologinių požymių, todėl tyrimai yra patikimesni ir išsamesni.



8 pav. Dangaus matomumo faktorius apibrėžiamas matomo dangaus dalimi ( $\Omega$ ) virš tam tikro stebėjimo taško, matomo iš dvimačio vaizdo (a). Algoritmas apskaičiuoja horizonto vertikalų pakilimo kampą  $\gamma_i$  skirtingomis kryptimis nurodyto spindulio  $R$  atstumu (b) (Zakšek ir kt., 2011).

### 2.2.2. Atvirumas

2002 m. R. Yokoyama ir kt. tyrėjai pristatė naują metodą išreikšti vietovės dominavimo ar uždarmo laipsnį nelygiame paviršiuje (Yokoyama ir kt., 2002). Šis metodas pavadintas *Atvirumu* (angl. *Openness*). Nustatant atvirumo reikšmę tam tikrai vietai iš skaitmeninio aukščio modelio apibrėžtame atstume ( $r$ ) yra gaunami mažiausiai aštuonių kryptių (Š, ŠV, V, PV, P, PR, R, ŠR) vertikalieji pjūviai. Nagrinėjant rastrinį elementą kiekviename pjūvyje nustatomas didžiausias įmanomas zenito (9 pav.,  $\alpha$ ) arba nadyro (9 pav.,  $\beta$ ) kampas. Pagrindinis skirtumas tarp šio metodo ir Dangaus matomumo faktoriaus tas, jog Atvirumas vertina visą sferą, o ne tik dangaus pusrutulį kaip DMF metodas. Vidutinė visų zenito kampų vertė lygi teigiamam atvirumui, o vidutinė nadyro reikšmė rodo neigiamą atvirumą. Galutinis vizualizacijos rezultatas priklauso nuo skaičiavimuose nustatyto spindulio ( $r$ ) reikšmės. Nedideli atstumai (keli metrai) pabrėžia vietinius mikrotopografinius pokyčius, o dideli atstumai (keli šimtai metrų) išryškina stambesnius objektus, pvz. upių slėnius ar kalnus, todėl priklausomai nuo tyrimo masto gali tekti apskaičiuoti *Atvirumą* su skirtingais parametrais (Doneus, 2013).



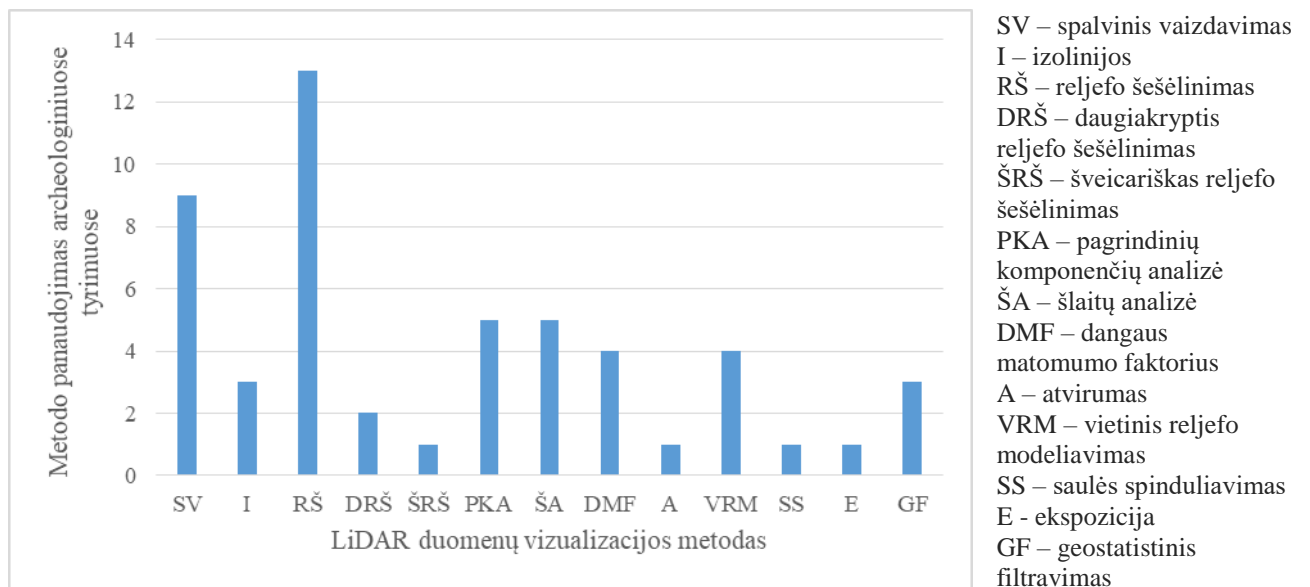
9 pav. Teigiamo ( $\alpha$ ) ir neigiamo ( $\beta$ ) atvirumo apskaičiavimas dviejuose skirtinguose pjūviuose (rytų ( $\alpha_{90}$ ,  $\beta_{90}$ ) ir vakarų ( $\alpha_{270}$ ,  $\beta_{270}$ ) kryptimi) nustatyto atstumu ( $r$ ) dviejuose skirtingose topografinėse situacijose (Doneus, 2013).

Iki šiol šis metodas archeologijoje nebuvo dažnai pritaikomas. Chiba ir Yokoyama archeologiniams žemėlapiams sudaryti panaudojo Atvirumo, Reljefo šešėlinimo ir Spalvinio kodavimo metodus (Chiba, Yokoyama, 2009). M. Doneus darbe aptarti pavyzdžiai ir palyginimai parodo, kad šis metodas aiškiai išskiria aukščiausius ir žemiausius reljefo požymius, tokius kaip pylimai, grioviai ir pilkapiai (Doneus, 2013).

### 2.2.3. Vietinis reljefo modeliavimas

Nuo 2010 m. kaip nauja priemonė archeologinių objektų nustatymui siūlomi **Vietiniai reljefo modeliai (VRM)** (angl. *Local relief model*) (Hesse, 2010). Archeologiniai objektai paprastai yra mažesnių matmenų nei žemės formos, ant kurių jie išsidėstę. Metodas, atskiriantis smulkesnius reljefo požymius nuo didelio masto kraštovaizdžio formų, vadinamas **tendencijos pašalinimu** (angl. *Trend removal*). Dirbant su skaitmeniniais žemės paviršiaus modeliais tendencija (didesnės kraštovaizdžio formos) pateikiama glodinant paviršių. Glodinimas įvykdomas pritaikant žemo dažnio sąsūkos filtrą (angl. *low pass convolution filter*) (Ten pat). VRM labai sustiprina nedidelės apimties, negilių topografinių savybių matomumą, nepriklausomai nuo apšvietimo kampo ir leidžia tiesiogiai nustatyti jų santykinę padidėjimą bei tūrį. Dėl to VRM yra tinkamas metodas plačios apimties erdviniam archeologiniams žvalgymams atlikti.

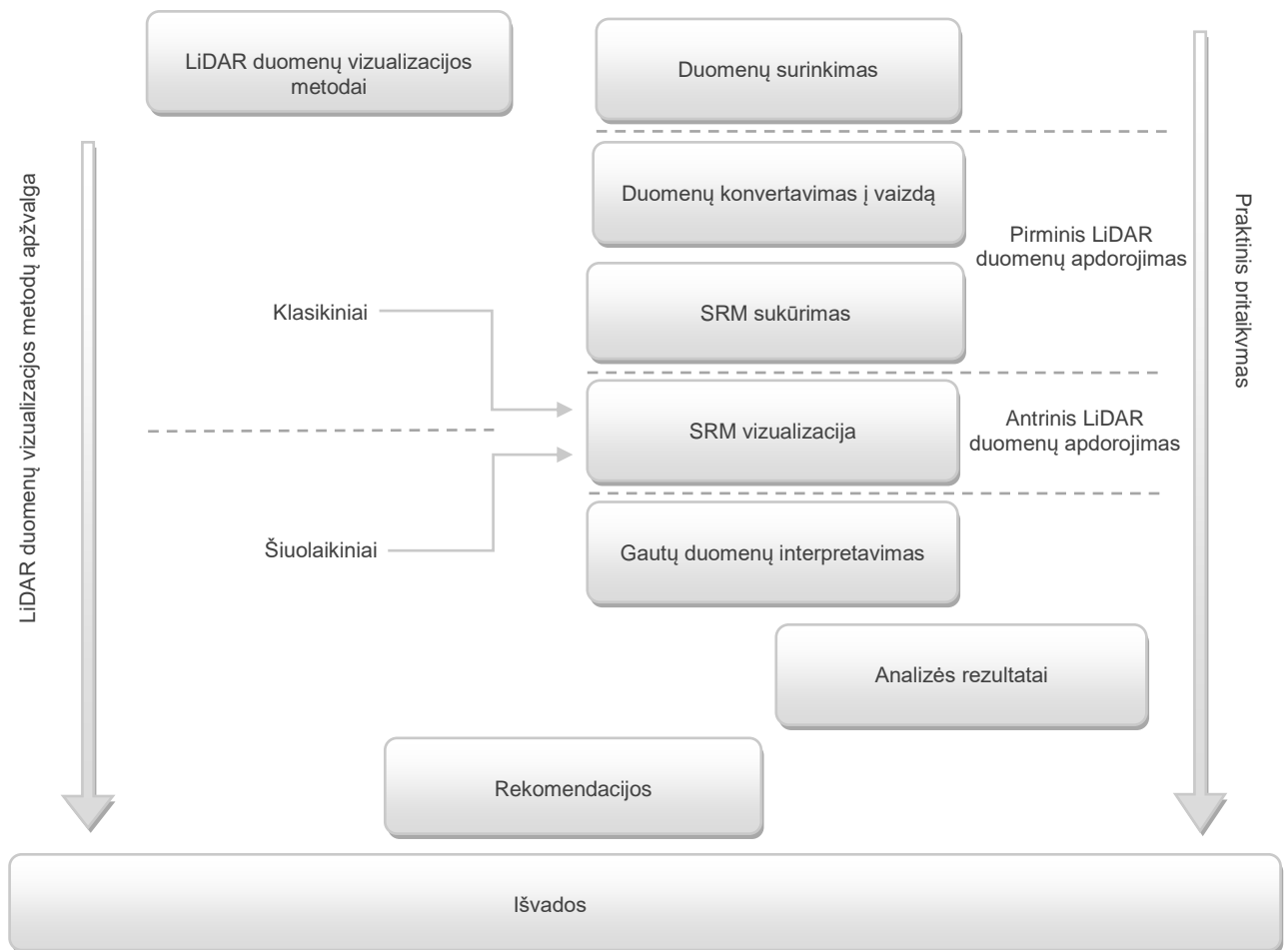
Peržiūrėjus naudojamus klasikinius ir šiuolaikinius LiDAR duomenų vizualizacijos metodus ir jų pritaikymą užsienio archeologiniuose tyrimuose matome, jog dažniausiai naudojami klasikiniai metodai – Reljefo šešėlinimas ir Spalvinis vaizdavimas. Šie vizualizacijos metodai archeologijoje gali būti prioritetiniai dėl nesudėtingo naudojimo ir gautų duomenų interpretavimo paprastumo. Jie suteikia „natūraliausią“, t. y. intuityviai aiškiausią vizualinę įspūdį lyginant su kitais metodais.



10 pav. Skirtingų LiDAR duomenų vizualizacijos metodų taikymas archeologijoje

### 3. DARBO METODIKA

Šiame darbe atliekama LiDAR duomenų apdorojimo metodų analizė archeologinių vertybių nustatymui. Siekiant išanalizuoti LiDAR taikymo archeologiniuose tyrimuose galimybes, buvo peržiūrėti užsienio straipsniuose publikuotų metodų pavyzdžiai (1 priedas). Išanalizavus užsienio archeologijoje taikomus LiDAR duomenų apdorojimo metodus atliktas tyrimas su pasirinktais Lietuvos archeologijos objektais. Tam panaudotas įprastas klasikinis reljefo šešėlinimo metodas bei du patobulinti šešėlinimo variantai – *Šveicariškas* ir *Daugiakryptis*. Iš šiuolaikinių metodų pasirinktas *Vietinis reljefo modeliavimo metodas*. Remiantis taikomaisiais pavyzdžiais ir analizės rezultatais parengiamos rekomendacijos (11 pav.).



11 pav. Tyrimo schema



### 3.1. Naudojami duomenys

**LiDAR duomenys.** Tyrime naudojami Lietuvos Respublikos teritorijos skaitmeniniai erdviniai žemės paviršiaus lazerinio skenavimo taškų duomenys – SEŽP\_0.5LT – gauti iš Nacionalinės žemės tarnybos. Vidutinis skrydžių aukštis LiDAR nuskaitymo metu buvo ~ 2,5 km; lazerio taškų tankis 1 tšk./ 2m<sup>2</sup>; vidutinis nuokrypis tarp taškų ~ 0,5 m. Jie vartotojui pateikiami .txt formatu, duomenys suskaidyti pagal M 1:10000 Lietuvos Respublikos teritorijos žemėlapių LKS-94 koordinacių sistemoje skaidymo lapais schema (Tamulynas ir kt., 2013).

**Istoriniai ir archeologiniai duomenys.** LiDAR duomenų vizualizacijos metodams nagrinėti pasirinktas objektas – Lietuvos Didžiosios Kunigaikštystės laikų istorinės sienos atkarpa dabartinėje Žemaitijos teritorijoje. Ši tarpvalstybinė siena nustatyta 1422 m. rugsėjo 27 d. Melno taikos susitarimu tarp Lietuvos Didžiosios Kunigaikštystės ir Vokiečių Ordino. Melno sutartimi įteisinta siena, kurios geografinė linija beveik nepasikeitė, gali būti laikoma viena iš seniausių ir stabiliausių valstybės sienų Europoje, kadangi ji egzistavo iki pat XX a. pradžios. Keitėsi tik valstybių, esančių abipus sienos, pavadinimai, tad šio objekto reikšmė svarbi krašto istorijai pažinti. Ši sutartis liudija pakitusius Lietuvos ir Vokiečių ordino santykius, joje Žemaitija buvo pripažinta Lietuvai bei išryškėjo linijinės sienos nustatymo užuomazgos. Melno sutarties metu šios sienos buvo numatytos tik teoriškai, jų žymėjimo darbai vyko bent po keleto metų. Riboženkliais pasirinkamos: upės, miškai, šaltiniai, „laukai“. Taipogi taikyti ir dirbtiniai ženklai: tilteliai, iškasti grioviai, ženklai medžiuose ir akmenys, kalneliai, keliai (Čelkis, 2011).

Šiuo metu yra žinomos ir kartografuotos trys atkarpos, kurios yra įtrauktos į kultūros vertybių registrą (12 pav.) ir saugomos valstybės kaip istorinis, archeologinis ir inžinerinis paveldas – Melno sutartimi nustatytos LDK valstybinės sienos atkarpa I, II, III; unikalūs kodai: 31745, 32633, 36149 (<https://kvr.kpd.lt>). Tačiau didžioji dalis šios buvusios sienos neužfiksuota ir ji tarsi pamiršta, likusi tik senuose žemėlapiuose, tad kyla grėsmė, jog intensyvi ūkinė veikla gali sunaikinti šios sienos likučius.

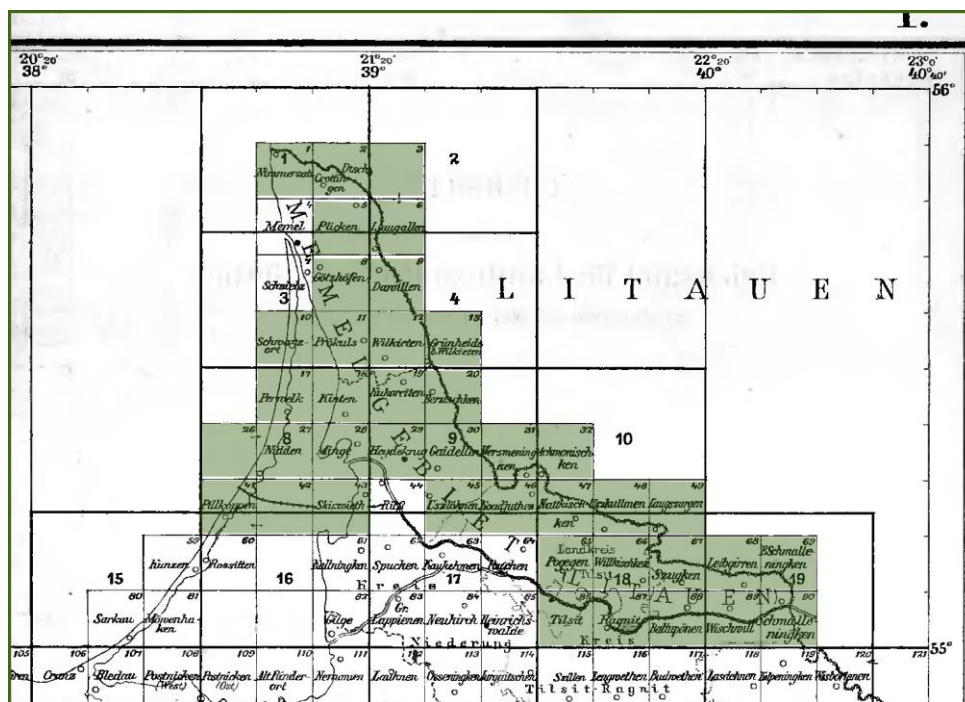


12 pav. Melno sutartimi nustatytos LDK valstybinės sienos atkarpos fragmentai (<https://kvr.kpd.lt>)

Melno sutartimi nustatytos LDK valstybinės sienos atkarpai būdingi žemės paviršiaus elementai (<https://kvr.kpd.lt>):

- **grioviai** iki 1,2 m gylio, viršuje apie 3 m pločio, į apačią siaurėjantys, atskirose vietose griovys tampa dvigubu ar net trigubu;
- **pylimai** suformuoti vienoje pusėje arba abipus griovio, iki 3 m pločio ir iki 0,5 m aukščio, atskirose atkarpose yra ir iki 5-6 m pločio ir 1 m aukščio;
- **kaupai** supilti griovyje, skirti griovio posūkio taškams pažymėti, iki 1,4 m aukščio nuo griovio dugno, iki 3,8 m skersmens bei vienas 6-7 m skersmens ir iki 1,8 m aukščio kaupas šalia sieną žymėjusio griovio.

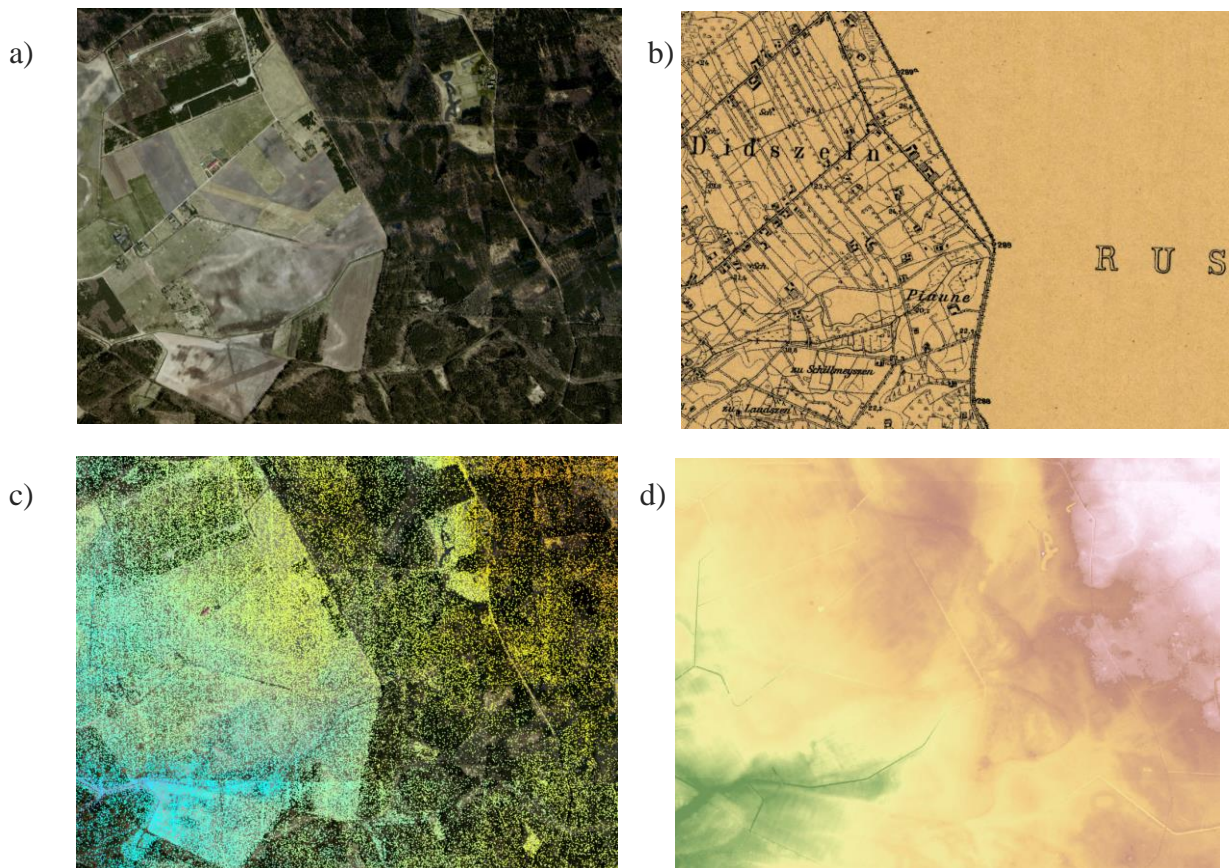
**Kartografiniai duomenys.** Šiai sienos atkarpos menamai ribai nustatyti panaudoti vokiški topografiniai žemėlapiai (M 1:25 000) (13 pav.). 44 žemėlapiai apimantys Klaipėdos kraštą parengti ir išleisti Pirmojo Pasaulinio karo išvakarėse 1910-1915 metais (<http://maps4u.lt/lt/>).



13 pav. Rinktinis vokiškų 1:25000 mastelio žemėlapių (Messtischblatt) lapas.

### 3.2. LiDAR duomenų apdorojimas

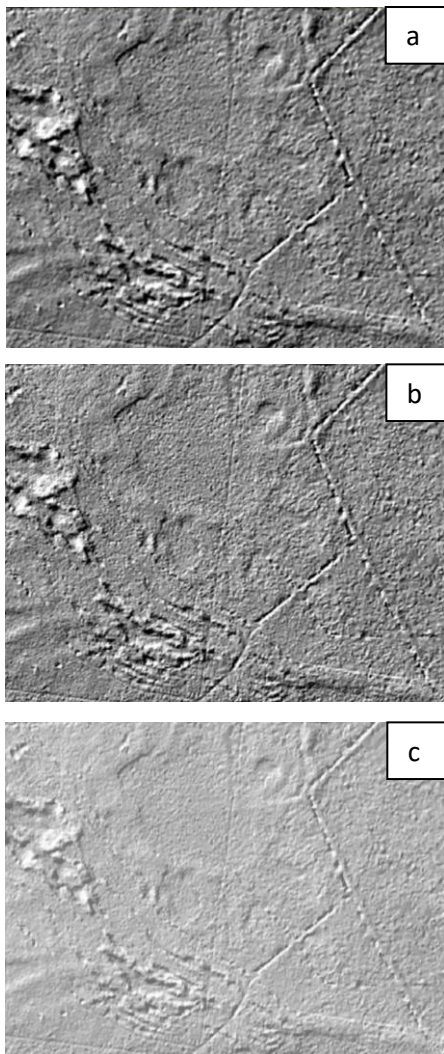
LiDAR duomenų apdorojimo metodams atlikti naudota *ArcGIS Desktop 10,6* programos versija su *Spatial Analyst* ir *3D Analyst* plėtiniais. Įrankio *Las Tools* pagalba .txt formato failai paverčiami .LAS failais. Toliau iš šių LiDAR duomenų sukuriamas rastrinis skaitmeninis reljefo modelis (14 pav.). Vizualizacijos metodams panaudoti *Hillshade\_Tools 9.3.tbx* (<https://www.esri.com/arcgis-blog/products/product/mapping/updated-hillshade-toolbox/>) ir *Local ReliefModel\_10\_2.tbx* ([https://www.researchgate.net/publication/289254539\\_Local\\_Relief\\_Model\\_LRM\\_Toolbox\\_for\\_ArcGIS\\_UPDATE\\_2016-05\\_-\\_new\\_download\\_link](https://www.researchgate.net/publication/289254539_Local_Relief_Model_LRM_Toolbox_for_ArcGIS_UPDATE_2016-05_-_new_download_link)) įrankių rinkiniai.



14 pav. a) vietovės ortofotografinis vaizdas; b) vietovė 1912 m žemėlapyje; c) vietovės taškų debesis *Arcgis Desktop 10,6* aplinkoje; d) SRM.

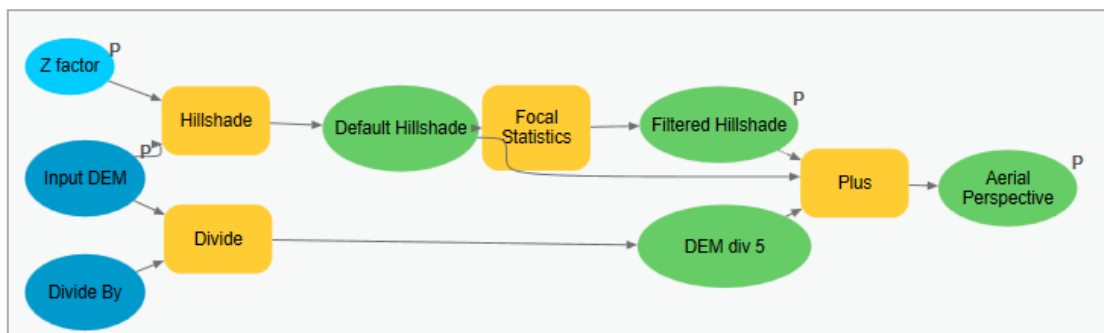
### 3.2.1. Reljefo šešėlinimo modeliai

Įprastai reljefo šešėlinimas padeda išryškinti archeologinių struktūrų matomumą skaitmeniniuose reljefo modeliuose. Kadangi vietovė gali būti apšviečiama įvairiomis kryptimis, bet koks kryptingas reljefo šešėlinimo modelis pritaikytas dideliems plotams, gali sukelti šešėlio efektą reljefo struktūroms, kurios yra statmenos ar artimos statmenai apšvietimo kryptčiai. Nors paprastas vienkryptis šešėlinimas dažnai yra efektyvus, šiame tyrime išbandėme du sudėtingesnius šešėlinimo modelius: *Šveicarišką šešėlinimo modelį* (angl. *Swiss hillshade model*) ir *Daugiakryptį įstrižinį šešėlinimo modelį* (angl. *Multi-Directional Oblique Weighting*).



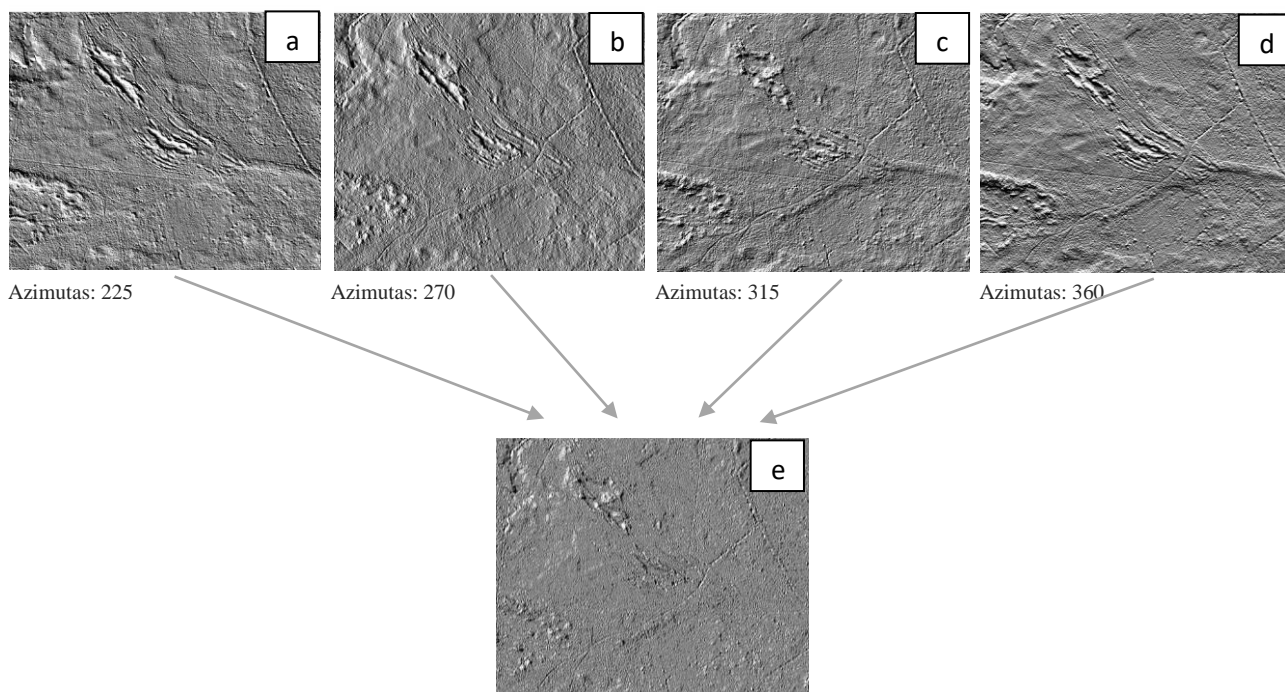
*Šveicariškas šešėlinimo modelis* yra sukuriamas naudojant du modifikuotus šešėlinimo metodus, kurie rodomi kartu su SRM (Barnes, 2002). Pirmasis yra apibendrintas šešėlinimas, sukurtas naudojant medianos filtrą (angl. *Median Filter*) pritaikytą pirminiam įprastam šešėlinimo modeliui - tai sukuria išlyginto paviršiaus efektą ir apibendrina vietovę pabrėžiant pagrindines geografines savybes, sumažinant smulkius požymius ir sušvelninant nelygumus šlaituose, tačiau išlaikant griežtesnius keturų požymius (15 pav., a). Antrasis modifikuotas šešėlinimo metodas sukurtas iš pradinio SRM ir pirminio šešėlinimo modelio taip, kad imituotų aeroperspektyvą, vaizduojančią aukštesnes vietas pašviesintas, o žemesnes patamsintas panaudojant rastrinę skaičiuoklę (angl. *Raster Calculator*) (15 pav., b). Pritaikant permatomumo nustatymus ir panaudojant šiuos du modifikuotus šešėlinimo metodus bei originalų SRM sukuriamas Šveicariško šešėlinimo modelis (15 pav., c).

15 pav. Šveicariško šešėlinimo modelio kūrimo eiga istorinės LDK sienos tyrimo atveju

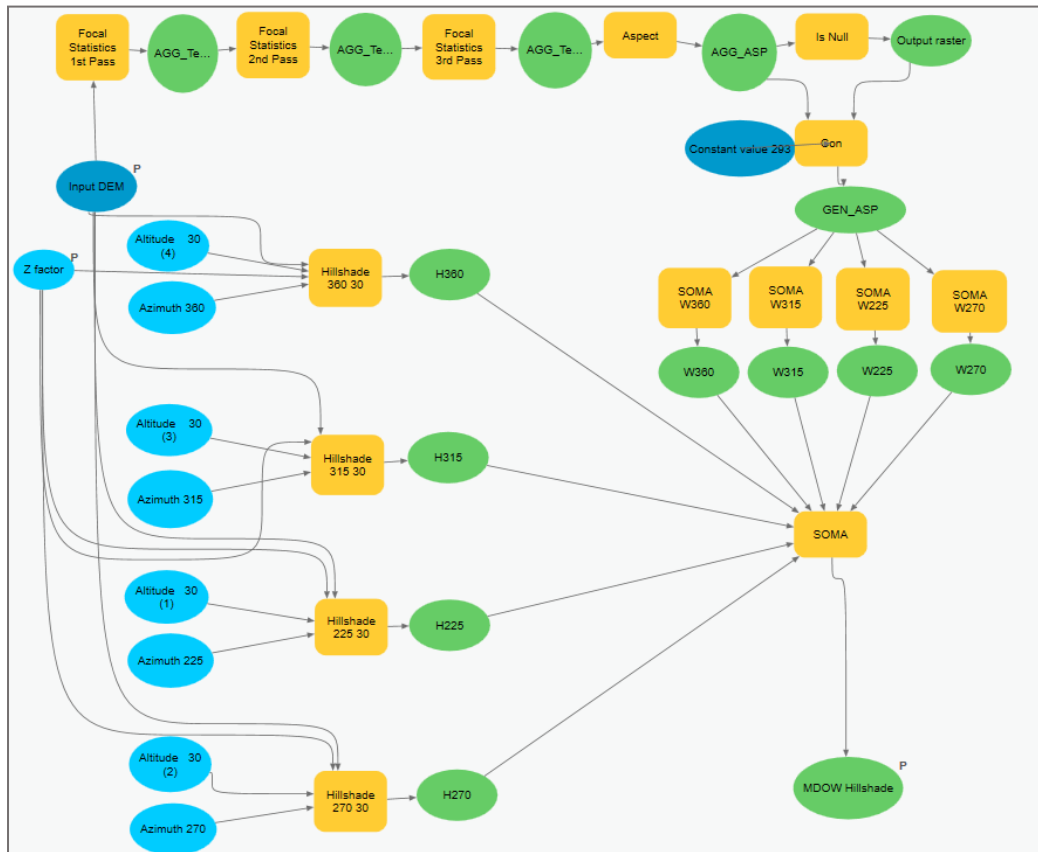


16 pav. Šveicariško šešėliavimo modelis Model Builder aplinkoje

Tradicinis reljefo šešėliavimo metodas pabrėžia struktūras, kurios yra dirbtinai įstrižai apšviečiamos, tačiau gali praleisti išilgai apšviečiamas struktūras. Todėl šiame tyrime panaudotas *Daugiakryptis įstrižinis reljefo šešėlinimo modelis*. Šis metodas sukuria reljefo paviršiaus vaizdą, kuriame paviršius įstrižai apšviečiamas naudojant daugiau nei vieno azimuto apšvietimą. Šis daugiakryptis metodas reljefui sukuria šešėlį iš keturių skirtingų apšvietimo kampų (17 pav., a, b, c,d, e), todėl įgalina pabrėžti archeologines struktūras nepriklausomai nuo jų orientacijos lyginant su apšvietimo šaltiniu. Sukūrus keturis skirtingus šešėlintus reljefo vaizdus, jie matematiškai susumuojami, kad būtų sukurtas galutinis bendras šešėlinimo rastras (17 pav., e).



17 pav. Daugiakryptis įstrižinis šešėlinimo modelio kūrimas istorinės LDK sienos tyrimo atveju



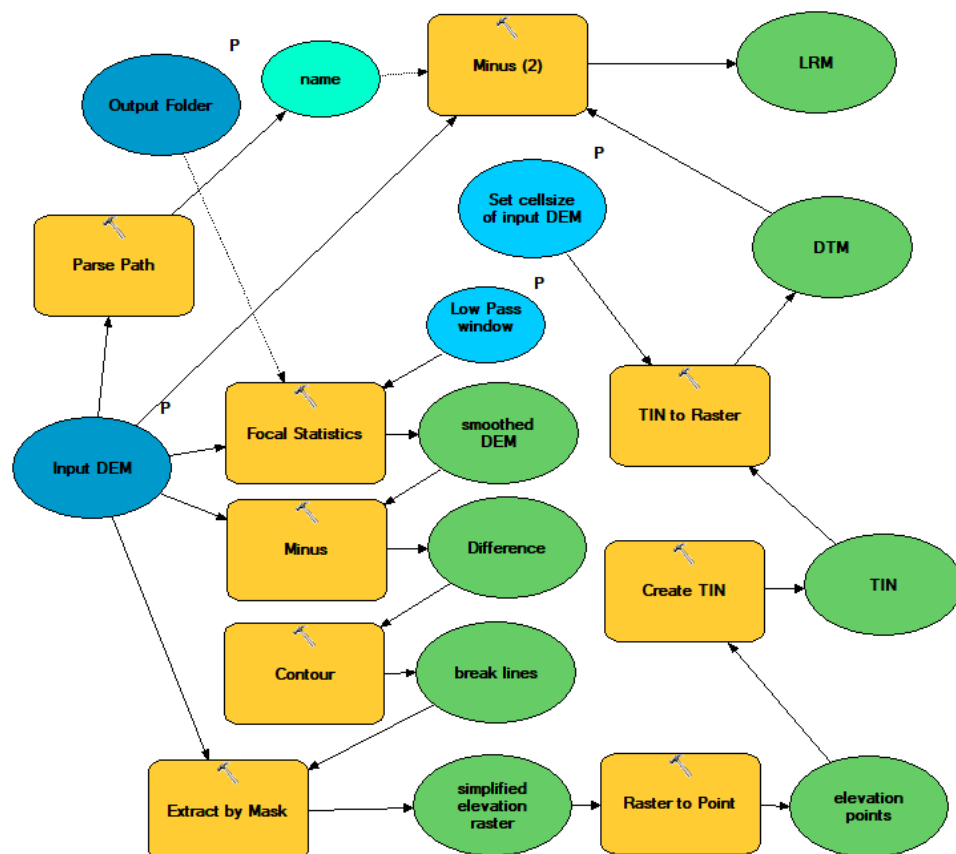
18 pav. Daugiakryptis įstrižinis šešėliavimo modelis Model Builder aplinkoje

### 3.2.2. Vietinis reljefo modelis

Iš šiuolaikinių metodų šiame tyrime panaudotas Vietinis reljefo modeliavimas (VRM). VRM vaizduoja vietinius, smulkius aukščių skirtumus, iš bendrų duomenų pašalinus didelės apimties kraštovaizdžio formas. Norint išskirti smulkius topografinius požymius reikia pritaikyti keletą duomenų apdorojimo procesų:

- 1) iš LiDAR taškų debesies sukuriamas SRM.
- 2) SRM pritaikomas žemo dažnio filtras (*Focal Statistics* funkcija) ir gaunamas glodintas SRM.
- 3) Pašalinant šį glodintą modelį iš pirminio SRM (*Minus* funkcija). Gaunamas skirtumo SRM.

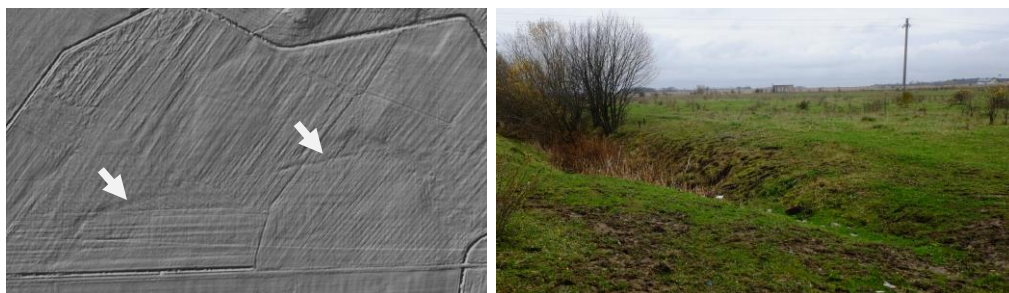
- 4) Naujai gautam modeliui sukuriamos „nulinės“ kontūrų linijos, kurios išskiria teigiamas ir neigiamas topografines anomalijas (išgaubtas arba įgaubtas reljefo formas) (*Contour* funkcija).
- 5) Iš originalaus pirminio SRM išgaunamos gardelių, kurios susikerta su kontūrų linijomis, aukščio reikšmės. Gaunamas supaprastintas aukščio rastras (*Extract by Mask* funkcija)
- 6) Supaprastintas aukščio rastras konvertuojamas į taškinį sluoksnį (tik nenulinės gardelės) (*Raster to Point* funkcija).
- 7) Iš aukščio taškų sukuriamas naujas skaitmeninis reljefo modelis (SRM) (*Create TIN* ir *TIN to Raster* funkcijos)
- 8) Galutinis vietinis reljefo modelis (VRM) gaunamas iš pradinio SRM atimant naują SRM (*Minus* funkcija).



19 pav. Vietinis reljefo modelis Model Builder aplinkoje

## 4. REZULTATAI

Išbandyti LiDAR teikiamas galimybes archeologinių vertybių nustatymui pasirinkti objektas - Melno sutartimi nustatytos LDK sienos atkarpa. Duomenų vizualizavimui pasirinkti įprasto reljefo šešėlinimo metodas bei patobulinti – Šveicariško šešėlinimo ir Daugiakrypčio šešėlinimo metodai. Bei vienas šiuolaikinis – Vietinio reljefo modeliavimo metodas. Šių metodų pagalba pavyko nustatyti Melno sutartimi nustatytos LDK sienos atkarpos padėtį ir užfiksuoti gerokai daugiau išlikusių struktūrų nei iki šiol manyta. Nustatytos 24 naujos vietos su galimai išlikusiais šios istorinės sienos pėdsakais (2 Priedas). Kadangi šis archeologinis objektas išlikęs daugiausiai tik griovių pavidalu išsamesnei vizualizavimo metodų analizei atlikti taip pat pasirinkti ir kiti sudėtingesnių formų ir skirtingų dydžių archeologiniai objektai. Tad šiame darbe LiDAR duomenų vizualizavimo metodai buvo analizuojami pagal archeologinių objektų formą ir vietovei būdingą reljefo formą. Vertinant skirtingus vizualizavimo metodus buvo atsižvelgiama į archeologinio objekto formos ir smulkesnių požymių, pvz. pylimų ar griovių, atskleidimą.



20 pav. Tyrimo metu aptikto naujo istorinės LDK sienos fragmento pavyzdys (Nuotrauka I. Kaminskaitės)

### 4.1. Vizualizavimo metodų analizė

#### 4.1.1. Pagal archeologinių objektų formą

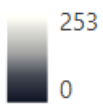
Pagal geometrines formas archeologiniai objektai skirstomi į (Risbol ir kt., 2013):

- 1) linijinės formos (21 pav.);
- 2) apskritimo formos (22 pav.);
- 3) ovalo formos (23 pav.);
- 4) keturkampio formos (24 pav.);
- 5) netaisyklingos formos (25 pav.).

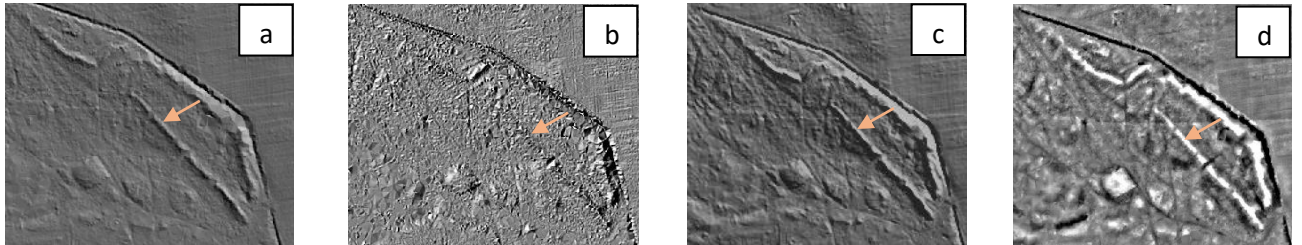


Remiantis šiuo skirstymu buvo atliktas skirtingų geometrinių formų Lietuvos archeologinių objektų vizualus įvertinimas.

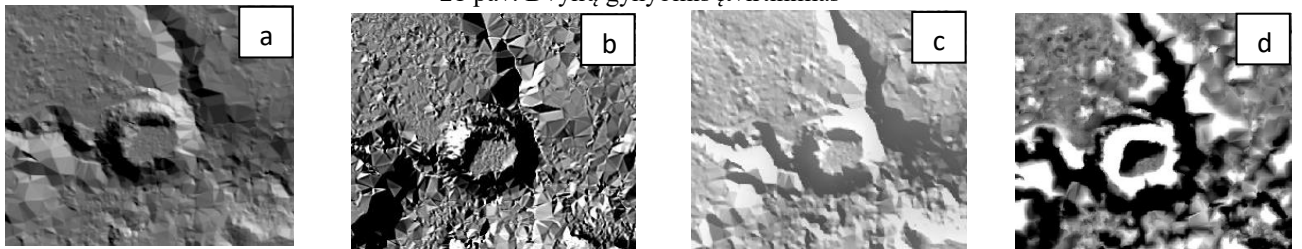
Value



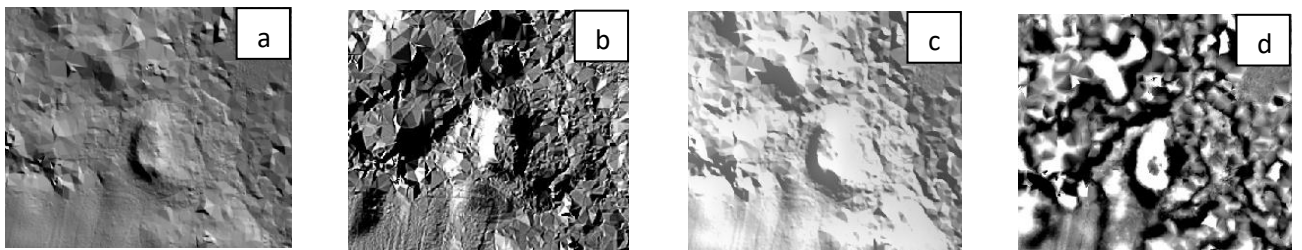
- a – įprastas šešėlinimas
- b – daugiakryptis šešėlinimas
- c – šveicariškas šešėlinimas
- d – vietinis reljefo modeliavimas



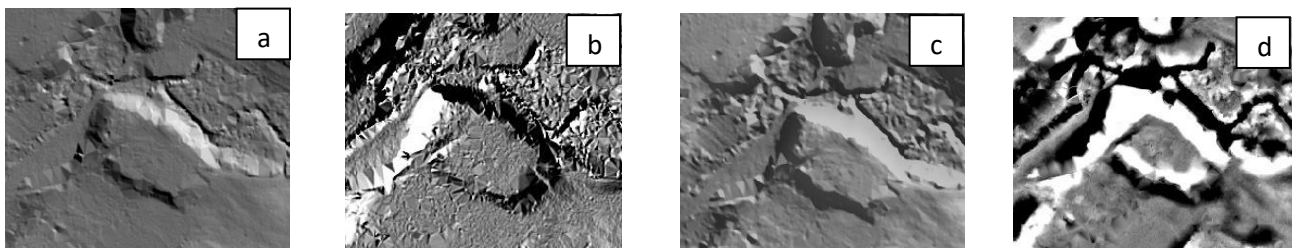
21 pav. Dvylių gynybinis įtvirtinimas



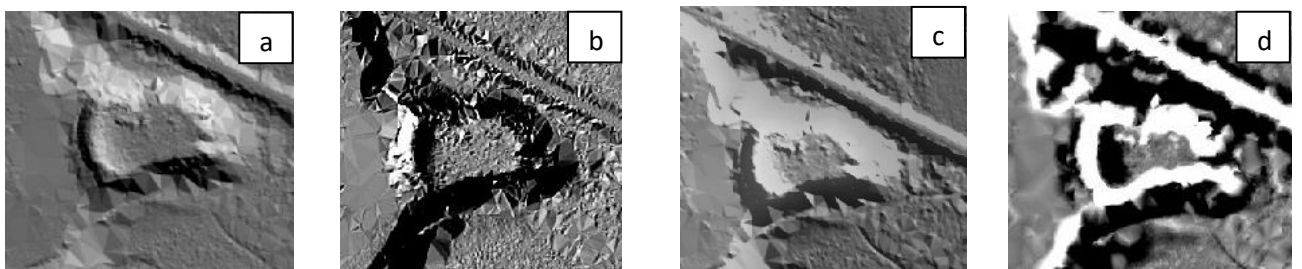
22 pav. Lazduonėnų piliakalnis



23 pav. Akmeniškų piliakalnis



24 pav. Vanagių piliakalnis



25 pav. Skomantų piliakalnis

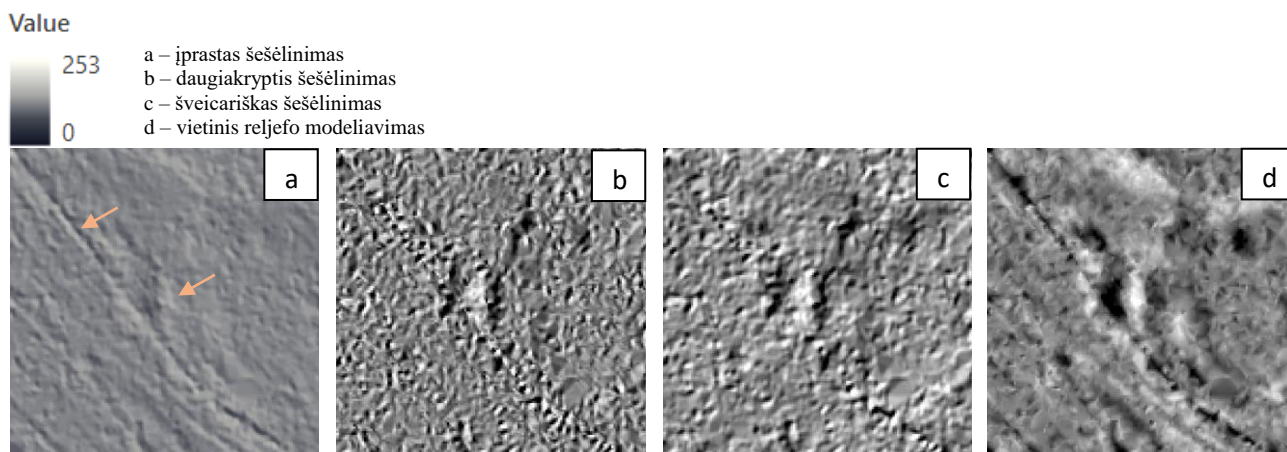
Nustatyta, jog archeologinių objektų geometrinė forma turi įtakos LiDAR duomenų vizualizavimo metodo parinkimui. Panaudojus skirtingus LiDAR duomenų vizualizacijos metodus Lietuvos archeologiniams objektams vizualizuoti nustatyta, jog *linijinius* archeologinius objektus geriausiai pabrėžia šveicariško šešėlinimo metodas (21 pav., c). Įprastas šešėlinimo metodas taip pat tinkamas, tačiau šveicariškas pateikia vizualiai ryškesnį vaizdą ir atskleidžia daugiau reljefo požymių. Tačiau *apskritų* ir *ovalių* objektų formą aiškiau atskleidžia įprastas šešėlinimas lyginant su kitais metodais (22 pav., a; 23 pav., a), nors tai smarkiai įtakoja apšvietimo krypties pasirinkimas. Pavyzdžiui 26 pav. pateikiamas pavyzdys, kai įprastas šešėlinimas aiškiai išskiria griovį, tačiau pasirinkus 45 laipsnių azimutą LDK sienos sampilas sunkiau pastebimas lyginant su kitais metodais (26 pav., a). Daugiakryptis šešėlinimas tinkamiausias vizualizuoti objektus, kuriems būdinga *keturkampė* forma, kadangi šiuo metodu objektas apšviečiamas iš kelių skirtingų pusių, todėl aiškiau pabrėžiamos skirtingos šlaitų pusės, nes vaizduojama daugiau šešėlio (24 pav., b). Objektus, kurių forma *netaisyklinga* vizualizuoti yra sudėtingiausia, tačiau tikroviškiasiai jie pateikiami įprastu reljefo šešėliavimo metodu (25 pav., a).

Apibendrinant galima teigti, jog universaliausias LiDAR duomenų vizualizacijos metodas remiantis atliktu skirtingų geometrinių formų archeologinių objektų vizualizacijos vertinimu yra įprastas reljefo šešėlinimo metodas (1 lentelė). Kiti šešėlinimo būdai nėra itin patikimi, kadangi vienus objektus išskiria sėkmingiau, o kitiems objektams yra mažiau tinkami. Vietinis reljefo modeliavimo metodas pateikia gana neįprastą vaizdą, kadangi reljefo vaizdavimas neatitinka tikrovėje matomo vaizdo, tačiau šio metodo nereikėtų nuvertinti, nes jis gana tiksliai išskiria objektų kontūrus ir padeda nustatyti tiksleną archeologinių objektų formą.

	Archeologinio objekto forma					
		linija	apskritimas	ovalas	keturkampis	netaisyklinga
Vizualizavimo metodas	Reljefo šešėlinimas	1	2	2	1	2
	Daugiakryptis reljefo šešėlinimas	0	1	0	2	1
	Šveicariškas šešėlinimas	2	0	0	1	0
	Vietinis reljefo modelis	1	0	0	0	0

Vertinimas: 0 – mažiausiai tinkamas; 1 – tinkamas; 2 – labai tinkamas

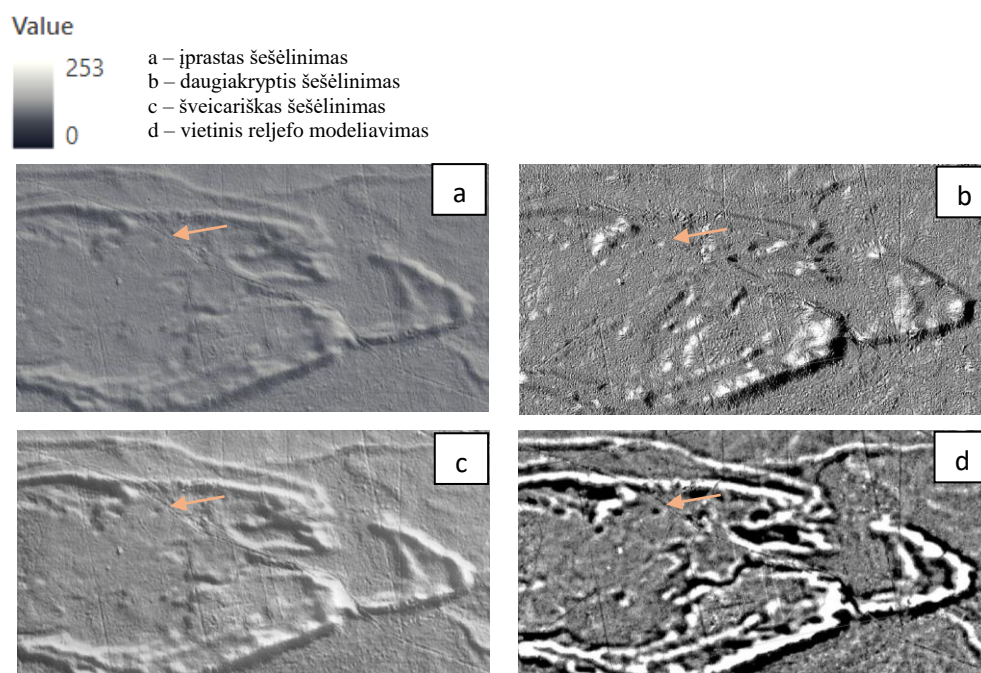
1 lentelė. LiDAR duomenų vizualizacijos metodų vertinimas pagal archeologinio objekto formą



26 pav. Melno taikos metu nustatytos LDK sienos fragmentas su sampilu

#### 4.1.2. Pagal reljefo formas

Remiantis morfometriniu reljefo formų klasifikacija, reljefas skirstomas į kalvas (27 pav.), bangas (28 pav.) ir lygumas (29 pav.) (Česnulevičius, 1999). Išnagrinėjus Melno sutartimi nustatytos LDK sienos atkarpos fragmentus šiose skirtingose reljefo formose nustatyta, jog ši linijinės formos objektą aiškiau pabrėžia šveicariško šešėlinimo metodas tiek kalvotame, tiek banguotame reljefe. Lygiame reljefe išskirtinas ir vietinis reljefo modeliavimas (29 pav., d).



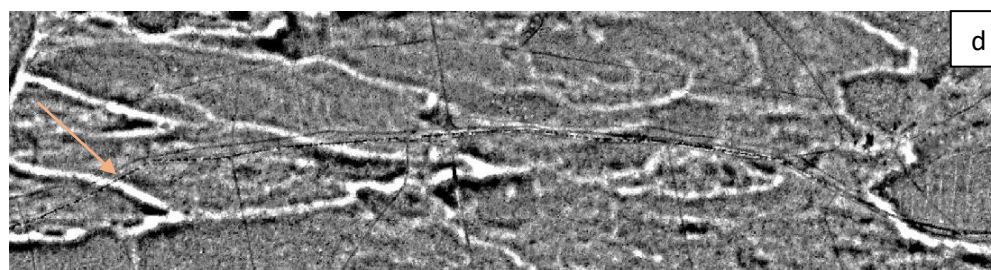
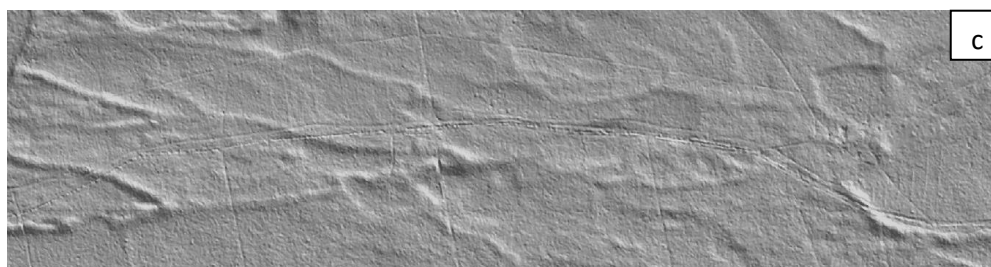
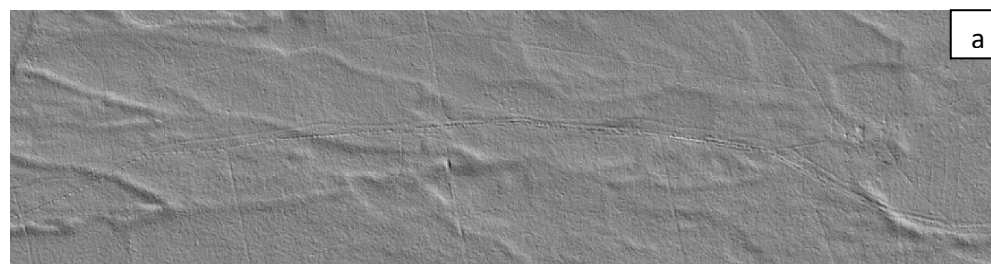
27 pav. Melno sutartimi nustatytos LDK valstybinės sienos atkarpa.

Reljefo forma: kalvos

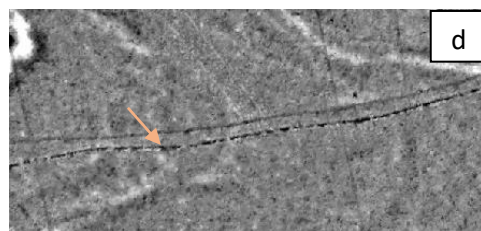
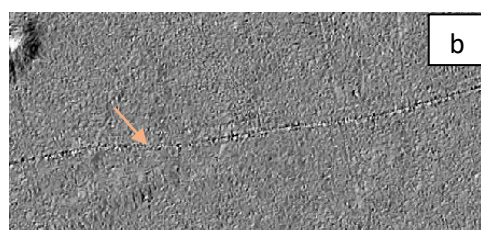
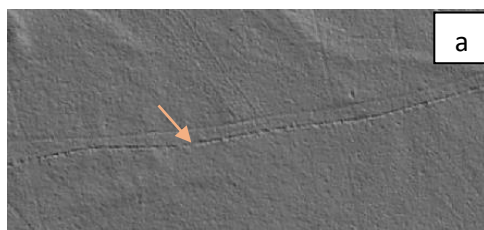
Value



- a – įprastas šešėlinimas
- b – daugiakryptis šešėlinimas
- c – šveicariškas šešėlinimas
- d – vietinis reljefo modeliavimas

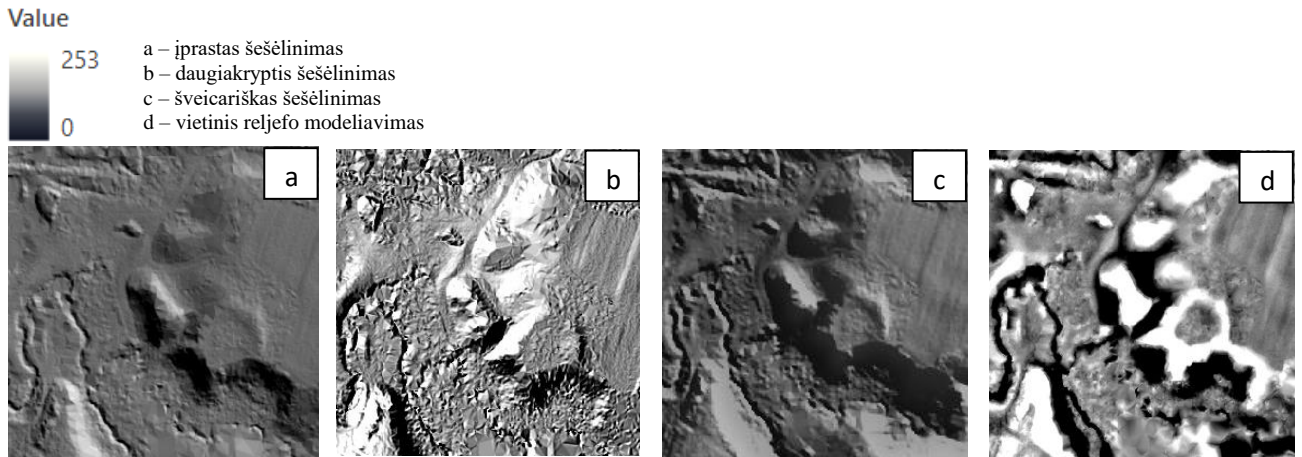


28 pav. Melno sutartimi nustatytos LDK valstybinės sienos atkarpa.  
Reljefo forma: bangos



29 pav. Melno sutartimi nustatytos LDK valstybinės sienos atkarpa.  
Reljefo forma: lyguma

Tačiau įvertinus kitų geometrinių formų stambesnius archeologinius objektus nustatyta, jog šveicariškas šešėlinimas ne visada yra tinkamiausias metodas. Reljefe, kuriam būdingos kalvos stambesnių ir sudėtingesnių formų archeologinių objektų struktūros aiškiau pabrėžiamos ne tik įprastu (30 pav., a), bet ir daugiakrypčiu šešėlinimu (30 pav., b). Todėl vertinant vizualizavimo metodus pagal skirtingas reljefo formas reikia atsižvelgti ir į archeologinio objekto dydį (2 lentelė).



30 pav. Andulių piliakalnis su priešpiliu.  
Reljefo forma: kalvos

		Reljefo formos			
		Kalvos		Bangos	Lygumos
	Archeologinio objekto dydis	<2 m	>2 m		
Vizualizavimo metodas	Reljefo šešėlinimas	1	2	1	1
	Daugiakryptis reljefo šešėlinimas	0	2	0	1
	Šveicariškas šešėlinimas	2	1	2	2
	Vietinis reljefo modelis	1	0	1	2

Vertinimas: 0 – mažiausiai tinkamas; 1 – tinkamas; 2 – labai tinkamas

2 Lentelė. LiDAR duomenų vizualizacijos metodų vertinimas pagal reljefo formą

## 5. REKOMENDACIJOS

LiDAR panaudojimas archeologiniuose tyrimuose gali žymiai papildyti mokslinę informaciją naujais duomenimis. Tačiau Nacionalinių tarnybų teikiami LiDAR duomenys nėra paruošti archeologinių objektų nustatymui, todėl juos reikia tinkamai apdoroti, kad būtų galima pritaikyti išsamesniems archeologiniams tyrimams. Šio darbo rengimo metu atlikus tyrimą ir panaudojant Lietuvos Nacionalinės žemės tarnybos teikiamus LiDAR duomenis nustatyta, jog LiDAR duomenų apdorojimą galima išskirti į du etapus. Kiekvienam etapui taikome skirtingas rekomendacijas.

### 1) Pirminis LiDAR duomenų apdorojimas.

Šiam etapui priskiriamos procedūros, reikalingos LiDAR duomenų parengimui skirtingų vizualizacijos metodų taikymui. Tai apimtų LiDAR duomenų filtravimą ir SRM sukūrimą. Ne visi lazerio impulsai pasiekia žemės paviršių, ypač tankioje augmenijoje, todėl atliekama interpoliacija siekiant užpildyti trūkstamų taškų paliktas tuščias erdves. Yra du pagrindiniai būdai, kaip sujungti lazerinio skenavimo taškus ir paversti šį taškų debesį į SRM. Pirmasis iš jų - *regularus stačiakampių tinklas*. Šiuo atveju paviršių apibūdina gardelių matrica, sudaryta iš eilučių ir stulpelių, sudarančių koordinačių tinklą. Kiekvienoje gardelėje saugomos aukščio reikšmės, o modeliuojant skaitmeninį reljefo paviršių panaudojama vidutinė taškų, priklausančių gardelei, Z reikšmė. Tačiau pagrindinė šio metodo problema yra duomenų praradimas išvedant reikšmių vidurkį. Kitas būdas vadinamas *nereguliariu trikampių tinklu* (NTT). Tai nepersidengiančių trikampių tinklas, kurio kiekviena trikampo viršūnė yra vienas LiDAR taškas su XYZ verte. Šis tinklas paverčiamas ištisine struktūra, vaizduojančia žemės paviršių. NTT privalumas yra tai, jog išvengiama duomenų praradimo, o duomenų apdorojimas nesudėtingai atliekamas beveik visose turimose GIS programose, todėl šį metodą rekomenduojama naudoti tiriant pavienius archeologinius objektus arba atliekant tyrimus nedidelėse teritorijose, kai reikalingi kuo tikslesni archeologinių struktūrų požymiai. Nors laikoma, kad NTT labiau atitinka pradines aukščių reikšmes, bet esant labai dideliame duomenų kiekiui ir analizuojant archeologinius objektus, pasiskirsčiusius itin plačiose teritorijose, rekomenduojame naudoti stačiakampių tinklą, kadangi jį lengviau sukurti ir analizuoti.

### 2) Antrinis LiDAR duomenų apdorojimas.

Šis etapas apima informatyviausio LiDAR duomenų vizualizacijos metodo parinkimą. Prieš pasirenkant LiDAR duomenų vizualizacijos metodą rekomenduojama atsižvelgti į pirminį

tyrimų tikslą, pvz., naujų nežinomų objektų nustatymas, žinomų objektų struktūrų ar aplinkos patikslinimas ir į tyrimų mastą. Dėl gausaus skirtingų metodų kiekio tikslinga iš anksto išnagrinėti šių metodų specifines savybes ir ypač laiko trukmę, reikalingą jų įgyvendinimui bei rezultatų interpretavimui. Siekiant aptikti naujus nežinomus objektus didelėse teritorijose, pirmiausia rekomenduojama rinktis klasikinį vizualizacijos metodą – įprastą reljefo šešėlinimą. Tai universaliausias, lengvai interpretuojamas ir daugelyje GIS programų prieinamas metodas. Tačiau nors įprastas šešėlinimas efektyvus, jo galimybes apriboja apšvietimo krypties pasirinkimas, todėl rekomenduojama taikyti bent dviejų skirtingų apšvietimo azimutų šešėlinimą. Siekiant išsamiau išnagrinėti archeologinius objektus nedidelėse teritorijose rekomenduojama naudoti keleto vizualizacijos metodų kombinaciją. Šiuo atveju tikslinga atsižvelgti į vietovei būdingą reljefo tipą. Ant plokštesnio reljefo rekomenduotina naudoti VRM ir įprasto šešėlinimo metodus. Pirmasis aiškiau pabrėš smulkesnes archeologines struktūras, o antrasis – stambesnes. Kalvotame reljefe rekomenduojama naudoti įprasto ir daugiakrypčio šešėlinimo metodus. Taip bus informatyviau atskleista archeologinių objektų forma.

## IŠVADOS

Šio tyrimo metu buvo analizuojami LiDAR duomenų apdorojimo metodai siekiant įvertinti Melno taikos sutartimi nustatytos LDK valstybinės sienos identifikavimo galimybes ir panaudojus kitus archeologinius objektus nustatyti vizualizacijos metodų informatyvumą.

Pirminis LiDAR panaudojimo archeologiniuose tyrimuose etapas apima duomenų surinkimą. Kuo didesnis lazerinio skenavimo gaunamų taškų tankis, tuo informatyvesnių rezultatų galima pasiekti. Šis etapas taip pat apima ir archyvinių duomenų surinkimą. Išsamesnės informacijos apie archeologinę vietovę turėjimas gali žymiai palengvinti archeologinių objektų nustatymo iš LiDAR duomenų tikimybę. LiDAR duomenų apdorojimas susideda iš dviejų pagrindinių etapų: pirminio duomenų apdorojimo – šis etapas apima LiDAR duomenų konvertavimą į skaitmeninį reljefo modelį ir parengimą vizualizacijai; antrinis LiDAR duomenų apdorojimas apima vizualizacijos metodų pritaikymą sukurtam skaitmeniniam reljefo modeliui.

LiDAR duomenų vizualizacijos metodai archeologiniams objektams nustatyti pasižymi didele įvairove. Klasikiniais metodams būdingos nesudėtingos rastrinės analizės funkcijos. Šiuolaikiniai metodai pasižymi sudėtingesnių matematinių funkcijų taikymu. Išsamesnei archeologinių objektų analizei atlikti dažniausiai naudojamos skirtingų vizualizacijos metodų kombinacijos.

Atliktas tyrimas patvirtino, jog LiDAR duomenys gali būti sėkmingai panaudoti naujų archeologinių struktūrų atskleidimui. Panaudojus įprastą Reljefo šešėliavimo, Šveicariško šešėliavimo, Daugiakrypčio šešėliavimo ir Vietinio reljefo modeliavimo metodus aptiktos 24 naujos vietos su galimai išlikusiais istorinės LDK sienos likučiais. Deja šie nuotoliniu būdu gauti duomenys negali pateikti tikslios informacijos, kurią galima nustatyti tik tiesiogiai apsilankant vietovėje. Iš LiDAR duomenų pavyko nustatyti tik griovių pavidalu išlikusias tiriamo archeologinio objekto dalis, o šiam objektui būdingų naujų sampilų panaudojus skirtingus vizualizacijos metodus nustatyti nepavyko. Šiam tikslui reikalingi aukštesnės kokybės LiDAR duomenys.

Atliktas tyrimas parodė, jog vizualizacijos metodų informatyvumas skiriasi. Tam turi įtakos archeologinio objekto dydis, jo forma ir objektą supančio reljefo forma. Vieni metodai tinkamesni ant plokštesnio paviršiaus ir geriau pabrėžia smulkius objektus (Vietinis reljefo modeliavimas), kiti metodai netinkami nei plokštiems paviršiams, nei smulkiems objektams identifikuoti, tačiau gerai atskleidžia tam tikrų formų stambius archeologinius objektus kalvotose vietovėse (Daugiakryptis reljefo šešėlinimas). Šveicariškas reljefo šešėlinimas puikiai išskiria



vienos formos (linijinius) archeologinius objektus, tačiau vizualizuojant kitų formų objektus šio metodo informatyvumas mažėja. Įprastas Reljefo šešėlinimas yra vienas patikimiausių metodų, tačiau netinkamai pasirinkus apšvietimo kryptį, jo informatyvumas taip pat sumažėja.

Kiekvienas kraštovaizdis ir archeologinė vietovė turi unikalių savybių, tad nėra vieno vizualizacijos metodo tinkamo visiems atvejams. GIS programomis įvykdžius LiDAR duomenų apdorojimo funkcijas sukuriama nauji išvestiniai duomenys, tačiau taipogi dalis informacijos nuo pirminių duomenų prarandama. Kiekvieno pritaikomo vizualizacijos metodo atveju ji skiriasi, todėl, priklausomai nuo tyrimų masto ir tikslo, patariama taikyti ne mažiau kaip du skirtingus LiDAR duomenų vizualizacijos metodus informatyvesniam archeologinių objektų atskleidimui.

## ŠALTINIŲ IR LITERATŪROS SĄRAŠAS

### Knygos:

- Barber D., Mills J. 2007. *3D laser scanning for heritage: advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture*. Swindon: English Heritage. 7–18 p.
- Crutchley S., Crow P. 2010. *The Light Fantastic. Using Airborne Lidar in Archaeological Survey*. 1st ed. English Heritage: Swindon, UK. 17 p.
- Česnulevičius A., 1999. *Lietuvos reljefas: morfografiniai ir morfometriniai aspektai*. Vilnius, Vilnius, Geografijos institutas. 37 p.
- Imhof E. 2007. *Cartographic Relief Presentation*. Edited by H. J. Steward. Redlands, USA: ESRI Press. 436 p.
- Poirier N., Opitz R., Nuninger L., Oštir K. 2013. *Lidar in Mediterranean agricultural landscapes: reassessing land use in the Mauguio*. Oxford: Oxbow Books. 184-186 p.

### Knygų dalys ir skyriai:

- Boer de A.G., Laan W.N.H., Waldus W., Zijverden van W.K. 2008. LIDAR-based surface height measurements: applications in archaeology. *Beyond Illustration: 2D and 3D Digital Technologies as Tools for Discovery in Archaeology*. 79-84 p.
- Tamulynas L., Grižas G., Skrupskelis A., Suncovas V., Vaicekauskas I. 2013. LiDAR duomenų taikymas Lietuvos archeologijoje. *Metodai Lietuvos archeologijoje: mokslas ir technologijos praeičiai pažinti*. 589–591 p.

### Publikacijos straipsnių rinkiniuose ir periodiniuose leidiniuose:

- Barnes D. 2002. Using ArcMap to Enhance Topographic Presentation." *Cartographic Perspectives*. Vol. 42. 5-7.
- Barnes I. 2003. Aerial remote-sensing techniques used in the management of archaeological monuments on the British Army's Salisbury Plain Training Area, Wiltshire, UK. *Archaeological Prospection*. 10. 88-90.

- Bennett R., Welham K., Hill R.A., Ford A. 2012. A comparison of visualization techniques for models created from airborne laser scanned data. *Archaeological Prospection*. 19. 41–42.
- Bewley R.H., Crutchley S.P., Shell C.A. 2005. New light on an ancient landscape: lidar survey in the Stonehenge World Heritage site. *Antiquity*. 79. 636-640.
- Bofinger J., Kurz S., Schmidt S. 2006. Ancient maps – modern data sets: different investigative techniques in the landscapes of the Early Iron Age princely hill fort Heuneburg, Baden-Württemberg. *From space to place: Proceedings of the 2nd International Workshop on remote sensing in archaeology*. Rome. 87-90.
- Brunning R., Farr-Cox F. 2005. The River Siger rediscovered: lidar survey and relict landscape on the Somerset Claylands. *Archaeology and the Severn Estuary*. 16. 7-10.
- Carey C., Brown K., Challis A.J., Howard & Cooper I. 2006. Predictive modelling of multi-period geoarchaeological resources at a river confluence: a case study from the Trent-Soar, UK. *Archaeological Prospection*. 13(4). 241-242.
- Challis K. 2006. Airborne laser altimetry in alluviated landscapes. *Archaeological Prospection*. 13. 103-104.
- Challis K., Howard A.J, Smith S.N., Gearey B.R., Moscrop D., Carey C.J., A. Thompson. 2006. Using airborne lidar intensity to predict the organic preservation of waterlogged deposits. S.Campana & M. Forte (ed.) *From space to place: Proceedings of the 2nd International Workshop on remote sensing in archaeology*. Rome. 93-94.
- Challis K., Kokalj Ž., Kincey M., Moscrop D., Howard A.J. 2008. Airborne lidar and historic environment records. *Antiquity*. 82(318). 1055-1064.
- Challis K., Forlin P., Kincey M. 2011. A generic toolkit for the visualization of archaeological features on airborne LiDAR elevation data. *Archaeological Prospection*. 18. 279–289.
- Chase A. F., Chase D. Z., Weishampel J. F., Shrestha R. L., Slatton K. C., Awe J. J., Carter W. E. 2011. Airborne LiDAR, archaeology, and the ancient Maya landscape at Caracol, Belize. *Journal of Archaeological Science*. 38(2). 387–389.
- Chiba F., Yokoyama R. 2009. New Method to Generate Excavation Charts by Openness Operators. *Proceedings of the 22nd CIPA Symposium*. Kyoto. 1–5.

- Crutchley S. 2006. Light detection and ranging (lidar) in the Witham Valley, Lincolnshire: an assessment of new remote sensing techniques. *Archaeological Prospection*. 13. 251–254.
- Devereux B. J., Amable G. S., Crow P., Cliff A. D. 2005. The potential of airborne lidar for detection of archaeological features under woodland canopies. *Antiquity*. 79(305). 658-660.
- Devereux B.J., Amable G.S., Crow P. 2008. Visualisation of LiDAR terrain models for archaeological feature detection. *Antiquity*. 82. 470–479.
- Doneus M., Briese C., Fera M., Janner M. 2008. Archaeological prospection of forested areas using full-waveform airborne laser scanning. *Journal of Archaeological Science*. 35(4). 882–893.
- Doneus M., Briese C. 2011. Airborne Laser Scanning in Forested Areas - Potential and Limitations of an Archaeological Prospection Technique. *Remote Sensing for Archaeological Heritage Management: Proceedings of the 11th EAC Heritage Management Symposium*. Reykjavik. Vol. 3. 53–56.
- Doneus M. 2013. Openness as Visualization Technique for Interpretative Mapping of Airborne Lidar Derived Digital Terrain Models. *Remote Sensing*. 5. 6427-6430.
- Doneus M., Miholjek I., Mandlbürger G., Doneus N., Verhoeven G., Briese C., Pregesbauer M. 2015. Airborne laser bathymetry for documentation of submerged archaeological sites in shallow water. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*. XL-5/W5. 99–100.
- Engström T., Johansson M. 2009. The use of terrestrial laser scanning in archaeology Evaluation of a Swedish project, with two examples. *Journal of Nordic Archaeological Science*. 16. 5-9.
- Gallagher J.M., Josephs R.L. 2008. Using LiDAR to Detect Cultural Resources in a Forested Environment: an Example from Isle Royale National Park, Michigan, USA. *Archaeological Prospection*. Vol. 15. 204–206.
- Harmon J.M, Leone M.P., Prince S.D., Snyder M. 2006. LiDAR for archaeological landscape analysis: a case study of two eighteenth-century Maryland plantation sites. *American Antiquity*. 71(4). 649-653.
- Hesse R. 2010. LiDAR-derived Local Relief Models (LRM) – a new tool for archaeological prospection. *Archaeological Prospection*. Vol. 17. 67-72.

- Holden N., Horne P., Bewley R. 2002. High-resolution digital airborne mapping and archaeology. Aerial Archaeology: developing future practice. *NATO Science Series, sub-series I: Life and Behavioural Sciences*. Amsterdam. 173-1175.
- Humme A., Lindenbergh R., Sueur C. 2006. Revealing Celtic Fields from Lidar Data Using Kriging Based Filtering. *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium "Image Engineering and Vision Metrology"*. Dresden. 1-5.
- Yokoyama R. Sirasawa M., Pike R.J. 2002. Visualizing topography by openness: A new application of image processing to digital elevation models. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 68. 257–265.
- Kersten Th., Lindstaedt M., Mechelke K., Vogt B. 2010. Terrestrial Laser Scanning for the Documentation of Archaeological Objects and Sites on Easter Island. Melero F., Cano P., Revelles J. eds, Fusion of Cultures. *Abstracts of the XXXVIII Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*. Granada. 309-312.
- Kokalj Ž., Zakšek K., Ostir K. 2011. Application of sky-view factor for the visualization of historic landscape features in LiDAR-derived relief models. *Antiquity*. 85. 263–273.
- Kokalj Ž., Zakšek K., Oštir K. 2013. Visualizations of Lidar Derived Relief Models. *Interpreting Archaeological Topography: Airborne Laser Scanning, 3D Data and Ground Observation*. Vol. 5. 100–114.
- Kuncevičius A., Laužikas R., Šmigelskas R., Augustinavičius R. 2012. Erdvės užkariavimas: 3D technologijos taikymo galimybės ir problemos Lietuvos archeologijoje. *Archaeologia Lituana*. 13. 7–28.
- Lasaponara R., Masini N., Holmgren R., Forsberg B. 2012. Integration of aerial and satellite remote sensing for archaeological investigations: a case study of the Etruscan site San Giovenale. *Journal of Geophysics and Engineering*. 9. S26–S39.
- Laužikas R., Kuncevičius A., Kurauskas V., Žižiūnas T., Šmigelskas R., Augustinavičius R., Žilinskas E. 2017. Kultūros paveldo informacijos pusiau automatinis valdymas ir tyrimai naudojant 3D technologijas. *Informacijos mokslai*. 77. 160–179.
- Lercari N. 2016. Terrestrial Laser Scanning in the Age of Sensing. Eds.: Forte M., Campana S. *Digital Methods and Remote Sensing in Archaeology*. New York: Springer. 3-33.

- Masini N., Coluzzi R., Lasaponara R. 2011. On the Airborne Lidar Contribution in Archaeology: from Site Identification to Landscape Investigation, Laser Scanning Chau-Chang Wang. *IntechOpen*. 263-285.
- Mayoral A., Toumazet J.P., Simon F.X., Vautier F., Peiry J.L. 2017. The Highest Gradient Model: A New Method for Analytical Assessment of the Efficiency of LiDAR-Derived Visualization Techniques for Landform Detection and Mapping. *Remote Sensing*. 9. 1-23.
- McCoy M.D, Asner G.P, Graves M.W. 2011. Airborne LiDAR survey of irrigated agricultural landscapes: an application of the slope contrast method. *Archaeological Science*. 38. 2141–2154.
- Risbøl O., Gjertsen A.K., Skare K. 2006. Airborne laser scanning of cultural remains in forests: some preliminary results from a Norwegian project. From Space to Place. *Proceedings of the 2nd international conference on remote sensing in archaeology: BAR International Series*. 57-70.
- Risbøl O., Bollandsås O.M., Nesbakken O., Ørka H.O., Næsset E & Gobakken T. 2013. Interpreting cultural remains in airborne laser scanning generated digital terrain models: effects of size and shape on detection success rates. *Journal of Archaeological Science*. Vol. 40. 4688 – 4700.
- Rowlands A., Sarris A. 2007. Detection of Exposed and Subsurface Archaeological Remains Using Multi-Sensor Remote Sensing. *Journal of Archaeological Science*. Vol. 34(5). 795-803.
- Schneider A., Takla M., Nicolay A., Raab A., Raab T. 2015. A Template-matching Approach Combining Morphometric Variables for Automated Mapping of Charcoal Kiln Sites. *Archaeological Prospection*. 22(1). 45–62.
- Sithole G., Vosselman G. 2004. Experimental Comparison of Filter Algorithms for Bare-Earth Extraction from Airborne Laser Scanning Point Clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 59. 85-101.
- Sittler B. 2004. Revealing historical landscapes by using airborne laser scanning. A 3-D Modell of Ridge and Furrow in Forests near Rastatt (Germany). *Proceedings of Natscan, Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment: Instruments, Processing Methods and Applications, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 258.

- Stal C., Bourgeois J., Maeyer de P., Mulder de G., Wulf de A., Goossens R., Nuttens T., Stichelbaut B. 2010. Kemmelberg (Belgium) case study: comparison of DTM analysis methods for the detection of relicts from the First World War. *Remote sensing for science, education, and natural and cultural heritage : proceedings of the EARSeL Symposium*. 65–72.
- Trier Ø. D., Pilø L. H. 2012. Automatic detection of pit structures in airborne laser scanning data. *Archaeological Prospection*. 19. 103–121.
- Venter M., Shields C., Cuevas Ordóñez M. 2017. Mapping Matacanela: The Complementary Work of Lidar and Topographical Survey in Southern Veracruz, Mexico. *Ancient Mesoamerica*. 1-12.
- Weber J., Powis T.G. 2014. Assessing terrestrial laser scanning in complex environments. *Advances in Archaeological Practice*. 2. 123–137.
- Wehr A., Lohr U. 1999. Airborne Laser Scanning—An Introduction and Overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 54(2-3) 68-82.
- Zakšek K., Oštir K., Kokalj Ž. 2011. Sky-view factor as a relief visualization technique. *Remote Sensing*. 3. 398–415.

#### Disertacijos:

- Čelkis T. 2011. *Valdžia ir erdvė: Lietuvos Didžiosios Kunigaikštystės teritorializacijos procesas XIV-XVI a.* Daktaro disertacija. Vilnius: Vilniaus universitetas.

#### Ataskaitos:

- 3D žemės paviršiaus skenavimas Panerių memoriale ataskaita. 2016.
- Mark R. 1992. *Multidirectional, oblique-weighted, shaded-relief image of the Island of Hawaii*. U.S. Geological Survey Open File Report. No. 92-422.

#### Kiti:

- SEŽP\_0.5LT - Lietuvos Respublikos teritorijos skaitmeniniai erdviniai žemės paviršiaus lazerinio skenavimo taškų duomenys

Interneto svetainės:

- <http://www.kvr.kpd.lt/>
- <http://www.bbc.com/news/world-latin-america-42916261>
- [http://fkc.staatsbibliothek-berlin.de/html/preussen/n9487\\_3.html](http://fkc.staatsbibliothek-berlin.de/html/preussen/n9487_3.html)
- <http://maps4u.lt/lt/>
- <http://kpip.lt/piliavietes.html>



# SANTRAUKA LIETUVIŲ KALBA

**Irmina Kaminskaitė**

## **LiDAR taikymo archeologiniuose tyrimuose metodinė analizė ir optimizavimas**

### **Santrauka**

Žemės paviršiaus lazerinio skenavimo metodas (LiDAR) (angl. Light Detection and Ranging) atveria naujas galimybes archeologiniam palikimui nagrinėti. Išsamesnė LiDAR duomenų taikymo archeologijoje analizė gali padėti atskleisti informatyvesnius ir vizualesnius archeologinių objektų atskleidimo metodus. Tad pagrindinis šio darbo tikslas yra išanalizuoti LiDAR duomenų apdorojimo metodus archeologinių objektų nustatymui ir parengti rekomendacijas.

Teorinėje dalyje apžvelgiami LiDAR duomenų taikymo archeologijoje tyrimai ir dažniausiai naudojami LiDAR duomenų vizualizacijos metodai. Praktinėje dalyje analizuojami Įprasto, Šveicariško, Daugiakrypčio reljefo šešėlinimo ir Vietinio reljefo modeliavimo metodai siekiant įvertinti Melno taikos sutartimi 1422 m. nustatytos LDK valstybinės sienos identifikavimo galimybes ir nustatyti vizualizacijos metodų informatyvumą.

Atliktas tyrimas parodė, jog vizualizacijos metodų informatyvumas skiriasi. Tam turi įtakos archeologinio objekto dydis, jo forma ir objektą supančio reljefo forma. Vieni metodai tinkamesni ant plokštesnio paviršiaus ir geriau pabrėžia smulkius objektus (Vietinis reljefo modeliavimas), kiti metodai netinkami nei plokštiems paviršiams, nei smulkiems objektams identifikuoti, tačiau gerai atskleidžia tam tikrų formų stambius archeologinius objektus kalvotose vietovėse (Daugiakryptis reljefo šešėlinimas). Šveicariškas reljefo šešėlinimas puikiai išskiria vienos formos (linijinius) archeologinius objektus, tačiau vizualizuojant kitų formų objektus šio metodo informatyvumas mažėja. Įprastas Reljefo šešėlinimas yra vienas patikimiausių metodų, tačiau netinkamai pasirinkus apšvietimo kryptį, jo informatyvumas taip pat sumažėja.

Kiekvienas kraštovaizdis ir archeologinė vietovė turi unikalių savybių, tad nėra vieno vizualizacijos metodo tinkamo visiems atvejams. Todėl, priklausomai nuo tyrimų masto ir tikslo, patariama taikyti ne mažiau kaip du skirtingus LiDAR duomenų vizualizacijos metodus informatyvesniam archeologinių objektų atskleidimui.

**Reikšminiai žodžiai:** LiDAR, Archeologija, Reljefo šešėlinimas, Šveicariškas reljefo šešėlinimas, Daugiakryptis reljefo šešėlinimas, Vietinis reljefo modeliavimas.

**Irmina Kaminskaitė**

**Methodical analysis and optimization of lidar application in archaeological research**

**Summary**

Light Detection and Ranging (LiDAR) opens up new opportunities for exploring archaeological heritage. A more detailed analysis of the application of the LiDAR data in archeology can help to reveal more informative methods to visualize archaeological objects. Thus, the main objective of this work is to analyze LiDAR data processing methods for the identification of archaeological objects and to prepare recommendations.

The theoretical part reviews the use of LiDAR application in archeology and most commonly used LiDAR data visualization methods. Practical part analyzes the traditional Hillshading, Swiss hillshading, Multidirectional oblique weighting (MDOW) and Local Relief Modeling (LRM) in order to assess the possibilities of identifying the historical state border of the Grand Duchy of Lithuania established after The Treaty of Melno in 1422 and to determine the informativeness of visualization methods.

The research showed that the informativeness of visualization methods varies. This is influenced by the size of the archaeological object, its shape and the shape of the surrounding relief. Some methods are more suitable on a flat surface and better emphasize small objects (LRM); other methods are not suitable for either flat surfaces or small objects, but reveal well large archaeological objects in hilly areas (MDOW). The Swiss hillshading is a good method to reveal one-form (linear) archaeological objects, but visualizing objects of other shapes reduces the informativeness of this method. Traditional Hillshading is one of the most trusted methods, but if the illumination is not chosen properly, its informativeness also decreases.

Each landscape and archaeological site have unique characteristics, so there is no single visualization method suitable for all cases. Therefore, depending on the scope and purpose of the research, it is advisable to apply at least two different methods of LiDAR data visualisation for more informative disclosure of archaeological objects.

**Keywords:** LiDAR, Archaeology, Hillshading, Swiss Hillshading, MDOW, LRM.

## PRIEDAI

1 priedas

### LiDAR duomenų vizualizacijos metodų taikymo archeologiniuose tyrimuose suvestinė lentelė

SV – spalvinis vaizdavimas

I – izolinijos

RŠ – reljefo šešėlinimas

DRŠ – daugiakryptis reljefo šešėlinimas

ŠRŠ – šveicariškas reljefo šešėlinimas

PKA – pagrindinių komponentų analizė

ŠA – šlaitų analizė

DMF – dangaus matomumo faktorius

A – atvirumas

VRM – vietinis reljefo modeliavimas

SS – saulės spinduliavimas

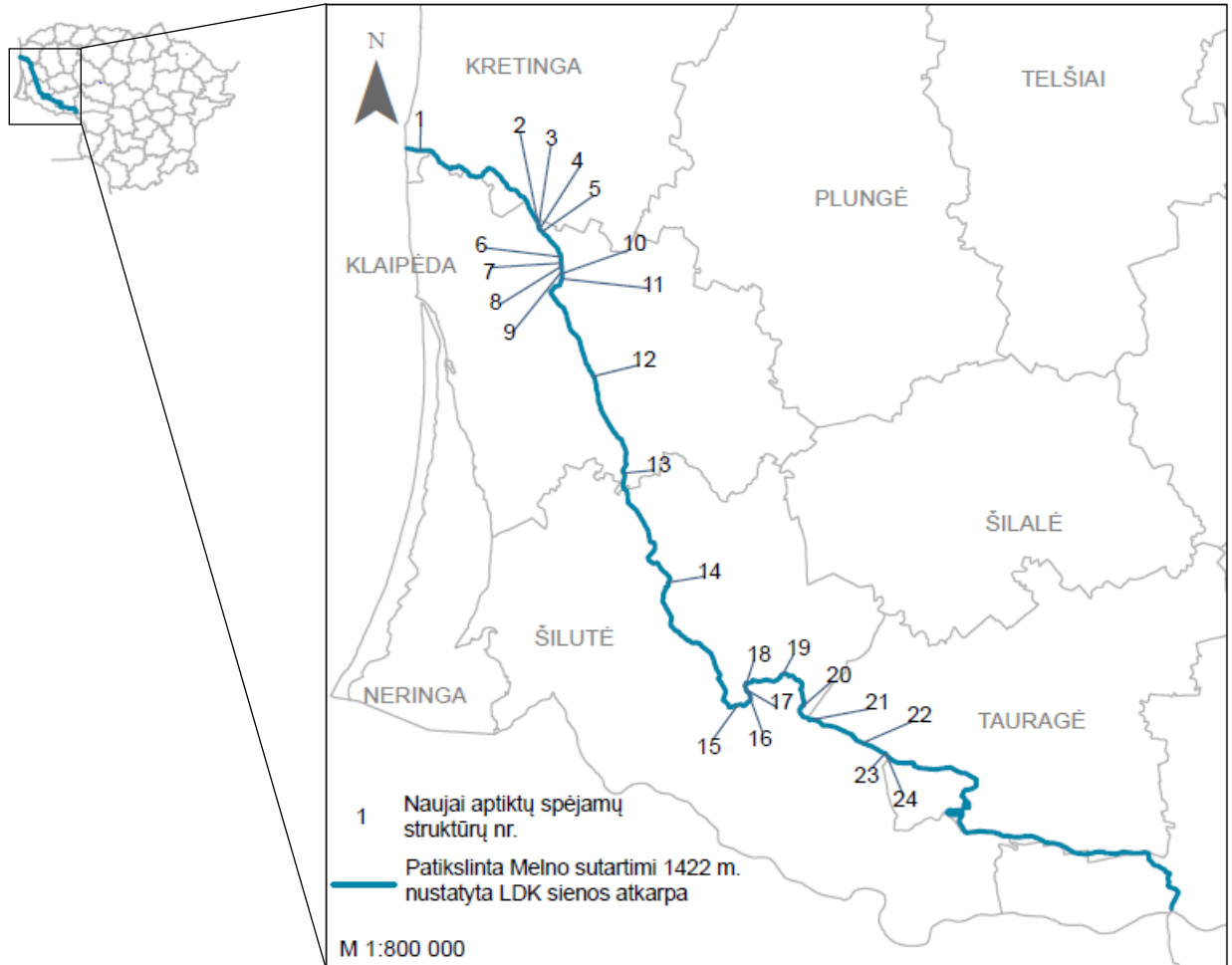
E - ekspozicija

GF – geostatistinis filtravimas

Nr.	Autorius, metai	SV	I	RŠ	DRŠ	ŠRŠ	PKA	ŠA	DMF	A	VRM	SS	E	GF
1	Holden ir kt., 2002	+		+										
2	Barnes, 2003													
3	Sittler, 2004	+												
4	Bewley ir kt., 2005		+		+									
5	Brunning, Farr-Cox, 2005			+										
6	Devereux ir kt., 2005				+									
7	Bofinger ir kt., 2006			+										
8	Carey ir kt., 2006	+												
9	Challis, 2006	+												
10	Challis ir kt., 2006	+												
11	Crutchley, 2006													
12	Doneus, Briese, 2006	+		+				+						+
13	Harmon ir kt., 2006		+	+										
14	Humme ir kt., 2006													+
15	Risbol ir kt., 2006			+										
16	Challis ir kt., 2008	+	+	+										
17	Devereux ir kt., 2008			+			+							
18	Chiba, Yokoyama, 2009	+		+						+				

19	Hesse, 2010											+			
20	Challis ir kt., 2011			+			+	+				+	+		
21	Doneus, Briese, 2011			+				+							
22	Kokalj ir kt., 2011			+			+		+						+
23	McCoy, 2011							+							
24	Zakšek ir kt., 2011								+						
25	Bennet ir kt., 2012						+	+	+			+		+	
26	Kokalj ir kt., 2013	+		+			+		+			+			
27	Poirier ir kt., 2013						+								

**Naujai aptiktos Melno sutartimi nustatytos LDK sienos struktūros**



Nr.	Koordinatės (LKS-1994 koordinacių sistemoje)
1	317457.25, 619209.27
2	331993.15, 6190004.52
3	332012.99, 6189835.86
4	332171.75, 6189336.46
5	332485.94, 6189088.41
6	334758.74, 6185964.39
7	334798.43, 6185263.24
8	334857.96, 6184886.21
9	334904.27, 6184222.10
10	334943.95, 6183924.45
11	334844.73, 6183276.22
12	338765.10, 6171244.31

13	342590.98, 6159150.18
14	348163.99, 6145781.64
15	356954.20, 6130420.57
16	358161.21, 6131761.69
17	357725.35, 6132214.32
18	357658.29, 6132633.42
19	362218.11, 6134192.47
20	364741.62, 6130243.58
21	366064.54, 6128523.79
22	372176.42, 6125586.91
23	374848.72, 6124396.28
24	375139.76, 6124263.99

Jono Vladislovo Suchodolec Prūsijos karalystės žemėlapis, I lapas (1732).



Berlyno miesto bibliotekos Prūsijos kultūros paveldo skyriaus fondai, N 9487/3.

Pilnas pavadinimas „XXIX, Vergrößerte Sectiones der General-Cardte von dem Königreich Preussen, wie daselbe in 4 folgende Districte abgetheilet als: Samland, Natangen, Oberland und Littauen“

Iš: [http://fkc.staatsbibliothek-berlin.de/html/preussen/n9487\\_3.html](http://fkc.staatsbibliothek-berlin.de/html/preussen/n9487_3.html)