

IVADAS.....	7
PAGRINDINIAI DARBE NAUDOTI ŽYMENYS	11
1. SKAITMENINIO RELJEFO MODELIAVIMO TECHNOLOGIJŲ APŽVALGA.....	12
1.1. ŽEMĖS PAVIRŠIAUS AUKŠČIŲ MATAVIMO METODŲ APŽVALGA, SUDARANT SKAITMENINĮ RELJEFO MODELĮ.....	12
1.2. PRADINIŲ DUOMENŲ, NAUDOJAMŲ RELJEFO MODELIO SUDARYTI, PAKLAIDŲ YPATUMAI.....	13
1.3. SKAITMENINIŲ RELJEFO MODELIŲ SUDARYMO PRINCIPAI	15
1.4. DAUGIAKRITERINĖS ANALIZĖS METODŲ TAIKYMAS GEOGRAFINEI INFORMACIJAI APDOROTI	17
1.5. IŠVADOS	20
2. RELJEFO MODELIAVIMO YPATUMAI.....	21
2.1. RELJEFO MODELIAVIMO ETAPAI	21
2.2. ŽEMĖS PAVIRŠIAUS MODELIAVIMO METODŲ SKIRSTYMAS PAGAL PARAMETRINIŲ FUNKCIJŲ NAUDOJIMĄ.....	21
2.3. PAGRINDINIAI PAVIRŠIAUS INTERPOLIAVIMO BŪDAI.....	22
2.4. SKAITMENINIŲ PAVIRŠIAUS MODELIŲ KOKYBĖS PALYGINIMAS	27
2.5. IŠVADOS	29
3. RELJEFO MODELIŲ, SUDARYTŲ NAUDOJANT SKIRTINGUS PRADINIUS DUOMENIS, TIKSLUMO TYRIMAS	30
3.1. RELJEFO MODELIO, SUDARYTO IN SAR METODU, TIKSLUMO ĮVERTINIMAS.....	31
3.2. RELJEFO MODELIO, SUDARYTO IŠ HORIZONTALIŲ, TIKSLUMO ĮVERTINIMAS	33
3.3. RELJEFO MODELIO, SUDARYTO ORTOFOTOGRAMETRINIŲ METODU, TIKSLUMO ĮVERTINIMAS.....	35
3.4. RELJEFO MODELIO, SUDARYTO STEREOFOTOGRAMETRINIŲ METODU, TIKSLUMO TYRIMAS	38
3.5. FOTOGRAMETRINIŲ MATAVIMO DUOMENŲ PANAUDOJIMAS RELJEFUI MODELIUOTI.....	44
3.6. IŠVADOS	47
4. RELJEFO SKAITMENINIO MODELIAVIMO METODŲ DAUGIAPARAMETRINIS VERTINIMAS IR PARAMETRŲ ĮTAKOS MODELIO TIKSLUMUI ANALIZĖ.....	48

4.1. GEOMORFOLOGINIŲ ŽEMĖS RELJEFO CHARAKTERISTIKŲ NUSTATYMO PRINCIPAI	48
4.2. PAVIRŠIAUS GEOMORFOLOGINIŲ RODIKLIŲ ĮVERTINIMAS	51
4.3. MODELIAVIMO METODŲ PARAMETRINIŲ FUNKCIJŲ ĮTAKOS RELJEFO MODELIO TIKSLUMUI TYRIMAS	58
4.3.1. <i>Variogramos tipo įtaka reljefo modelio tikslumui</i>	58
4.3.2. <i>Taškų aukščių svorio reikšmės įtaka reljefo modelio tikslumui</i>	67
4.4. MODELIAVIMO PARAMETRŲ ĮTAKOS SKIRTINGIEMS RELJEFO TIPAMS TYRIMAS	70
4.5. EKSPERIMENTINIŲ REZULTATŲ REGRESINIAI MODELIAI	90
4.5.1. <i>Skaitmeninio reljefo modelio kokybės regresinis modelis, įvertinant ląstelės matmenis ir atstumą tarp taškų</i>	91
4.5.2. <i>Skaitmeninio reljefo modelio kokybės regresinis modelis įvertinant ląstelės matmenis, atstumą tarp taškų ir reljefo geomorfologines charakteristikas</i>	95
4.6. SKAITMENINIO RELJEFO MODELIAVIMO METODŲ KOKYBĖS IR PRIORITETŲ VERTINIMAS, TAIKANT DAUGIAKRITERINĘ ANALIZĘ	101
4.6.1. <i>Analizės metodika</i>	101
4.6.2. <i>Analizės rezultatai</i>	103
4.7. IŠVADOS	106
BENDROSIOS IŠVADOS	107
AUTORĖS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS.....	109
LITERATŪRA.....	110

IVADAS

Darbo aktualumas: Pasaulyje skaitmeniniai reljefo modeliai pradėti plačiai taikyti devintajame dešimtmetyje, atsiradus pakankamai galingai skaičiavimo technikai. Skaitmeniniai reljefo modeliai taikomi aplinkos procesams modeliuoti, kariniams tikslams bei kitiems inžineriniams ir mokslo uždaviniams spręsti. Sudarant skaitmeninius reljefo modelius bei juos vertinant plačiai taikomi matematiniai statistiniai matavimo duomenų apdorojimo ir analizės metodai. Tačiau kuriant skaitmeninius reljefo modelius ir juos vertinant, matematinių statistinių metodų taikymas turi tam tikrų ypatumų. Šie ypatumai atsiranda dėl to, kad reljefo modeliavimas ir analizė priskiriami geostatistinių uždavinių grupei. Geostatistiniai uždaviniai ypatingi tuo, kad pradiniai matavimo rezultatai yra tarpiniai tarp grynai atsitiktinių ir grynai determinuotų dydžių. Sprendžiant geostatistinius uždavinius, tenka naudotis regionalizuotais duomenimis, kurių stochastinės savybės yra teritorijos geografinės padėties funkcijos. Modeliuojant reljefą, geografinės padėties funkcijų savybės lemia paviršiaus geomorfologiniai ypatumai. Reljefo paviršiui modeliuoti naudojamų metodų (pvz., krigingo, splain, svorinio, daugianario) teorinis pagrindimas paremtas atsitiktinių dydžių statistine analize. Kadangi geostatistinių matavimų duomenų savybės sąlygoja teritorijos geografinę padėtį, ne visur vienodai gerai tinka vieni ar kiti modeliavimo metodai bei modeliavimo algoritmų parametrai. Šios priežastys lemia, kad nėra vieningų skaitmeninio reljefo modeliavimo metodų ir būdų, vienodai gerai tinkančių visoms teritorijoms. Dėl didelės žemės paviršiaus reljefo savybių įvairovės kokybišką reljefo modelį galima sudaryti tik diferencijuotai taikant atskirus modeliavimo metodus bei tų metodų parametrus, įvertinus regioninius geostatistinių duomenų ypatumus. Parenkant geriausiai tinkamus reljefo modeliavimo metodus, būtina sukurti vieningą reljefo klasifikavimo metodiką ir jos pagrindu atlikti detalius tyrimus.

Darbo tikslas: Ištirti skaitmeninių reljefo modelių tikslumo priklausomybę nuo pradinių duomenų parengimo būdų, modeliavimo metodų, modeliavimo parametru, reljefo geomorfologinių savybių bei nustatyti modeliavimo metodų tinkamumo įvairioms reljefo formoms prioritetus.

Siekiant šio tikslo, reikia išspręsti tokius **pagrindinius uždavinius**:

- ištirti skaitmeninio reljefo modelio tikslumo priklausomybę nuo pradinių duomenų parengimo būdų;
- parengti žemės reljefo geomorfologinių savybių vertinimo ir klasifikavimo sistemą bei atlikti teritorijos zonavimą;

- ištirti modeliavimo metodų parametrinių funkcijų įtaką reljefo modelio tikslumui;
- ištirti modeliavimo parametrų įtaką skirtingiems reljefo tipams;
- ištirti modeliavimo metodų įtaką reljefo modelio tikslumui;
- sudaryti eksperimentinių rezultatų regresinius modelius, apibūdinančius sąsajas tarp reljefo modelių tikslumo, modeliavimo parametrų ir reljefo geomorfologinių savybių;
- įvertinti skaitmeninių reljefo modelių kokybę ir prioritetus, taikant daugiakriterinę analizę.

Tyrimų objektas: Lietuvos teritorijos skaitmeniniai reljefo modeliai ir jiems sudaryti skirtingais būdais išmatuoti pradiniai duomenys.

Tyrimų metodika: Eksperimentiniai skaitmeninių reljefo modelių kokybės tyrimai, taikant geografinių geoinformacinių sistemų technologijas, tyrimų rezultatų matematinę statistinę ir daugiakriterinę analizę.

Mokslinis naujumas:

- nustatyta skaitmeninių reljefo modelių tikslumo priklausomybė nuo modeliavimo metodų, modeliavimo parametrų ir reljefo geomorfologinių savybių;
- sudaryti regresiniai modeliai, apibūdinantys skirtingais metodais gautų reljefo modelių tikslumo priklausomybę nuo modeliavimo parametrų ir reljefo geomorfologinių rodiklių;
- pirmą kartą, vertinant skaitmeninių reljefo modelių kokybę ir modeliavimo metodų prioritetus, taikyta daugiakriterinė analizė.

Praktinė darbo reikšmė: Remiantis gautais tyrimų rezultatais ir geomorfologiniu reljefo suskirstymu į zonas galima parinkti geriausiai tinkančius modeliavimo metodus ir modeliavimo parametrus su skirtingomis teritorijų savybėmis bei sudaryti geresnės kokybės reljefo modelį visai teritorijai.

Ginamieji teiginiai:

- reljefo klasifikavimas pagal geomorfologines savybes;
- modeliavimo metodų ir jų parametrinių funkcijų bei modeliavimo parametrų įtakos skaitmeninių reljefo modelių kokybei dėsningumai, priklausantys nuo geomorfologinių reljefo savybių;
- daugiakriterinės analizės taikymo galimybės, vertinant skaitmeninių reljefo modelių kokybę ir modeliavimo metodų prioritetus.

Darbo aptarimas: Disertacijos darbo rezultatai buvo nagrinėjami konferencijose:

1. 2000 m. birželio 21 d. XI pasaulio lietuvių mokslo ir kūrybos simpoziume. Geografijos ir geodezijos sekcija. Pranešimo tema „Lietuvos miestų kartografavimas fotogrametriniu metodu”.
2. 2000 m. rugsėjo 29 d. Respublikinėje mokslinėje konferencijoje „Civilinė inžinerija ir geodezija”. Geodezijos sekcija. Pranešimo tema „Urbanizuotos teritorijos skaitmeninio ortofotografinio žemėlapiu M 1:10 000 tikslumo įvertinimas”.
3. 2004 m. kovo 25 d. 7-oji jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ Aplinkos apsaugos inžinerijos sekcijos Aplinkos apsaugos technologijų pasekcijos. Pranešimo tema „Daugiakriterinės analizės metodų pritaikymas, sprendžiant uždavinius su geografiniais duomenimis“.
4. 2004 m. gegužės 12 d. Tarptautinėje mokslinėje metodinėje konferencijoje „Žemės naudojimas ir žemėtvarka” pranešimo tema „Fizinio paviršiaus ploto skaičiavimas, naudojant skaitmeninius paviršiaus modelius“.
5. 2004 m. Respublikinėje mokslinėje konferencijoje „Civilinė inžinerija ir geodezija”. Geodezijos sekcija. Pranešimo tema „Skaitmeninio reljefo modeliavimo krigingo metodu kriterijų reikšmingumo įvertinimas“ (International Scientific Methodical Conference „Land Use and Land Management“ – „Area Calculation of Physical Terrain Surface Using Digital Surface Models Proceedings“).
6. 2005 m. gegužės 27 d. Tarptautinėje mokslinėje konferencijoje „Aplinkos inžinerija”. Pranešimo tema „Paviršiaus modeliavimo parametrų įtakos skaitmeninių reljefo modelių tikslumui įvertinimas“ (The 6th International Conference on Environmental Engineering, Vilnius, Lithuania, 26–27 May 2005 „Evaluation of the Influence of Surface Modeling Parameters on the Accuracy of Digital Elevation Models“).

Publikacijos: Parengtos ir paskelbtos 9 publikacijos, iš jų 5 – Lietuvos mokslo tarybos pripažintuose moksliniuose leidiniuose.

Darbo apimtis ir struktūra: Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, bendrosios išvados, 201 pavadinimų literatūros sąrašas, 9 pavadinimų disertacijos autorės darbų sąrašas. Bendra apimtis – 125 psl. Darbe yra 46 paveikslai ir 45 lentelės.

Padėkos: Autorė nuoširdžiai dėkoja darbo vadovui prof., habil. dr. A. Zakarevičiui, kurio patarimai ir pastabos padėjo įsigilinti į tyrimo objektą ir spręsti disertaciniam darbui keliamus uždavinius; Geodezijos ir kadastro katedros kolegoms už naudingas pastabas, geranoriškas konsultacijas ir pagalbą.

Autorė dėkoja Informacinės visuomenės plėtros komiteto ir ypatingai Elektroninių ryšių ir inovacijų skyriaus kolektyvui už supratimą ir palaikymą viso mokslinio darbo rengimo metu.

Autorė dėkinga artimiesiems, kurių palaikymas buvo viena svarbiausių sąlygų, leidusių sėkmingai paruošti darbą.

Autorė dėkoja A. Kumetaičiui, suteikusiam profesionalią pagalbą, gilinantis į skaitmeninių reljefo modelių sudarymo ypatumus.

PAGRINDINIAI DARBE NAUDOTI ŽYMENYS

SRM – skaitmeninis reljefo modelis;

TIN – nereguliarusis trikampių tinklas;

TINgrid – stačiakampių tinklo reljefo modelis, sudarytas iš nereguliaraus trikampių tinklo;

H_{stereo} – stereofotogrametriškai išmatuotų taškų aukščiai;

H_{aps9} – įvairiais metodais gauta taško aukščio reikšmė, naudojant apskritiminę variogramą ir 9 gretimus interpoliavimo taškus;

$H_{\text{aps6_44zona}}$ – įvairiais metodais gauta taško aukščio reikšmė, naudojant apskritiminę variogramą ir 6 gretimus interpoliavimo taškus 44 zonoje;

$H_{\text{aps9_44zona}}$ – įvairiais metodais gauta taško aukščio reikšmė, naudojant apskritiminę variogramą ir 9 gretimus interpoliavimo taškus 44 zonoje;

$H_{\text{aps12_44zona}}$ – įvairiais metodais gauta taško aukščio reikšmė, naudojant apskritiminę variogramą ir 12 gretimų interpoliavimo taškų 44 zonoje;

H_{*9} – įvairiais metodais gauta taško aukščio reikšmė, imant 9 gretimus interpoliavimo taškus;

H_{*6_44zona} – įvairiais metodais gauta taško aukščio reikšmė, imant 6 gretimus taškus 44 zonoje;

H_{*9_44zona} – įvairiais metodais gauta taško aukščio reikšmė, imant 9 gretimus interpoliavimo taškus 44 zonoje;

H_{*12_44zona} – įvairiais metodais gauta taško aukščio reikšmė, imant 12 gretimų interpoliavimo taškų 44 zonoje.

1. SKAITMENINIO RELJEFO MODELIAVIMO TECHNOLOGIJŲ APŽVALGA

Reljefo modeliavimas yra sudėtingas daugiapakopis uždavinys, priklausantis nuo daugelio veiksnių: matavimų tikslumo, pradinių duomenų tikslumo ir išsidėstymo, duomenų apdorojimo, modeliavimo metodų ir pan. Norint gauti reikiamą tikslumą, turi būti parinkti patikimi pradiniai duomenys, tinkamiausias paviršiaus modeliavimo metodas konkrečiam reljefo tipui bei geriausiai tinkantys šio metodo parametrai.

1.1. Žemės paviršiaus aukščių matavimo metodų apžvalga, sudarant skaitmeninį reljefo modelį

Sudarant skaitmeninius reljefo modelius distanciniais matavimų metodais iš lėktuvo arba dirbtinio žemės palydovo, susiduriama su paviršiaus fragmentais, kuriuose dėl tankios augalijos arba kitų priežasčių paviršiaus išmatuoti neįmanoma (Jones, 1997). Šiose vietovėse reikia atlikti papildomus matavimus, kurie didina reljefo modelio sudarymo kaštus. Jei neišmatuoti plotai nėra labai dideli, paviršiaus duomenų spragas, siūloma užpildyti, atliekant interpoliaciją. Palyginus krigingo, splain ir svorinį metodus, geriausi rezultatai gauti naudojant splain metodą (Doucette, Beard, 2000).

Modeliavimo metodais, nenaudojant horizontalių, galima pasiekti geresnę SRM kokybę. Pradėtos naudoti tiesioginio žemės paviršiaus matavimo technologijos leidžia sumažinti klaidų kiekį reljefo modelyje (Maune, 2001). Lazerinės altimetrijos – LiDAR (angl. Light distance and ranging), matavimų metodikos tobulinimas leidžia tikėtis ateityje gauti didelės skiriamosios gebos ir tikslumo SRM (Ritchie, 1995; DeLoach ir Leonard, 2000; Brock ir kiti, 2002). Radarinės interferometrijos (InSAR) metodas reljefo matavimo tikslumu ir aukšta skiriamąja geba gali konkuruoti su optiniais reljefo matavimais (Small, 1998; Gens, 1999; Dowman, 2000; Hanssen, 2001; Smith, 2002). LiDAR lėktuvuose montuojama lazerinė matavimų sistema per sekundę išmatuoja 2000–5000 taškų aukščių ± 15 cm tikslumu. Iš šių gausių paviršiaus matavimų gali būti sudaromi didelės teritorijos 1 m skiriamosios gebos SRM (Hill ir kiti, 2000; Carter ir kiti, 2001). Šiuo metodu atliekamų matavimų kaštai yra panašūs į fotogrametrinio metodo arba horizontalių vektorizavimo kaštus, o duomenų apdorojimo ir tikslinimo (augmenijos ir antropogeninių objektų pašalinimo iš reljefo modelio) kaštai yra mažesni. Tai didina šio metodo efektyvumą ir konkurencingumą. LiDAR metodas taip pat gali būti naudojamas kartu su skaitmenine fotogrametrija tiksliais nedidelių teritorijų reljefo modeliams sudaryti (Gwinner ir kiti, 2000; Lane ir kiti, 2000).

Interferometrijos metodu, pagrįstu vienalaikio arba pakartotinio signalo priėmimu specialiu kartografavimo radaru, kartografuotas beveik visas žemės paviršius. 2000 metų lapkričio mėnesį per 10 dienų interferometrinio radaru, sumontuotu erdvėlaivyje „Endeavour“, kartografuota ~ 80% Žemės paviršiaus, sukuriant didžiulį skaitmeninių reljefo aukščių duomenų masyvą. Iš gautų matavimo duomenų sudarytas SRM, kurio ląstelės matmenys yra 90×90 m (Farr ir Kobrick, 2000; NASA, 2002). Jis pakeitė prieš tai naudotą SRM, kurio ląstelės matmenys buvo 1×1 km, sudarytą ANUDEM metodu iš taškų aukščių, horizontalių ir hidrografijos tinklo duomenų (Gesch ir Larson, 1998; Gesch ir kiti, 1999).

Sudėtingi paviršiaus matavimo ir duomenų apdorojimo metodai negarantuoja SRM kokybės. Matuojant InSAR, LiDAR ir kitais nuotolinio matavimo metodais, lieka paklaidų, priklausomų nuo pačios matavimų technologijos (Leberl, 1998; Toutin, 1999; Endreny ir kt., 2000; Nuth ir kt., 2002). Paklaidos randamos pačiame reljefo modelyje, taip pat skaičiuojant šlaitų kryptis ir nuolydžius (Ahmadzadeh ir Petrou, 2001; Kervyn, 2001). Apdorojus kosminių matavimų duomenis, galima konstatuoti, kad penktadalio žemės rutulio reljefo modelio panaudojimas yra ribotas dėl grubių klaidų (visi kalnuoti regionai), o kitų 70% duomenų vidutinė kvadratinė reljefo modelio paklaida yra ±10 m, tačiau daug kur paklaidos siekia daugiau negu 30 m. Kadangi radaro signalas neprasiskverbia pro tankią augmeniją, miškingų regionų reljefo duomenys nėra patikimi, todėl kosminės misijos metu gautas reljefo modelis pačių gamintojų (NASA, 2002) traktuojamas kaip rezultatas, kuris gali būti panaudotas moksliniams eksperimentams ir testavimui. Kiti šio SRM trūkumai – plotai, kuriuose nėra duomenų, nelygūs vandens paviršiai, neteisingai dešifruotos kranto linijos. LiDAR ir InSAR metodus siūloma naudoti kartu, gaunant tikslesnį, aukštesnės skiriamosios gebos ir apimančią didesnę teritoriją skaitmeninį reljefo modelį (Slatton ir kt., 2001).

1.2. Pradinių duomenų, naudojamų reljefo modeliui sudaryti, paklaidų ypatumai

Visi SRM dėl vienokių ar kitokių priežasčių turi trūkumų. Dauguma reljefo modelio paklaidų atsiranda dėl horizontalių, kurios yra vektorizuojamos nuo analoginių žemėlapių ir panaudojamos SRM sudarymui (Coops, 2000). Šių paklaidų dažnai neįmanoma panaikinti operatoriaus pastangomis, kadangi tektų patikrinti viso horizontalių tinklo tikslumą. Standartai garantuoja tik statistinį vidutinį reljefo paklaidų dydį, tačiau lokals reljefo paklaidos gali viršyti statistinį vidurkį. Stačiakampių tinklo reljefo modeliai gali būti sudaromi iš horizontalių bei taškų aukščių. Tokiu būdu sudaromų reljefo modelių tikslumas priklauso nuo horizontalių tankio, reljefo formų, paviršiaus kitimo ir stačiakampių tinklo ląstelių matmenų (Gao, 1997). Topografiniai žemėlapiai su horizontalėmis skirti pavaizduoti reljefą, todėl jie niekada nebuvo naudojami didelės skiriamosios gebos ir tikslumo reljefo modeliams sudaryti. Pradėjus naudoti skaitmeninius reljefo modelius,

paaikškėjo, kad iš horizontalių sudaryti reljefo modeliai turi nemažai trūkumų – reljefo modelio „laiptuotumas“ ir paklaidos dėl netiksliai nubrėžtų horizontalių (Ollier, 1967). Reljefo kokybė vertinama, naudojant specialius modeliavimo ir duomenų apdorojimo algoritmus. Taip nustatomos paklaidos, atsirandančios dėl netiksliai išbraižytų horizontalių bei iškraipymų reljefo modeliavimo metu (Shortridge, 2001). Tokiems defektams ištaisyti taikomos reljefo modelio klaidų pašalinimo procedūros (Oimoen, 2000; Hutchinson ir kiti, 2001; Gesch ir kiti, 2002). Literatūroje aprašytoms modelių tikslinimo procedūroms nėra sistemos, aprėpiančios kelių veiksnių įtakojamų klaidų atsiradimą. Procedūros skiriamos tam tikro pobūdžio klaidoms šalinti. Reljefo modelio klaidos ir netikslumai tarpusavyje yra susiję, todėl būtinas sisteminis požiūris į vertinamą objektą, norint veiksmingai pagerinti reljefo modelio kokybę.

Sudarant SRM iš horizontalių, dalis reljefo paklaidų gali būti panaikinta, papildomai apdorojant skaitmeninius reljefo modelius arba jų išvestinius paviršius (nuolydžius, šlaitų kryptis ir kt.) – ieškant anizotropinių reljefo fragmentų. Šiose vietose dažnos didesnės reljefo modelio paklaidos. Naudojant papildomus duomenis arba reljefo duomenų apdorojimo operacijas, šios paklaidos panaikinamos (Duh, Brown, 1999). Kitas reljefo modelio paklaidų identifikavimo būdas – reljefo modelio reikšmių palyginimas su žemės paviršiaus aukščių matavimų duomenimis.

Sudarant skaitmeninius reljefo modelius iš distancinių matavimų duomenų, į skaitmeninį reljefo modelį neišvengiamai patenka dirbtiniai žmogaus sukurti objektai (statiniai, antžeminės konstrukcijos ir pan.). Šiems skaitmeninių reljefo modelių trūkumams šalinti siūloma naudoti skaitmeninį filtravimą (Oimoen, 2000). Filtruojant duomenis, antropogeninės kilmės stačiakampės formos reljefo struktūros iškerpamos, o tose vietose paviršiaus modelio reikšmės suskaičiuojamos, interpoliuojant gretimas reljefo reikšmes.

Tyrimai, naudojant GPS matavimus, patvirtina hipotezę, kad atskiruose reljefo modelio plotuose paklaidos gali būti kelis kartus didesnės, negu vidutinė kvadratinė paklaida (Holmes ir kt., 2000). Reljefo modelius siūloma tikslinti, naudojant papildomus fotogrametriškai išmatuotus taškų aukščius (Lane ir kt., 2000).

Tikslinant iš distancinių matavimų sudarytus reljefo modelius, reikia keisti stačiakampio tinklinio modelio ląstelės matmenis. Moksliniai tyrimai šioje srityje parodė, kad gaunamo skaitmeninio reljefo modelio tikslumas daugiausia priklauso nuo modeliuojamo paviršiaus formos bei nuo ląstelių skaičiaus ploto vienetu (Rees, 2000).

Atlikus literatūros analizę, pastebėta, kad dauguma mokslininkų savo darbus skiria reljefo modelio paklaidoms identifikuoti ir šalinti iš jau sudaryto reljefo modelio, tačiau nėra pakankamai pagrįstos ir vieningos metodikos, skirtos paviršiaus modeliavimo procesui tobulinti, siekiant išvengti modeliuojant atsirandančių paklaidų.

Viena iš naujovių reljefo modelių kokybės tyrimų srityje yra laboratorinių reljefo modelių kūrimas ir jų paviršiaus matavimai. Australijos mokslininkai laboratorijos sąlygomis ištyrė stereofotogrametrinio modeliavimo galimybes. Sudaryto laboratorinio reljefo modelio ląstelės matmenys 6×6 mm, standartinio nuokrypio įvertis 20 mm. Upės slėnio laboratorinio modelio skersmuo 200 mm. Šis tyrimas, lyginant eksperimentinį ir skaitmeninį reljefo modelius, leidžia nustatyti modeliavimo proceso trūkumus ir greičiau rasti sprendimus modelio tikslumui padidinti (Hancock ir Willgoose, 2001).

1.3. Skaitmeninių reljefo modelių sudarymo principai

Reljefo modeliams sudaryti dažnai taikomi nereguliaraus trikampių tinklo paviršiaus modeliai. Nereguliarusis trikampių tinklas reljefo modeliavimui buvo pradėtas naudoti, atsiradus galingesnei skaičiavimo technikai. Iš pradžių reljefo modeliavimo uždaviniai buvo sprendžiami, sudarant stačiakampių tinklo reljefo modelius, kadangi matricinė stačiakampių tinklo struktūra geriau tiko duomenims apdoroti. Vėliau kaip alternatyva stačiakampių tinklui atsirado nereguliarusis trikampių tinklas. Kiekvienas iš šių skaitmeninių reljefo modelių turi savo privalumų ir trūkumų (Little, Shi, 1998, 2001). Patobulinus nereguliarųjį trikampių tinklą, jis įgavo erdvinę topologinę struktūrą (Mark, 1997). Šiuo metu TIN sudaromas iš aukščių duomenų, naudojant Voronoi diagramas. Šis procesas trunka ilgai ir reikalauja didelių skaičiavimo technikos resursų (Ware, Kidner, 1997). Sudarytas modelis nėra kompaktiška duomenų struktūra, o užima daug vietos duomenų laikmenose, todėl lėčiau vaizduojamas ir apdorojimas. Nereguliaraus trikampių tinklo glaudinimo algoritmų sudarymas, tyrimai ir tobulinimas yra svarbus reljefo modeliavimą tiriančių mokslininkų uždavinys (Park ir kt., 2001). Nereguliaraus trikampių tinklo modeliai dažniausiai yra sudaromi iš horizontalių bei taškų aukščių. Atliekami tyrimai šio modeliavimo metodo trūkumams išaiškinti ir panaikinti (Zhu ir kt., 2001).

Prieš kelis metus buvo sukurta nauja paviršiaus modeliavimo kryptis, naudojant fraktalus (paviršiaus skaidymas į daugiakampus). Tai perspektyvus paviršiaus modeliavimo metodas, tačiau šiuo metu paviršiaus modeliavimas fraktalais nagrinėjamas daugiau kaip teorinė galimybė. Programinės įrangos paketų, modeliuojančių paviršių fraktalais, rasti nepavyko.

Sudaryti paviršiaus modeliai tiriami, įvertinant SRM paklaidas ir tikslumą bei lyginant skaitmeninio reljefo modelio paviršiaus reikšmes su kitais duomenų šaltiniais (analoginiais žemėlapiais, lazerinės altimetrijos matavimais) (Gesch, 1998). Nagrinėjamos įvairios SRM vertinimo ir tikslinimo metodikos bei galimybės (Giles ir Franklin, 1996; Duh ir Brown, 1999; Lemmens, 1999; Toutin, 1999; Gong ir kt., 2000; Krupnik, 2000; Rees, 2000). Skaitmeninio reljefo modelio tikslinimui siūloma identifikuoti skaitmeninio reljefo modelio vietas, kur yra didžiausios

paklaidos, ir šiuose fragmentuose naudoti tikslesnius papildomus aukščių duomenis. Taip pakeitus 1% skaitmeninio reljefo modelio paviršiaus tikslesniais duomenimis, vidutinės kvadratinės paklaidos sumažėja nuo 2% iki 8% (López, 2002), tačiau dažnai sunku rasti norimą kiekį papildomų tikslesnių taškų aukščių. Didelės paklaidos atskirose reljefo modelio vietose rodo, jog pasirinktas reljefo modeliavimo metodas šiai teritorijai modeliuoti nėra tinkamas, todėl kiekvienam reljefo tipui reikia parinkti atskirą tinkamiausią reljefo modeliavimo metodą.

Kadangi tinkamiausio universalaus paviršiaus modeliavimo metodo nėra, daug dėmesio skiriama paviršiaus modeliavimo metodų panaudojimui, sprendžiant taikomuosius uždavinius (Doucette, Beard, 2000). Moksliniuose darbuose reljefo modeliavimo metodai lyginami pagal sudaromų reljefo modelių tikslumą. Tačiau norint įvertinti modeliavimo metodo tinkamumą pasirinktos teritorijos reljefo modeliui sudaryti, reikia atlikti kompleksinę modeliavimo metodų analizę, atsižvelgiant į modeliavimo metodų parametų įtaką sudaromo SRM tikslumui ir formai. Modeliavimo metodo parametras – dydis, apibūdinantis modeliavimo metodo savybes bei įtakojantis modeliavimo metodo tikslumą. Išsamiam reljefo modeliavimo metodų palyginimui trūksta tyrimų, kuriuose atspindėtų atskirų parametų įtaka, modeliuojant skirtingus reljefo tipus. Jo Wood (1996) pasiūlė metodiką, skirtą reljefo geomorfologinei analizei atlikti, tačiau pagal šią metodiką reljefas tiesiog suskirstomas į geomorfologinius tipus. Naudojant tokią reljefo rūšiavimą, sunku išskirti atskirų reljefo charakteristikų įtaką SRM tikslumui.

Reljefo modeliavimo metodų vienareikšmiškai įvertinti neįmanoma, nes kiekvienas jų turi savų privalumų ir trūkumų, todėl nacionaliniams reljefo modeliams sudaryti skirtingos šalys renkasi skirtingus modeliavimo metodus. JAV naujas pagrindinis SRM sudarytas iš 1:24 000, 1:55 000 ir 1:63 360 mastelio topografinių žemėlapių, panaikinant teritorijos skaidymą į 7.5' kvadratus ir atitinkamai parengus pradinius duomenis (Gesch ir kt., 2002). Šie aukščių duomenys yra sujungti į vientisą masę, suprojektuoti NAD83 koordinatų sistemoje (angl. The North American Datum of 1983). Kontroliniai tinklo taškai yra išsidėstę Meksikoje, Karibų salose, JAV, Kanadoje, Grenlandijoje. Naudojami aukščių matavimo vienetai – metrai. Reljefo modelis nuolatos atnaujinamas ir susideda iš vienaarūšių duomenų. Reljefo modelis – stačiakampių tinklas, kurio skiriamoji geba yra 1" (apie 30 m) žemyninei JAV daliai, Havajams ir Puerto Rikui ir 2" Aliaskai. Šiuo metu JAV sudarinėjamas naujas reljefo modelis, kurio ląstelės matmenys yra 10×10 m.

Naują skaitmeninį reljefo modelį yra sukūrusios ir kitos šalys. Mokslininkai Carroll ir Morse aprašo Australijos reljefo modelio GEODATA 9" kūrimą (Carroll ir Morse, 1996). Specialiai šiam tikslui Australijos nacionaliniame universitete buvo sukurtas ANUDEM reljefo tinklinio modeliavimo metodas (Hutchinson ir kt., 2001). ANUDEM metode skaičiavimams naudojami hidrografijos duomenys, taip sumažinant reljefo modelio paklaidas šalia hidrografijos objektų.

Airijoje, skirtingai negu įprasta daugelyje šalių, SRM sukurtas, naudojant skaitmeniniais fotogrametriniais metodais automatiškai sudaromą paviršiaus modelį (Cory ir McGill, 1999).

Lietuvoje tyrimų apie sudarytų SRM tikslumą padaryta nedaug. Naudojant SRM konkrečioms tikslams pagal meteorologinius bei fizinius geografinius ypatumus, tirta reljefo įtaka lietaus poplūdziams Lietuvos upėse (Rimkuvienė, Rimkus, 2001), taip pat modeliuoti hidrodinaminiai procesai Nemuno žemupyje (Ascila, Dumbrasas ir kt., 2000). SRM tikslumas tirtas, nustatant Lietuvos teritorijos administracinių vienetų plotus bei skaičiuojant Lietuvos paviršiaus plotą (Kumetaitis ir kt., 2003), o taip pat tiriant elektromagnetinių bangų sklaidimą planuojant telekomunikacijas (Ramonaitis, Kumetaitis, 2002). A. Kumetaitis pirmasis Lietuvoje pradėjo nagrinėti SRM tikslumo priklausomybę nuo reljefo morfometrinių charakteristikų bei tyrė būdus, padėsiančius integruoti įvairių reljefo tipų modeliavimo ypatumus (Kumetaitis, 2004; Kumetaitienė, Kumetaitis, 2005).

1.4. Daugiakriterinės analizės metodų taikymas geografini informacijai apdoroti

Daugiakriterinės analizės sistemos kuriamos ir pritaikomos įvairiems tikslams bei uždaviniams spręsti. Daugiakriterinė analizė leidžia pasirinkti optimalų sprendimą, kai kriterijai kartais vienas kitam prieštarauja. Daugiakriterinė analizė atspindi reliatyvią kriterijų svarbą sprendžiant konkrečius uždavinius ir įvertinant gautus rezultatus. Apžvelgus literatūrą pagal sprendžiamus uždavinius daugiakriterinės analizės sistemas galima suskirstyti į kelias kategorijas. Daugiausiai yra sprendžiami optimalios vietos parinkimo uždaviniai (geriausio taško paieška) (Arentze ir Borger, 1996; Armstrong ir kt., 1992; Reitsma, 1990), geriausio sprendimo paieškos uždaviniai, alternatyvų paieškos uždaviniai; procesų modeliavimas, įvairios tarpinės šių uždavinių variacijos.

Daugiakriterinės geografinės analizės taikymo sritis yra labai plati:

- kraštotvarkoje (Despotakis ir kt., 1993; Kyem, 2000; Malczewski ir kt., 1996a),
- gyvenvietėms planuoti ir projektuoti (Amer ir kt., 1993; Batty, 1993; Batty ir Densham, 1996; Batty ir Xie, 1994; Lein, 2003; Mendes, 2001; Mendes ir Motizuki, 2001; Scholten ir Stillwell, 1990; Strassert, 1995; Velden ir Kreuwel, 1990; Vriens ir Hendriks, 1995),
- vietinės valdžios sprendimų paramos sistemose (Davis ir McDonald, 1993; Kyem, 2001; Neves ir Condessa, 1994; Watson ir Wadsworth, 1996),
- žemės ūkyje (Janssen ir Rietveld, 1990): žemėtvarkoje (Eastman ir kt., 1993a; Joerin, 2001; Pereira ir Duckstein, 1993), žemės reformų valdymui (Keller ir Strap, 1996), žemėnaudų tvarkymui (Eastman ir kt., 1998; Janssen ir Rietveld, 1990),

- miškotvarkoje (Eastman ir Toledano, 1996a; Kyem, 2002a; Kyem, 2002b; Varma ir kt. 1998),
- biologijoje: gamtinių arealų pokyčiams prognozuoti ir arealams išsaugoti (Beatley, 1994; Clevenger ir kt., 2002), ekosistemoms stebėti (Doak, 1994); gyvūnijos rūšių paplitimo dinamikai modeliuoti (Hickey, 1994; McKelvey ir kt., 2001),
- hidrografijai modeliuoti: vandens ištekliams planuoti ir valdyti (Makropoulos ir kt., 2003; Shim ir kt., 2002), dinaminį vandentakos modeliams kurti (Bennett, 1994), irigacijos sistemoms projektuoti (Badji ir Mallants, 1991); potvyniams prognozuoti ir vertinti (Shim ir kt., 2002), aplinkai tvarkyti (Fedra, 1993; Janssen, 1992; Malczewski ir kt., 1996b; Negahban ir kt., 1996),
- meteorologijoje (Rivington ir kt., 2002; Rivington ir kt., 2003): El Nino reiškinių tyrimai (Eastman ir kt. 1996),
- aplinkosaugoje: žalos padariniams aplinkai stichinių nelaimių ir gamybinių avarių atveju įvertinti (Czorny, 1994; Couclelis ir Monmonier, 1995; Eastman ir Toledano, 1996b; Stoffel, 1992), atliekų saugojimo vietoms parinkti (Carver, 1996; Shih ir Lin, 2003), aplinkos užterštumui modeliuoti (Chiueh ir kt., 1997), gamtiniam resursams planuoti (Hassan ir Hutchinson, 1993),
- geodezijoje fotogrametriniams vaizdams apdoroti (Eastman, Laney, 2002; Bonham–Carter, 1994; Wright ir kt., 2003a; Wright ir kt., 2003b),
- geologijoje (Bonham–Carter, 1994): dirvos erozijai modeliuoti (Fisher, 1991), sedimentams modeliuoti (Burton ir Rosenbaum, 2003),
- civilinėje saugoje: sveikatos saugos įstaigų išdėstymui planuoti (Eastman ir kt., 1995); ekstremalioms situacijoms prognozuoti,
- sausumos ir vandens transporte: transporto infrastruktūrai planuoti (Patnam, 2004),
- statybose: statinių vietoms parinkti, statybų organizavimui ir valdymui,
- nekilnojamo turto vadyboje ir vertinime (McCartney ir Thrall, 1991), nekilnojamojo turto investicijoms planuoti (Peterson, 1993),
- ekonomikoje: verslo projektavimui (Lin ir kt., 1997).

Atliekant geografinių duomenų daugiakriterinę sprendimų analizę, jos rezultatai tiesiogiai priklauso nuo analizėje naudojamų duomenų patikimumo ir tikslumo (Agumya ir Hunter, 1999; Leitner, 1995). Šiai svarbiai temai skiriama nepakankamai dėmesio.

Lietuvoje geografinės daugiakriterinės analizės metodai mažai tyrinėti ir analizuoti. Darbu, kuriuose kaip vienas iš kriterijų yra vertinama objektų geografinė padėtis, taip pat nėra daug (Ustinovičius ir Stasiulionis, 2001). Dažniau taikomi ir analizuojami negeografiniai daugiakriterinės analizės metodai bei jais pagrįstos sprendimų paramos sistemos bei problematika, susijusi su duomenų gavyba, jos technologiniais sprendimais ir žinių išgavimu iš duomenų sistemų, jų kūrimu ir praktinių taikymų įvertinimu (Zalieskaitė ir Brazaitis, 2002).

Plėtojantis pasauliniam žinių tinklui, vis daugiau darbų skiriama internetinėms sprendimų paramos sistemoms (Kaklauskas ir Zavadskas, 2002, Trinkūnas, 2003.).

Daug dėmesio skiriama pačių daugiakriterinių sprendimų paramos sistemų architektūrai, projektavimo sprendimų priėmimo procesui struktūrizuoti (Dzemydienė, 2002), nustatant kriterijus, kurie leidžia parinkti naudingesnius ir patikimesnius sprendimus iš galimų alternatyvių variantų. Šią temą papildoma gamyboje naudojamų techninių informacinių sistemų intelektualizavimas (Čaplinskas ir Dzemydienė, 2001; Čaplinskas ir Lupeikienė, 2001; Ribikauskas ir Vasilecas, 2001).

Lietuvoje plačiai daugiakriterinės analizės metodai taikomi statyboje. Mokslinius darbus šioje srityje galima suskirstyti į statybos projektų daugiakriterinę analizę (Gusakov ir kt., 2003; Šarka ir kt., 1999; Trinkūnas, 2003; Zavadskas ir kt., 1992; Zavadskas ir kt., 1994; Zavadskas ir kt., 1995), statinių atnaujinimo, remonto, rekonstrukcijos klausimus (Janušaitis ir Liubinskaitė, 2001; Zavadskas ir kt., 1997; Zavadskas ir kt., 1999), pastatų priežiūros, gyvavimo proceso ir ilgaamžiškumo vertinimo daugiakriterinę analizę (Kaklauskas, 1999; Kaklauskas ir Turskis, 1994; Kaklauskas ir kt., 1999; Kaklauskas ir kt., 2000a; Kaklauskas ir kt., 2000b; Kaklauskas ir kt., 2000c; Malinauskas ir Petrašenko, 2001; Zavadskas ir kt., 1998; Zavadskas ir kt., 2001), statybos investicinių projektų daugiakriterinį vertinimą (Lunkevičius ir kt., 2001), teorinius darbus statybos daugiakriterinės analizės srityje, skirtus vertinimo parametrus parinkti ir svoriams nustatyti (Dėjus, 2002; Ustinovičius, 2001), pastatų ūkio valdymo arba statybų proceso valdymo daugiakriterinei analizei (Apanavičienė ir Juodis, 2003; Zavadskas ir kt., 1992, Zavadskas ir kt., 1999; Zavadskas ir kt., 2001), pastatų daugiakriteriniam vertinimui (Šaparauskas, 2003; Kaklauskas ir Kvederytė, 1998; Zavadskas ir Kaklauskas, 1996), statybos pramonės daugiakriterinei analizei (Kaklauskas ir kt., 1996; Zavadskas ir kt., 1997).

Skaitmeninių reljefo modeliavimo metodų kokybės kompleksinio vertinimo ir parinkimo klausimai daugiakriterinės analizės metodais nenagrinėti. Tačiau įvertinant daugiakriterinės analizės metodologinius principus bei skaitmeninių reljefo modelių sudarymo ypatumus, kai tenka derinti dažnai tarpusavyje prieštaraujančius rodiklius, sumariniams rodiklių analizės ir atskirų alternatyvų skaitmeniniams prioritetiniams įverčiams gauti galima taikyti daugiakriterinę analizę.

1.5. Išvados

1. Apžvelgus ir susisteminus mokslinius darbus apie žemės reljefo modeliavimą, juos galima suskirstyti į kelias mokslinių tyrimų kryptis:
 - žemės paviršiaus matavimų, kuriais gaunami pradiniai duomenys skaitmeniniam reljefo modeliui sudaryti, tobulinimas;
 - pradinių duomenų tikslinimas bei panaudojimas reljefo modeliui sudaryti;
 - SRM sudarymo principai ir technologijos bei paviršiaus modeliavimo metodų, stengiantis juos optimizuoti ir pritaikyti įvairiems uždaviniams, analizė;
 - skaitmeninių reljefo modelių sudarymo tobulinimas.
2. Trūksta sistemos, aprėpiančios kelių veiksnių įtakojamą klaidų atsiradimą. Procedūros skiriamos tik tam tikro pobūdžio klaidoms šalinti. Norint veiksmingai pagerinti reljefo modelio kokybę, būtinas sisteminis požiūris į vertinamą objektą.
3. Nėra metodikos, kuri pagal reljefo geomorfologines savybes leistų parinkti tinkamiausią modeliavimo metodą kiekvienam reljefo tipui. Skaitmeninių reljefo modeliavimo metodų tikslumas tiriamas nevertinant atskirų parametrų įtakos tikslumui ir neatliekant daugiaparametrinės analizės.
4. Skaitmeninių reljefo modeliavimo metodų kokybės kompleksinio vertinimo ir parinkimo klausimai daugiakriterinės analizės metodais nenagrinėti. Atsižvelgiant į daugiakriterinės analizės metodologinius principus bei į tai, kad sudarant skaitmeninius reljefo modelius dažnai tenka vertinti tarpusavyje prieštaraujančius rodiklius, alternatyvų prioritetams nustatyti galima taikyti daugiakriterinius metodus.

2. RELJEFO MODELIAVIMO YPATUMAI

2.1. Reljefo modeliavimo etapai

Reljefo modeliavimas yra sudėtingų duomenų kūrimo, analizės ir apdorojimo procesų visuma. Reljefo modeliavimo procesą galima suskirstyti į keletą etapų:

- pradinių duomenų kūrimas;
- pradinių duomenų vertinimas;
- preliminarus reljefo modelio sudarymas;
- modeliuojamos vietovės analizė pagal preliminarų reljefo modelį, atliekant reljefo morfologinį zonavimą;
- optimalaus reljefo modeliavimo metodo ir parametrų parinkimas kiekvienai zonai;
- reljefo modelių sudarymas, naudojant parinktus parametrus;
- reljefo modelių tikslumo įvertinimas;
- atskirų zonų reljefo modelių integravimas, sudarant bendrą visos teritorijos reljefo modelį.

Šiame darbe autorė analizuoja:

- pradinių duomenų, naudojamų skaitmeninio reljefo modeliams sudaryti, tikslumą;
- modeliuojamo reljefo geomorfologines savybes.
- sudaryto skaitmeninio reljefo modelio tikslumą.

Tyrimui pasirinkti skaitmeninio reljefo modeliavimo metodai: krigingas, kokrigingas, svorinis, splain, daugianaris.

2.2. Žemės paviršiaus modeliavimo metodų skirstymas pagal parametrinių funkcijų naudojimą

Paviršiaus modeliavimo metodus galima suskirstyti į dvi grupes pagal skaičiavimams reikalingus modeliavimo parametrus: metodus, duomenų analizei naudojančius variogramas; bei metodus, duomenų analizei naudojančius svorius (2.1 lentelė).

2.1 lentelė. Modeliavimo metodų parametrinės funkcijos

Parametrinė funkcija	Modeliavimo metodai						
	Krigin– gas	Kokri– gingas	Regu– liarus splain	Įtemptas splain	Atvirkš– tinio atstumo svorinis	Globalus daugia– naris	Lokalus daugia– naris
Variograma	+	+	–	–	–	–	–
Svorinė	–	–	+	+	+	+	+

Sudarant SRM krigingo metodu, galima naudoti šias variogramas: apskritiminę, sferinę, tetrasferinę, penasferinę, eksponentinę 1–2, Gauso, kvadrato, slenksčio efekto, K. Beselio.

Skirtingas paviršiaus interpoliavimo būdų naudojimas yra pagrindinė savybė, kuria skiriasi paviršiaus modeliavimo metodai.

2.3. Pagrindiniai paviršiaus interpoliavimo būdai

Interpoliacija – tai procesas, kuriuo iš turimų aplinkinių reikšmių nustatomos apytikslės paviršiaus reikšmės tose vietose, kur nėra matavimų taškų. Apytikslis tarpinių reikšmių nustatymas plotuose, esančiuose už išmatuotos teritorijos ribų, vadinamas ekstrapoliacija.

Interpoliacija naudojama taškiniais duomenimis konvertuoti į ištisinį paviršiaus modelį. Ištisinius paviršiaus modelius galima palyginti tarpusavyje (Burrough ir McDonnell, 1998): Interpoliuojama, kai:

- atskiri paviršiaus modeliai yra skirtingos skiriamosios gebos, ir, norint juos palyginti, reikia pakeisti tinklinio modelio ląstelių dydį arba orientaciją, pavyzdžiui, skenuotų duomenų (vaizdai iš palydovo, aerofotografijos) konvertavimas, transformavimas į kitą koordinatinių sistemą, skenuotų vaizdų mozaikos sujungimas į vientisą vaizdą;
- ištisinis paviršiaus modelis perskaičiuojamas iš vieno duomenų modelio į kitą, pavyzdžiui, vaizdų mozaikos perskaičiavimas į kitą mozaiką arba kai nereguliarus trikampių tinklas perskaičiuojamas į stačiakampių tinklinį modelį;
- turimi duomenys ne visiškai padengia dominantį paviršių, tuomet trūkstamos teritorijos paviršius suskaičiuojamas, naudojantis jau turimais duomenimis.

Norint sudaryti skaitmeninį reljefo modelį apskaičiuojama kiekvienos stačiakampių tinklo ląstelės aukščio reikšmė. Kad būtų įmanoma tai padaryti, reikia nustatyti, ar ieškoma aukščio reikšmė yra būtent tame taške, kur yra taškas su žinoma aukščių reikšme, ar šis taškas yra tarp žinomų taškų. Pirmuoju atveju aukščio reikšmė randama tiesiogiai priskiriant turimą aukščių reikšmę, o antruoju atveju aukščio reikšmės apskaičiuojamos, naudojant interpoliacijos metodus.

Modeliuojant skaitmeninį reljefo modelį interpoliacija naudojama šioms tikslams:

- pasirinkto taško aukščio reikšmei skaičiuoti;
- tinklinio paviršiaus aukščių reikšmėms skaičiuoti naudojant išmatuotus taškų aukščius;
- horizontalių padėčiai rasti;
- stačiakampių tinklinio modelio skiriamajai gebai pakeisti.

Interpoliavimo metodai, skirti stačiakampių tinklo modelio paviršiui rasti iš netaisyklingai išsidėsčiusių pradinių duomenų taškų, gali būti suskirstyti į globalius ir lokalius. Globalios paviršiaus interpoliavimo procedūros apskaičiuoja vieną funkciją, aprašančią visą modeliuojamą

Skaitmeninio reljefo modeliavimo daugiaparametrinis vertinimas, atsižvelgiant į paviršiaus geomorfologines savybes paviršių. Vietinio paviršiaus interpoliavimo procedūros veikia atvirkščiai – vertina paviršių pagal vienas po kito esančius tinklo susikirtimo taškus, skaičiavimams naudojant tik artimiausių taškų reikšmes.

Lokaliais interpoliavimo metodais vadinami tokie metodai, kurie paviršiaus reikšmėms skaičiuoti naudoja artimiausius duomenų taškus. Paviršiaus interpoliavimas susideda iš šių etapų:

- analizuojamos teritorijos dydžio apie interpoliuojamą tašką radimas;
- artimiausių duomenų taškų suradimas;
- matematinio modelio pasirinkimas paviršiaus reikšmei apskaičiuoti pagal turimą ribotą aplinkinių taškų skaičių;
- skaitmeninio reljefo modelio paviršiaus reikšmės radimas.

Krigingo metodas

Krigingo metodas – pavadintas Pietų Afrikos inžinieriaus D. G. Krige pavardės, kuris sukūrė ir išplėtojo šį metodą, garbei (Oliver, Webster, 1990). Skaičiuojant nežinomas paviršiaus taškų aukščių reikšmes krigingo metodu, naudojamas matematinis variogramų modelis. Variograma – parametrinė funkcija, naudojama gretimų taškų aukščių koreliacijai (statistinei priklausomybei) nustatyti. Variograma naudojama rasti optimaliausius erdvinius sprendimus, gauti pačius bendriausius struktūrinio pavaizdavimo ypatumus, įvertinti objektų matmenis ir padėtį. Variograma parodo ribas teritorijų, kuriose išmatuoti dydžiai turi apibrėžto diapazono reikšmes. Variogramų naudojimo privalumas – paprastas matematinis realizavimas, o trūkumas – nejautrumas smulkioms reljefo detalėms. Su krigingu susijusios procedūros apima matavimų klaidų bei netikslumų įvertinimus (Chao–yi Lang, 1995).

Neigiama krigingo savybė – skaičiavimo sudėtingumas (Heinrich, 1994). Reikia išspręsti dideles lygčių sistemas kiekvienai krigingo metodu skaičiuojamai tinklinio modelio ląstelei, todėl modeliuojant reljefą krigingo metodu, reikia daug daugiau kompiuterio resursų negu interpoliuojant paviršių kitais reljefo modeliavimo metodais. Be to, reikia skirti daug dėmesio išankstinei duomenų analizei, variogramos formai ir gretimų zonų dydžiui nustatyti. Modeliuojant paviršių krigingo metodu, paviršiui sudaryti rezultatai generuojami pagal pradinių duomenų reikšmes. Atsitiktinės pradinių duomenų paklaidos eliminuojamos, taikant atitinkamas procedūras.

Paprastasis krigingas naudoja modelį, išreikštą formule (Johnston, Ver Hoef ir kt., 2001):

$$H(s) = \mu + \varepsilon(s), \quad (2.1)$$

čia $H(s)$ – taško s aukščio reikšmė; μ – nežinoma aukščio vidurkio reikšmė; $\varepsilon(s)$ – nepriklausoma atsitiktinė paklaida. Vidurkis išskaičiuojamas iš aplinkinių žinomų taškų z reikšmių.

Universalijame kriginge reikia nustatyti pradinių duomenų taškų svorius bei daugianarių koeficientus (Johnston, Ver Hoef ir kt., 2001). Kadangi šiuo atveju daugiau nežinomųjų, būtina naudoti didelį gretimų taškų skaičių (Davis, 1986). Tačiau neįmanoma nustatyti gretimos zonos ribų, todėl pasirenkama sutartinė gretimą zona, pagal kurią būtų galima apskaičiuoti daugianarį. Skaičiavimas apima sąlyginę gretimą zoną ir atitinkamus kiekvieno taško koeficientus.

Svorinis metodas – tai toks paviršiaus modeliavimo metodas, kuriame pradiniais taškų aukščiams priskiriami svoriai, atvirkščiai proporcingi atstumui iki skaičiuojamo taško (Johnston, Ver Hoef ir kt., 2001).

Svorinė interpoliacija paremta prielaida, kad artimesni objektai yra panašesni tarpusavyje negu tolimesni. Neišmatuotai reikšmei nustatyti svorinis metodas naudoja aplink esančius išmatuotus taškų aukščius. Išmatuotų taškų aukščių įtaka nustatomai reikšmei priklauso nuo atstumo tarp žinomo ir nustatomų taškų. Atstumui tarp taškų mažėjant, svoris didėja.

Nustatomo taško altitudė skaičiuojama pagal formulę:

$$\hat{H}(s_j) = \sum_N \lambda_i H(s_i), \quad (2.2)$$

čia $\hat{H}(s_j)$ – nustatoma ląstelės s_i reikšmė; N – skaičiavimams naudojamų taškų skaičius; λ_i – kiekvieno išmatuoto taško aukščio svoris; $H(s_i)$ – žinoma aukščio reikšmė taške s_i .

Taškų svoriai apskaičiuojami taip:

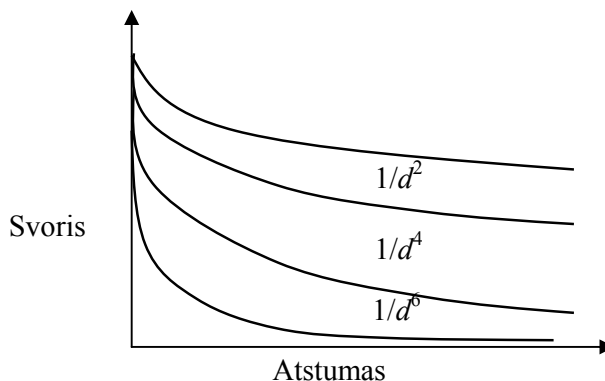
$$\lambda_i = \frac{d_{ij}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{ij}^{-p}}, \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1. \quad (2.3)$$

Didėjant atstumui svoris mažėja, kadangi įtakoja laipsnio parametras p ; d_{ij} – atstumas tarp nustatomo taško s_j ir išmatuotų taškų s_i . Didėjant atstumui, išmatuoto taško įtaka nustatomam taškui mažės eksponentiškai. Skaičiavimuose naudojamų taškų svorių suma lygi 1.

Arti matuojamo taško esantys taškai turi didesnę svorį, o labiau nutolę – mažesnę svorį ($1/d^2$). Priklausomai nuo vietovės sąlygų, atstumas gali būti įvertinamas skirtingais būdais. Jei $p = 1$, tai reiškia, kad yra paprasta linijinė interpoliacija tarp taškų. Kuo didesnis p , tuo labiau mažėja tolimesnių taškų svoriai ir gaunamas mažiau apibendrintas paviršius.

Įvertinami duomenų taškų, naudojamų skaičiavimo procedūrose, svoriai iki ieškomo taško (2.1 pav.). Pateiktos keturios skirtingos svorio įvertinimo funkcijos. Didėjant atstumui, svoris mažėja.

Pradinių duomenų taškų aukščiams priskirti svoriai, remiantis svorine funkcija, yra tikslinami. Kai $p = 1$, svorinė funkcija (2.3) priskiria proporcingus atstumui svorius ir išreiškia santykinę kiekvieno pradinio taško įtaką. Dažniausiai naudojamos svorio įvertinimo funkcijos priklauso nuo atstumo iki norimų apskaičiuoti koordinatų ir tolimiausio skaičiavimams naudojamo taško. Ši svorinė funkcija vėliau išskaidoma taip, kad tęstųsi nuo vieneto iki nulio per visam atstumui.



2.1 pav. Svorio priklausomybės nuo atstumo grafikas

Splain metodas – tai toks deterministinis interpoliavimo metodas, kai interpoliuojamas paviršius priartinamas prie pradinių duomenų taškų aukščių reikšmių (Franke, 1982; Mitas, Mitasova, 1988).

Splain metodas tinkamiausias glotnių formų paviršiams interpoliuoti, taip pat tolygiai kintančio paviršiaus nuolydžiui skaičiuoti. Staigiai pasikeitus paviršiaus nuolydžiui, gaunami didesni paviršiaus aukščių reikšmių standartinių nuokrypių įverčiai. Splain metodu sudarytas reljefo modelis netinkamas skaičiuoti paviršiaus kreivumą. Interpoliavimui naudojant didesnę svorį, gaunamas labiau suapvalintas paviršius.

Globali daugianarė interpoliacija paprastai naudoja regresijos modelį, sudarytą pagal visus duomenis. Gautas rezultatas arba trendas priklauso nuo kintančių x ir y koordinatų.

Pirmojo laipsnio modelis aprašomas taip:

$$H(x_i, y_i) = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 y_i + \varepsilon(x_i, y_i), \quad (2.4)$$

čia $H(x_i, y_i)$ – aukščio reikšmė taške (x_i, y_i) ; β_j – parametrai; $\varepsilon(x_i, y_i)$ – atsitiktinė paklaida.

Antrojo laipsnio modelis aprašomas taip:

$$H(x_i, y_i) = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i + \beta_3 x_i^2 + \beta_4 y_i^2 + \beta_5 x_i y_i + \varepsilon(x_i, y_i). \quad (2.5)$$

Analogiškai galima aprašyti ir aukštesnių laipsnių modelius. Regresijos modelio pritaikymas, vertinant parametrus β_i , atliekamas mažiausiųjų kvadratų metodu.

Lokali daugianarė interpoliacija panaši į globalią daugianarę interpoliaciją, išskyrus tai, kad paviršiaus reikšmės nustatomos skaičiavimams naudojant aplinkines reikšmes iš griežtai apibrėžtos teritorijos. Šios teritorijos ribos perstumiamos paviršiumi, ir kiekviename taške randamas apibrėžtos teritorijos centrinio taško aukštis $H(x_i, y_i)$. Paklaidos minimizuojamos naudojant mažiausiųjų kvadratų metodą:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i (H(x_i, y_i) - H_0(x_i, y_i))^2 = \min, \quad (2.6)$$

čia N – taškų skaičius apibrėžtoje teritorijoje; λ_i – žinomo taško aukščio svoris (2.3). Galimi ir kitokie svorio skaičiavimo būdai.

Pirmojo laipsnio funkcija centrinio taško aukščiui atrodo taip:

$$H_0(x_i, y_i) = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 y_i. \quad (2.7)$$

Antrojo laipsnio funkcija centrinio taško aukščiui atrodo taip:

$$H_0(x_i, y_i) = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 y_i + \beta_3 x_i^2 + \beta_4 y_i^2 + \beta_5 x_i y_i. \quad (2.8)$$

Aukštesnių laipsnių daugianariai randami analogiškai. Parametras β_i minimizuojamas ir nustatomas centriniam teritorijos taškui, kiekvieną kartą perstumiant teritorijos ribas, t. y. taikomas slenkantysis polinomas.

2.4. Skaitmeninių paviršiaus modelių kokybės palyginimas

Svarbiausi skaitmeninių reljefo modelių kokybės rodiklis yra jų tikslumas, kuris apibrėžiamasi standartinių nuokrypių įverčiais. Darbo autorė sudarytų skaitmeninių paviršiaus modelių kokybei analizuoti panaudojo du atvejus.

1) Skirtingais interpoliavimo metodais sudarytų tinklinių reljefo modelių palyginimas. Paviršiaus modelių palyginimas atliekamas vertinant, kaip skaitmeninio reljefo forma atitinka realų reljefą. Vertinant skaitmeninio reljefo modelio paviršiaus formą, braižomos horizontalės, atliekamas paviršiaus šešėliavimas. Pirmiausia vizualiai įvertinama horizontalių kokybė ir reljefo paviršiaus modelio forma. Horizontalių tinklas turi būti tolygus, be aštrių kampų, reljefo modelio paviršius neturi būti per daug laužytas ir turi atspindėti ne tik didelius, bet ir smulkius paviršiaus nelygumus.

2) Sudaryto paviršiaus modelio tikslumas yra vertinamas modeliui sudaryti naudojant papildomus taškus, gautus stereodigitalizavimo būdu arba geodezinio pagrindo taškų aukščius. Jei tikslumui įvertinti naudojami stereodigitalizavimo būdu gauti taškų aukščiai, rekomenduojama, kad jie būtų išmatuoti naudojant papildomą stereovaizdų orientavimą.

Skaičiuojami aukščių skirtumai tarp išmatuotų taškų aukščių ir paviršiaus modelio reikšmių.

Skaičiuojami paklaidų statistiniai parametrai.

Skaičiuojami paviršiaus skerspjūvio profiliai, einantys per raižyto reljefo regionus. Vertinant ir lyginant reljefo profilius, galima spręsti apie reljefo modelio detalumą – sugebėjimą perteikti smulkius paviršiaus nelygumus, apie paviršiaus modelio defektus (laiptuotumą, per aštirus arba per daug užapvalintus paviršiaus kontūrus).

Skaitmeniniams reljefo modeliams sudaryti naudojami taškai, horizontalės, hidrografijos objektų linijos, kiti objektai, turintys aukščio reikšmes arba modeliuojant įtakojantys paviršiaus formą.

Skaitmeniniai vietovės modeliai dažnai yra sudaromi distanciniais paviršiaus matavimo metodais. Tokiu būdu sudarant paviršiaus modelį, į jį neišvengiamai pakliūva antžeminiai objektai (pastatai, miškai, krūmai ir pan.), todėl analizuojant skaitmeninius vietovės modelius svarbu įvertinti antžeminių objektų įtaką reljefo modeliui.

Abiem atvejais SRM kokybė buvo nagrinėta, taikant stačiakampių tinklo (GRID) arba nereguliaraus trikampių tinklo (TIN) metodiką duomenų blokams formuoti. Išmatuotus taškų aukščius darbo autorė palygino Vilniaus teritorijoje. 1995 metais VGTU Geodezijos institutas stereofotogrametriniu būdu sukūrė Vilniaus miesto GIS bazinį skaitmeninį žemėlapi (Žalnierukas ir kt., 1996). Žemėlapis sudarytas fotogrametrinį modelį stereodigitalizuojant kompiuterizuotais

analoginiais prietaisais – autografais A8. Stereodigitalizuota naudojant norvegiškas *Pumatec* programas *Orprog*, *Ps.DigStereo* ir *Ps.Map*. Aeronuotrauka daryta Norvegijos AB "Fjellanger Widerøe" aerokamera RMK TOP ($c_k = 153,6$ mm). Mastelis – 1:6000 (skersinių juostų – 1:8000). Fotografavimo aukštis – 910 m. Aerofotografavimo metu lėktuvo kinematinė GPS nustatytos erdvinės projekcinių centrų koordinatės panaudotos skaičiuojant aerotrianguliaciją (Ruzgienė ir Žalnierukas, 1998). Žemėlapių tikslumas projektuotas ne mažesnis, negu grafinių 1:1000 mastelio planų – ryškių kontūrų kartografavimo vidutinė paklaida geodezinio pagrindo atžvilgiu – iki 0,40 m (vidutinė kvadratinė paklaida – 0,48 m), o ribinė – 0,80 m. Žemėlapių tikslumą, atsižvelgiant į aerofotonuotraukos parametrus, nulemia aerotrianguliacijos ir stereodigitalizavimo paklaidos. SRM tikslumo kontrolei tirti panaudoti 2843 stereofotogrametriškai išmatuoti taškų aukščiai. Atliekant šių paviršiaus modelių tikslumo tyrimą, skaičiuojant aukščių skirtumus tarp reljefo modelio reikšmių ir taškų aukščių, buvo gauti nevienareikšmiai rezultatai. Juos išanalizavus paaiškėjo, kad tokie rezultatai buvo gauti dėl netolygaus kontrolinių taškų pasiskirstymo tiriamame paviršiuje. Papildomam SRM tyrimui atlikti iš kontrolinių taškų aukščių buvo sudarytas nereguliaraus trikampių tinklo paviršiaus modelis. Nereguliaraus trikampių tinklo paviršiaus modelis buvo konvertuotas į stačiakampių tinklo modelį, ir buvo atliktas SRM tikslumo tyrimas visoje modelio teritorijoje. Darbo autorė reljefo modeliavimo metodų vertinimo technologinę schemą pateikia 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Reljefo modelių kokybės eksperimentinio tyrimo technologinė schema

Modeliavimo etapai	Trumpas atliekamo tyrimo aprašymas
Pradinių duomenų, naudojamų reljefui modeliuoti, analizė	Įvertinti turimų modeliujamos teritorijos aukščių duomenų privalumai ir trūkumai.
Stereofotogrametriniai kontrolinių paviršiaus taškų aukščių matavimai	Norint gauti tikslų skaitmeninį reljefo modelį, atlikti stereofotogrametriniai matavimai Šeškinės Oze, išmatuojant charakteringus šios teritorijos paviršiaus taškus.
Skaitmeninio reljefo modelio sudarymas	Sudarytas stačiakampių tinklo modelis, naudojant parinktus paviršiaus modeliavimo metodus: krigingą, kokrigingą, splain, svorinį, daugianario.
Teritorijos geomorfologinių savybių analizė	Parinkti reljefo modelio vertinimo geomorfologiniai kriterijai ir atliktas paviršiaus vertinimas.
Teritorijos zonavimas	Įvertintas reljefas ir teritorija suskirstyta į zonas pagal reljefo tipus.

2.2 lentelės tęsinys

Modeliavimo etapai	Trumpas atliekamo tyrimo aprašymas
Skaitmeninio reljefo modelio tikslumo tyrimas	Tikslumas skirtingo reljefo tipo teritorijose tirtas pagal pakartotinai stereodigitalizuotų taškų aukščius; nagrinėtas paklaidų pasiskirstymas skirtingo reljefo tipo teritorijose. Modelio paviršiui sudaryti naudota pusė stereofotogrametriškai išmatuotų paviršiaus taškų. Kita pusė taškų naudota sudaryto reljefo modelio tikslumo kontrolei.
Reljefo modelių tikslumo tyrimas	Tirta modeliavimo metodų, parametrinių funkcijų ir parametų įtaka reljefo modelio tikslumui teritorijose su skirtingomis geomorfologinėmis savybėmis.
Rezultatų analizė	Statistinė, regresinė, daugiakriterinė analizė, tinkamiausių modeliavimo metodų prioritetų nustatymas.
Skaitmeninio paviršiaus modelio pasirinktu metodu sudarymas	Parinkti paviršiaus modeliavimo parametrai, gautas SRM, atitinkantis keliamus reikalavimus.

2.5. Išvados

- Kadangi sudarant skaitmeninius reljefo modelius naudojami įvairūs interpoliavimo metodai bei modeliuojant taikomos įvairios parametrinės funkcijos, reikia atlikti eksperimentinius tyrimus tam, kad būtų galima nustatyti geriausiai tinkančius metodus teritorijoms su skirtingomis geomorfologinėmis savybėmis.
- Reikia nustatyti geomorfologines reljefo charakteristikas ir teritoriją pagal šias savybes suskirstyti į zonas.
- Parengta technologinė schema eksperimentinių skaitmeninių reljefo modelių tikslumui tirti (pagal šią schemą tyrimai atlikti tolimesniuose šio darbo skyriuose).

3. RELJEFO MODELIŲ, SUDARYTŲ NAUDOJANT SKIRTINGUS PRADINIUS DUOMENIS, TIKSLUMO TYRIMAS

Pradinių duomenų tikslumas, padėtis ir tankis tiesiogiai įtakoja modeliuojamo SRM tikslumą. Svarbu gauti kokybiškus aukščių duomenis, leidžiančius sudaryti tikslų SRM. Taškų turi būti pakankamai daug, kad taškų aukščių pakaktų ne tik reljefo modeliui sudaryti, bet ir tikslumo kontrolei atlikti. Duomenų kokybinės ir kiekybinės charakteristikos bei ekonominiai rodikliai priklauso nuo pasirinkto aukščių matavimų metodo.

Šiuo metu pasaulyje daugiausia naudojami iš vektorizuotų horizontalių sudaryti skaitmeniniai reljefo modeliai. Šių modelių naudojimo populiarumą lemia analoginių žemėlapių gausa, iš kurių vektorizuojamos horizontalės. Lauko matavimai skaitmeniniams reljefo modeliams sudaryti nenaudojami, kadangi yra per brangūs. Lauko matavimai naudojami tik SRM kontrolei. Vis daugiau SRM sudaroma distanciniais matavimų metodais, kuriuos galima skirstyti į tiesioginius matavimus (LiDAR, InSAR) ir fotogrametrinius matavimus. Ir tiesioginiai, ir fotogrametriniai matavimai turi tą patį trūkumą: iš oro ne visada matomas žemės paviršius, todėl šiose vietose tiksliai išmatuoti paviršių neįmanoma.

Darbe naudojama tyrimo metodologija bei būdai nesiejami su konkrečiu objektu ir gali būti taikomi bet kokioms teritorijoms, tačiau autorė eksperimentiniams tyrimams pasirinko Lietuvos teritoriją, kadangi šioje teritorijoje SRM sudaryti, naudojant visus aukščiau išvardintus metodus, o darbo autorė atliko papildomus stereofotogrametrinius matavimus Vilniaus teritorijoje. Lietuvos teritorijai sudaryti keli skaitmeniniai vietovės modeliai (3.1 lentelė). Jie skiriasi sudarymo metodu, tikslumu, detalumu, paviršiaus skiriamąja geba, sudarymui panaudotais pradiniais duomenimis.

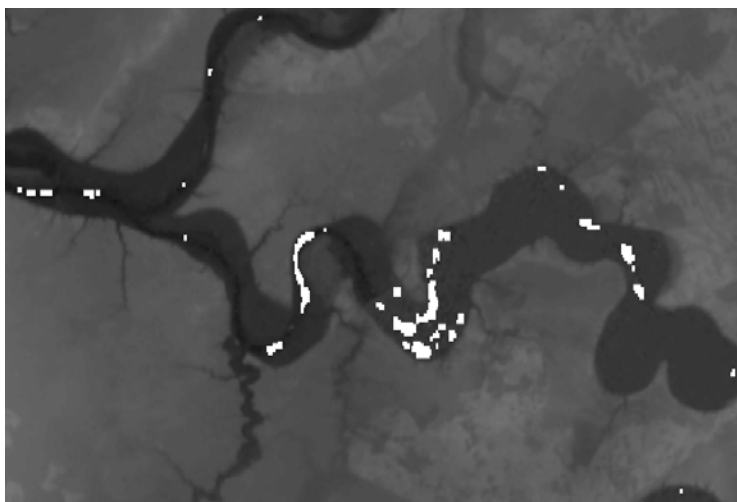
3.1 lentelė. Lietuvos teritorijos skaitmeniniai vietovės modeliai

Reljefo modelis	Duomenų paruošimo metodas	Ląstelės matmenys	Duomenų šaltinis
Lietuvos	InSAR metodas	50×50 m	Distanciniai matavimai
Lietuvos	Anudem metodas: horizontalių interpoliavimas	50×50 m	1942 m. koordinačių sistemos žemėlapių horizontalės
Kauno, Klaipėdos	Ortofotografinis	2×2 m	Fotogrametriniai matavimai
Vilniaus	Stereofotogrametrinis	2×2 m	Stereofotogrametrinis digitalizavimas

3.1. Reljefo modelio, sudaryto InSAR metodu, tikslumo įvertinimas

Kosminio vaizdo 50 m skiriamosios gebos skaitmeninis vietovės modelis buvo sudarytas InSAR metodu pagal NASA programą. Šiuo metodu buvo išmatuotas visos Europos sausumos paviršius. InSAR metodas leidžia tiksliai išmatuoti lygaus arba nestipriai kalvoto paviršiaus taškų aukščius. Tose vietose, kur žemės paviršiuje yra augmenija, dalinai išmatuojamas ir augmenijos paviršius, ir žemės paviršius, priklausomai nuo augmenijos tankumo. Vietovėse, kur yra dideli nuolydžiai, matavimai InSAR metodu ne visada įmanomi.

Darbo autorės atlikta SRM analizė parodė, kad šis modelis turi daug trūkumų, sąlygotų paviršiaus matavimų metodo.

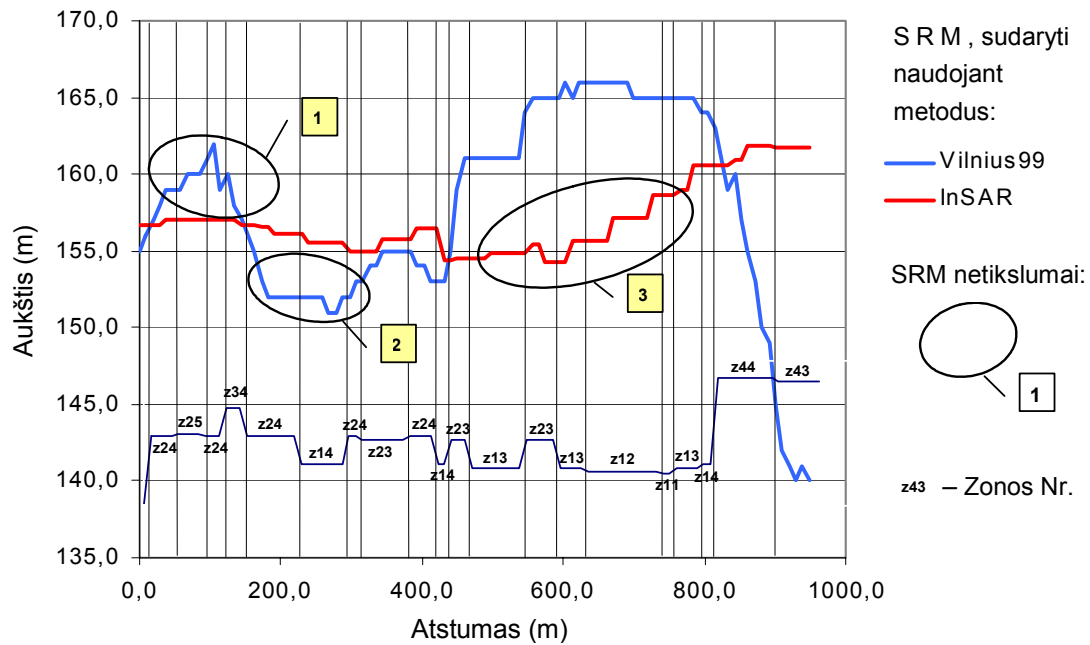


3.1 pav. Nemuno ir Neries santakos SRM fragmentas, sudarytas InSAR metodu

Pastebėta, kad sudarant skaitmeninį reljefo modelį InSAR metodu, lieka neišmatuota nemažai pavienių plotų giliuose upių slėniuose. Kaip matyti 3.1 pav., lieka neišmatuoti plotai (baltai pažymėta teritorija), esantys stačiuose upių slėniuose. Lietuvos teritorijoje liko neišmatuota 53,56 km² teritorijos. Šiose vietovėse paviršiaus duomenys gali būti gauti, atliekant esamų taškų interpoliavimą arba naudojant papildomus taškų aukščius. Atlikus skaitmeninio reljefo modelio, sudaryto InSAR metodu, analizę ir lyginant su SRM, sudarytu nereguliarių trikampių tinklą pavertus stačiakampiu rastru (Vilnius99), paaiškėjo, kad šis skaitmeninis paviršiaus modelis yra nedetalus, neatspindi smulkių reljefo detalių (3.2 pav. 1 ir 2 ovalu pažymėtos profilio atkarpos). 1999 m. UAB „Bitė GSM“ užsakymu GIS centro sukurtas skaitmeninis reljefo modelis – Vilnius99, skirtas telekomunikacijų tinklų planavimui. Šis modelis yra 50 m rezoliucijos. Jam kurti buvo panaudotos 1:50 000 mastelio skaitmeninės kosminio vaizdo duomenų bazės horizontalės (GIS–Centras, 1999). Smulkūs reljefo nelygumai, kurie matomi, sudarant paviršiaus modelį iš horizontalių arba taškų

aukščių, dažniausiai neišmatuojami. Taip pat dažnai yra praleidžiami reljefo įdubimai, vietomis reljefo modelyje matomi tikrovėje neegzistuojantys paviršiaus nelygumai (3.2 pav. 3 ovalu pažymėta profilio atkarpa). Autorės nuomone, šie netikslumai galėjo atsirasti dėl netikslių matavimų staigių paviršiaus pokyčių vietose. Netikslumai galėjo atsirasti ir dėl to, kad SRM, kurio ląstelės matmenys 50×50 m, negalima identifikuoti bei detalizuoti staigių reljefo pokyčių.

Grafiko apačioje esanti kreivė žymi zonų, per kurias eina reljefo profilis, numerius. Kuo trumpesnė atkarpa, tuo mažesnį plotą užima nurodyta zona (reljefo zonavimo metodika ir zonų geomorfologinės charakteristikos aprašytos 4.1 poskyryje).



3.2 pav. SRM, sudaryti InSAR metodu, analizė

Palyginus InSAR metodu sudarytą SRM su Vilniaus teritorijoje fotogrametriškai išmatuotomis taškų altitudėmis, gautas standartinis nuokrypis $\sigma = 4,57$ m (3.2 lentelė).

3.2 lentelė. Skaitmeninio reljefo modelio tikslumo duomenys

SRM statistiniai duomenys	50 m / InSAR
Kontrolinių taškų kiekis, vnt.	3115
Vidutinis altitudžių skirtumas $\bar{h}$, m	2,26
Standartinio nuokrypio įvertis σ , m	4,57
Didžiausias altitudžių skirtumas $\bar{h}_{\max}$, m	25,17
Standartinio nuokrypio įverčio pasikliautinis intervalas, m ($q = 0,05$)	4,41 ÷ 4,73

3.2. Reljefo modelio, sudaryto iš horizontalių, tikslumo įvertinimas

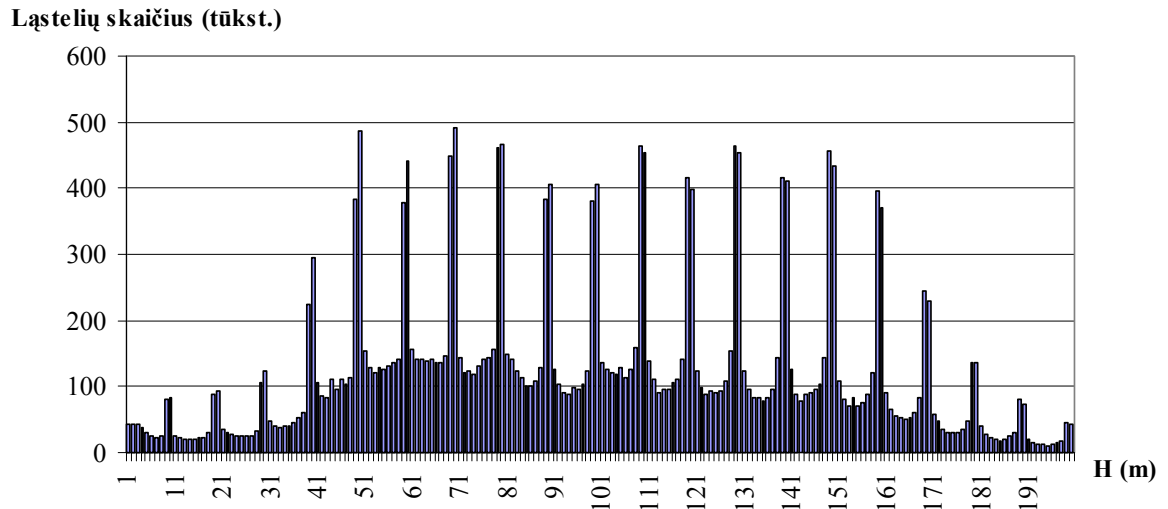
Rastrinis visos Lietuvos reljefo modelis DEM50 buvo sudarytas 1996 m. (GIS–Centras, 1999). Šiam SRM sudaryti buvo panaudoti aukščių taškai ir horizontalės. Aukščių taškai gauti digitalizuojant 1:50 000 mastelio topografinių žemėlapių, išleistų 1975–1990 m., horizontales ir aukščių ženklinius. Dalis aukščių taškų duomenų bazės, užkoduotos DXF formatu, buvo gauta iš Minsko geodezijos įmonės. Horizontalės ir kiti kartografiniai duomenys buvo sukaupti 1942 m. koordinatų sistemos 1:50 000 mastelio žemėlapiuose. Pradinių duomenų tikslumas atitinka 1:50 000 mastelio žemėlapiui keliamus reikalavimus. Aukščių duomenų interpoliavimui naudotas krigingo metodas. DEM50 yra stačiakampių tinklo reljefo modelis. Tinklinį modelį sudaro ląstelių masyvas iš 5985 eilučių ir 7775 stulpelių, iš viso 46533375 ląstelės. DEM50 nėra tikslus dėl kelių veiksnių (Kumetaitis, 2000):

- nėra visiškai patikimų pradinių duomenų SRM sudaryti;
- paviršiaus modeliavimo metodo sąlygoti trūkumai.

Iki šio laiko kartografinės medžiagos leidybai naudojamos 1942 m. koordinatų sistemos žemėlapiuose išbraižytos horizontalės. Palyginus geodezinio pagrindo taškų aukščius bei stereodigitalizuotus taškų aukščius, paaiškėjo, kad vietomis horizontalių duomenys yra nepatikimi.

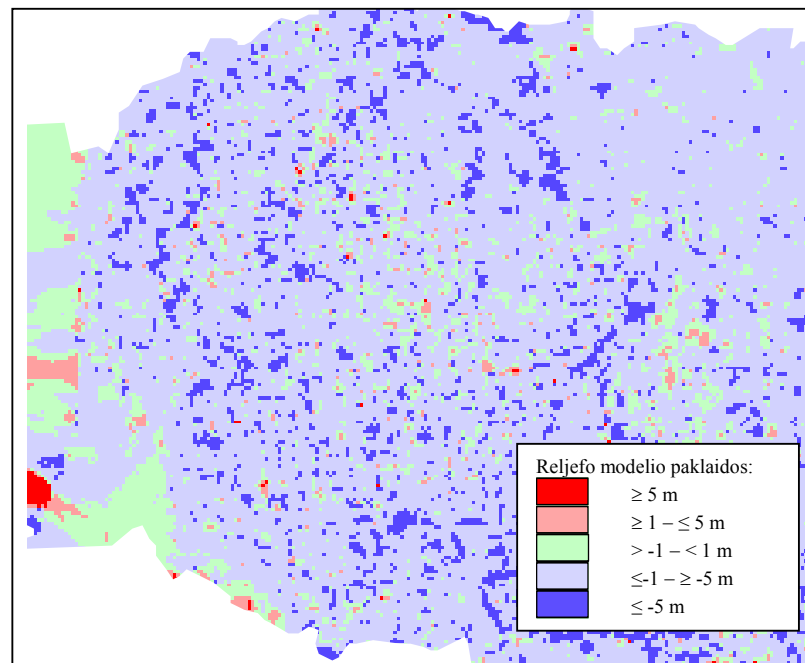
Paviršiaus profilio analizė parodė, kad iš horizontalių sudarytas SRM neatspindi nedidelių reljefo pokyčių. Vidutiniai reljefo pokyčiai taip pat nėra detalai vaizduojami. Tai gali būti dėl horizontalių braižymo netikslumų arba dėl pasenusių reljefo duomenų. Kitas skaitmeninio reljefo modelio trūkumas yra sąlygotas paviršiaus formavimo metodo. Iš horizontalių sudaryto SRM detalumas yra labai nevienodas. Kadangi horizontalės yra ištisinės linijos, tai gaunamas daug didesnis aukščius apibūdinančių ląstelių skaičius, kurių aukščių reikšmės yra lygios horizontalių reikšmėms ir žymiai mažesnis tarp horizontalių esančių interpoliuotų reikšmių skaičius (Atkinson, 1999). Tai galima matyti iš SRM paviršiaus ląstelių aukščių reikšmių histogramos (3.3 pav.).

Histogramos pikai atitinka sveikąsias horizontalių, kurios buvo panaudotos SRM sudaryti, aukščių reikšmes. Tuomet reikšmių, atitinkančių horizontalių linijas, padaugėja. Tai gali turėti įtakos reljefo panaudojimui įvairiems tikslams. Hidrografijos, erozijos ir kitų dirvos paviršiuje vykstančių reiškinių, kurių modeliavime naudojamos nuolydžio reikšmės, skaičiavimai nebus labai tikslūs, kadangi gautas paviršius yra iškraipytas pagal horizontalių tinklą. Šį trūkumą, nors ir ne visiškai, galima pašalinti (Kumetaitis, 2000).



3.3 pav. Skaitmeninio reljefo modelio, sudaryto iš horizontalių, ląstelių aukščių reikšmių histograma

Modeliuojant reljefą, būtina atsižvelgti į hidrografijos objektų kranto liniją, priešingu atveju vandens telkinių paviršius gaunamas „banguotas“. Tas labai gerai atsispindi Kuršių marių ir Baltijos jūros teritorijoje (3.4 pav.).



3.4 pav. 1996 m. reljefo modelio aukščių nuokrypos nuo kontrolinių matavimų

SRM aukščių skirtumai randami, skaičiuojant aukščių nesutapimus tarp vektorizuotų iš 1:10 000 mastelio žemėlapių taškų aukščių ir 1996 m. SRM paviršiaus reikšmių. Tokių paviršių

Skaitmeninio reljefo modeliavimo daugiaparametrinis vertinimas, atsižvelgiant į paviršiaus geomorfologines savybes galima pataisyti, šių objektų kranto liniją panaudojant kaip horizontalę, pagal kurią tikslinamas ir „išlyginamas“ vandens telkinių paviršius.

Didžiausi altitudžių skirtumai (≥ 5 m) šiame reljefo modelyje kaupiasi, kur dideli reljefo nuolydžiai (3.3 lentelė). Tai būdinga ir miškingoms raižyto reljefo vietovėms. Vilniaus miestas pasižymi sudėtingomis formomis, todėl 3.3 lentelėje matomas didesnis, lyginant su visos Lietuvos teritorijos, standartinio nuokrypio įvertis.

3.3 lentelė. Skaitmeninio reljefo modelio tikslumo duomenys

1996 m. SRM statistiniai duomenys	Lietuvos teritorijoje	Vilniaus mieste
Kontrolinių taškų kiekis, vnt.	64451	3115
Vidutinis altitudžių skirtumas $\bar{h}$, m	-0,8	-0,71
Standartinio nuokrypio įvertis σ , m	3,0	3,92
Didžiausias altitudžių skirtumas $\bar{h}_{\max}$, m	29,0	18,15
Standartinio nuokrypio įverčio pasikliautinis intervalas, m ($q = 0,05$)	2,98 ÷ 3,02	3,78 ÷ 4,06

Atsižvelgiant į Lietuvos teritorijos reljefo pobūdį, tikslintina teritorija yra didžiųjų upių slėniai su stačiais šlaitais. SRM tikslinamas naudojant hidrografijos taškus.

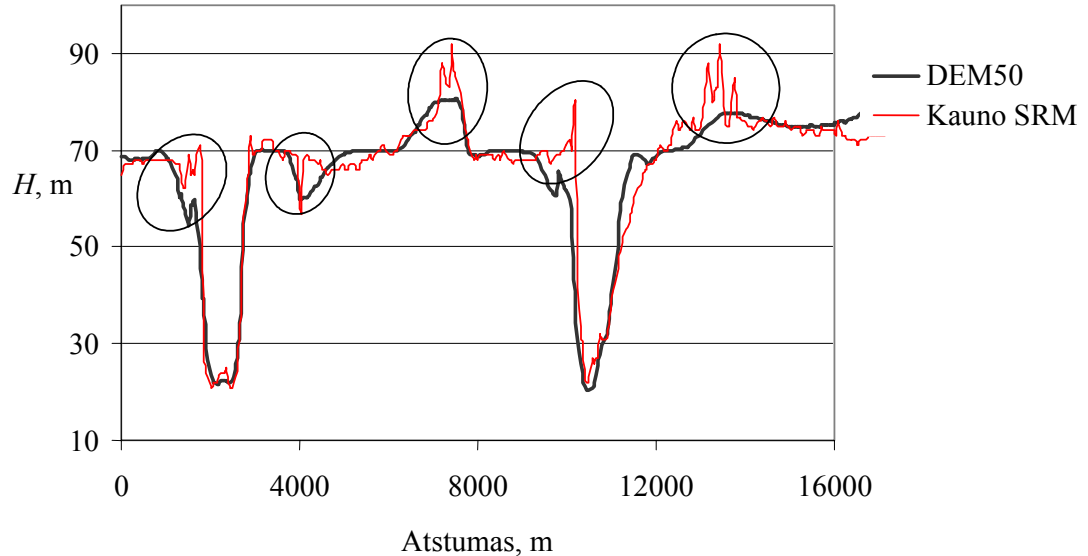
3.3. Reljefo modelio, sudaryto ortofotogrametriniu metodu, tikslumo įvertinimas

Ortofotografinio žemėlapis sudarymas susideda iš šių etapų: aeronuotraukų skenavimo, skaitmeninės aerotrianguliacijos, SRM sudarymo ir tikslinimo pagal sudarytą SRM (Kaczinski ir Ziobro, 1998). Vienas iš būtinų etapų ortofotografinių žemėlapių gamybos procese yra SRM sudarymas ortofotogrametriniu metodu. Šiuo metodu reljefas modeliuojamas, naudojant persidengiančias aerofotonuotraukas. Teorinis šiuo metodu sudaryto SRM aukščio tikslumas yra 0,3-1 lastelės matmenų, t. y. $0,1\% H_s$ - $0,2\% H_s$ (H_s – skrydžio aukštis) atviroje vietovėje ir $1\% H_s$ – $2\% H_s$ miškingoje teritorijoje (Kaczinski, 2000).

Aerogeodezijos institute ortofotogrametriniu metodu, naudojant Leica darbo stotį, sudarytas Kauno 2×2 m lastelės matmenų skaitmeninis paviršiaus modelis. Šis metodas labai perspektyvus, nes ortofotografiniai šalies žemėlapiai nuolatos atnaujinami, o SRM gali būti gautas sudarant ortofotografinį žemėlapi kaip papildomas produktas, kuriam nereikia atskiros aeronuotraukos.

Todėl šis metodas gali būti naudojamas, norint greitai sudaryti didelės teritorijos skaitmeninį reljefo modelį.

Taip gautas modelis apima ne tik žemės paviršių, bet ir antžeminius objektus, iškilusius aukščiau žemės paviršiaus: pastatus, miškus, pavienius medžius, krūmynus (3.5 pav.).



3.5 pav. Antžeminiai objektai, atspindintys Kauno SRM

Palyginę skaitmeninio reljefo modelio, gauto ortofotogrametriniu metodu (Kauno SRM), ir SRM, sudaryto Anudem metodu iš horizontalių, skerspjūvio profilius, matome, kad ortofotogrametriniu metodu sudarytas paviršiaus modelis yra labai detalus ir atspindi smulkius paviršiaus nelygumus. Nagrinėjamas profilis praveistas per Nemuno ir Neries upių slėnius Kauno miesto teritorijoje. Matosi, kad hidrografijai ir kitiems antžeminiams reiškiniams (pavyzdžiui, dirvos erozijai) modeliuoti toks paviršius netinkamas, kadangi apima daug antžeminių objektų (3.5 pav. ovalais apibrėžtos profilio atkarpos), kurie iškraipo tikrąjį žemės paviršiaus vaizdą. Norint iš šio SRM sukurti skaitmeninį reljefo modelį, prieš tai iš reljefo modelio reikia pašalinti antžeminius objektus. Tai gali būti atliekama rankiniu būdu, naudojant papildomą aukščių informaciją tose vietose, kur dideli paviršiaus plotai dengiami augmenijos. Kadangi operatorius gali tiksliai išmatuoti žemės paviršių, kur augalija retesnė, šiose vietose tikslinga papildomai naudoti stereodigitalizuotus taškų aukščius.

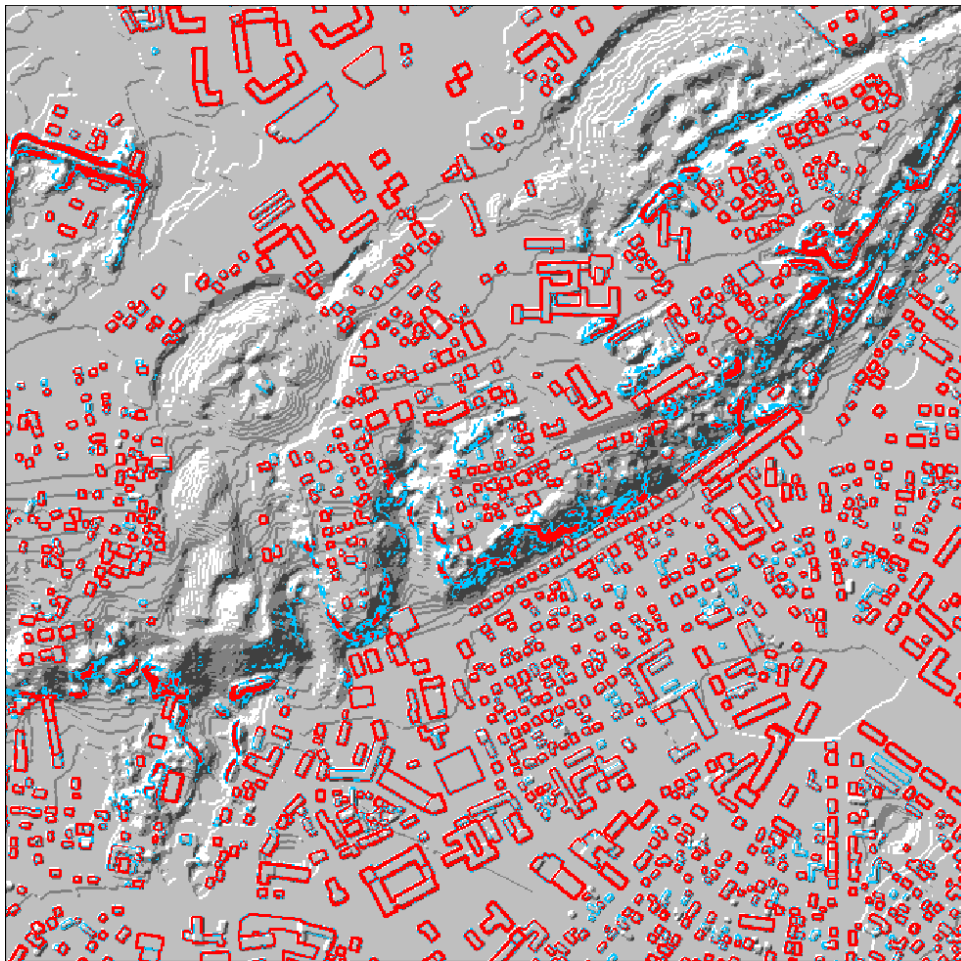
Kadangi stereofotogrametriniai matavimai Kauno mieste neatlikti, SRM tikslumas buvo tiriamas, lyginant su didelio tikslumo SRM (ląstelės matmenys – 2×2 m), gautu iš 1:10 000 mastelio žemėlapiu horizontalių. Kontrolei naudota 7100 taškų aukščių.

3.4 lentelė. Skaitmeninio reljefo modelio tikslumo duomenys

SRM statistiniai duomenys	Ortofotogrametrinis metodas
Kontrolinių taškų kiekis, vnt.	7100
Vidutinis altitudžių skirtumas $\bar{h}$, m	-2,94
Standartinio nuokrypio įvertis σ , m	6,23
Didžiausias altitudžių skirtumas $\bar{h}_{\max}$, m	26,56
Standartinio nuokrypio įverčio pasikliautinis intervalas, m ($q = 0,05$)	6,09 ÷ 6,37

Antžeminių objektų eliminavimas iš reljefo modelio

Autorės atliktas ortofotografinio žemėlapio nuolydžių skaičiavimo tyrimas parodė, kad reljefo nuolydžių žemėlapis, kuriame išskirti didesni negu 60%, tiksliai pakartoja antžeminių objektų kontūrus (3.6 pav.).



3.6 pav. Ortofotografinis žemėlapis su nuolydžių kontūrais ir vektorizuotais pastatais

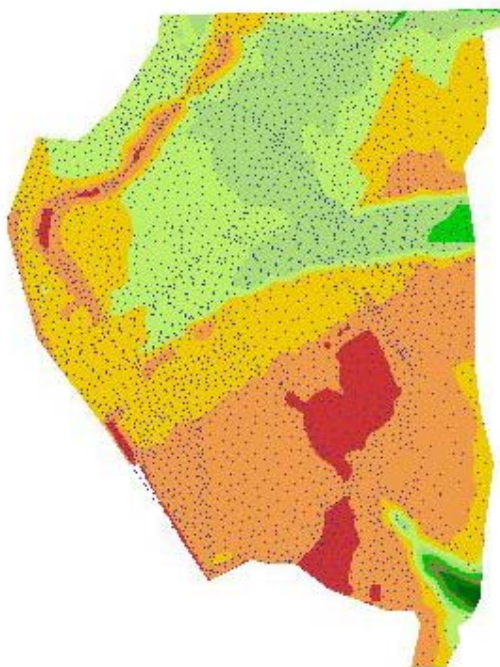
Gamtoje tokie nuolydžiai yra sutinkami retai – upių slėniuose, kurie sudaro ne daugiau negu 5% Lietuvos teritorijos, todėl 95% atvejų šį metodą galima taikyti tiesiogiai, o 5% atvejų – su tam tikrom išlygom – antžeminiams objektams atpažinti. Nuolydžių, didesnių negu 60%, kontūrus galima panaudoti augmenijos plotams apibrėžti, o pastatams labiau tinka statesnių negu 85%

nuolydžių kontūrai. Vėliau tokius antžeminius objektus galima pašalinti iš skaitmeninio paviršiaus modelio. Interpoliuojant gretimas teritorijas, turinčias aukščių reikšmes, gaunamos reljefo reikšmės pastatų buvimo vietose. Kadangi miškai ir krūmynai dažniausiai užima didesnius plotus, aukščių reikšmių, esančių aplink miško kontūrą, nepakanka ir interpoliavimui reikia naudoti kontūro viduje esančius papildomus taškų aukščius. Kitas galimas didesnių negu 85% reljefo nuolydžių kontūrų pritaikymas – vektorizavimo darbams kontroliuoti, kadangi nuolydžių kontūrai atitinka pastatų kontūrus. Tyrimo metu nuolydžiai apskaičiuoti, naudojant 2 m skiriamosios gebos trimatį Kauno vietovės modelį, gautą ortofotogrametriniu metodu: mėlynu kontūru pažymėti vektorizuoti pastatai; mėlynai pažymėti > 60% nuolydžiai, raudonai – > 85% nuolydžiai. Analizuojant 3.6 pav. matosi, kad nuolydžių žemėlapis atkartoja pastatų kontūrus ir gali būti naudojamas kaip pagalbinė medžiaga pastatams ir kitiems antžeminiams objektams vektorizuoti ir kontroliuoti (Kumetaitienė, Kumetaitis, 2002). Nuolydžių informaciją galima panaudoti, automatinio būdu filtruojant antžeminius objektus iš skaitmeninio paviršiaus modelio.

3.4. Reljefo modelio, sudaryto stereofotogrametriniu metodu, tikslumo tyrimas

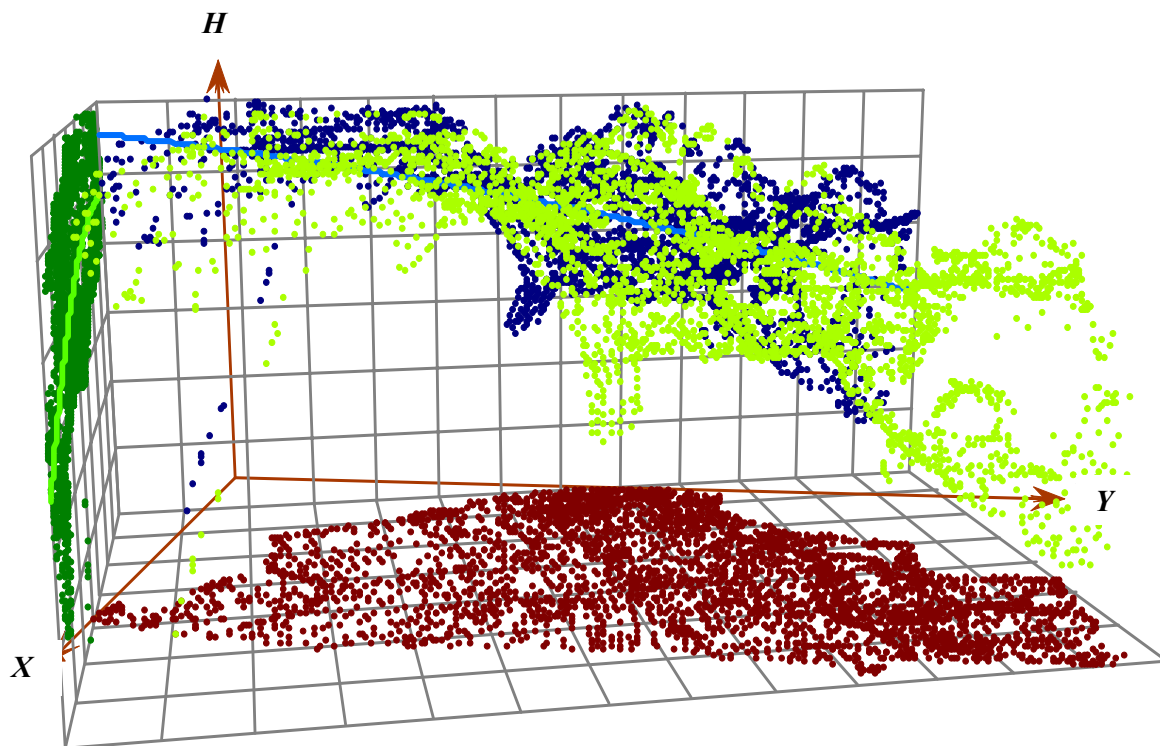
Stereofotogrametrinių matavimų privalumas – galimybė išdėstyti taškus pagal poreikį. Skaitmeniniam reljefo modeliui sudaryti ir kontroliuoti reikalingi taškų aukščiai gauti stereofotogrametriniu metodu. Šis metodas pasižymi tikslumu. Atsižvelgiant į reljefo situaciją, operatorius gali pasirinkti pradinių taškų išdėstymą taip, kad būtų atspindėtos svarbiausios reljefo savybės (Žalnierukas ir kt. 1999). Taip pat rankiniu būdu išvengiama, kad augalija ir antropogeniniai objektai nepatektų į sudaromą reljefo modelį. Metodo trūkumas tas, kad rankinis darbas reikalauja daug laiko sąnaudų, todėl jis nėra labai produktyvus ir, lyginant su kitais metodais, gana brangus.

Analizuodama naudotų metodų tikslumą, darbo autorė ištyrė Vilniaus 2 m skiriamosios gebos skaitmeninio reljefo modelio fragmentą, sudarytą naudojant stereodigitalizuotus taškų aukščius. Taškų aukščiai išmatuoti stereofotogrametriniu prietaisu A8. Matavimai atlikti 121,86 km² plote Vilniaus miesto teritorijoje. Skaitmeniniam reljefo modeliui sudaryti darbo autorė pasirinko Šeškinės Ozą.



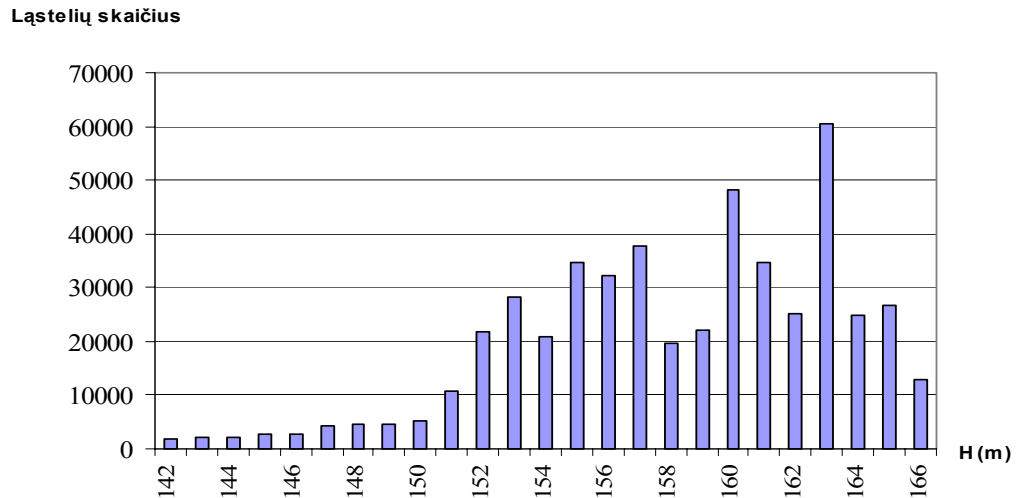
3.7 pav. Vilniaus miesto dalies reljefo modelio kontrolinių taškų išsidėstymas

Kadangi autorė norėjo sudaryti labai tikslų SRM, buvo atliktas papildomas stereodigitalizavimas, išmatuojant 5689 charakteringus vietovės taškų aukščius (3.7 pav. ir 3.8 pav.).



3.8 pav. Stereodigitalizuotų taškų aukščių erdvinis išsidėstymas

Stereofotogrametriškai sudarytas SRM paviršius, kitaip negu gautas interpoliuojant horizontales (žr. 3.2 skyrių, 3.3 pav.), kinta tolygiai (3.9 pav.).



3.9 pav. SRM, sudaryto iš stereodigitalizuotų taškų aukščių, histograma

Vertinant iš stereofotogrametriškai išmatuotų altitudžių sudarytą SRM, buvo atlikti šiuo metodu gautų matavimų tikslumo tyrimai (Žalnierukas, Kumetaitienė, 1999).

Taškų altitudžių matavimo stereomodelyje apriorinė paklaida apskaičiuota pagal prof. Øystein Andersen (1982) siūlomą formulę:

$$M_H = M_B \frac{f}{b} m_{px}, \quad (3.1)$$

čia M_B – aeronuotraukos mastelio vardiklis (6000); f – aerokameros židinio nuotolis;
 b – fotografavimo bazė ($b = 92$ mm); m_{px} – horizontaliojo paralakso matavimo prietaisu gauta vidutinė kvadratinė paklaida ($m_{px} \approx 0,012$ mm). Šiuo atveju $M_H = 0,12$ m.

Sudaromo žemėlapio tikslumą, žiūrint aeronuotraukos parametrų, taip pat lemia ir aerotrianguliacijos paklaidos. Atsižvelgiant į atraminių taškų nustatymo aerotrianguliacijos metodu paklaidas ($m_{Htr} = 10$ cm), projektine absoliutine taškų altitudžių nustatymo paklaida galima laikyti $M_H = 15$ cm.

Taškų altitudžių tikslumas tirtas:

- 1) kartojant stereodigitalizavimą;
- 2) geometriniu niveliavimu nustatant taškų, identifikuotų skaitmeninio žemėlapio blokuose ir vietovėje, altitudes;
- 3) palyginant altitudes su geodezinėmis tų pačių taškų, identifikuotų 1:500 mastelio miesto planuose, altitudėmis.

Buvo tikrinami įvairūs duomenų blokai. Taškai parinkti vizualiai vaizduoklyje. Altitudžių skirtumai skaičiuoti iš stereofotogrametriškai išmatuotų altitudžių atimant geodezinius taškų aukščius, kurios nustatytos miesto planuose arba niveliuojant.

Altitudžių tikslumo tyrimas pagal 1:500 mastelio miesto planus

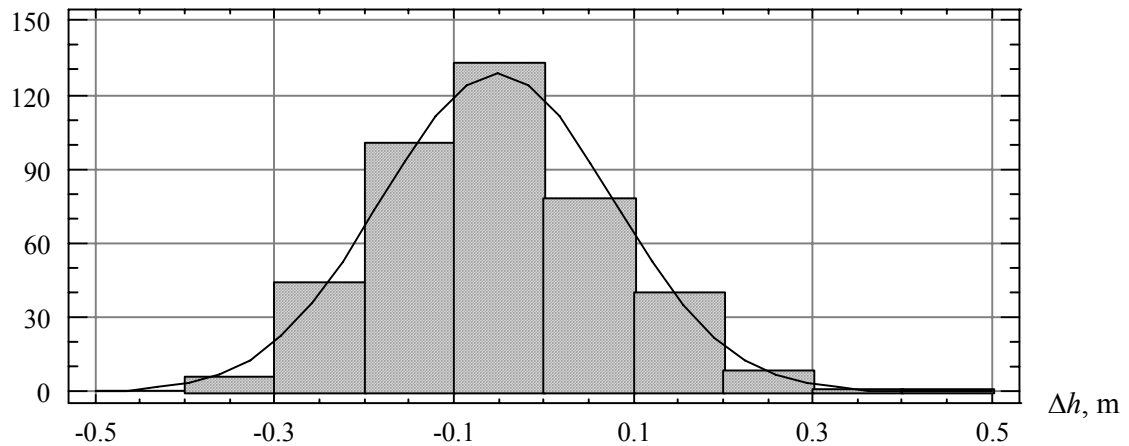
Blokų taškų altitudės tikrintos, lyginant jas su 1:500 mastelio planuose identifikuotų taškų altitudėmis. Taip tikrinta keturiolika blokų (624 taškai). Altitudžių skirtumai apibendrinti 3.5 lentelėje. Vidutinis kvadratinis altitudžių paklaidų vidurkis 0,14 m. Kai kuriuose blokuose (Šeškinė) yra žymūs sisteminiai altitudžių skirtumai (nuo –0,08 iki –0,19 m). Vidutinė kvadratinė altitudžių skirtumų paklaida yra 0,14 m (3.2 lentelė) apskaičiuota pagal formulę:

$$m_{\Delta h} = \sqrt{\frac{\sum \Delta h^2}{n-1}}. \quad (3.2)$$

3.5 lentelė. Aukščių nuokrypų, nustatytų pagal 1:500 mastelio planus, apibendrinti duomenys

Blokai	Vieta	Tikrintų altitudžių skaičius	Vid. kvadr. paklaida $m_{\Delta h}$, m	Vid. kvadr. paklaidos pasikliautinis intervalas, m ($q = 0,05$)		Didžiausi altitudžių skirtumai, m
				nuo	iki	
B10B11	Fabijoniškės	27	0,14	0,09	0,19	–0,26
D10D11	Justiniškės	47	0,10	0,07	0,13	+0,27
D13D14	"	29	0,10	0,06	0,14	+0,19
D15D16	"	32	0,11	0,07	0,15	+0,26
K22K23	Naujamiestis	83	0,15	0,12	0,18	–0,32
B8B9	Pašilaičiai	26	0,10	0,06	0,14	–0,27
D16D17	Šeškinė	71	0,14	0,11	0,17	–0,37
E25E26	"	14	0,20	0,10	0,30	–0,29
E26E27	"	70	0,17	0,13	0,21	–0,50
E27E28	"	16	0,11	0,06	0,16	–0,29
F27F28	Žirmūnai	45	0,12	0,08	0,16	+0,37
F29F30	"	64	0,10	0,08	0,12	–0,24
C19C20	Baltupiai	40	0,16	0,11	0,21	–0,32
C20C21	"	60	0,19	0,14	0,24	–0,37
Iš viso		624				
Vidutinių kvadratinių paklaidų vidurkis			0,14			

Dažniai



3.10 pav. Altitudžių skirtumų, nustatytų pagal 1:500 mastelio planus, histograma

Modeliui naudojamų taškų altitudžių tikrinimas geometriniu niveliavimu

Keturiuose blokuose buvo parinkti ir aerofotovaizduose paženklinėti kontroliniai taškai, kuriuos būtų galima surasti vietovėje (šaligatvių, įvažiavimų, gatvių sankirtos, gatvių pakraščiai prie stulpų ir panašiai). Vietovėje identifikuoti 184 kontroliniai taškai.

Parinktų taškų altitudės nustatytos trimis techninio niveliavimo ėjimais, susietais su anksčiau vietovėje markiruotais ir GPS metodu koordinuotais aeronuotraukos kontūrženkliais. Ėjimų ilgiai: Šeškinėje – 2,1 km, Justiniškėse – 1,6 km ir Žirmūnuose – 1,4 km. Bendras ėjimų ilgis 5,1 km. Nivelyras Ni-025. Daugumos kontrolinių taškų altitudės išmatuotos iš niveliavimo stočių, kaip tarpiniai taškai.

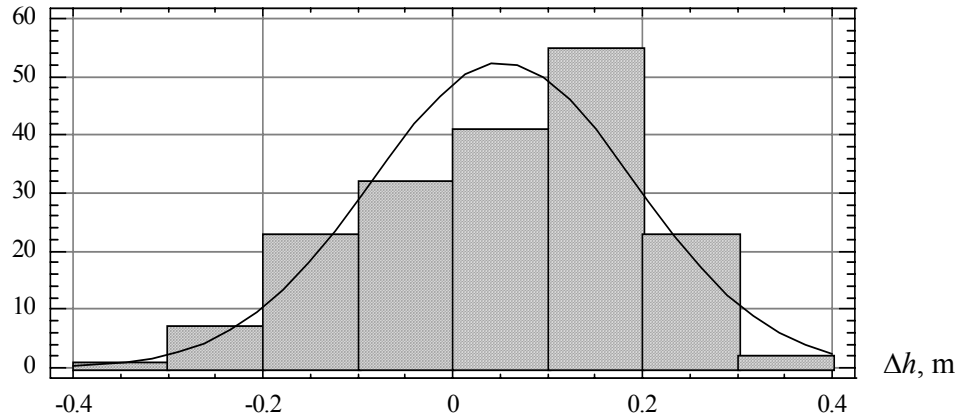
Atlikus statistinę altitudžių tikrinimo rezultatų analizę gauta, kad standartinis blokų taškų altitudžių vidutinių kvadratinių paklaidų vidurkis, lyginant su nustatytu geometriniu niveliavimu, yra 0,14 m (3.11 pav.).

Atsižvelgiant į tai, kad yra sisteminių nuokrypių, vidutinė kvadratinė altitudžių paklaida apskaičiuota pagal formulę:

$$m_{\Delta h} = \frac{1}{n-1} \sum \Delta h^2 - n \bar{\Delta h}^2, \quad (3.2)$$

čia Δh – fotogrametrinių altitudžių nuokrypiai nuo išmatuotų niveliavimų; $\bar{\Delta h}$ – nuokrypių aritmetinis vidurkis, $\bar{\Delta h} = 0,046$ m; n – nuokrypių skaičius.

Dažniai


3.11 pav. Niveliavimu nustatytų altitudžių skirtumų histograma

Altitudžių nuokrypių pasiskirstymo histograma su normaliojo pasiskirstymo kreive pateikiama 3.6 lentelėje.

3.6 lentelė. Taškų altitudžių, tikrintų niveliuojant, tikslumo duomenys

Stereomodelis	Vietovė	Tikrintų altitudžių skaičius	Vid.kvadr. nuokrypių dydžiai $m_{\Delta h}$, m	Vidutinė kvadratinės paklaidos pasikliautinis intervalas, m ($q = 0,05$)		Didžiausi altitudžių skirtumai, m
				nuo	iki	
D10D11	Justiniškės	73	0,16	0,12	0,20	-0,05
E24E25	Šeškinė	58	0,14	0,10	0,18	+0,30
E25E26	"	12	0,09	0,04	0,14	+0,25
F29F30	Žirmūnai	41	0,14	0,10	0,18	+0,39
Iš viso		184				
Vidutinių kvadratinų paklaidų vidurkis			0,14			

Norėdama vienareikšmiškai įvertinti iš skirtingų pradinių duomenų šaltinių gautų SRM tikslumą, darbo autorė 2×2 m ląstelės matmenų SRM perskaičiavo į 50×50 m. Taip gautas SRM palygintas su stereofotogrametriškai išmatuotais taškų aukščiais (3.7 lentelė).

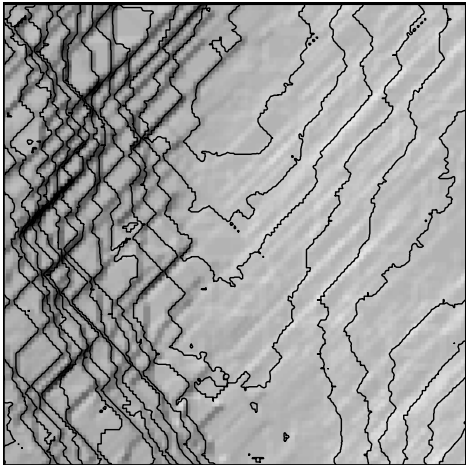
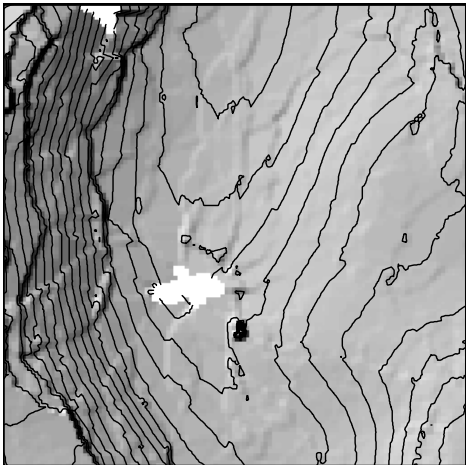
3.7 lentelė. 50×50 m ląstelės matmenų SRM tikslumo duomenys

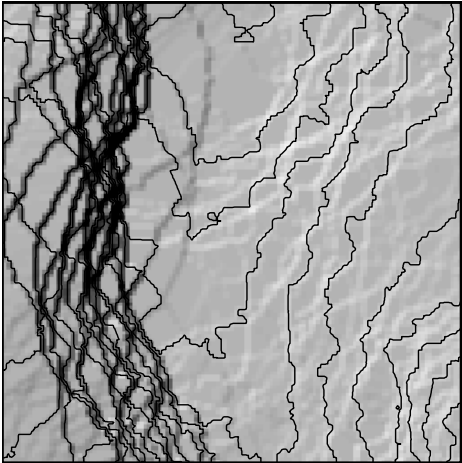
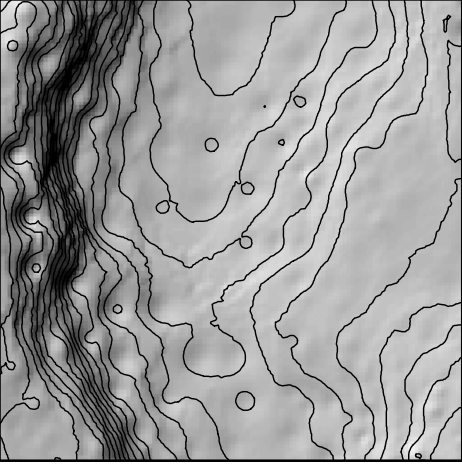
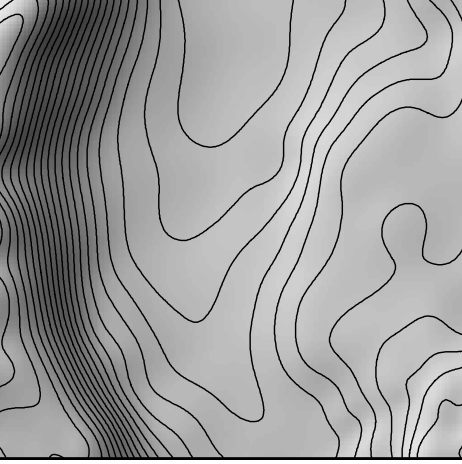
Statistiniai duomenys	Šeškinės Ozo teritorijoje, Vilniaus mieste
Kontrolinių taškų kiekis, vnt.	3115
Vidutinis altitudžių skirtumas $\bar{h}$, m	0,74
Standartinio nuokrypio įvertis σ , m	1,89
Didžiausias altitudžių skirtumas $\bar{h}_{\max}$, m	14,46
Standartinio nuokrypio įverčio pasikliautinis intervalas, m ($q = 0,05$)	1,82 ÷ 1,96

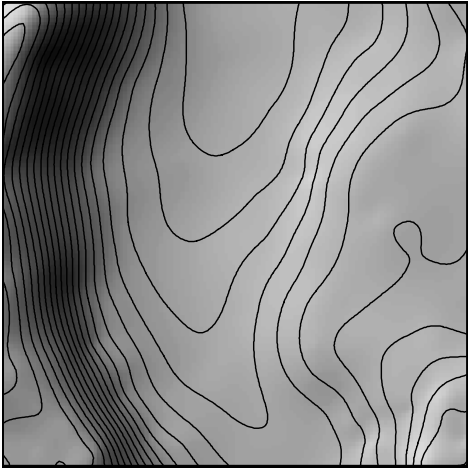
3.5. Fotogrametrinių matavimo duomenų panaudojimas reljefui modeliuoti

Autorė atliko skaitmeninių reljefo modelių, sudarytų iš skirtingų pradinių duomenų, palyginimą. Įvertinus gautus rezultatus galima teigti, kad iš stereofotogrametrinių matavimo duomenų gautas SRM yra tiksliausias ir patikimiausias. Stereofotogrametriniu metodu išmatuotų taškų altitudžių vidutinė kvadratinė paklaida $m_{\Delta h}$ yra 0,14 m, todėl šiuo metodu išmatuoti taškų aukščiai buvo naudojami darbe didelio tikslumo SRM sudaryti. Preliminariam SRM tikslumo tyrimui atlikti autorė parinko mokslinėje literatūroje (Lloyd ir Atkinson, 1999; Cattle ir kt., 2002; Du, 1996; Rees, 2000) rekomenduojamus reljefo modeliavimo metodus su standartiniais parametrais. Reljefui modeliuoti pasirinkta Šeškinės Ozo teritorija Vilniaus mieste, SRM sudaryti panaudota daugiau kaip 5000 taškų (3.8 lentelė).

3.8 lentelė. Reljefo modelių, sudarytų skirtingais metodais, palyginimas

Reljefo modelio grafinis vaizdas, gautas naudojant šešėliavimą ir išbraižius horizontales	Stačiakampių tinklo reljefo modelių sudarymo metodų aprašymas
	<i>Metodas:</i> universalusis krigingas <i>Metodo parametrai:</i> Gauso variograma Skaičiavimams naudojami 9 gretimi taškai Sudaryto reljefo modelio skiriamoji geba – 1 m <i>SRM tikslumas:</i> Standartinio nuokrypio įvertis $\sigma = 1,41$ m
	<i>Metodas:</i> universalusis krigingas <i>Metodo parametrai:</i> apskritiminė variograma Skaičiavimams naudojami 12 gretimų taškų Sudaryto reljefo modelio skiriamoji geba – 1 m <i>SRM tikslumas:</i> Standartinio nuokrypio įvertis $\sigma = 0,29$ m

Reljefo modelio grafinis vaizdas, gautas naudojant šešėliavimą ir išbraižius horizontales	Stačiakampių tinklo reljefo modelių sudarymo metodų aprašymas
	<i>Metodas:</i> paprastasis krigingas <i>Metodo parametrai:</i> Gauso variograma Skaičiavimams naudojama 12 gretimų taškų Sudaryto reljefo modelio skiriamoji geba – 1 m <i>SRM tikslumas:</i> Standartinio nuokrypio įvertis $\sigma = 2,03$ m
	<i>Metodas:</i> svorinis <i>Metodo parametrai:</i> taško aukščio svorio reikšmė lygi 2 Skaičiavimams naudojama 12 gretimų taškų Sudaryto reljefo modelio skiriamoji geba – 1 m <i>SRM tikslumas:</i> Standartinio nuokrypio įvertis $\sigma = 0,99$ m
	<i>Metodas:</i> reguliarus spline <i>Metodo parametrai:</i> taško aukščio svorio reikšmė lygi 0,1 Skaičiavimams naudojama 12 gretimų taškų Sudaryto reljefo modelio skiriamoji geba – 1 m <i>SRM tikslumas:</i> Standartinio nuokrypio įvertis $\sigma = 0,70$ m

Reljefo modelio grafinis vaizdas, gautas naudojant šešėliavimą ir išbraižius horizontales	Stačiakampių tinklo reljefo modelių sudarymo metodų aprašymas
	<i>Metodas:</i> įtemptas splain <i>Metodo parametrai:</i> taško aukščio svorio reikšmė lygi 0,1 Skaičiavimams naudojama 12 gretimų taškų Sudaryto reljefo modelio skiriamoji geba – 1 m <i>SRM tikslumas:</i> Standartinio nuokrypio įvertis $\sigma = 0,59$ m

Turint daug pradinių taškų, ypač svarbu parinkti tinkamus modeliavimo parametrus. Tik tuomet galima tikėtis geriausio rezultato.

Iš 3.8 lentelėje pateikiamo tyrimo atrodo, kad teisingiausiai reljefas atvaizduojamas, modeliuojant paviršių splain metodu, tačiau gauti standartinio nuokrypio įverčiai parodo, kad paviršius per daug suglotninamas ir todėl šis metodas nėra tinkamiausias reljefo modeliavimui. Gauti rezultatai parodė, kad iš horizontalių formos ir išsidėstymo negalima spręsti apie SRM metodo tikslumą ir tinkamumą.

3.6. Išvados

1. Atliktas iš įvairių pradinių duomenų šaltinių gautų skaitmeninių reljefo modelių palyginimas (3.2 ÷ 3.4 ir 3.7 lentelės). Paviršiaus modelis, gautas iš stereodigitalizuotų taškų aukščių, įvertintas kaip geriausias detalumo ir tikslumo požiūriu. Vidutinė kvadratinė altitudžių paklaida, remiantis 184 kontrolinių taškų niveliavimo duomenimis, yra 0,14 m. Didžiausi altitudžių skirtumai – iki 0,40 m.
2. InSAR metodu sudaryto reljefo modelio tikslumas ($\sigma = 4,57$ m). Atliktas tyrimas parodė, kad šiuo metodu sudarytas reljefo modelis yra „užterštas“ antžeminiais objektais, paviršius yra neišmatuotas staigių reljefo pokyčių vietose. Lietuvos teritorijoje neišmatuoto paviršiaus plotas yra 53,56 km².
3. Ištirtas SRM, sudaryto iš stereofotogrametriškai išmatuotų taškų, tikslumas ($\sigma = 1,89$ m). SRM (ląstelės matmenys 50×50 m) buvo suvienodinti su SRM, gautais iš InSAR ir horizontalių duomenimis.
4. Nustatyta, kad SRM sudaryti ortofotogrametriniu metodu, naudojant Leica ir panašias automatines darbo stotis, tačiau šiuo būdu gauti paviršiaus modeliai yra „užteršti“ antžeminiais objektais, todėl reikalingas tolimesnis paviršiaus modelio tikslinimas, naudojant papildomus aukščių duomenis urbanizuotose ir apželdintose teritorijose. SRM, sudaryto ortofotogrametriniu metodu, standartinio nuokrypio įvertis gautas $\sigma = 6,23$ m.
5. Atliktas ortofotogrametriniu metodu sudaryto SRM nuolydžių tyrimas, iš kurio matosi, kad antžeminius objektus galima atskirti pagal paviršiaus nuolydžių reikšmes.
6. Iš horizontalių sudaryto SRM tyrimas parodė, kad didžiausi šio metodo trūkumai yra paviršiaus išsidėstymas „terasomis“ bei mažas reljefo modelio tikslumas teritorijose su staigiais reljefo pokyčiais. Šio tipo reljefo modelyje reikalingas papildomas hidrografijos objektų kranto linijų tikslinimas. SRM tikslumas ištirtas, imant 3115 kontrolinių taškų, standartinio nuokrypio įvertis gautas $\sigma = 3,92$ m.
7. Gauti reljefo modeliai įvertinti, braižant horizontalių tinklą ir atliekant šešėliavimą. Norint įvertinti skaitmeninio reljefo modeliavimo metodo tikslumą, labai svarbu parinkti individualius paviršiaus modeliavimo parametrus.

4. RELJEFO SKAITMENINIO MODELIAVIMO METODŲ DAUGIAPARAMETRINIS VERTINIMAS IR PARAMETRŲ ĮTAKOS MODELIO TIKSLUMUI ANALIZĖ

Darbo autorė paviršiui modeliuoti taikomų parametrinių funkcijų (variogramų) reikšmingumui nustatyti panaudojo fotogrametriškai išmatuotus taškus kintančio raižytumo teritorijoje. Fotogrametrinis taškų aukščių matavimo metodas buvo pasirinktas dėl jo tikslumo ir galimybės greitai išmatuoti modeliuojamos teritorijos paviršiaus reikšmes (Žalnierukas, Kumetaitienė, 1999). Kaip parodė 3 skyriuje aprašyti tyrimai, fotogrametriniu metodu išmatuotų taškų aukščių vidutinė kvadratinė paklaida yra 0,14 m, didžiausi altitudžių skirtumai – iki 0,40 m. Tyrimui atlikti pasirinkta teritorija, kurią galima suskirstyti į kelis reljefo tipus. Tiriamos teritorijos paviršiaus plotas sudaro 0,49 km². Vidutinis atstumas tarp išmatuotų paviršiaus taškų – 8 m.

4.1. Geomorfologinių žemės reljefo charakteristikų nustatymo principai

Geomorfologines žemės reljefo charakteristikas reikia nustatyti tam, kad būtų galima įvertinti reljefo savybių įtaką SRM kokybei (Pike, 1988).

Reikia išskirti ir atitinkamai zonuoti teritoriją pagal tokias geomorfologines charakteristikas, kurios gali turėti žymią įtaką reljefo modeliavimo kokybei ir nuo kurių gali priklausyti SRM sudarymo metodų pasirinkimas (Evans, 1972). Kaip rodo šio darbo 3 skyriuje atlikti tyrimai, svarbiausių reljefo ypatumų rodikliai, lemiantys SRM kokybę, gali būti vietovės nuolydžiai ir reljefo kintamumas. Kad būtų galima atlikti teritorijos zonavimą, reikia įvertinti atitinkamo reljefo geomorfologinius rodiklius (Zevenbergen and Thorne, 1987; Skidmore, 1989; Chang ir Tsai, 1991).

Geomorfologinių rodiklių nustatymas

Žemės paviršiaus taškų aukščių kitimas x ir y kryptimis gali būti nustatomas pagal šlaito nuolydį ir kryptį. Šiuos du parametrus galima rasti, nustačius taško aukščio $H = \varphi(x, y)$, dalines išvestines pagal x ir y .

Nuolydis randamas iš funkcijų dviejų dalinių išvestinių komponentų:

$$H = \varphi(x, y),$$

$$i = \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{\Delta y}\right)^2}, \quad (4.1)$$

čia $\frac{\Delta h}{\Delta x}$ ir $\frac{\Delta h}{\Delta y}$ randamos naudojant tinklinio reljefo modelio 9 ląstelių masyvą (4.1 pav.):

H_{11}	H_{12}	H_{13}
H_{21}	H_{22}	H_{23}
H_{31}	H_{32}	H_{33}

4.1 pav. Paviršiaus nuolydžių skaičiavimas, naudojant stačiakampių tinklinį modelį

Kai ląstelė, kurios nuolydis skaičiuojamas, yra reljefo modelio pakraštyje, dalies gretimų ląstelių aukščių reikšmių nėra. Vietoje jų skaičiavimuose naudojama vidurinės ląstelės aukščio reikšmė. Dėl šios priežasties kraštinių ląstelių nuolydis gaunamas mažesnis.

Nuolydis skaičiuojamas x ašies kryptimi (Burrough, McDonell, 1998):

$$\frac{\Delta h}{\Delta x} = \frac{(H_{13} + 2H_{23} + H_{33}) - (H_{11} + 2H_{21} + H_{31})}{8 \cdot d_x}, \quad (4.1)$$

čia $\frac{\Delta h}{\Delta x}$ – dalinė aukščio reikšmės išvestinė x kryptimi; H_{ij} – tinklinio modelio ląstelių aukščių reikšmės; d_x – tinklinio modelio ląstelės skersmuo x kryptimi.

Skaičiuojant nuolydį y ašies kryptimi:

$$\frac{\Delta h}{\Delta y} = \frac{(H_{31} + 2H_{32} + H_{33}) - (H_{11} + 2H_{12} + H_{13})}{8 \cdot d_y}, \quad (4.2)$$

čia $\frac{\Delta h}{\Delta y}$ – dalinė aukščio reikšmės išvestinė y kryptimi; h_{ij} – tinklinio modelio ląstelių aukščių reikšmės; d_y – tinklinio modelio ląstelės skersmuo y kryptimi.

Skaičiuojamas bendras centrinės ląstelės nuolydžio kampas (Evans, 1979, 1980; Zevenbergen ir Thorne, 1987; Skidmore, 1989):

$$i_{\text{rad}} = \arctan \Delta h, \quad (4.2)$$

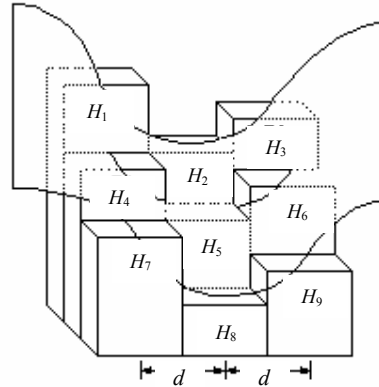
čia i_{rad} – nuolydis, išreikštas radianais.

Paviršiaus kreivumas ir kintamumas

Paviršiaus kreivumas skaičiuojamas iš skaitmeninio reljefo modelio ląstelių reikšmių. Taško aukštis H išreiškiamas 4-osios eilės daugianariu:

$$H = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I. \quad (4.3)$$

Lygties koeficientai randami, naudojant 9 skaitmeninio reljefo modelio ląstelių masę (4.2 pav.).



4.2 pav. Paviršiaus kreivumo skaičiavimas, naudojant SRM

Visam paviršiaus kreivumui skaičiuoti reikalingi koeficientai randami pagal šias formules (Johnston, Ver Hoef ir kt., 2001):

$$A = \frac{\frac{H_1 + H_3 + H_7 + H_9}{4} - \frac{H_2 + H_4 + H_6 + H_8}{2} + H_5}{d_4}, \quad B = \frac{\frac{H_1 + H_3 - H_7 - H_9}{4} - \frac{H_2 - H_8}{2}}{d_3},$$

$$C = \frac{\frac{-H_1 + H_3 - H_7 + H_9}{4} - \frac{H_4 - H_6}{2}}{d_3}, \quad D = \frac{\frac{H_4 + H_6}{2} - H_5}{d_2}, \quad E = \frac{\frac{H_2 + H_8}{2} - H_5}{d_2},$$

$$F = \frac{-H_1 + H_3 + H_7 - H_9}{4d_2}, \quad G = \frac{-H_4 + H_6}{2d}, \quad H = \frac{H_2 - H_8}{2d}, \quad I = H_5,$$

čia H_i – taško aukštis i – tajame taške, d_i – atstumas tarp ląstelių centrų.

Kreivumas naudojamas reljefo modelio geomorfologiniam klasifikavimui.

Sudarytas skaitmeninis reljefo modelis naudojamas vietovės geomorfologiniam zonavimui.

Zonavimą sudaro šie etapai:

1. nuolydžių skaičiavimas;
2. šlaitų kryptių skaičiavimas;
3. šlaitų kryptių ir nuolydžių sluoksnių erdvinės sankirtos radimas;
4. reljefo kintamumo žemėlapiu sudarymas;
5. reljefo raižytumo skaičiavimas iš erdvių reljefo išraiškos parametrų.

Skaitmeninio paviršiaus modelis buvo suskirstytas į zonas pagal reljefo nuolydį ir šlaitų kryptis. Nenuosekliai kintančios šlaitų kryptys yra raižyto reljefo požymis. Raižytumo intensyvumą parodo nuolydžio reikšmė. Didėjant nuolydžiui, didėja ir reljefo raižytumas. Šiuos abu požymius

apjungia reljefo kintamumo modelis, kuris gaunamas skaičiuojant nuolydžio ir šlaitų kryptių erdvinę sankirtą. Erdvinė sankirta gaunama sujungiant du arba daugiau paviršių. Naujai suformuotas paviršius turi abiejų paviršių savybes. Erdvinės sankirtos modelį išskaidant į grupes gaunamas reljefo kintamumo žemėlapis, parodantis šlaitų kryptis bei nuolydžių reikšmes. Atsižvelgiant į tiriamos teritorijos reljefo charakteristikas, nuolydis išskaidytas į 5 grupes, o šlaitų kryptys – į 8 grupes. Reljefo kintamumo bei nuolydžio modelių sujungimas ir duoda reljefo raižytumo paviršių.

Schematiškas reljefo zonavimo procesas pavaizduotas 4.3 pav. Darbo autorė tokį skaidymą pasiūlė, atsižvelgdama į A. Kumetaičio Lietuvos teritorijos skirstymą į morfometrinius tipus (Kumetaitis, 2004, Kumetaitienė, Kumetaitis, 2005). Reljefas suskirstytas į reljefo nuolydžius todėl, kad tokie skaidymo intervalai geriausiai atspindi reljefo pokyčius.

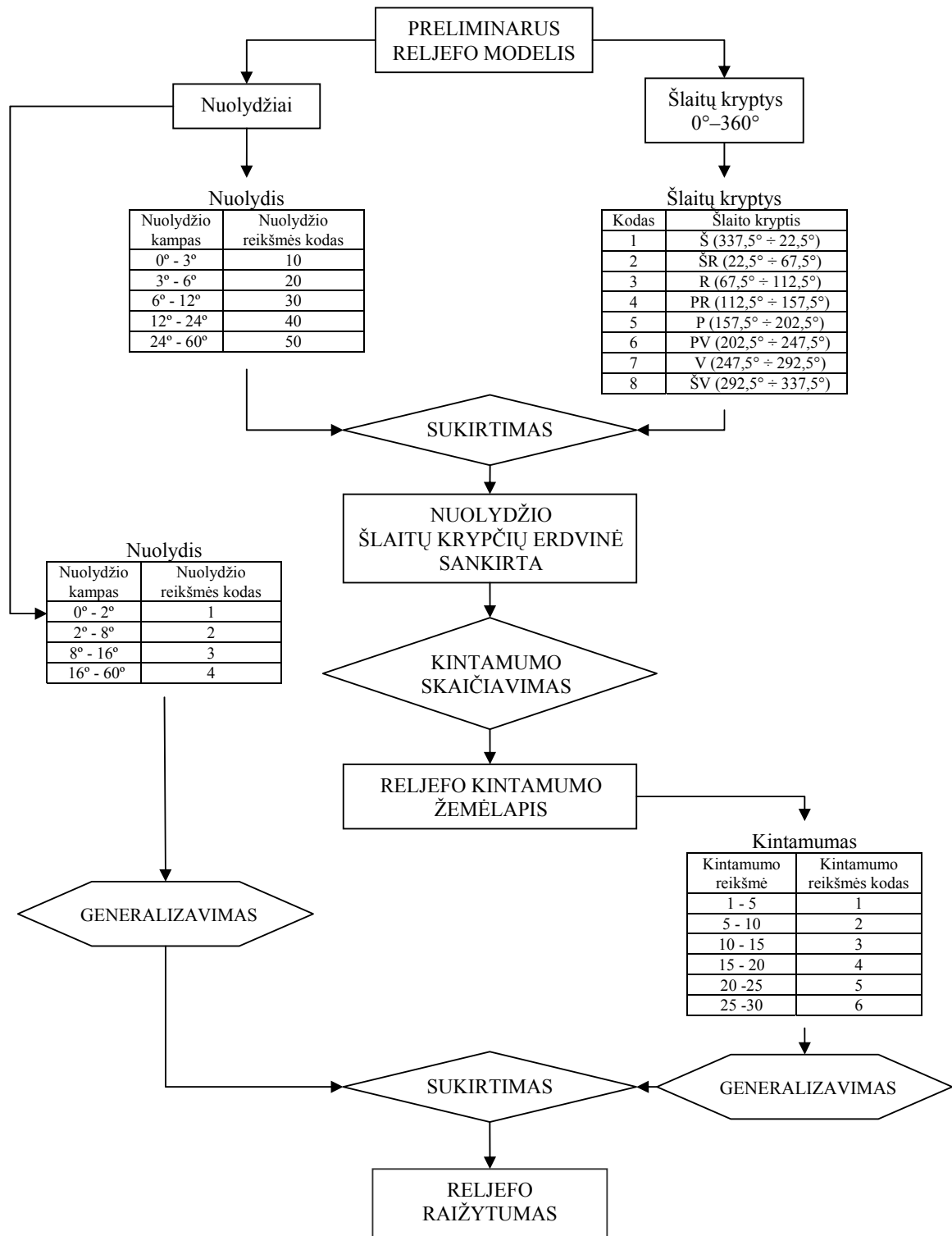
4.2. Paviršiaus geomorfologinių rodiklių įvertinimas

Panaudojus pasiūlytą metodiką (4.3 pav.), skirtą paviršiaus geomorfologiniam zonavimui ir įvertinant paviršiaus charakteristikas – nuolydį, šlaito kryptį ir raižytumą, paviršius suskirstomas į tipus (Kumetaitienė, 2005).

Pirmajame geomorfologinių parametrų palyginimo etape universaliu paviršiaus modeliavimo metodu (paprastuoju kriginu, naudojant apskritiminę variogramą su 9 gretimais taškais) buvo sudarytas skaitmeninis pasirinktos teritorijos tinklinis reljefo modelis. Atlikus paviršiaus modeliavimo metodų palyginimą, universaliu paviršiaus modeliavimo metodu buvo pasirinktas paprastasis kriginio metodas (naudojant apskritiminę variogramą su 9 gretimais taškais).

Reljefo nuolydžių skaičiavimas, naudojant stačiakampių tinklo modelį

Nuolydžių skaičiavimas pagal horizontales arba pagal nereguliarųjį trikampių tinklą nėra sudėtingas: įvertinamas statmens, jungiančio dvi horizontales, posvyrio kampas arba, atliekant skaičiavimus nereguliariame trikampių tinkle, įvertinamas trikampio plokštumos posvyrio kampas. Atliekant skaičiavimus su stačiakampiu tinklu, uždavinys tampa sudėtingesnis, kadangi stačiakampių tinklo ląstelės yra plokščios ir horizontalios. Skaičiuojant tinklinio reljefo modelio paviršiaus nuolydį, naudojamas 3×3 ląstelių masyvas (Jones, 1997). Nuolydžio skaičiavimo funkcija, ieškant vidurinės ląstelės nuolydžio reikšmės, skaičiavimus atlieka pasvirusioje plokštumoje, esančioje arčiausiai prie ląstelių aukščių reikšmių.



4.3 pav. Reljefo zonavimo pagal paviršiaus raižytumą schema

Apskaičiuotas nuolydžių paviršius suskirstomas į klases pagal nuolydžio dydį (4.1 lentelė ir 4.4 pav.).

4.1 lentelė. Nuolydžio reikšmių kodavimas nuolydžių modelyje

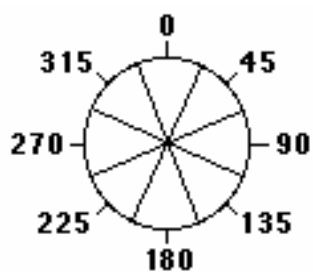
Nuolydžio kampo reikšmė	Nuolydžio reikšmės kodas
0° – 3°	10
3° – 6°	20
6° – 12°	30
12° – 24°	40
24° – 60°	50



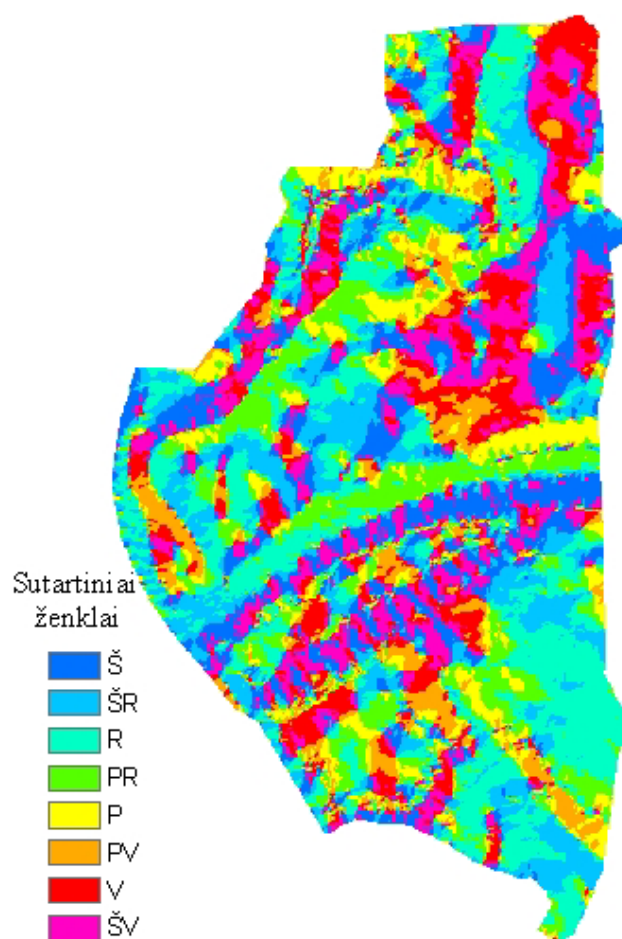
4.4 pav. Nuolydžio reikšmių vaizdavimas nuolydžių modelyje

Šlaitų kryptių skaičiavimas, naudojant stačiakampių tinklo modelį

Skaitmeninis paviršiaus modelis naudojamas kaip pagalbinė priemonė reljefo raižytumui įvertinti (Travis ir kt., 1975). Atliekant šlaitų kryptių analizę, paviršius pagal nuolydžio kryptis suskirstytas į 9 kategorijas: šiaurės, šiaurės rytų, rytų, pietryčių, pietų, pietvakarių, vakarų, šiaurės vakarų ir teritorijas plokščiu paviršiumi (4.5 pav. ir 4.6 pav.).



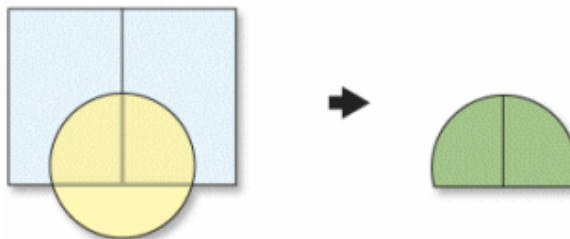
4.5 pav. Paviršiaus šlaitų kryptių nustatymas



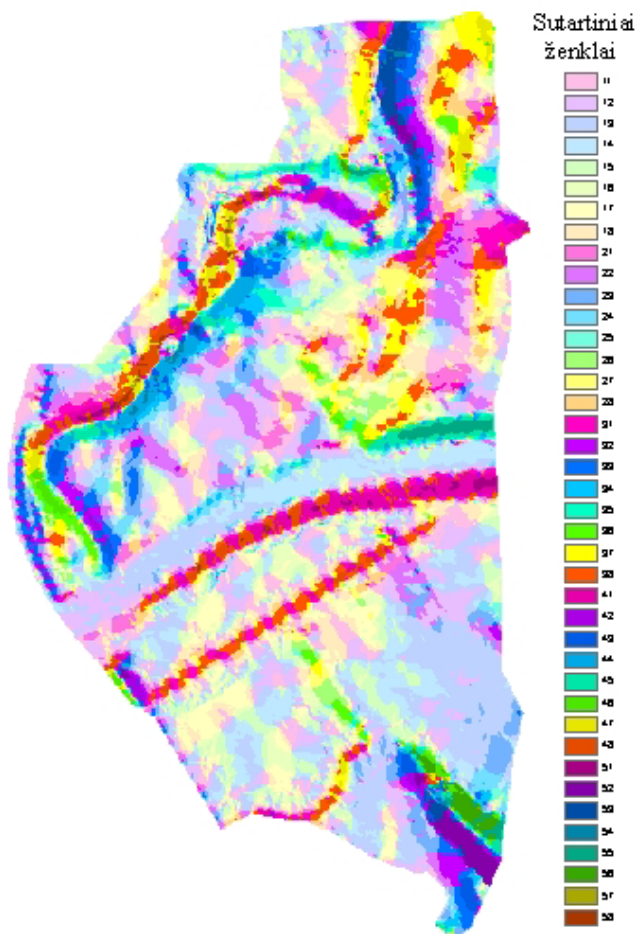
4.6 pav. Paviršiaus nuolydžių kryptių žemėlapis

Šlaitų krypčių ir nuolydžių sluoksnių erdvinės sankirtos radimas

Šlaitų krypčių ir nuolydžių erdvinė sankirta sujungia savyje šlaitų krypčių ir nuolydžių informaciją (4.7 pav. ir 4.8 pav.) bei yra naudojama santykiniam reljefo kintamumui rasti.



4.7 pav. Šlaitų krypčių ir nuolydžių erdvinės sankirtos pavyzdys



4.8 pav. Šlaitų krypčių ir nuolydžių erdvinės sankirtos žemėlapis

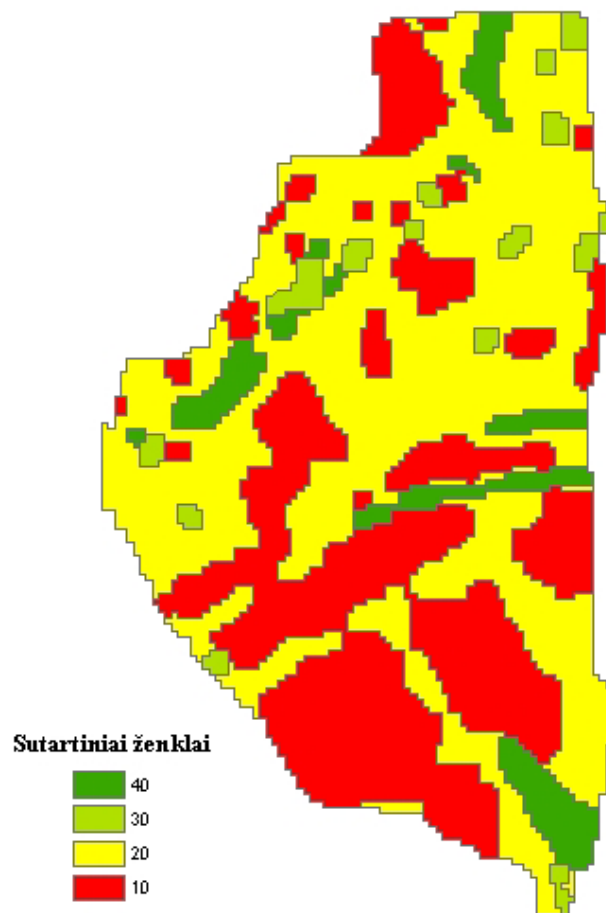
Reljefo kintamumo žemėlapis sudarymas

Santykinio kintamumo žemėlapis atspindi horizontalių ir vertikalų paviršiaus pokyčių įvairovę (Evans, 1980). Naudojant šlaitų kryptių ir nuolydžių erdvinės sankirtos žemėlapi (4.8 pav.) skaičiuojamas santykinis reljefo kintamumas, kuris parodo skirtingų aukščių reikšmių pasirinktoje teritorijoje santykį su suminiu skirtingų aukščių reikšmių skaičiumi (Turner, 1989).

$$R = \frac{n}{k} \times 100, \quad (4.3)$$

čia R – santykinis reljefo kintamumas; n – analizei naudojamų ląstelių skaičius; k – paviršiaus modelyje esančių skirtingų paviršiaus aukščių reikšmių skaičius.

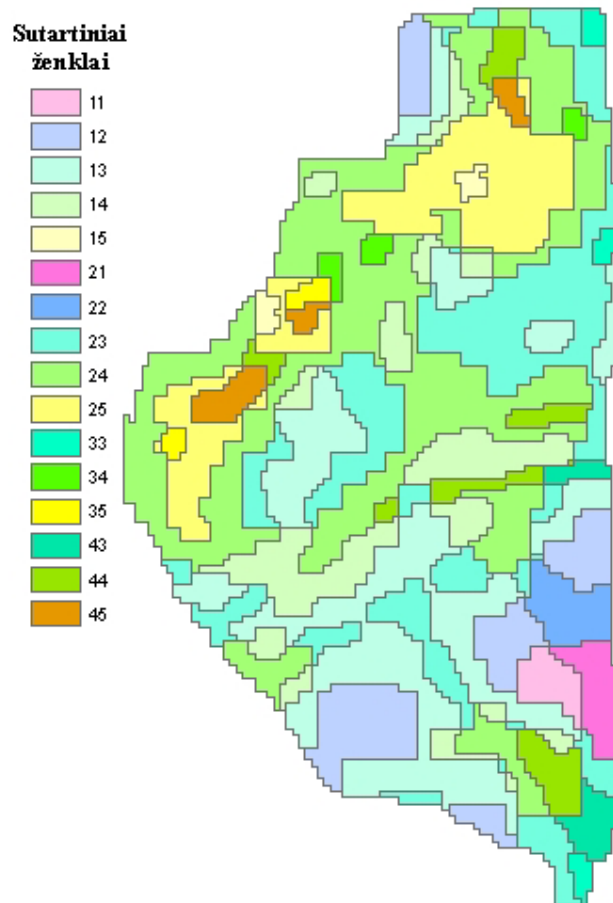
Analizei panaudotų ląstelių skaičius $n = 7 \times 7$. Reljefo kintamumas suskirstomas į kategorijas. Suskirstius šlaitų ir nuolydžių erdvinės sankirtos sluoksnį į kategorijas, gauti fragmentiškai išsibarsčius duomenys, netinkami reljefo modelio tikslumo analizei. Duomenų fragmentiškumui pašalinti klasifikuotas sankirtos sluoksnis buvo generalizuojamas, pašalinant mažus regionus ir supaprastinant likusiųjų ribas (4.9 pav.).



4.9 pav. Generalizuotas reljefo kintamumo žemėlapis

Reljefo raižytumo skaičiavimas iš erdvinės reljefo kintamumo ir nuolydžių sankirtos

Reljefo kintamumas parodo paviršiaus reikšmių įvairovę, tačiau neatspindi šio paviršiaus aukščių pokyčių intensyvumo. Ši parametrai galima matyti paviršiaus raižytumo žemėlapyje, kuris gaunamas sujungiant reljefo raižytumo ir nuolydžių erdvinius sluoksnius (4.10 pav.). Reljefo raižytumo žemėlapyje atsispindi informacija apie reljefo nuolydžio krypties ir kampo kitimą, šlaitų nuolydžius.



4.10 pav. Reljefo raižytumo žemėlapis

Analizuojant šią informaciją, reljefo modelis suskaidomas į homogeniškas reljefo raižytumo zonas, turinčias panašias geomorfologines savybes (4.3 pav.). Tuos pačius modeliavimo parametrus galima panaudoti tik vienodomis geomorfologinėmis savybėmis pasižyminčioje reljefo teritorijoje, nes keičiantis reljefui reikia keisti ir reljefo modeliavimo parametrus.

Skaitmeninis reljefo modelis pagal raižytumą buvo suskirstytas į atskiras klases (4.2 lentelė). Darbo autorė skirstymą į zonas atliko skaičiuodama pagrindines reljefo charakteristikas – nuolydžius ir šlaitų kryptis. Siekiant supaprastinti ir apibendrinti pagrindinių reljefo charakteristikų

Skaitmeninio reljefo modeliavimo daugiaparametrinis vertinimas, atsižvelgiant į paviršiaus geomorfologines savybes nustatymo rezultatus, paviršiaus reikšmės sugrupuotos į kelis intervalus, kuriems suteiktas sąlyginis aukščių reikšmės kodas – vienaženklis skaičius (4.2 lentelė).

4.2 lentelė. Reljefo nuolydžio bei kintamumo klasifikavimas

Šlaito nuolydžio kodas	Šlaito nuolydžio kampas	Reljefo kintamumo kodas	Reljefo kintamumas (skirtingų reikšmių skaičius, kai $n = 7 \times 7$)
1	$0^\circ \div 2^\circ$	1	1 – 5
2	$2^\circ \div 8^\circ$	2	5 – 10
3	$8^\circ \div 16^\circ$	3	10 – 15
4	$16^\circ \div 60^\circ$	4	15 – 20
		5	20 – 25
		6	25 – 30

Kitos charakteristikos rastos, atliekant pagrindinių reljefo charakteristikų erdvinę sankirtą. Šis skirstymas buvo atliktas, naudojant *ESRI ArcGIS* programos modulį *Spatial Analyst*. Erdvinės sankirtos rezultatai taip pat sugrupuoti į kelias klases ir pažymėti dviženkliais skaičiais. Pirmasis skaitmuo $1 \div 4$ parodo šlaitų nuolydį, antrasis $1 \div 6$ – reljefo kintamumą.

4.3. Modeliavimo metodų parametrinių funkcijų įtakos reljefo modelio tikslumui tyrimas

Reljefo modeliavimo metodus pagal parametrų įtaką galima suskirstyti į dvi grupes: metodai, skaičiavimams naudojantys variogramas, ir svoriniai metodai. Skirtingi metodai remiasi nevienodais taško aukščio svorio nustatymo principais. Svoris gali priklausyti nuo atstumo iki skaičiuojamo taško, taip pat nuo skaičiavimams naudojamų gretimų taškų skaičiaus. Svorio reikšmės įtaka sudaromo reljefo modelio tikslumui priklauso nuo paviršiaus modeliavimo metodo (Johnston, Ver Hoef ir kt., 2001).

4.3.1. Variogramos tipo įtaka reljefo modelio tikslumui

Skaitmeninis reljefo modelis sudarytas, naudojant *ArcGIS* programų paketą su priedais *3D Analyst*, *Spatial Analyst* ir *Geostatistical Analyst*. Reljefo modeliavimui panaudotos geostatistinės paviršiaus modeliavimo priemonės, rankiniu būdu parenkant modeliavimo parametrus. Keičiant parametrų reikšmes ištirta atskirų parametrų įtaka reljefo modelių tikslumui.

Modeliuojant reljefą kriginio metodu, skaičiavimams naudojami įvairūs variogramų tipai, nurodyti 4.3 lentelėje. Norint panaudoti variogramų funkcijas, reikia nurodyti būtinas procedūras – gretimų taškų skaičių ir ląstelės matmenis. Priklausomai nuo kuriamo modelio sudėtingumo galima nurodyti papildomas procedūras (trendo, slenksčio, inertiškumo ir anizotropijos), aprašytas 4.3 lentelėje (Johnston, Ver Hoef ir kt., 2001).

4.3 lentelė. Krigingo metode naudojamos procedūros

Procedūros	Krigingo modeliavimo metodas									
	Apskritiminė	Sferinė	Tetrasferinė	Pentafertinė	EkspONENTINĖ 1	Gauso	Kvadrato	Slenksčio efekto	K.Beselio	EkspONENTINĖ 2
Papildomos procedūros	Trendo									
	Slenksčio									
	Inertiškumo									
	Anizotropijos									
	Sektorių skaičiaus									
Būtinios procedūros	Gretimų taškų skaičiaus									
	Ląstelės matmenų									

Darbe naudotos procedūros:

trendo procedūra – apibendrintų reljefo pokyčių tendencijų nagrinėjamos teritorijoms nustatymas;

anizotropijos procedūra – reljefo pokyčių skirtingomis kryptimis nevienodumo įvertinimas;

sektorių skaičiaus procedūra – apskritimu apibrėžtos teritorijos skaidymas į dalis.

Variogramų algoritmai turi žemiau parodytas išraiškas (Johnston, Ver Hoef ir kt., 2001).

Apskritiminė variograma:

$$\gamma(d; \theta) = \begin{cases} \frac{2\theta_s}{\pi} \left[\frac{\|d\|}{\theta_r} \sqrt{1 - \left(\frac{\|d\|}{\theta_r}\right)^2} + \arcsin \frac{\|d\|}{\theta_r} \right] & \text{kai } 0 \leq \|d\| \leq \theta_r \\ \theta_s & \text{kai } \theta_r < \|d\| \end{cases}, \quad (4.4)$$

čia γ – variogramos funkcija; $d = (d_x, d_y)^T$; $\|d\|$ – atstumas tarp taškų; $\theta_s \geq 0$ – dalinis slenkstinis parametras; $\theta_r \geq 0$ – ribos parametras.

Sferinė variograma:

$$\gamma(d; \theta) = \begin{cases} \theta_s \left[\frac{2\|d\|}{3\theta_r} - \frac{1}{2} \left(\frac{\|d\|}{\theta_r}\right)^3 \right] & \text{kai } 0 \leq \|d\| \leq \theta_r \\ \theta_s & \text{kai } \theta_r < \|d\| \end{cases}, \quad (4.5)$$

tetrasferinė variograma:

$$\gamma(d; \theta) = \begin{cases} \frac{2\theta_s}{\pi} \left[\arcsin\left(\frac{\|d\|}{\theta_r}\right) + \frac{\|d\|}{\theta_r} \sqrt{1 - \left(\frac{\|d\|}{\theta_r}\right)^2} + \frac{2}{3} \frac{\|d\|}{\theta_r} \left(1 - \left(\frac{\|d\|}{\theta_r}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}} \right] & \text{kai } 0 \leq \|d\| \leq \theta_r \\ \theta_s & \text{kai } \theta_r < \|d\| \end{cases}, \quad (4.6)$$

pentasferinė variograma:

$$\gamma(d; \theta) = \begin{cases} \theta_s \left[\frac{15}{8} \frac{\|d\|}{\theta_r} - \frac{1}{2} \left(\frac{\|d\|}{\theta_r}\right)^2 \right] & \text{kai } 0 \leq \|d\| \leq \theta_r \\ \theta_s & \text{kai } \theta_r < \|d\| \end{cases}, \quad (4.7)$$

eksponentinė variograma 1:

$$\gamma(d; \theta) = \theta_s \left[1 - \exp\left(-\frac{3\|d\|}{\theta_r}\right) \right] \quad \text{visiems } d, \quad (4.8)$$

Gauso variograma:

$$\gamma(d; \theta) = \theta_s \left[1 - \exp\left(-3 \left(\frac{\|d\|}{\theta_r}\right)^2\right) \right] \quad \text{visiems } d. \quad (4.9)$$

Kadangi šis modelis yra nepastovaus būvio be sankaupos (*nugget*), automatiškai *Geostatistical Analyst* prideda mažą sankaupą modelyje, lygų 1/1000 iš parinktų apdorotų duomenų variantų.

Kvadratinė variograma:

$$\gamma(d; \theta) = \theta_s \frac{19 \left(\frac{\|d\|}{\theta_r}\right)^2}{1 + 19 \left(\frac{\|d\|}{\theta_r}\right)^2} \quad \text{visiems } d. \quad (4.10)$$

K. Besselio variograma:

$$\gamma(d; \theta) = \theta_s \left[1 - \frac{(\Omega_{\theta_k} \|d\| / \theta_r)^{\theta_k}}{2^{\theta_k-1} \Gamma(\theta_r)} K_{\theta_k} (\Omega_{\theta_k} \|d\| / \theta_r) \right] \quad \text{visiems } d, \quad (4.11)$$

čia $\theta_s \geq 0$, $\theta_r \geq 0$, $\theta_k \geq 0$, Ω_{θ_k} – skaitinė reikšmė, kai $\gamma(\theta_r) = 0,95\theta_s$ visiems θ_k , $\Gamma(\theta_k)$ – gama funkcija, $\Gamma(y) = \int_0^\infty x^{y-1} \exp(-x) dx$ ir $K_{\theta_k} (\Omega_{\theta_k} \|d\| / \theta_r)$ – modifikuota Besselio antrosios eilės funkcija θ_k .

slenksčio efekto variograma:

$$\gamma(d; \theta) = \begin{cases} \theta_s & \text{kai } d = 0 \\ \theta_s \frac{1 - \sin(2\pi \|d\| / \theta_r)}{\sin(2\pi \|d\| / \theta_r)} & \text{kai } d \neq 0 \end{cases} \quad (4.12)$$

eksponentinė variograma 2:

$$\gamma(d; \theta) = \theta_s \left[1 - \exp \left(-3 \left(\frac{\|d\|}{\theta_r} \right)^{\theta_e} \right) \right] \quad \text{visiems } d, \quad (4.13)$$

čia $\theta_s \geq 0$ ir $0 \leq \theta_e \leq 2$. Kadangi šis modelis yra nestabilus be sankaupos (*nugget*), tai galima automatiškai su *Geostatistical Analyst* pridėti mažą klaidą (reikšmę), lygią 1/1000 iš parinktų apdorotų duomenų variantų.

Skaitmeniniam reljefo modeliui sudaryti ir jo tikslumui įvertinti buvo naudota geomorfologiškai ištirta Šeškinės Ozo teritorija. Stereofotogrametriškai išmatuoti taškai padalinti į dvi dalis, atsižvelgiant į jų geografinę padėtį. Kiekvienai grupei skirta po 2844 taškus. Kiekviena šių dalis tolygiai dengė visą nagrinėjamą teritoriją, vidutinis atstumas tarp taškų – 7,7 m. Taškai išdėstyti taip, kad atspindėtų charakteringas reljefo vietas. Pirmoji dalis buvo panaudota skaitmeniniam reljefo modeliui sudaryti, antroji – šio modelio tikslumui įvertinti.

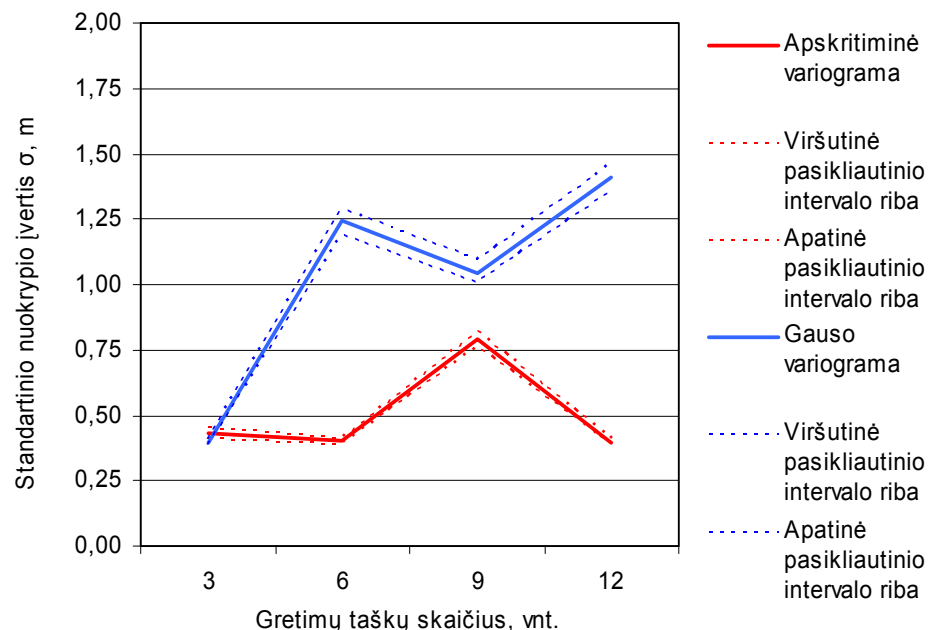
Pradiniam tyrimo etapui, t. y. reljefo modeliui sudaryti, pasirinktas paprastojo kriginio metodas, kaip vienas tiksliausių ir dažniausiai naudojamų metodų reljefo modeliui sudaryti (Skidmore, 1989). Skaitmeniniam reljefo modeliui sudaryti buvo pasirinktos apskritiminė ir Gauso variogramos (Jones, 1997). Apžvelgus taškų išsidėstymą ir geomorfologines reljefo charakteristikas nagrinėjamoje teritorijoje, buvo nutarta skaičiavimams naudoti vieno sektoriaus apskritimą,

nenurodant spindulio parametro, nes taškų išsidėstymas pakankamai tankus. Kadangi spindulys apibrėžia teritoriją, kurioje esantys taškų aukščiai naudojami skaičiavimui, o skaičiavimams naudojamų gretimų taškų skaičius yra didelis, nėra prasmės užsibrėžti teritorijos, atibojančios nuo skaičiavimams nenaudotinų taškų. Skaičiavimai su pirmosios dalies duomenimis atlikti naudojant 3, 6, 9 ir 12 gretimų taškų. Sudaryto reljefo modelio tikslumas įvertintas, naudojant antrąjį paviršiaus taškų masę ir skaičiuojant reljefo modelio taškų aukščių reikšmių standartinių nuokrypių įverčius σ pagal antrajame masėje esančių taškų aukščių reikšmes (4.4 lentelė).

4.4 lentelė. Paprastojo kriginio su skirtingomis variogramomis tikslumo palyginimas

Gretimų taškų skaičius	Apskritiminė variograma			Gauso variograma		
	Standartinio nuokrypio įvertis σ , m	Pasikliautinis intervalas, m ($q = 0,05$)		Standartinio nuokrypio įvertis σ , m	Pasikliautinis intervalas, m ($q = 0,05$)	
		nuo	iki		nuo	iki
3	0,43	0,41	0,45	0,40	0,39	0,41
6	0,40	0,39	0,41	1,24	1,19	1,29
9	0,79	0,76	0,82	1,05	1,01	1,09
12	0,40	0,39	0,41	1,41	1,36	1,46

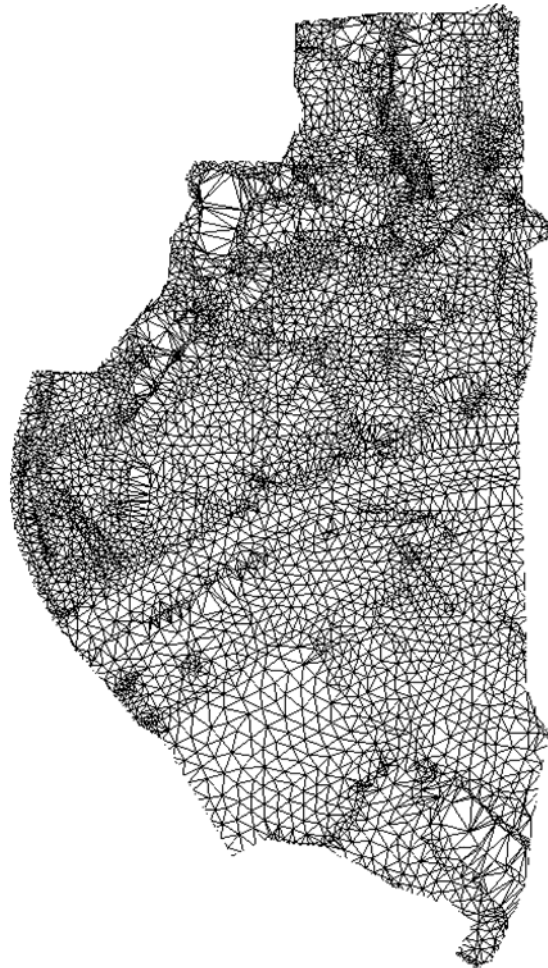
Gauti skaičiavimo rezultatai parodė, kad reljefo modelio tikslumo kitimas, atsižvelgiant į modeliavimui panaudotų gretimų taškų skaičių, yra nevienodas (4.11 pav.) esant skirtingoms variogramoms. Mažesnė SRM tikslumo priklausomybė nuo taškų skaičiaus gauta, taikant apskritiminę variogramą.



4.11 pav. Reljefo modelio paklaidų priklausomybė nuo panaudotų gretimų taškų skaičiaus

Detaliau išanalizavus antrojo masyvo taškų išsidėstymą gautų reljefo modelių atžvilgiu, nutarta sudaryti nereguliarųjį trikampių tinklą, panaudojant visus išmatuotus taškus (4.12 pav.). Nereguliarusis trikampių tinklas sudarytas, naudojant *ArcGIS* modulį *3D Analyst* (ESRI, 1992).

Nereguliarusis trikampių tinklas tolygiai padengė visą modeliuojamą paviršių, todėl skaitmeninio reljefo modelio tikslumo tyrimo rezultatai leido įvertinti kriginio metodu, naudojant variogramas, sudarytus reljefo modelius. Kadangi palyginti galima tik vienodo tipo reljefo modelius, nereguliarusis trikampių tinklas konvertuotas į stačiakampį tinklinį modelį (4.13 pav.).



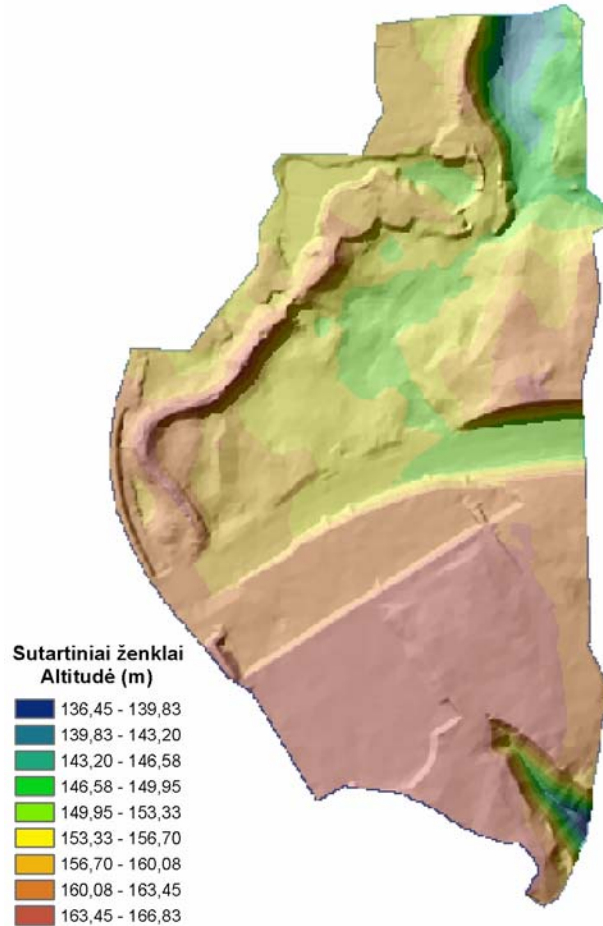
4.12 pav. Taškų aukščių sujungimas į nereguliarųjį trikampių tinklą

Skaitmeniniai reljefo modeliai sudaryti paprastojo kriginio metodu, naudojant variogramų tipus ir įvairių gretimų intropoliavimo taškų skaičių (3, 6, 9, 12). Skaičiavimams naudota teritorija apibrėžta apskritimu, kurio spindulys lygus atstumui iki tolimiausio interpoliavimo taško.

Skaitmeninių reljefo modelių tikslumo analizė atlikta, skaičiuojant standartinio nuokrypio įvertį σ pagal formulę:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (H_i - \bar{H})^2} = \sqrt{\frac{(H_1 - \bar{H})^2 + (H_2 - \bar{H})^2 + \dots + (H_n - \bar{H})^2}{n-1}}, \quad (4.14)$$

čia n – taškų aukščių skaičius; H_i – pagal atitinkamos variogramos tipą išmatuotas taško aukštis; $\bar{H}$ – stereofotogrametriškai išmatuotas taško aukštis.



4.13 pav. SRM, sudaryto kriginio metodu, grafinis vaizdas

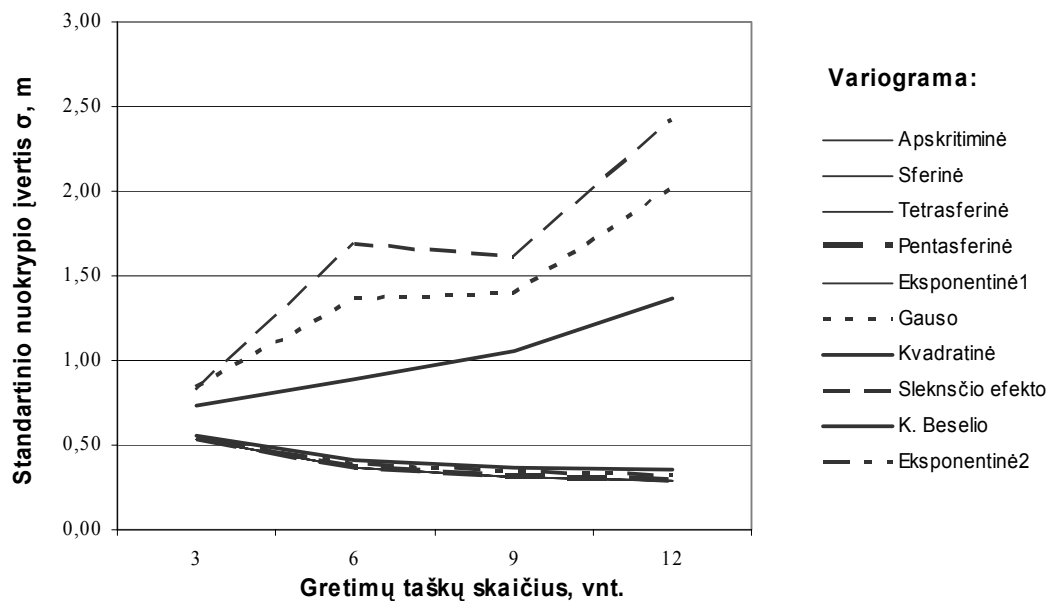
Skaitmeninio reljefo modelio konstravimo, naudojant variogramas, tyrimas parodė, kad geriausi rezultatai gaunami, naudojant apkritiminę, sferinę, tetrasferinę, pentasferinę, eksponentinę 1, eksponentinę 2 ir K. Beselio variogramas (4.5 lentelė). Sudarant reljefo modelius su skirtingu gretimų taškų skaičiumi, geriausi rezultatai gauti, imant 12 skaičiavimuose naudojamų gretimų taškų. Tačiau imant daugiau gretimų taškų, ilgėja skaičiavimo trukmė, o rezultatai nėra tikslesni ir yra taškų aukščių matavimo tikslumo ribose. Todėl optimaliam rezultatui gauti sudarant skaitmeninį reljefo modelį, siūloma naudoti 9 gretimus taškus (4.14 pav.).

Tyrimo metu buvo bandoma nustatyti, kaip SRM tikslumas priklauso nuo reljefo modelio sudarymui naudojamo kriginio metodo ir variogramos tipo. Eksperimentas buvo atliktas, naudojant

ESRI ArcGIS programinę įrangą su funkciniais priedais *Spatial Analyst* ir *Geostatistical Analyst*, skirtais paviršiams modeliuoti ir darbui su rastriniais duomenimis. Eksperimento metu pasirinkus paprastojo kriginio metodą su skirtingomis variogramomis, buvo sudaromi reljefo modeliai ir lyginami su stereofotogrametriškai išmatuotais kontrolinių taškų, kurių vidutinė kvadratinė paklaida 0,14 m, aukščiais.

4.5 lentelė. Krigingo metodu su skirtingomis variogramomis gautas SRM tikslumas

Variograma										
Taškų skaičius	Apskri- timinė	Sferinė	Tetra- sferinė	Penta- sferinė	Ekspo- nentinė 1	Ekspo- nentinė 2	Kvad- ratinė	Slenks- čio efekto	K. Beselio	Gauso
Standartinio nuokrypio įvertis σ , m										
3	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,55	0,73	0,82	0,56	0,85
6	0,36	0,37	0,37	0,37	0,37	0,39	0,89	1,69	0,41	1,36
9	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,34	1,05	1,61	0,37	1,40
12	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,32	1,37	2,42	0,36	2,03



4.14 pav. Reljefo modelio paklaidų priklausomybė nuo variogramos tipo ir interpoliavimui naudotų gretimų taškų skaičiaus

Gauti rezultatai palyginti tarpusavyje, siekiant nustatyti variogramos tipo įtaką SRM tikslumui. Iš gautų rezultatų matosi, kad variogramas pagal sudaromo reljefo modelio priklausomybę nuo taškų skaičiaus galima suskirstyti į dvi grupes: variogramas, iš kurių gaunamo

reljefo modelio tikslumas didėja, imant daugiau gretimų taškų, ir variogramos, iš kurių gaunamo reljefo modelio tikslumas, imant daugiau gretimų taškų, ženkliai mažėja, todėl reljefo modelių sudarymui netinka. Pirmajai grupei priklauso apskritiminė, sferinė, tetrasferinė, pentasferinė, eksponentinė 1 ir eksponentinė 2 variogramos. Antrąją grupę sudaro Gauso, kvadratinė ir slenksčio efekto variogramos.

Papildomų procedūrų, naudojamų modeliuojant reljefą kriginio metodu, įvertinimas

Trendas reljefo modeliavime nusako apibendrintus reljefo pokyčius nagrinėjamoje teritorijoje (pavyzdžiui, tolstant nuo jūros, reljefas kinta – aukštėja). Savo tyrime autorė panaudojo trendo pašalinimą – skaičiavimuose naudojo 100% išmatuotų taškų aukščių visoje teritorijoje bei teritoriją padalinant į dvi lygias dalis – skaičiavimams kiekvienoje jų panaudojant 50% išmatuotų taškų. Tyrimas atliktas modeliuojant reljefą kriginio metodu, naudojant apskritiminę variogramą su 9 gretimais taškais. Tyrimas (4.6 lentelė) parodė, kad atliekant visos teritorijos trendo pašalinimą, naudojant visus taškus, sudaryto reljefo modelio tikslumas nepakinta, o trendo pašalinimas, dalinant teritoriją į dvi dalis, duoda tikslesnį rezultatą (naudojant apskritiminę variogramą paklaidos siekia 0,5 m; naudojant Gauso variogramą – 1, 0 m). Tokius rezultatus galima paaiškinti tuo, kad skaičiuojant trendą visai teritorijai, reljefas labiau apibendrinamas. Kadangi nagrinėjama teritorija labai raižyta, todėl teritoriją dalinant į atskiras dalis, stambesnės reljefo formos mažiau generalizuojamos ir gaunamas didesnis tikslumas.

4.6 lentelė. Trendo įtaka SRM tikslumui

Trendas	Apskritiminė variograma			Gauso variograma		
	Standartinio nuokrypio įvertis σ , m	Pasikliautinis intervalas, m ($q = 0,05$)		Standartinio nuokrypio įvertis σ , m	Pasikliautinis intervalas, m ($q = 0,05$)	
		nuo	iki		nuo	iki
Teritoriją padalinant į dvi dalis	0,31	0,30	0,32	1,41	1,36	1,46
Visos teritorijos	0,81	0,78	0,84	2,41	2,32	2,50

Galima daryti išvadą, kad vietovėse, kur yra raižytas arba mišrus reljefo tipas, trendo pašalinimas neduoda didesnio sudaromo modelio tikslumo.

Sektorijų skaičius – apskritimu apibrėžtos teritorijos dalių skaičius, iš kurių interpoliavimui imami taškai. Kai duomenys kinta šiaurės, rytų, pietų arba vakarų kryptimis, centrinio taško reikšmės skaičiavimui naudotini 4 sektoriai, kurių skiriamosios linijos išsidėsčiusios šiaurės rytų, pietryčių, pietvakarių ir šiaurės vakarų kryptimis. Kai duomenys kinta šiaurės rytų, pietryčių,

pietvakarių ar šiaurės vakarų kryptimis, centrinio taško reikšmės skaičiavimui naudotini 4 sektoriai, kurių skiriamosios linijos išsidėsčiusios šiaurės, rytų, pietų ir vakarų kryptimis. Modeliuojamą plotą rekomenduojama skaidyti į sektorius tuomet, kai pradinių duomenų įtaka modeliuojamo taško vertei priklauso nuo duomenų išsidėstymo šio taško atžvilgiu (Johnston, Ver Hoef ir kt., 2001). Kadangi dažniausiai reljefo kitimas nėra vyraujantis kokia nors kryptimi, matuojami reljefo taškai į sektorius neskaidytini.

Norint įvertinti šio parametro įtaką reljefo modelio tikslumui, atlikti tyrimai modeliuojamos teritorijos neskaidant į sektorius ir skaidant į 4 sektorius, kurių skiriamosios linijos išsidėsčiusios šiaurės, rytų, pietų ir vakarų kryptimis. Pastaruoju atveju rezultatai gauti prastesni (4.7 lentelė). Gautus rezultatus galima paaiškinti tuo, kad nagrinėjamos teritorijos reljefo duomenų kitimas nėra vyraujantis kokia nors kryptimi ir yra raižytas.

4.7 lentelė. SRM tikslumo priklausomybė nuo sektorių skaičiaus

Sektoriai	Paprastojo kriginio metodas naudojant 6 gretimus taškus	Apskritiminė variograma		Sferinė variograma		Gauso variograma		Kvadrato variograma	
		σ , m	Pasikliau- tinis intervalas, m ($q = 0,05$)	σ , m	Pasikliau- tinis intervalas, m ($q = 0,05$)	σ , m	Pasikliau- tinis intervalas, m ($q = 0,05$)	σ , m	Pasikliau- tinis intervalas, m ($q = 0,05$)
1		0,36	0,35 ÷ 0,37	0,37	0,36 ÷ 0,38	1,36	1,31 ÷ 1,41	0,89	0,86 ÷ 0,92
4		0,99	0,95 ÷ 1,03	0,97	0,93 ÷ 1,01	1,40	1,35 ÷ 1,45	1,29	0,93 ÷ 1,39

4.3.2. Taškų aukščių svorio reikšmės įtaka reljefo modelio tikslumui

Didelę grupę sudaro paviršiaus modeliavimo metodai, kurių tikslumui svarbus modeliavimui naudojamų paviršiaus taškų aukščių svorių nustatymas (Wood, 1998). Naudojant skirtingus paviršiaus modeliavimo metodus, optimalią svorio reikšmę galima parinkti programiškai, tačiau tyrimų rezultatai parodė, kad taip parinkta svorio reikšmė ne visada yra optimali (Zevenbergen ir Thorne, 1987). Optimali svorio reikšmė analizuota, tiriant reljefo modelius, kurie buvo sudaryti, naudojant skirtingas svorių reikšmes.

Svoriniu metodu tyrimas buvo atliekamas Šeškinės Ozo teritorijoje imant 2844 taškų aukščių masyvą ir naudojant skirtingą gretimų taškų skaičių (3, 6, 9, 12, 15) bei skirtingą laipsnio parametro (2.3) reikšmę ($p = 1 \div 4$) (4.8 lentelė). Stačiakampio tinklinio modelio ląstelių matmenys 2×2 m. Skirtingais parametrais sudarytų modelių tyrimo rezultatai tikrinti, imant 2843 kontrolinius taškų aukščius.

Taško svorio įtakos tyrimas sudaromo reljefo modelio tikslumui parodė, kad ne visuomet programiškai parinktas taško aukščio laipsninis parametras duoda geriausius rezultatus (4.8 lentelė): skaičiavimams naudojant 6 gretimus taškus, reikia imti $p = 2$; skaičiavimams naudojant 9 gretimus taškus $p = 2 \div 3$; 12÷15 taškų – $p = 3$.

4.8 lentelė. Taškų skaičiaus ir svorinės funkcijos laipsnio įtaka SRM tikslumui

Skaičiavimams naudojamų gretimų taškų skaičius, vnt.	$p = 1$	$p = 2$	$p = 3$	$p = 4$	Programiškai parinktas laipsnis (p_{opt})	σ , m
	Standartinio nuokrypio įvertis σ , m					
3	0,64	0,64	0,66	0,69	1,8595	0,63
6	0,63	0,56	0,59	0,63	2,8490	0,58
9	0,71	0,57	0,57	0,62	3,4677	0,59
12	0,80	0,59	0,57	0,61	3,8614	0,60
15	0,89	0,63	0,57	0,61	4,1015	0,61

Sudarant paviršių *reguliarus bei įtempto splain metodais* naudojant nustatomo taško aukščio svorį $\lambda = 0,1$, tikslesnis paviršius gautas įtempto splain metodo atveju (4.9 lentelė).

Įtempto splain metode skaičiavimui naudojama pirmosios eilės paviršiaus išvestinė. Kuo didesnė laipsnio reikšmė, tuo gaunamas mažiau laužytas paviršius.

4.9 lentelė. Tikslumo priklausomybė nuo skaičiavimams naudojamų gretimų taškų skaičiaus

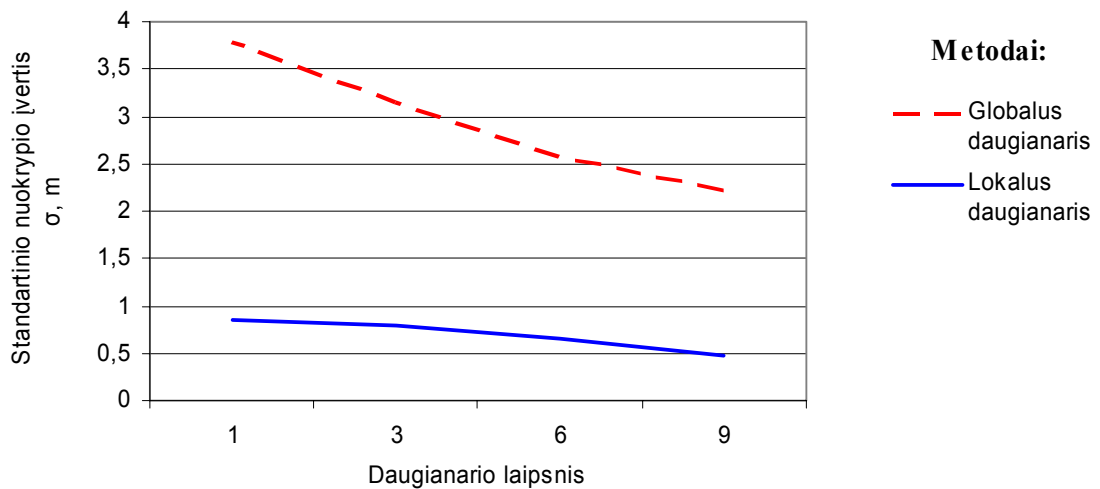
Skaičiavi- mams naudojamų gretimų taškų skaičius, vnt.	Reguliarus splain			Įtemptas splain		
	Standartinio nuokrypio įvertis σ , m, kai $\lambda = 0,1$	Pasikliautinis intervalas, m ($q = 0,05$)		Standartinio nuokrypio įvertis σ , m, kai $\lambda = 0,1$	Pasikliautinis intervalas, m ($q = 0,05$)	
		nuo	iki		nuo	iki
3	0,64	0,62	0,66	0,41	0,39	0,43
6	0,61	0,59	0,63	0,38	0,37	0,39
9	0,64	0,62	0,66	0,38	0,37	0,39
12	0,70	0,67	0,73	0,40	0,39	0,41
15	0,74	0,71	0,77	0,42	0,40	0,42

Vilniaus miesto Šeškinės Ozo teritorijos reljefo modeliai sudaryti taikyti *globalaus ir lokalaus daugianario metodai* (plačiau žr. 2 skyrių). Tyrimui panaudota 5689 taškų aukščiai. Pusė taškų imta skaitmeniniams reljefo modeliams sudaryti, likusi dalis – kontrolei. SRM ląstelių matmenys – 2×2 m. Teritorija, iš kurios buvo imami taškai tyrimui, apibrėžta 35 m spindulio

apskritimu. Kaip matosi iš gautų rezultatų (4.10 lentelė), tos pačios teritorijos reljefo modelio, sudaryto globalaus daugianario metodu, standartinio nuokrypio įvertis yra žymiai didesnis ($2,22 \div 3,79$ m), negu modelį sudarant lokalaus daugianario metodu ($0,48 \div 0,85$ m) (4.15 pav.). Taip yra todėl, kad šiais metodais gautų rezultatų skirtumai labai priklauso nuo reljefo savybių. Globalaus daugianario interpoliavimo algoritmas pritaikytas nedideliems paviršiaus pokyčiams didelėje teritorijoje. Paviršius suglotnindamas, imant bendrą taškų skaičių ir visų taškų aukščių reikšmes, todėl neatsižvelgiama į staigius reljefo pokyčius. Tačiau modeliuojant žemės paviršių, dažnai susiduriama su staigiais nedidelių teritorijų reljefo pokyčiais (Evans, 1990), todėl tokiu atveju reikia paviršių modeliuoti lokalaus daugianario metodu. Kadangi darbo autorė tyrimui pasirinko teritoriją, pasižyminčią staigiais reljefo pokyčiais (Šeškinės Ozo teritorija), todėl taškų aukščius interpoliuojant lokalaus daugianario algoritmu, gauti žymiai geresni rezultatai.

4.10 lentelė. Globalaus ir lokalaus daugianarių metodų tikslumo palyginimas

Daugianario laipsnis	Globali daugianarė interpoliacija			Lokali daugianarė interpoliacija		
	Standartinio nuokrypio įvertis σ , m	Pasikliautinis intervalas, m ($q = 0,05$)		Standartinio nuokrypio įvertis σ , m	Pasikliautinis intervalas, m ($q = 0,05$)	
		nuo	iki		nuo	iki
1	3,79	3,66	3,92	0,85	0,83	0,87
3	3,14	3,02	3,26	0,8	0,77	0,83
6	2,57	2,47	2,66	0,65	0,63	0,67
9	2,22	2,14	2,30	0,48	0,46	0,50



4.15 pav. Globalaus ir lokalaus daugianario paviršių modeliavimo metodų tikslumo palyginimas

Norint išsiaiškinti daugianario laipsnio bei gretimų taškų skaičiaus įtaką sudaromo reljefo modelio tikslumui, buvo sudaryti reljefo modeliai, naudojant pirmojo ir antrojo laipsnio daugianarius (4.11 lentelė).

4.11 lentelė. Gretimų taškų skaičiaus ir daugianario laipsnio įtaka SRM tikslumui, sudarant modelį daugianario metodu

Taškų skaičius \ Daugianario laipsnis	6	9	12	15
	Standartinio nuokrypio įvertis σ , m			
1	0,41	0,44	0,46	0,49
2	–	0,41	0,35	0,34

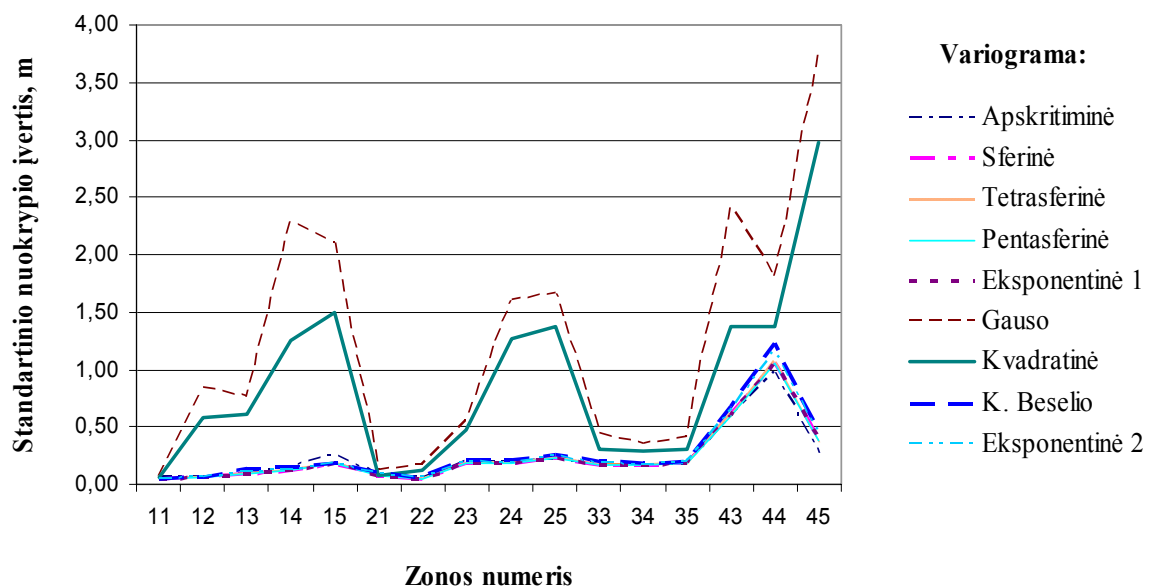
4.4. Modeliavimo parametrų įtakos skirtingiems reljefo tipams tyrimas

Norint įvertinti reljefo modelio paklaidas kiekvienoje zonoje, atliktas tikslumo tyrimas, Šeškinės Ozo teritoriją suskaidant į zonas su skirtingomis geomorfologinėmis charakteristikomis. Kiekvienai zonai apskaičiuoti aukščių skirtumai tarp stačiakampių tinklo modelio TINgrid ir krigingo metodu naudojant 9 gretimus taškus su skirtingomis variogramomis (apskritimine, sferine, tetrasferine, pentasferine, eksponentine 1–2, Gauso, kvadratine ir K. Beselio) sudarytų stačiakampių tinklo modelių.

Kaip matosi iš 4.12 lentelės, pats didžiausias standartinis nuokrypis yra 44 zonoje. 45 zonos standartiniai nuokrypiai yra žymiai mažesni, nors kaip tik šioje zonoje yra didžiausias šlaito nuolydis ir reljefo kintamumas. Tai galima paaiškinti tuo, kad į šias teritorijas pakliuvo labai nedaug taškų (53 taškai) ir gauti rezultatai nėra patikimi. Atlikus rezultatų analizę, matyti, kad standartinių nuokrypių įverčiai priklauso nuo reljefo raižytumo. Kadangi reljefo raižytumo parametras atspindi reljefo nuolydį ir kintamumą, galima daryti išvadą, kad sudaryto modelio tikslumas prastėja, didėjant šlaitų nuolydžiui ir reljefo kintamumui (4.16 pav.). Tiksliausi duomenys gauti 11, 12, 13, 21 ir 22 reljefo zonose. Palyginus modeliavimui naudotas variogramas, galima teigti, kad didelių reljefo pokyčių teritorijose Gauso ir kvadrato variogramos nenaudotinos (14, 15, 24, 25, 35 ÷ 45 zonos).

4.12 lentelė. SRM tikslumas skirtingose reljefo zonose

Variogramos Reljefo zonos	Apskritiminė	Sferinė	Tetra- sferinė	Penta- sferinė	Ekspo- nentinė 1	Gauso	Kvad- ratinė	K.Beselio	Ekspo- nentinė 2
	Standartinio nuokrypio įvertis σ , m								
11	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,06	0,05	0,05
12	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,84	0,59	0,06	0,05
13	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,77	0,61	0,14	0,11
14	0,15	0,12	0,12	0,12	0,12	2,29	1,26	0,15	0,12
15	0,26	0,19	0,19	0,19	0,19	2,11	1,50	0,19	0,18
21	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,12	0,08	0,10	0,09
22	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,17	0,13	0,07	0,06
23	0,20	0,18	0,18	0,18	0,18	0,55	0,48	0,22	0,20
24	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	1,61	1,27	0,21	0,18
25	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	1,66	1,37	0,27	0,25
33	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,45	0,30	0,20	0,18
34	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,34	0,29	0,19	0,17
35	0,17	0,19	0,19	0,19	0,19	0,41	0,30	0,20	0,19
43	0,60	0,59	0,59	0,59	0,59	2,41	1,37	0,67	0,64
44	0,98	1,05	1,05	1,05	1,05	1,81	1,38	1,22	1,15
45	0,27	0,37	0,37	0,37	0,38	3,74	2,98	0,46	0,43

**4.16 pav.** SRM tikslumo skirtingose reljefo zonose išsidėstymas

Norint gauti didesnio tikslumo reljefo modelį, buvo atliktas eksperimentas, kuriuo siekta sudaryti atskirą reljefo modelį vienai reljefo raižytumo zonai. Eksperimentui buvo pasirinkta 44 zona, kadangi reljefo modelio tikslumas šioje teritorijoje gautas pats mažiausias: $\sigma = 0,98 \div 1,81$ m (4.13 lentelė). Šios zonos skaitmeniniam reljefo modeliui sudaryti buvo panaudoti 437 matavimų taškai, įeinantys į pasirinktą zoną bei esantys 24 metrų atstumu aplink ją. Tai padaryta, siekiant išvengti modelio tikslumo sumažėjimo zonos pakraščiuose dėl modeliavimui naudojamo mažesnio taškų skaičiaus. Tiriamoje teritorijoje yra keli plotai, priklausantys 44 zonai. Šie plotai buvo modeliuojami kartu, sudarant bendrą reljefo modelį.

Reljefo modelio kontrolė atlikta, imant modeliavimui nenaudotus stereofotogrametriškai išmatuotus taškų aukščius, esančius zonos ribose. Iš nereguliaraus trikampių tinklo sudarytas bei ankstesniame tyrime naudotas stačiakampių tinklas šios zonos reljefo modelio tikslumo tyrimui nenaudotas, kadangi dėl sudėtingo reljefo kontrolinio modelio tikslumas šioje teritorijoje buvo mažesnis.

4.13 lentelė. Skirtingais metodais sudarytų SRM tikslumas 44 zonoje

Standartinio nuokrypio įvertis σ , m		H_{stereo}^- H^*_{aps9}	H_{stereo}^- $H^*_{\text{aps6_44zona}}$	H_{stereo}^- $H^*_{\text{aps9_44zona}}$	H_{stereo}^- $H^*_{\text{aps12_44zona}}$
Metodas					
Paprastasis krigingas		0,64	0,66	0,68	0,68
Universalus krigingas		0,64	0,66	0,69	0,68
Standartinio nuokrypio įvertis σ , m		H_{stereo}^- H^*_9	H_{stereo}^- $H^*_{6_44zona}$	H_{stereo}^- $H^*_{9_44zona}$	H_{stereo}^- $H^*_{12_44zona}$
Metodas					
Reguliarus splain	$p = 0,1$; ląstelės matmenys = 2×2 m	0,64	0,68	0,69	0,71
Įtemptas splain		0,64	0,56	0,56	0,58
Svorinis	$p = 2$	0,64	0,99	0,99	0,99
	$p = 3$	0,64	0,73	0,73	0,73
	$p = 4$	0,64	0,63	0,63	0,63
	$p = 5$	0,64	0,60	0,60	0,60
	$p = 6$	0,64	0,61	0,61	0,61

* – eilutėje nurodytu metodu gauta taško aukščio reikšmė

Tyrimu tikrinta, ar galima skirtingais metodais modeliuojant pasirinktą zoną, pasiekti didesnę tikslumą negu duoda tiksliausias iš tirtų metodų (paprastojo krigingo metodas, naudojant apskritiminę variogramą su 9 gretimais taškais). Naudojant paprastojo ir universalus krigingo, reguliaraus ir įtempto splain bei svorinį metodus buvo sudaryti reljefo modeliai, naudojant 44 zonos taškus (4.13 lentelė). Gauti rezultatai parodė, kad visos teritorijos reljefo modelis tikslumu

nenusileidžia 44 zonai sudarytiems reljefo modeliams. Galima daryti išvadą, kad modeliuoti vieną zoną neefektyvu. Ištyrus 44 zonos reljefą, padaryta išvada, kad kiekvienam šios zonos plotui reikia sudaryti atskirą reljefo modelį. Šiai hipotezei pagrįsti buvo atliktas papildomas tyrimas.

Atskirai sudaryti du reljefo modeliai skirtingiems 44 zonos plotams. Atliktas šių plotų reljefo modelių tikslumo tyrimas. Naudojant stereofotogrametriškai išmatuotus taškus, įvertintas šių plotų reljefo modelių tikslumas.

Gautas standartinio nuokrypio įvertis palygintas su visos teritorijos reljefo modelio standartinio nuokrypio įverčiu šiuose plotuose. Rezultatai parodė, kad visai teritorijai ir atskiriems plotams sudaryti reljefo modeliai savo tikslumu vienas nuo kito beveik nesiskiria. Norint pasiekti didesnę tikslumą atskiruose plotuose, būtina atsižvelgti į paviršiaus kitimo dėsningumus šiose teritorijose. Sudarant atskirų plotų reljefo modelius panaudojamas anizotropijos parametras (įvertinamas reljefo pokyčių skirtingomis kryptimis nevienodumas). Tuomet gaunamas reljefo modelio tikslumas, kuris yra artimas pradinių duomenų tikslumui. Pirmajame plote (tyrimui naudoti 87 taškų aukščiai), kur reljefo struktūra yra paprastesnė, standartinio nuokrypio įverčio reikšmė sumažėja 5 cm. Antrajame plote (tyrimui naudoti 72 taškų aukščiai), kur dėl sudėtingos reljefo struktūros standartinio nuokrypio įvertis buvo didžiausias visoje modeliuojamoje teritorijoje ($\sigma = 0,85$ m), naudojant anizotropijos procedūrą reljefo modelį pavyko patikslinti daugiau kaip 2 kartus ($\sigma = 0,34$ m). Gauti rezultatai (4.14 lentelė) patvirtina pasiūlyto metodo, skirto reljefo skirstymui į zonas, efektyvumą.

4.14 lentelė. SRM tikslumas atskiruose 44 zonos plotuose

Tirtas plotas	Metodas	Standartinio nuokrypio įvertis σ , m	
		nenaudojant anizotropijos parametro	naudojant anizotropijos parametą
I	Paprastasis krigingas, naudojant apskritiminę variogramą ir 9 gretimų taškus*	0,33	0,33
	Paprastasis krigingas, naudojant apskritiminę variogramą ir 9 gretimų taškus	0,34	0,29
	Paprastasis krigingas naudojant sferinę variogramą ir 9 gretimų taškus	0,34	0,29
II	Paprastasis krigingas, naudojant apskritiminę variogramą ir 9 gretimų taškus*	0,90	0,89
	Paprastasis krigingas, naudojant apskritiminę variogramą ir 9 gretimų taškus	0,85	0,34
	Paprastasis krigingas, naudojant sferinę variogramą ir 9 gretimų taškus	0,85	0,34

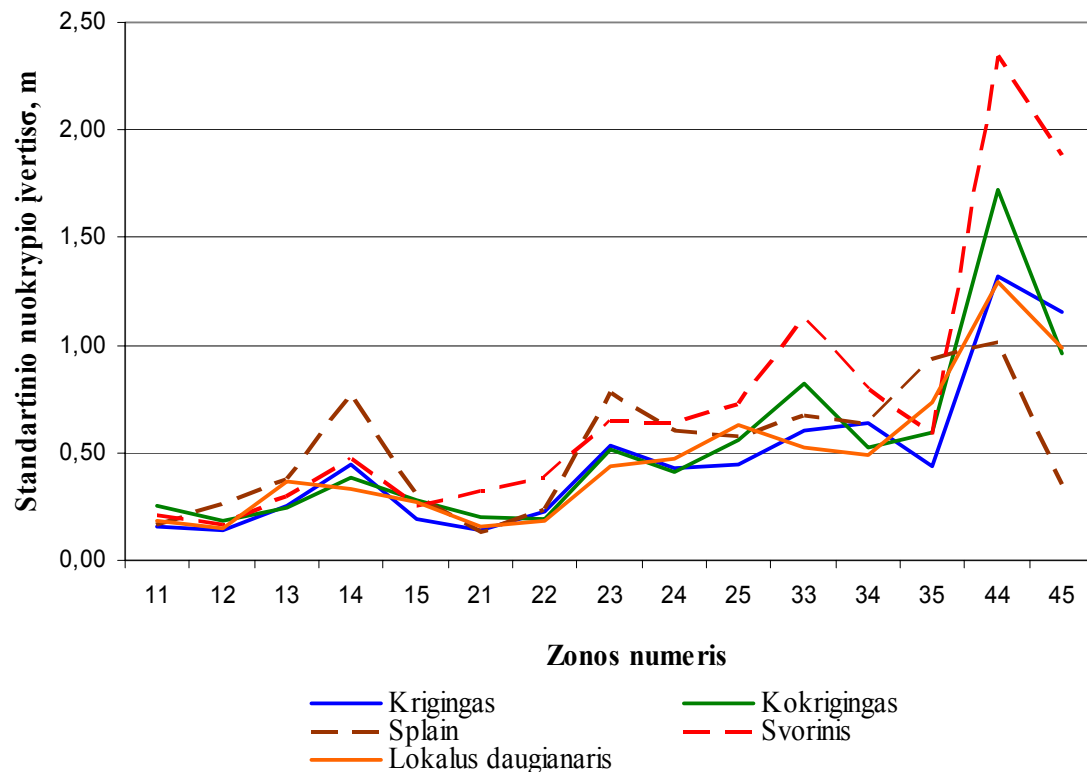
* – tikslumo palyginimui sudarytas visos teritorijos reljefo modelis

Norint išsiaiškinti, ar naudojant skirtingus paviršiaus modeliavimo metodus pavienių zonų reljefo modeliams sudaryti galima pasiekti didesnę tikslumą negu tais pačiais metodais modeliuojant visą teritoriją, buvo atliktas kiekvienos zonoje atskirai sudaryto reljefo modelio tikslumo tyrimas. Apskaičiuoti standartinių nuokrypių įverčiai palyginti su reljefo modeliais, sudarytais skirtingais paviršiaus modeliavimo metodais iš karto visai teritorijai. Tyrimo rezultatai parodė, kad sudarant reljefo modelį vienai zonai, kai ji susideda iš kelių nesusisiekiančių plotų, gaunamas tikslumas yra mažesnis, negu modeliuojant iš karto visą teritoriją. Norint pasiekti didžiausią tikslumą modeliuojant iš karto visą teritoriją, reikia skirtingais metodais sudaryti šios teritorijos reljefo modelius, teritoriją suskaidyti į zonas pagal reljefo tipą ir kiekvienoje zonoje įvertinti įvairių reljefo modelių tikslumą (4.15 lentelė, 4.17 pav.). Reljefo modelių fragmentai, kuriuose pasiektas didžiausias tikslumas, sujungiami tarpusavyje, taip gaunamas reljefo modelis, kurio tikslumas bus didesnis negu reljefo modelių, sudarytų kuriuo nors vienu reljefo modeliavimo metodu.

4.15 lentelė. SRM standartinių nuokrypių įverčiai zonose

Metodas Zonos Nr.	Taškų skaičius zonoje	Krigingas	Kokrigingas	Splain	Svorinis	Lokalus dauginaris
		σ , m				
11	9	0,16	0,25	0,17	0,21	0,18
12	91	0,14	0,18	0,26	0,17	0,15
13	267	0,26	0,24	0,37	0,30	0,37
14	164	0,44	0,39	0,77	0,47	0,34
15	10	0,19	0,28	0,29	0,25	0,27
21	13	0,14	0,20	0,13	0,32	0,16
22	25	0,22	0,19	0,24	0,38	0,18
23	440	0,53	0,52	0,78	0,65	0,44
24	895	0,43	0,41	0,60	0,64	0,47
25	461	0,45	0,56	0,58	0,73	0,63
33	29	0,60	0,83	0,67	1,13	0,53
34	38	0,64	0,52	0,64	0,79	0,49
35	26	0,43	0,59	0,94	0,59	0,74
43*	12	3,17	1,65	6,10	4,41	1,38
44	63	1,32	1,72	1,02	2,34	1,30
45	53	1,15	0,96	1,35	1,88	0,99

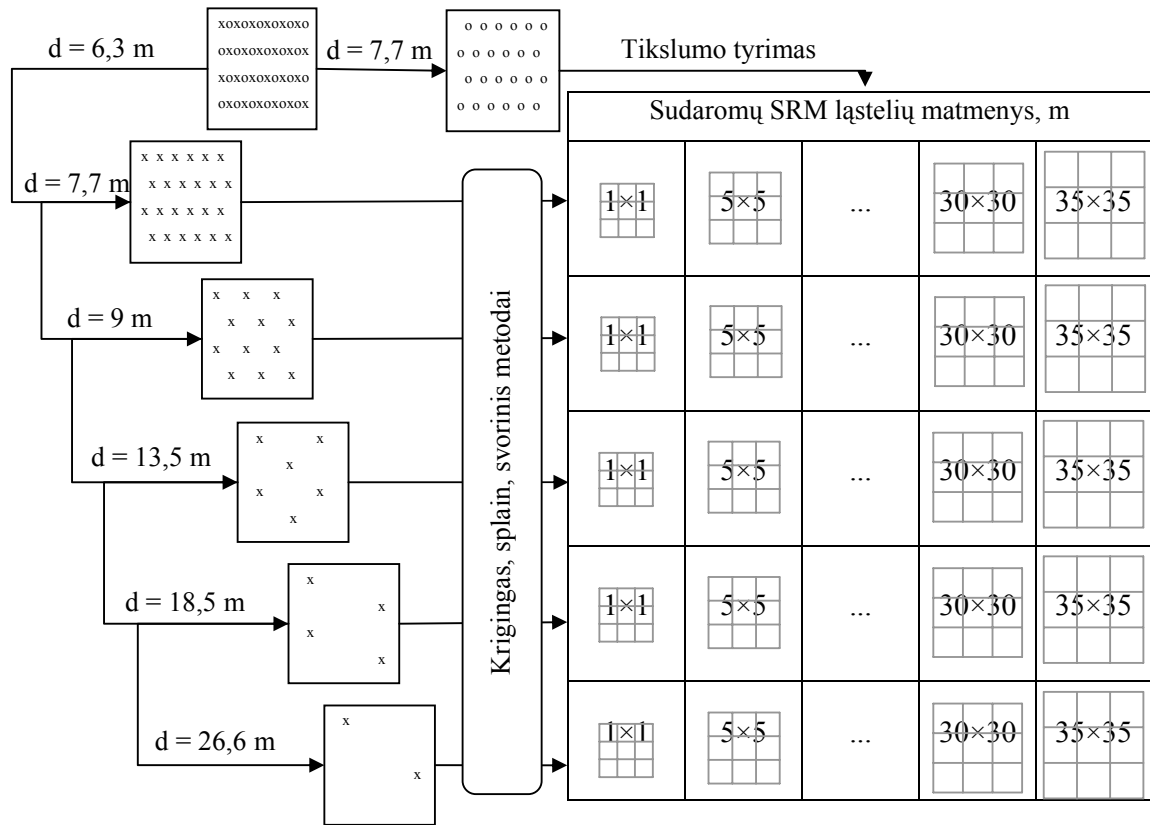
* – dėl grubių paklaidų ši zona grafike nerodoma



4.17 pav. SRM standartinių nuokrypių įverčių zonose grafikas

Modeliuojant reljefą, svarbu parinkti optimalius SRM ląstelės matmenis. Nuo ląstelės matmenų priklauso reljefo modeliavimo ir duomenų apdorojimo greitis. Ląstelės matmenis galima pasirinkti atsižvelgiant į poreikį, kam bus naudojamas reljefo modelis. Norėdama rasti SRM tikslumo priklausomybę nuo ląstelės matmenų ir atstumo tarp pradinių duomenų taškų, darbo autorė atliko tyrimą, kurio metu taškų aibė buvo palaipsniui skaidoma į poaibius, taip didinant atstumus tarp pradinių duomenų taškų. Suskaidyti pradinių duomenų poaibiai buvo naudojami sudarant SRM, pasirinkus skirtingus ląstelių matmenis (4.18 pav.).

Skaitmeninis reljefo modelis buvo sudaromas krigingo, splain ir svoriniu metodu iš taškų, tarp kurių vidutinis atstumas nuo 7,7 m iki 26,6 m, ląstelės matmenys imti nuo 1×1 m iki 35×35 m. Vidutinis atstumas tarp taškų skaičiuotas iš 4845 tyrimui naudotų taškų. Tyrimo metu gautų reljefo modelių tikslumas buvo vertinamas, naudojant fotogrametriškai išmatuotus taškų aukščius. Apskaičiuoti standartinių nuokrypių įverčiai palyginti tarpusavyje.

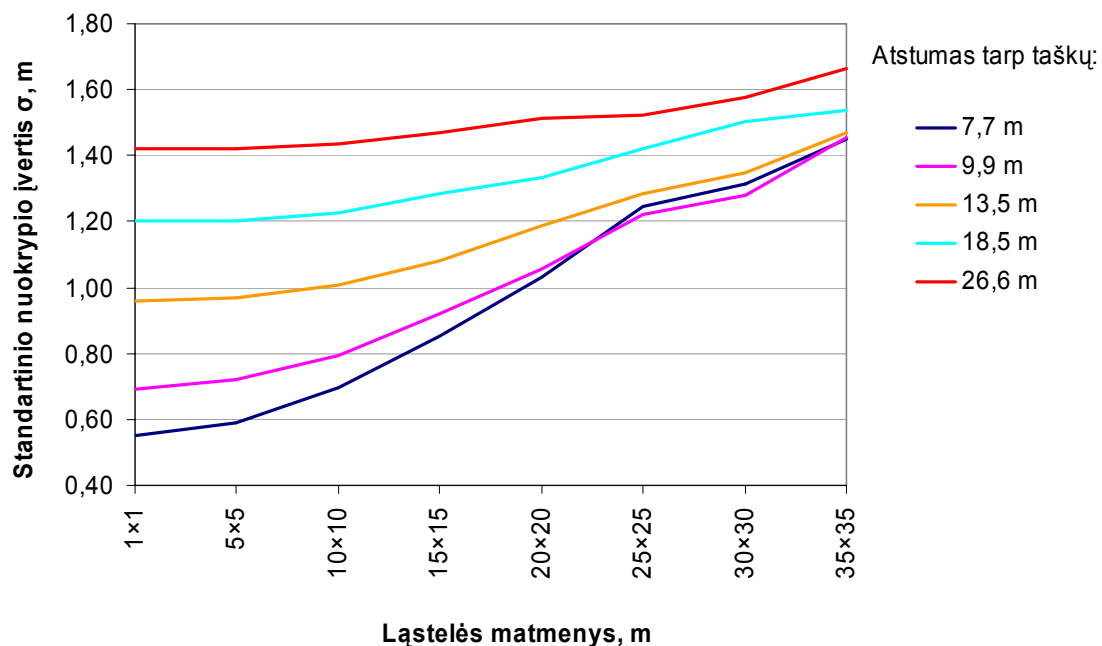


4.18 pav. SRM tikslumo priklausomybės nuo ląstelės matmenų ir atstumo tarp taškų tyrimo schema

Palyginimo rezultatai parodė, kad SRM tikslumas priklauso nuo vidutinio atstumo tarp taškų bei ląstelės matmenų. Iš gautų rezultatų matyti, kad egzistuoja tiesinė priklausomybė tarp atstumo bei ląstelės matmenų santykio ir SRM tikslumo. Tai atsispindi 4.17 ÷ 4.19 paveiksluose.

4.16 lentelė. SRM, sudaryto krigingo metodu, tikslumas

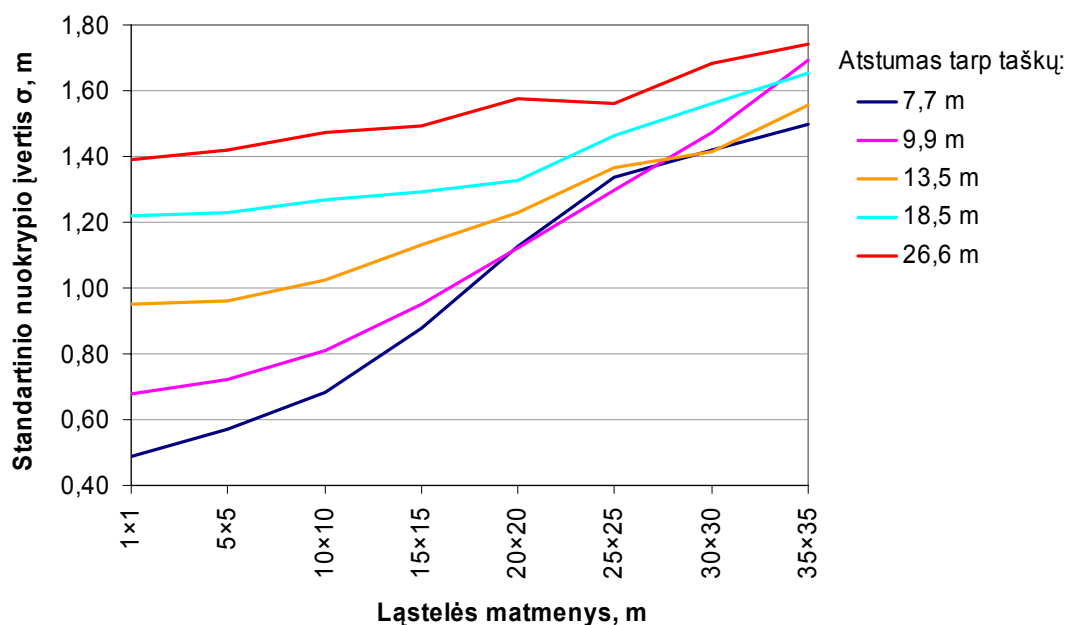
Ląstelės matmenys, m	Vidutinis atstumas tarp taškų				
	7,7 m	9,9 m	13,5 m	18,5 m	26,6 m
	Standartinio nuokrypio įvertis σ , m				
1×1	0,55	0,69	0,96	1,20	1,42
5×5	0,59	0,72	0,97	1,20	1,42
10×10	0,70	0,79	1,01	1,23	1,44
15×15	0,85	0,92	1,08	1,29	1,47
20×20	1,03	1,06	1,19	1,33	1,51
25×25	1,24	1,22	1,29	1,42	1,52
30×30	1,31	1,28	1,35	1,51	1,58
35×35	1,45	1,46	1,47	1,54	1,66



4.19 pav. Modeliavimo parametrų įtaka SRM, sudaryto kriginio metodu, tikslumui

4.17 lentelė. SRM, sudaryto splain metodu, tikslumas

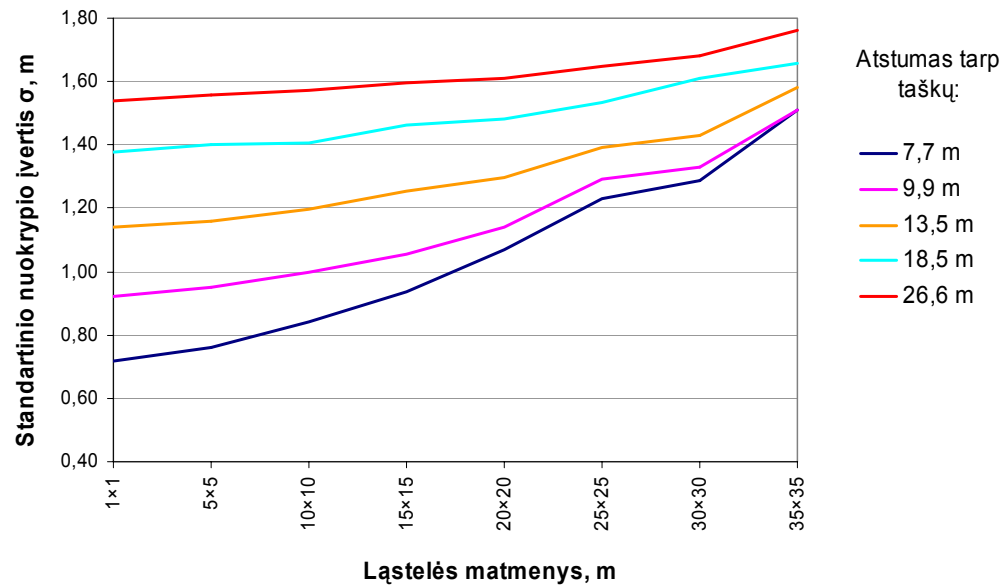
Ląstelės matmenys, m	Vidutinis atstumas tarp taškų				
	7,7 m	9,9 m	13,5 m	18,5 m	26,6 m
	Standartinio nuokrypio įvertis σ , m				
1×1	0,49	0,68	0,95	1,22	1,39
5×5	0,57	0,72	0,96	1,23	1,42
10×10	0,68	0,81	1,03	1,27	1,47
15×15	0,88	0,95	1,13	1,29	1,49
20×20	1,13	1,12	1,23	1,32	1,57
25×25	1,34	1,30	1,37	1,47	1,56
30×30	1,42	1,47	1,42	1,56	1,68
35×35	1,50	1,69	1,56	1,65	1,74



4.20 pav. Modeliavimo parametrų įtaka SRM, sudaryto splain metodu, tikslumui

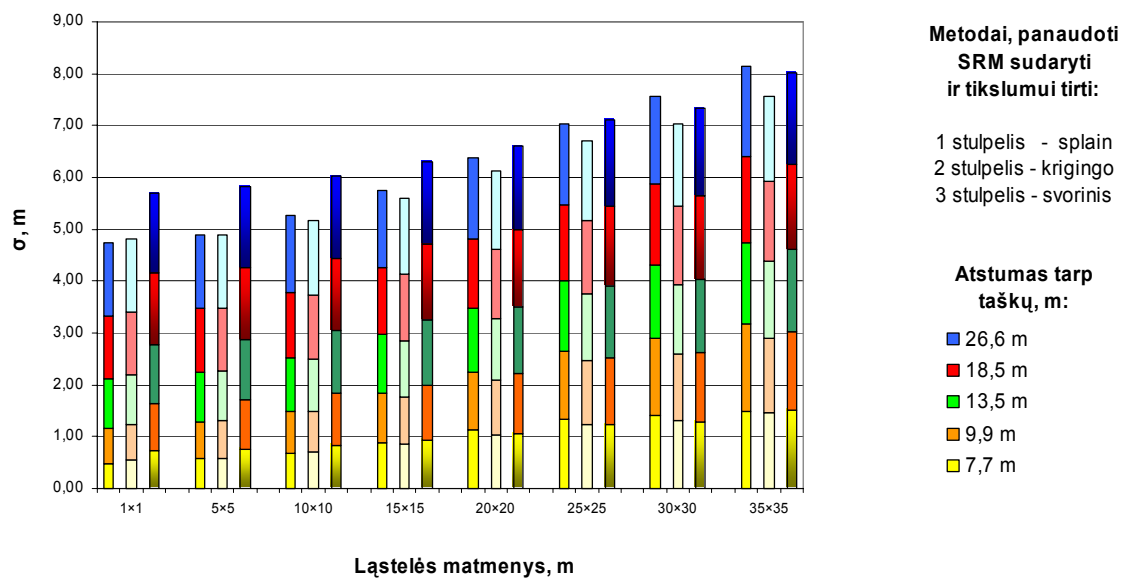
4.18 lentelė. SRM, sudaryto svoriniu metodu, tikslumas

Ląstelės matmenys, m	Vidutinis atstumas tarp taškų				
	7,7 m	9,9 m	13,5 m	18,5 m	26,6 m
	Standartinio nuokrypio įvertis σ , m				
1x1	0,72	0,92	1,14	1,38	1,54
5x5	0,76	0,95	1,16	1,40	1,56
10x10	0,84	1,00	1,20	1,41	1,57
15x15	0,94	1,05	1,26	1,46	1,60
20x20	1,07	1,14	1,30	1,48	1,61
25x25	1,23	1,29	1,39	1,53	1,65
30x30	1,29	1,33	1,43	1,61	1,68
35x35	1,51	1,51	1,58	1,66	1,76



4.21 pav. Modeliavimo parametų įtaka SRM, sudaryto svoriniu metodu, tikslumui

Atliktų tyrimų rezultatai parodė, kad sudaromo reljefo modelio tikslumas tiesiogiai priklauso nuo ląstelių matmenų ir atstumo tarp pradinių duomenų taškų. Šis eksperimentas atliktas pasirinktai Šeškinės Ozo teritorijai, neišskiriant atskirų geomorfologinių zonų.

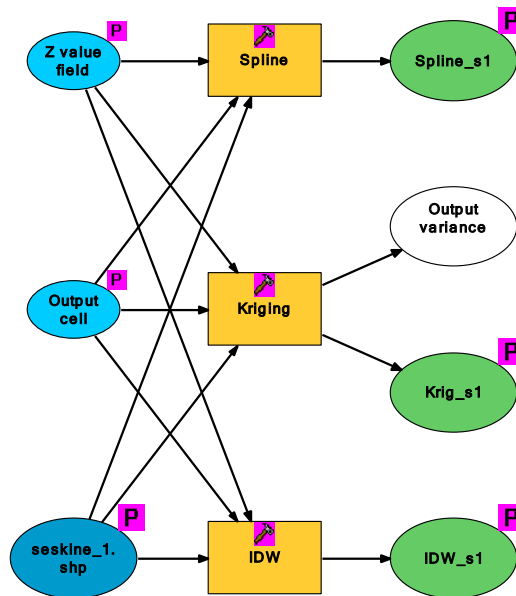


4.22 pav. Modeliavimo parametų įtaka SRM, sudaryto skirtingais metodais, tikslumui

Norėdama atlikti grafinį skirtingais metodais sudarytų SRM palyginimą, darbo autorė sudarė grafiką (4.22 pav.), kuriame į tris stulpelius surikiavo splain, kriginio bei svoriniu metodais gautų SRM standartinių nuokrypių įverčius, kurių reikšmės priklauso nuo atstumo tarp gretimų taškų ir ląstelės matmenų. Kaip matyti iš 4.22 pav., daugumoje stulpelių grupių tiksliausias yra kriginio metodas.

Darbo autorė atliko atskirą tyrimą analizuodama, kaip ląstelės matmenys ir atstumas tarp pradinių taškų įtakoja reljefo modelio tikslumą skirtingose geomorfologinėse zonose. Norint išvengti perteklinės informacijos ir optimizuoti tyrimus, buvo praleista dalis geomorfologinių zonų, kurių charakteristikos labai panašios. Reljefo modelio tikslumo tyrimas atliktas, naudojant charakteringas ląstelių matmenų ir atstumų tarp pradinių duomenų taškų aukščių reikšmes. Taip apdorotų duomenų kiekis sumažintas, neprarandant svarbios informacijos apie reljefo modelio tikslumo priklausomybę nuo ląstelės matmenų ir atstumo tarp taškų.

Naudojant *ESRI ArcGIS* programinę įrangą, sukuriama duomenų apdorojimo procedūra, skirta automatizuotam SRM sudaryti ir analizuoti (4.23 pav.).



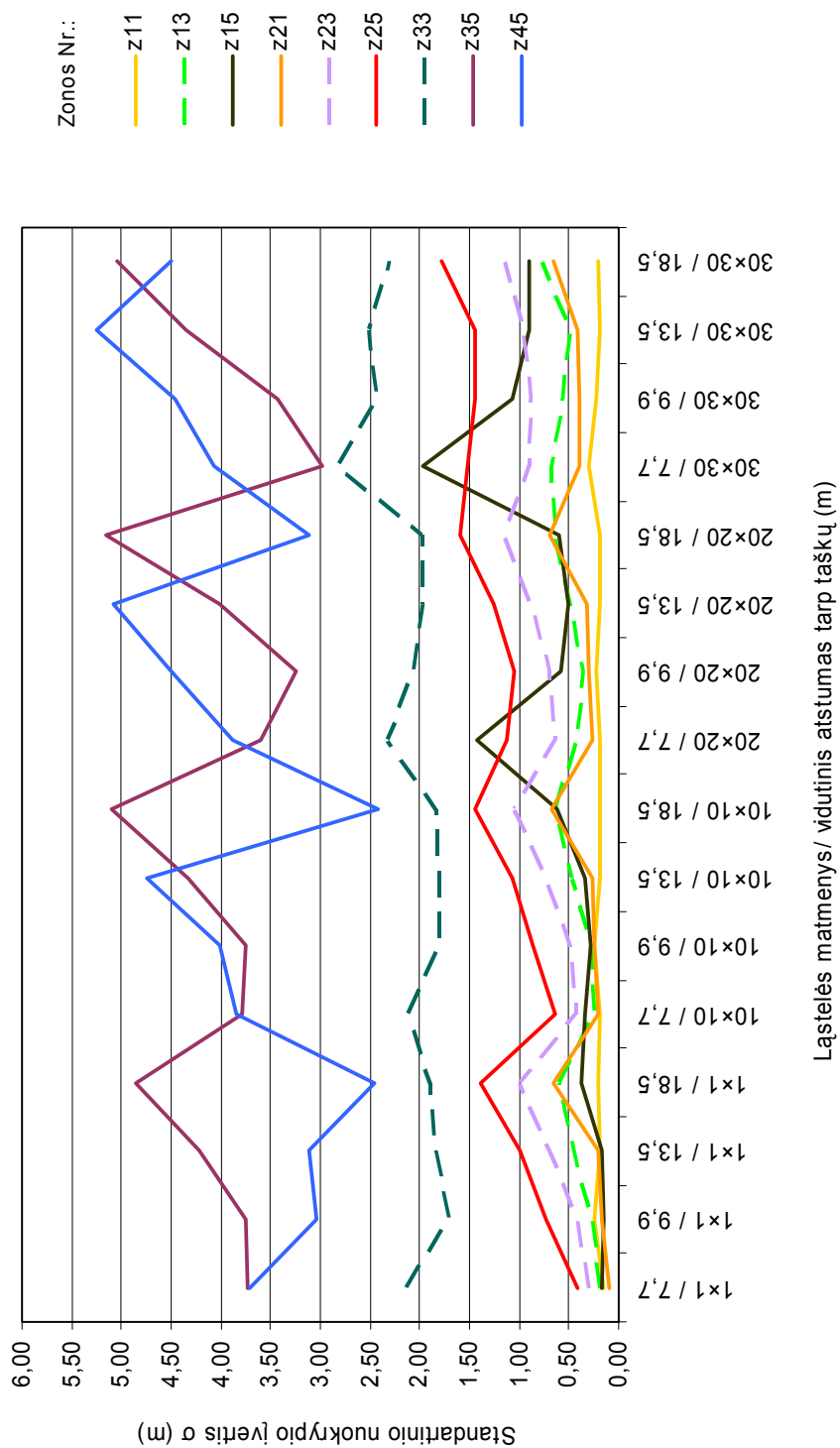
4.23 pav. Automatizuotos daugiaparametrinės reljefo modeliavimo procedūros

Pradiniai taškų duomenys suskirstomi į kelias dalis su skirtingais atstumais tarp taškų. Šie taškiniai duomenys taip pat padalinami į zonas, kiekvienai taškų grupei priskiriant visus vienai zonai priklausančius taškus ir taškus, esančius 20 m spinduliu aplink zoną tam, kad skaičiavimai prie zonos ribos būtų tikslesni.

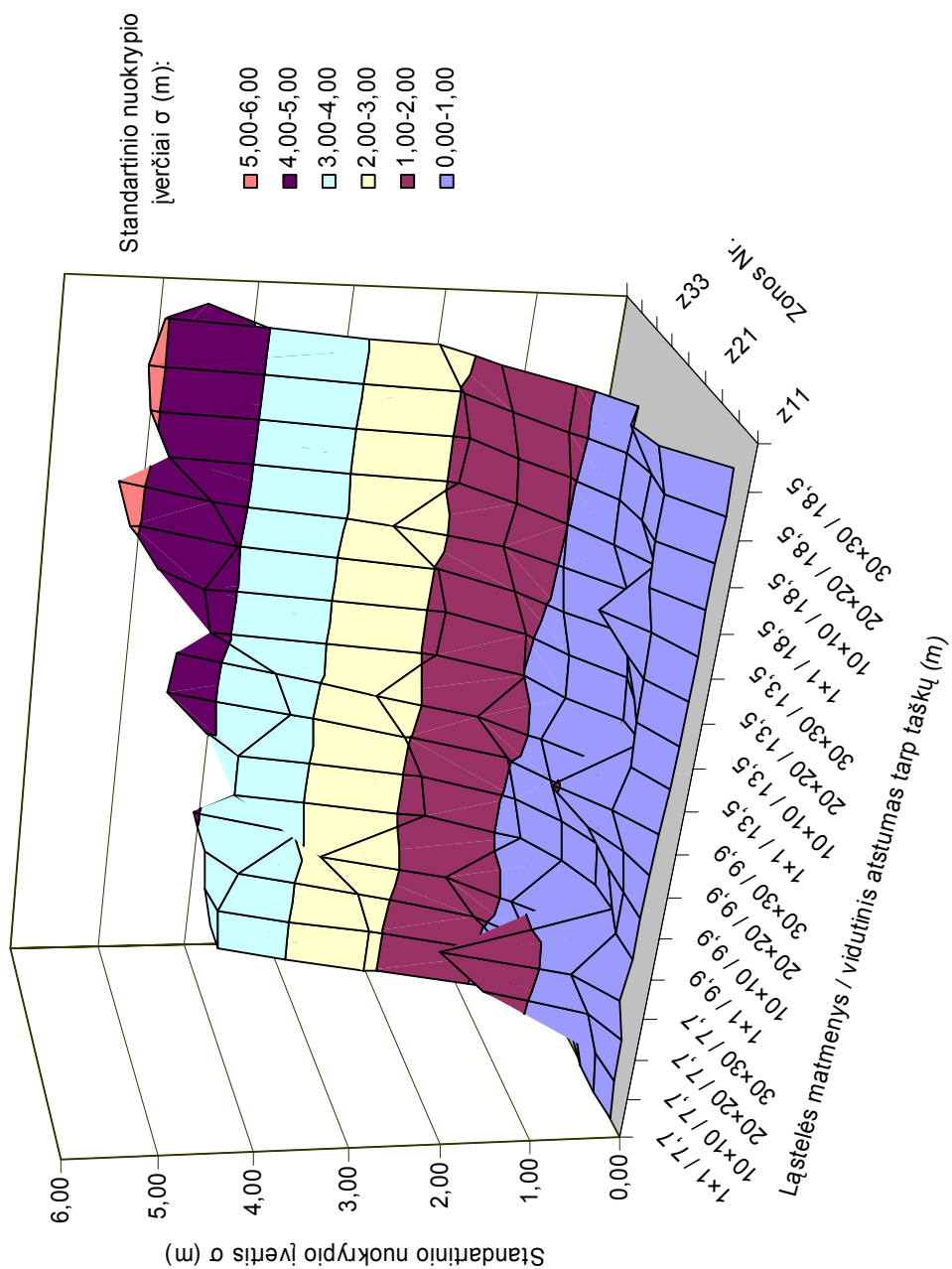
SRM sudaryti kriginio, splain ir svoriniu metodais. Eksperimentiniai SRM suskirstyti į grupes pagal ląstelių matmenis ir atstumus tarp gretimų taškų. SRM reikšmės įrašytos į kontrolinių taškų atributinius duomenis. Gautos aukščių reikšmės palygintos su stereofotogrametriškai išmatuotomis identišku taškų aukščių reikšmėmis. Apskaičiuoti sudarytų SRM standartinių nuokrypių įverčiai (4.19 lentelė). Atliktas grafinis gautų rezultatų palyginimas (4.24 pav. ir 4.25 pav.). Gauti rezultatai parodė, kad ląstelės matmenys standartinio nuokrypio įverčiams neturi įtakos, kai reljefo raižytumas yra nedidelis ($11 \div 23$ zonos). Didėjant reljefo raižytumui, didėja ir ląstelės matmenų įtaka SRM tikslumui.

4.19 lentelė. Kringingo metodu sudaryto SRM skirtingose zonose tikslumas

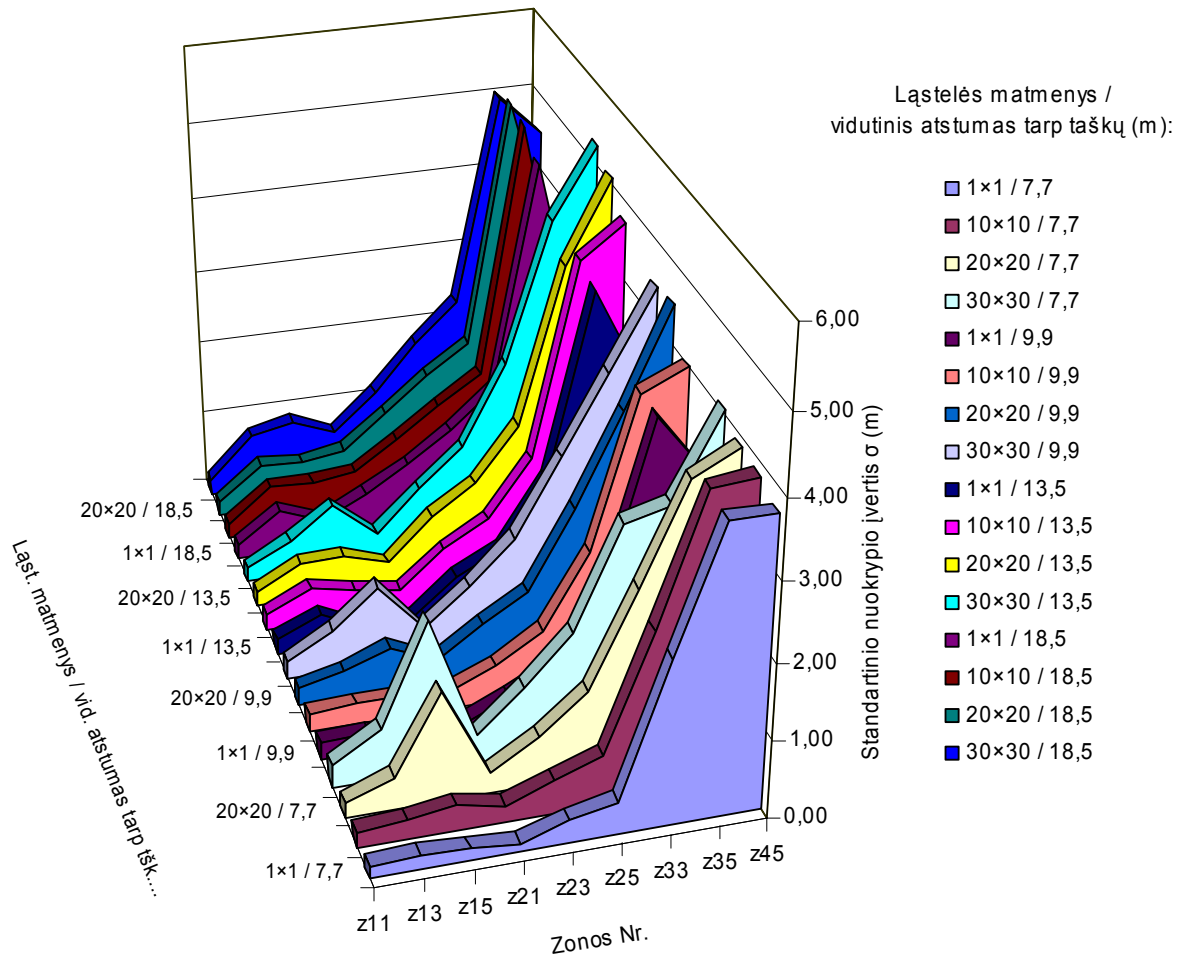
Lasteles matmenys / vidutinis atstumas tarp taškų (m)	Zonos Nr.										Standartinis nuokrypis σ (m)									
	z11	z13	z15	z21	z23	z25	z33	z35	z43	z45										
1×1 / 7,7	0,15	0,18	0,16	0,10	0,30	0,42	2,14	3,73	0,89	3,72										
10×10 / 7,7	0,19	0,24	0,33	0,21	0,43	0,64	2,13	3,78	2,07	3,84										
20×20 / 7,7	0,19	0,41	1,43	0,27	0,63	1,12	2,33	3,60	3,40	3,89										
30×30 / 7,7	0,30	0,68	1,98	0,38	0,90	1,52	2,83	2,97	5,43	4,06										
1×1 / 9,9	0,24	0,26	0,14	0,17	0,41	0,73	1,70	3,75	4,35	3,04										
10×10 / 9,9	0,25	0,28	0,28	0,24	0,49	0,86	1,80	3,76	4,72	4,01										
20×20 / 9,9	0,23	0,36	0,58	0,30	0,70	1,04	2,06	3,24	5,16	4,50										
30×30 / 9,9	0,23	0,57	1,06	0,40	0,87	1,44	2,44	3,44	6,56	4,46										
1×1 / 13,5	0,19	0,45	0,17	0,21	0,69	0,99	1,84	4,23	9,21	3,12										
10×10 / 13,5	0,20	0,47	0,34	0,25	0,74	1,07	1,81	4,33	9,41	4,74										
20×20 / 13,5	0,18	0,49	0,50	0,32	0,88	1,25	1,96	4,02	9,54	5,09										
30×30 / 13,5	0,19	0,49	0,90	0,42	0,96	1,45	2,52	4,35	9,71	5,25										
1×1 / 18,5	0,20	0,61	0,38	0,66	1,00	1,39	1,89	4,85	9,34	2,46										
10×10 / 18,5	0,19	0,63	0,62	0,68	1,04	1,45	1,83	5,10	9,54	2,42										
20×20 / 18,5	0,18	0,64	0,60	0,69	1,15	1,59	1,97	5,16	9,69	3,12										
30×30 / 18,5	0,20	0,78	0,89	0,66	1,14	1,77	2,30	5,04	9,81	4,50										



4.24 pav. Krigingo metodu sudaryto SRM skirtingose zonose tikslumas



4.25 pav. Krigingo metodu sudaryto SRM skirtingose zonose tikslumas



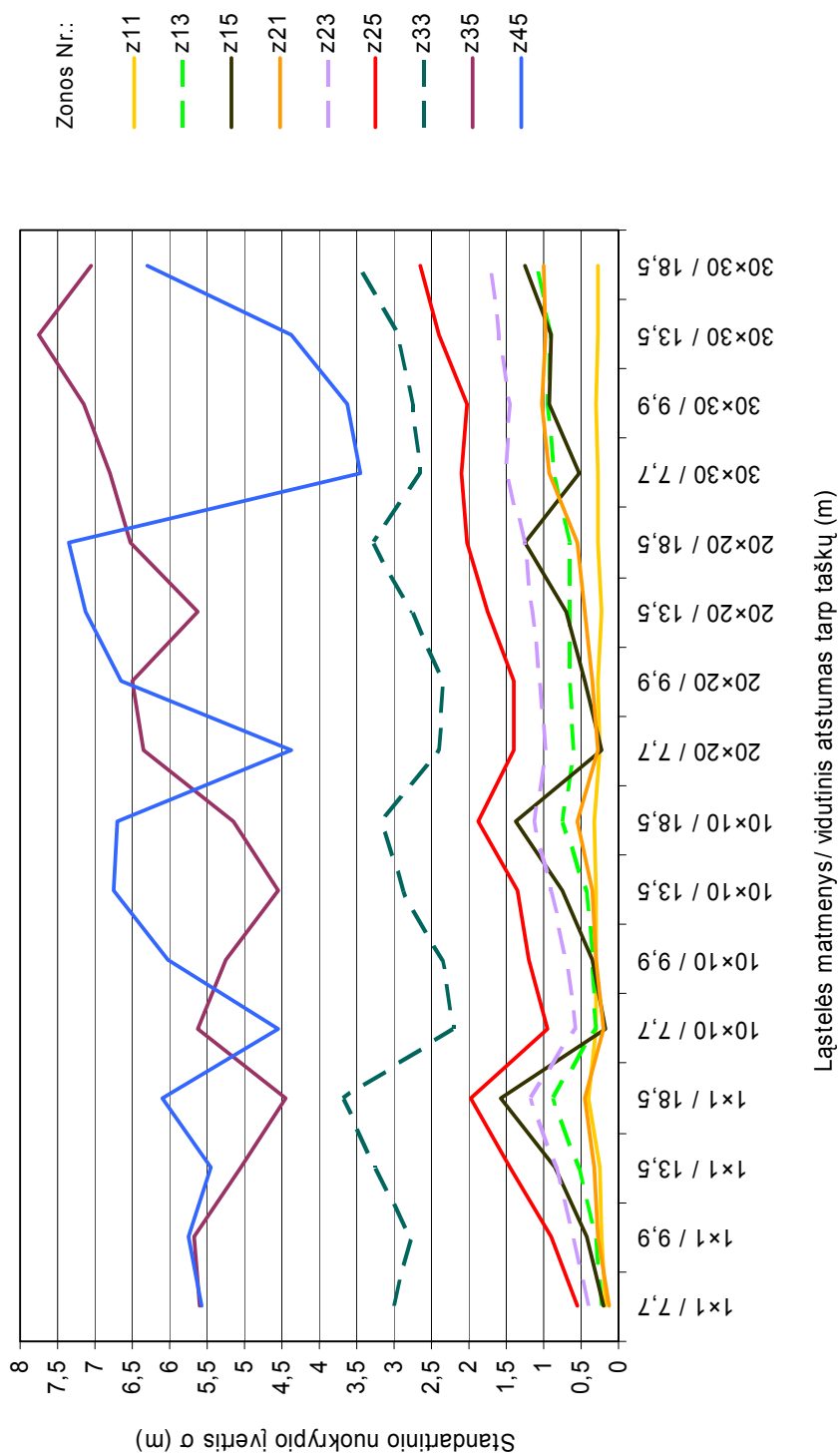
4.26 pav. Krigingo metodu sudaryto SRM skirtingose zonose tikslumas

Labiausiai SRM tikslumas priklauso nuo vidutinio atstumo tarp gretimų stereofotogrametriškai išmatuotų taškų (4.19 ÷ 4.21 lentelės, 4.24 ÷ 4.28 pav.). Tai parodo, kad tiksliam reljefo modeliui sudaryti svarbu turėti ne tik tikslus pradinius duomenis, bet ir taškų išsidėstymą, atitinkantį charakteringas reljefo pokyčių vietas.

SRM tikslumą skirtingose zonose įtakoja ir taškų tankumas (4.22 lentelė). Zonose, kur nedideli reljefo pokyčiai, taškų tankumas neturėjo didelės įtakos SRM tikslumui (11, 15 ir 16 zonose), tačiau modeliuojant didelio raižytumo reljefą tai turi didelę įtaką (35 ir 43 zonos).

4.20 lentelė. Splain metodu sudaryto SRM skirtingose zonose tikslumas

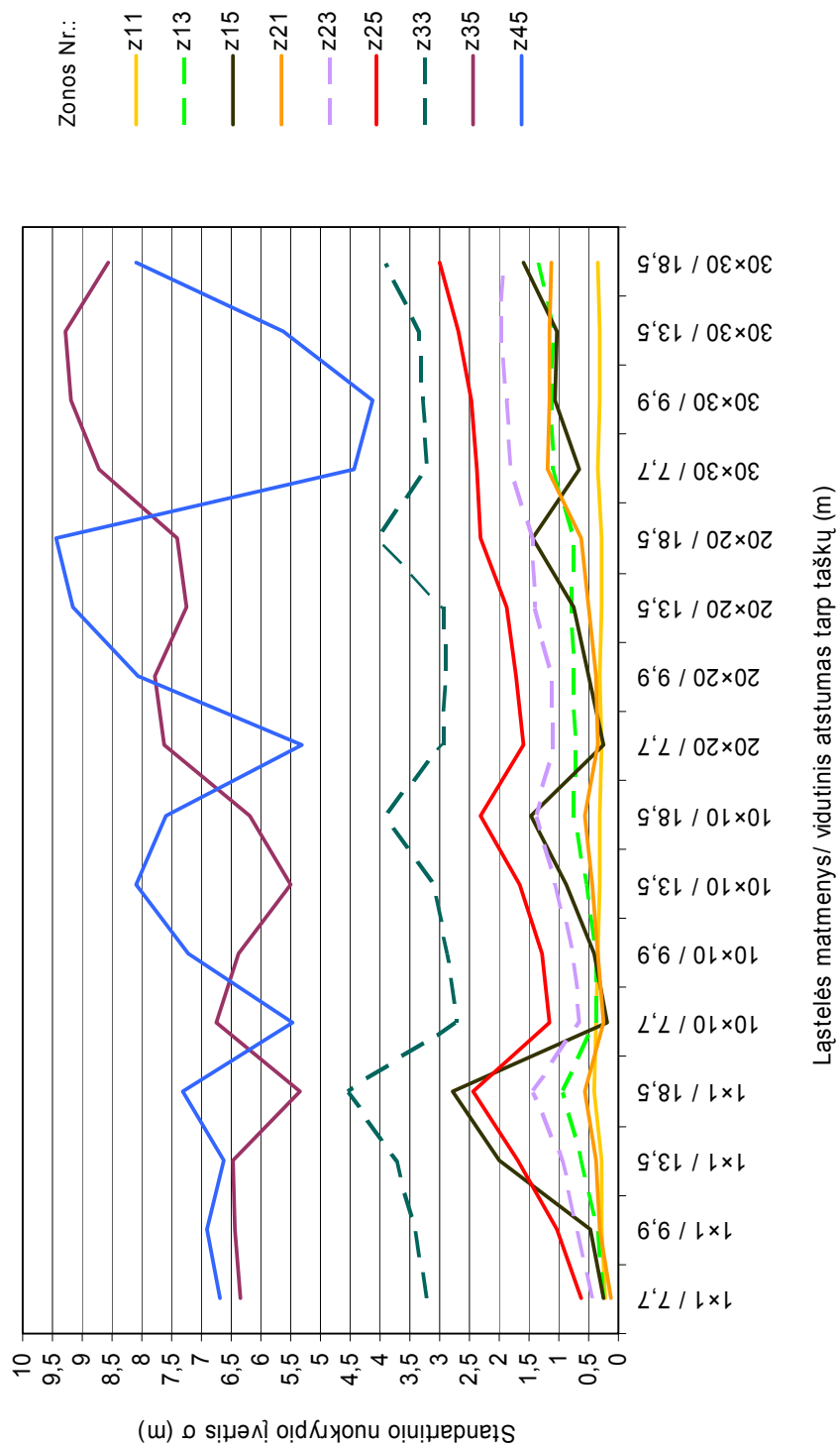
Zonos Nr. Laštelės matmenys / atstumas tarp taškų, m	z11	z13	z15	z21	z23	z25	z33	z35	z43	z45
	Standartinis nuokrypis σ , m									
1×1 / 7,7	0,18	0,22	0,19	0,13	0,39	0,55	3,00	5,60	1,34	5,58
10×10 / 7,7	0,23	0,29	0,43	0,27	0,60	0,90	2,77	5,67	2,90	5,76
20×20 / 7,7	0,25	0,53	1,86	0,32	0,82	1,46	3,26	5,04	5,10	5,45
30×30 / 7,7	0,39	0,88	2,57	0,46	1,17	1,98	3,68	4,46	7,60	6,09
1×1 / 9,9	0,31	0,31	0,17	0,20	0,57	0,95	2,21	5,63	6,09	4,56
10×10 / 9,9	0,30	0,34	0,36	0,29	0,69	1,20	2,34	5,26	7,08	6,02
20×20 / 9,9	0,30	0,43	0,75	0,36	0,91	1,35	2,88	4,54	7,74	6,75
30×30 / 9,9	0,32	0,74	1,38	0,56	1,13	1,87	3,17	5,16	9,18	6,69
1×1 / 13,5	0,25	0,59	0,22	0,27	0,97	1,39	2,39	6,35	13,82	4,37
10×10 / 13,5	0,28	0,66	0,44	0,35	1,04	1,39	2,35	6,50	13,17	6,64
20×20 / 13,5	0,23	0,64	0,70	0,45	1,14	1,75	2,74	5,63	13,36	7,13
30×30 / 13,5	0,27	0,64	1,26	0,55	1,25	2,03	3,28	6,53	14,57	7,35
1×1 / 18,5	0,28	0,85	0,53	0,92	1,50	2,09	2,65	6,79	14,01	3,44
10×10 / 18,5	0,29	0,95	0,93	1,02	1,46	2,03	2,75	7,14	14,31	3,63
20×20 / 18,5	0,27	0,90	0,90	0,97	1,61	2,39	2,96	7,74	14,54	4,37
30×30 / 18,5	0,28	1,09	1,25	0,99	1,71	2,66	3,45	7,06	14,72	6,30



4.27 pav. Splain metodu sudaryto SRM skirtingose zonose tikslumas

4.21 lentelė. Svoriniu metodu sudaryto SRM skirtingose zonose tikslumas

Zonos Nr. Ląstelių matmenys / atstumas tarp taškų, m	z11	z13	z15	z21	z23	z25	z33	z35	z43	z45
	Standartinis nuokrypis σ , m									
1×1 / 7,7	0,21	0,25	0,24	0,14	0,45	0,63	3,21	6,34	1,60	6,70
10×10 / 7,7	0,27	0,34	0,46	0,32	0,69	1,02	3,41	6,43	3,73	6,91
20×20 / 7,7	0,29	0,62	2,00	0,38	0,95	1,68	3,73	6,48	5,78	6,61
30×30 / 7,7	0,42	0,95	2,77	0,57	1,44	2,43	4,53	5,35	9,77	7,31
1×1 / 9,9	0,36	0,36	0,20	0,26	0,66	1,17	2,72	6,75	7,40	5,47
10×10 / 9,9	0,35	0,39	0,42	0,34	0,74	1,29	2,88	6,39	8,02	7,22
20×20 / 9,9	0,32	0,54	0,87	0,45	1,05	1,66	3,09	5,51	9,29	8,10
30×30 / 9,9	0,32	0,74	1,48	0,56	1,39	2,30	3,90	6,19	11,81	7,58
1×1 / 13,5	0,29	0,72	0,26	0,34	1,10	1,58	2,94	7,61	15,66	5,30
10×10 / 13,5	0,30	0,75	0,51	0,38	1,11	1,71	2,90	7,79	16,94	8,06
20×20 / 13,5	0,29	0,78	0,75	0,51	1,41	1,88	2,94	7,24	17,17	9,16
30×30 / 13,5	0,29	0,74	1,44	0,63	1,44	2,32	4,03	7,40	16,51	9,45
1×1 / 18,5	0,34	1,10	0,65	1,19	1,80	2,36	3,21	8,73	15,88	4,43
10×10 / 18,5	0,32	1,13	1,05	1,16	1,87	2,47	3,29	9,18	17,17	4,11
20×20 / 18,5	0,32	1,09	1,02	1,17	1,96	2,70	3,35	9,29	17,44	5,62
30×30 / 18,5	0,34	1,33	1,60	1,12	1,94	3,01	3,91	8,57	17,66	8,10



4.28 pav. Svoriniu metodu sudaryto SRM skirtingose zonose tikslumas

4.22 lentelė. Skirtingose zonose tikslumo įvertinimui naudotų taškų skaičius

Zonos Nr.	z11	z13	z15	z21	z23	z25	z33	z35	z43	z45	
Lasteles matmenys / vidutinis atstumas tarp taškų (m)	Taškų skaičius zonoje (vnt.)										
	1×1 / 7,7	11	269	14	16	440	461	31	14	11	25
	10×10 / 7,7	11	269	14	16	440	461	31	14	11	26
	20×20 / 7,7	11	269	14	16	440	461	31	14	11	27
	30×30 / 7,7	11	269	14	16	440	461	31	14	11	28
	1×1 / 9,9	11	269	14	16	440	461	30	14	11	22
	10×10 / 9,9	11	269	14	16	440	461	30	14	11	25
	20×20 / 9,9	11	269	14	16	440	461	30	14	11	27
	30×30 / 9,9	11	269	14	16	440	461	31	14	11	27
	1×1 / 13,5	11	269	14	16	440	461	28	11	11	22
	10×10 / 13,5	11	269	14	16	440	461	28	12	11	25
	20×20 / 13,5	11	269	14	16	440	461	29	13	11	27
	30×30 / 13,5	11	269	14	16	440	461	29	14	11	27
	1×1 / 18,5	11	269	14	15	436	461	24	10	11	22
	10×10 / 18,5	11	269	14	15	440	461	25	11	11	22
20×20 / 18,5	11	269	14	16	440	461	24	13	11	23	
30×30 / 18,5	11	269	14	15	440	461	30	13	11	27	

4.5. Eksperimentinių rezultatų regresiniai modeliai

Norėdama statistiškai pagrįsti standartinio nuokrypio įverčio priklausomybę nuo ląstelės dydžio, atstumo tarp gretimų taškų, geomorfologinių reljefo savybių, darbo autorė atliko eksperimentinių rezultatų regresinę analizę ir sudarė regresinius modelius.

Regresinė analizė dažnai taikoma praktiniams tyrimams (Zakarevičius, 1994; Čekanavičius ir Murauskas, 2002). Norint atlikti regresinę analizę, reikia sudaryti regresijos modelį. Regresijos modelis – statistinis modelis, leidžiantis vieno kintamojo reikšmes prognozuoti pagal kitų kintamųjų reikšmes. Regresijos modeliui sudaryti, jo tinkamumui patikrinti ir prognozėms taikyti naudojama regresinė analizė.

Standartinių nuokrypių pasiskirstymą SRM paviršiuje galima rasti sudarius regresinį modelį. Regresinio modelio parametrai nustatomi, naudojant apskaičiuotus standartinių nuokrypių įverčius ir reljefą apibūdinančių geomorfologinių charakteristikų, reljefo modelių parametrų skaitines reikšmes. Paprasčiausias yra linijinis regresinis modelis:

$$\sigma = \beta X + \varepsilon, \quad (4.15)$$

čia σ – išmatuotų standartinių nuokrypių įverčių skaitinė reikšmė; X – teritorijos geomorfologinių charakteristikų, modelio parametrų ir pradinių duomenų skaitinių reikšmių vektorius; β – regresinio modelio lygties matrica; ε – atsitiktinių paklaidų vektorius.

Standartiniai nuokrypiai ir reljefo geomorfologinės charakteristikos turi būti nustatytos tuose pačiuose taškuose.

Modelio parametrai (4.14) nustatomi mažiausiųjų kvadratų metodu:

$$b = (X^T X)^{-1} X^T \sigma. \quad (4.16)$$

Empiriškai nustatytas regresijos modelis gali būti užrašytas taip:

$$\hat{\sigma} = bX. \quad (4.17)$$

Regresinio modelio atitikimas matavimo rezultatams gali būti tikrinamas, naudojant determinacijos koeficientą R^2 ir Fišerio F statistiką. Determinacijos koeficientas

$$R^2 = \frac{b^T X^T \sigma - n \bar{\sigma}^2}{\sigma^T Y - n \bar{\sigma}^2} \quad (4.18)$$

kinta ribose $0 \leq R^2 \leq 1$ ir parodo regresinio modelio efektyvumą. Kuo determinacijos koeficientas artimesnis vienetui, tuo regresinis modelis geriau atitinka matavimo rezultatus. Determinacijos koeficientas parodo santykį tarp išmatuotų ir regresijos modelių, aprašytų SRM standartinių

Skaitmeninio reljefo modeliavimo daugiaparametrinis vertinimas, atsižvelgiant į paviršiaus geomorfologines savybes nuokrypių įverčių reikšmių. Determinacijos koeficientą padauginus iš 100, gautusi procentais išreikštas rodiklis, parodantis, kokią išmatuotų dydžių dalį įvertina regresijos modelis.

Determinacijos koeficiento panaudojimas modelio atitikimui nustatyti yra patogus ir aiškus būdas. Didžiausias jo trūkumas tas, kad neįvertinama išvadų apie atitikimą tikimybė. Šį trūkumą ištaiso ir determinacijos koeficientą papildo dispersinės analizės pagrindu gauta Fišerio statistika:

$$F = \frac{(b^T X^T \sigma - n \bar{\sigma}^2)(n - m - 2)}{\sigma^T \sigma - b^T X^T \sigma (m - 1)}, \quad (4.19)$$

čia n – matavimų (diskrecinių taškų) skaičius; m – regresinio modelio parametrų skaičius.

Statistika F turi ir $k_2 = n - m - 2$ laisvės laipsnius. Jeigu $F > F_{q(k_1, k_2)}$, tai su tikimybe $p = 1 - q$ galima teigti, kad regresinis modelis atitinka išmatuotus dydžius ir įvertina 100% išmatuotų SRM standartinių nuokrypių reikšmių.

Pagal šiuos duomenis įvertinant regresinio modelio lygties koeficientus, gaunamas regresinis modelis:

$$\sigma = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n, \quad (4.20)$$

čia $a_0, a_1, \dots, a_n$ – regresijos lygties koeficientai; $X_1, X_2, \dots, X_n$ – nepriklausomi kintamieji.

4.5.1. Skaitmeninio reljefo modelio kokybės regresinis modelis, įvertinant ląstelės matmenis ir atstumą tarp taškų

Norėdama įvertinti priklausomybę tarp skaitmeninio reljefo modelio standartinio nuokrypio skaitinės reikšmės ir ląstelės matmenų bei atstumo tarp pradinių duomenų taškų aukščių, darbo autorė sudarė regresinės analizės modelius krigingo, splain ir svoriniu metodais sudarytiems SRM (4.23 ÷ 4.28 lentelės). Šie modeliai taikyti visos teritorijos SRM tikslumui įvertinti. Kadangi šiuose vertinimuose nebuvo išskirtos geomorfologinės zonos, regresinės analizės modelius sudaro vienas priklausomas ir du nepriklausomi parametrai: X_1 – ląstelės matmenys, X_2 – atstumas tarp taškų.

Krigingo metodu sudaryto SRM statistinis įvertinimas

4.23 lentelė. Regresijos lygties parametrų įverčiai (krigingo metodas)

Priklausomas kintamasis σ				
Lygties koeficientai	Parametro reikšmė	Standartinis nuokrypis	Stjudento T statistika	Patikimumo lygmuo q
a_0	0,450	0,047	9,494	$q < 0,001$
a_1	0,017	0,001	11,812	$q < 0,001$
a_2	0,029	0,002	12,221	$q < 0,001$

4.24 lentelė. Regresijos lygties dispersinė analizė

	Kvadratų suma	Laisvės laipsniai	Dispersijos įverčiai	F statistika	Patikimumo lygmuo
Regresijos	3,045	2	1,523	144,42	$q < 0,001$
Liekamųjų paklaidų	0,390	37	0,011		
Visa	3,435	39			
Determinacijos koeficientas = 88,645%					
Standartinės paklaidos įvertis = 0,103					

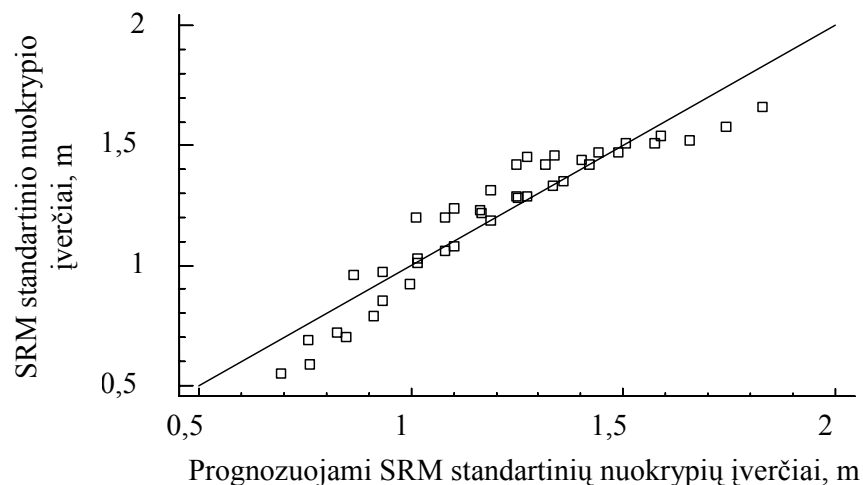
Pagal šiuos duomenis gautas regresinis modelis

$$\sigma = 0,450 + 0,017 \cdot X_1 + 0,029 \cdot X_2, \quad (4.21)$$

čia X_1 – ląstelės matmenys, X_2 – atstumas tarp taškų.

Kadangi $F > F_{q(k_1, k_2)}$, tai su tikimybe $p = 0,95$ galima teigti, kad regresinis modelis atitinka matavimo rezultatus ir juo aprašoma iki 89% visų reikšmių (4.24 lentelė). Likę 11% reikšmių yra ta išmatuotų dydžių dalis, kurių neatspindi regresinis modelis, t. y. kurios nepaklūsta regresiniu modeliu prognozuojamų standartinių nuokrypių priklausomybei nuo SRM ląstelės matmenų ir atstumo tarp pradinių duomenų taškų.

Kaip matosi iš 4.29 pav., sudarant SRM krigingo metodu, egzistuoja tiesinė priklausomybė tarp ląstelės matmenų, atstumo tarp taškų ir standartinio nuokrypio įverčio. Standartinio nuokrypio įverčiai išsidėstę 0,5÷1,6 m diapazonu.

**4.29 pav.** Daugialypės regresijos grafinis vaizdas (krigingo metodas)

*Splain metodu sudaryto SRM statistinis įvertinimas***4.25 lentelė.** Regresijos lygties parametų įverčiai (splain metodas)

Priklausomas kintamasis σ				
Lygties koeficientai	Parametro reikšmė	Standartinis nuokrypis	Stjudento T statistika	Patikimumo lygmuo q
a_0	0,440	0,055	7,974	$q < 0,001$
a_1	0,021	0,002	12,471	$q < 0,001$
a_2	0,028	0,003	10,183	$q < 0,001$

4.26 lentelė. Regresijos lygties dispersinė analizė

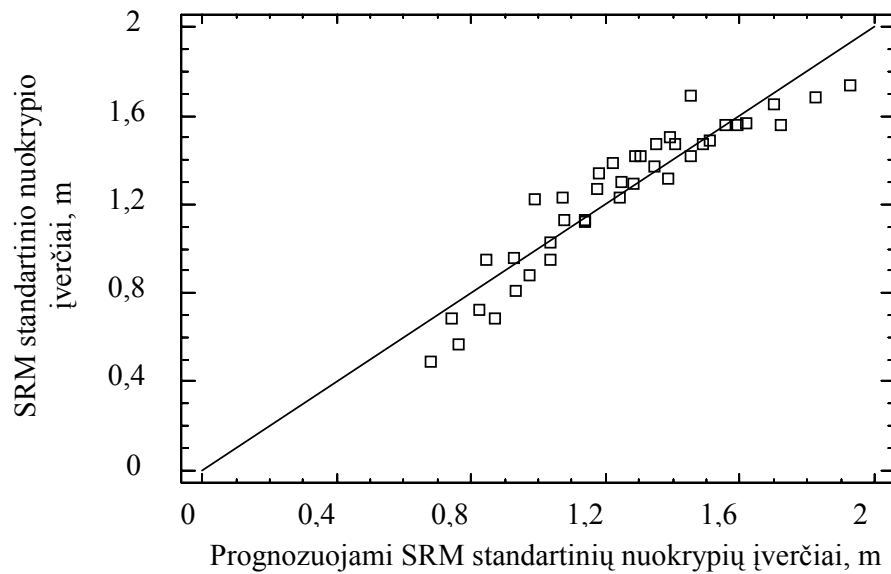
	Kvadratų suma	Laisvės laipsniai	Dispersijos įverčiai	F statistika	Patikimumo lygmuo
Regresijos	3,703	2	1,852	129,61	$q < 0,001$
Liekamųjų paklaidų	0,529	37	0,014		
Visa	4,232	39			
Determinacijos koeficientas = 87,509%					
Standartinės paklaidos įvertis = 0,120					

Pagal šiuos duomenis gautas regresinis modelis

$$\sigma = 0,440 + 0,021 \cdot X_1 + 0,028 \cdot X_2. \quad (4.22)$$

Su tikimybe $p = 0,95$ galima teigti, kad regresinis modelis atitinka matavimo rezultatus ir juo aprašoma iki 87,5% visų reikšmių (4.26 lentelė). Likę 12,5% reikšmių yra ta išmatuotų dydžių dalis, kurių neatspindi regresinis modelis, t. y. kurios nepaklūsta regresiniu modeliu prognozuojamo standartinių nuokrypių priklausomybei nuo SRM ląstelės matmenų ir atstumo tarp pradinių duomenų taškų.

Kaip matosi iš 4.30 pav., sudarant SRM spline metodu, egzistuoja tiesinė priklausomybė tarp ląstelės matmenų, atstumo tarp taškų ir standartinio nuokrypio įverčio. Standartinio nuokrypio įverčiai išsidėstę $0,4 \div 1,8$ m diapazonu.



4.30 pav. Daugialypės regresijos grafinis vaizdas (splain metodas)

Svoriniu metodu sudaryto SRM statistinis įvertinimas

4.27 lentelė. Regresijos lygties parametų įverčiai (svorinio metodo)

Priklausomas kintamasis σ				
Lygties koeficientai	Parametro reikšmė	Standartinis nuokrypis	Stjudento T statistika	Patikimumo lygmuo q
a_0	0,622	0,043	14,419	$q < 0,001$
a_1	0,013	0,001	10,114	$q < 0,001$
a_2	0,031	0,002	14,020	$q < 0,001$

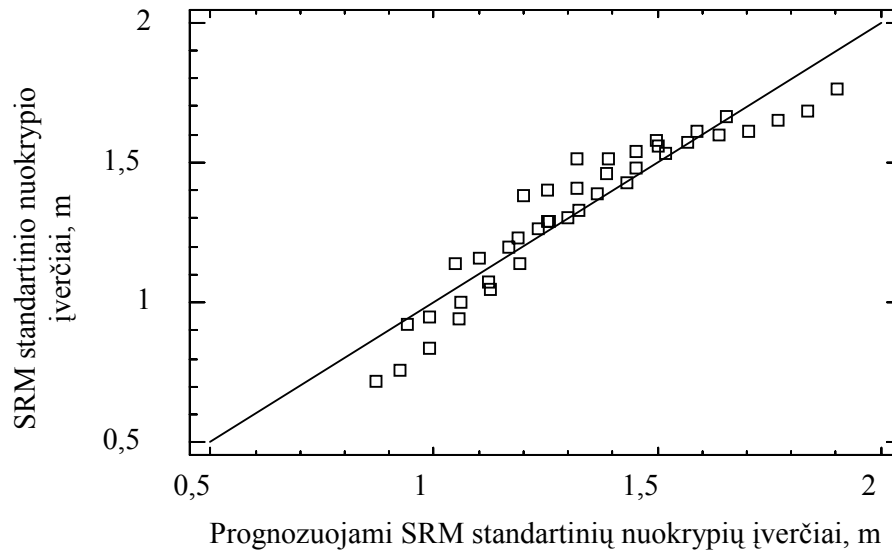
4.28 lentelė. Regresijos lygties dispersinė analizė

	Kvadratų suma	Laisvės laipsniai	Dispersijos įverčiai	F statistika	Patikimumo lygmuo
Regresijos	2,606	2	1,303	149,42	$q < 0,001$
Liekamųjų paklaidų	0,323	37	0,009		
Visa	2,929	39			
Determinacijos koeficientas = 88,983%					
Standartinės paklaidos įvertis = 0,093					

Pagal šiuos duomenis gautas regresinis modelis

$$\sigma = 0,622 + 0,013 \cdot X_1 + 0,031 \cdot X_2. \quad (4.23)$$

Su tikimybe $p = 0,95$ galima teigti, kad regresinis modelis atitinka matavimo rezultatus ir juo aprašoma iki 89% visų reikšmių. Likę 11% reikšmių yra ta išmatuotų dydžių dalis, kurių neatspindi regresinis modelis, t. y. kurios nepaklūsta regresiniu modeliu prognozuojamo standartinių nuokrypių priklausomybei nuo SRM ląstelės matmenų ir atstumo tarp pradinių duomenų taškų.



4.31 pav. Daugialypės regresijos grafinis vaizdas (svorinis metodas)

Kaip matome iš 4.31 pav., sudarant SRM svoriniu metodu, egzistuoja tiesinė priklausomybė tarp ląstelės matmenų, atstumo tarp taškų ir standartinio nuokrypio įverčio. Standartinio nuokrypio įverčiai išsidėstę $0,7 \div 1,8$ m diapazonu.

Įvertinus kriginio, splain ir svoriniu metodų sudarytų SRM statistinius skaičiavimus, galima teigti, kad kriginio metodas yra tiksliausias ir tinkamiausias SRM sudarymui.

4.5.2. Skaitmeninio reljefo modelio kokybės regresinis modelis įvertinant ląstelės matmenis, atstumą tarp taškų ir reljefo geomorfologines charakteristikas

Norėdama įvertinti priklausomybę tarp standartinio nuokrypio skaitinės reikšmės bei ląstelės matmenų, atstumo tarp pradinių duomenų taškų aukščių ir SRM geomorfologinių charakteristikų skaitinių reikšmių vidurkiai (4.29 lentelė), darbo autorė sudarė regresinės analizės modelius kriginio, splain ir svoriniu metodais sudarytiems SRM, suskaidytiems į geomorfologines zonas. Regresinės analizės modelius sudaro vienas priklausomas (standartinio nuokrypio įvertis) ir keturi nepriklausomi parametrai – ląstelės matmenys, atstumas tarp taškų, šlaito nuolydis ir kintamumas (4.29 pav.).

4.29 lentelė. SRM geomorfologinių charakteristikų skaitinių reikšmių vidurkiai

Šlaito nuolydžio kodas	Šlaito nuolydžio kampo vidurkis	Reljefo kintamumo kodas	Reljefo kintamumo skaitinės reikšmės vidurkis
1	1°	1	3
2	5°	2	7,5
3	12°	3	12,5
4	38°	4	17,5
		5	22,5

Krigingo metodu sudaryto SRM statistinis įvertinimas

4.30 lentelė. Regresijos lygties parametrų įverčiai (krigingo metodas)

Priklausomas kintamasis σ				
Lygties koeficientai	Parametro reikšmė	Standartinis nuokrypis	Stjudento T statistika	Patikimumo lygmuo q
a_0	-1,143	0,432	-2,644	0,009
a_1	0,033	0,010	3,307	0,001
a_2	0,057	0,026	2,187	0,030
a_3	0,131	0,008	16,118	$q < 0,001$
a_4	0,030	0,0148	2,000	0,047

4.31 lentelė. Regresijos lygties dispersinė analizė

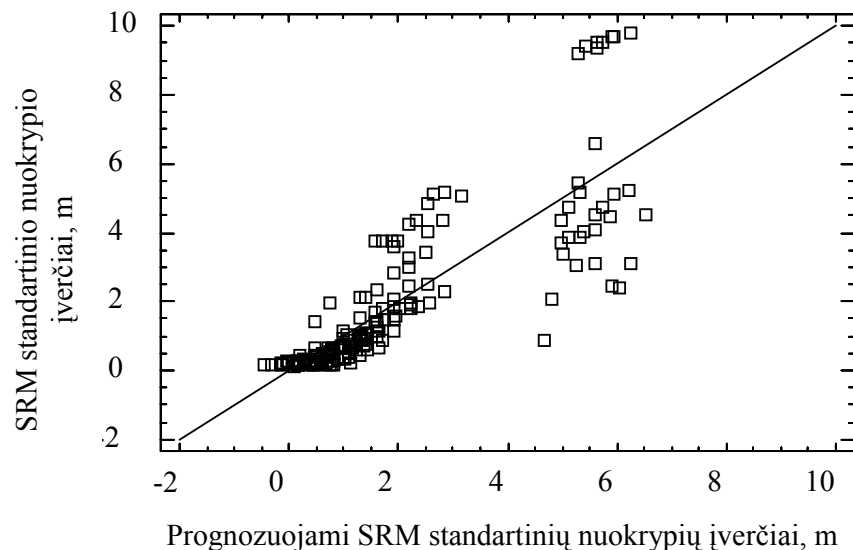
	Kvadratų suma	Laisvės laipsniai	Dispersijos įverčiai	F statistika	Patikimumo lygmuo
Regresijos	578,773	4	144,693	79,07	$q < 0,001$
Liekamųjų paklaidų	283,657	155	1,830		
Visa	862,43	159			
Determinacijos koeficientas = 67,109%					
Standartinės paklaidos įvertis = 1,353					

Pagal šiuos duomenis gautas regresinis modelis

$$\sigma = -1,143 + 0,032 \cdot X_1 + 0,057 \cdot X_2 + 0,131 \cdot X_3 + 0,029 \cdot X_4, \quad (4.24)$$

čia σ – standartinio nuokrypio įvertis; X_1 – SRM ląstelės matmenys; X_2 – atstumas tarp pradinių duomenų taškų; X_3 – reljefo nuolydžio vidutinė skaitinė reikšmė; X_4 – reljefo kintamumo vidutinė skaitinė reikšmė.

Su tikimybe $p = 0,95$ galima teigti, kad regresinis modelis atitinka matavimo rezultatus ir juo aprašoma iki 89% visų reikšmių. Likę 11% reikšmių yra ta išmatuotų dydžių dalis, kurių neatspindi regresinis modelis, t. y. kurios nepaklūsta regresiniu modeliu prognozuojamų standartinių nuokrypių priklausomybei nuo SRM ląstelės matmenų ir atstumo tarp pradinių duomenų taškų.



4.32 pav. Daugialypės regresijos grafinis vaizdas (krigingo metodas)

Atlikus kringingo metodu sudaryto SRM, suskaidyto į zonas, daugialypės regresijos modelio grafinę analizę (4.32 pav.), matosi, kad didžioji dalis standartinių nuokrypių įverčių išsidėstę pagal tiesinę priklausomybę, tačiau dalis duomenų nėra tiesiškai priklausomi. Sugretinus 4.32 pav. ir 4.19 lentelę, pastebima, kad didžiausias nuokrypis nuo tiesinės regresijos yra 35, 43 ir 45 zonose. Galima daryti išvadą, kad duomenų nukrypimą nuo tiesinio išsidėstymo sąlygoja didelis šlaito nuolydis ($>16^\circ$) ir reljefo kintamumas ($15 \div 25$). Iš 4.19 ÷ 4.21 lentelių matosi, kad pačios didžiausios paklaidos susikaupusios 43 zonoje, kur SRM modeliavimui buvo panaudota tik 11 taškų (4.22 lentelė). Šis faktorius taip pat galėjo įtakoti tokį duomenų pasiskirstymą šioje zonoje.

Splain metodu sudaryto SRM statistinis įvertinimas

4.32 lentelė. Regresijos lygties parametų įverčiai (splain metodas)

Priklausomas kintamasis σ				
Lygties koeficientai	Parametro reikšmė	Standartinis nuokrypis	Stjudento T statistika	Patikimumo lygmuo q
a_0	-2,041	0,639	-3,198	0,002
a_1	0,028	0,014	1,953	0,053
a_2	0,137	0,039	3,461	0,001
a_3	0,194	0,012	16,175	$q < 0,001$
a_4	0,039	0,022	1,796	0,074

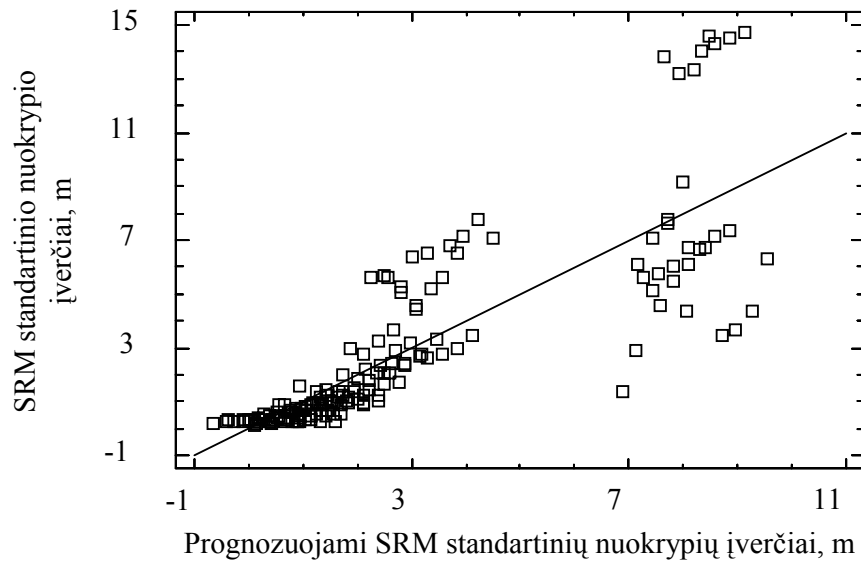
4.33 lentelė. Regresijos lygties dispersinė analizė

	Kvadratų suma	Laisvės laipsniai	Dispersijos įverčiai	F statistika	Patikimumo lygmuo
Regresijos	1259,09	4	314,771		$q < 0,001$
Liekamųjų paklaidų	618,109	155	3,988		
Visa	1877,19	159			
Determinacijos koeficientas = 67,073%					
Standartinės paklaidos įvertis = 1,997					

Pagal šiuos duomenis gautas regresinis modelis

$$\sigma = -2,041 + 0,028 \cdot X_1 + 0,134 \cdot X_2 + 0,194 \cdot X_3 + 0,039 \cdot X_4. \quad (4.25)$$

Su tikimybe $p = 0,95$ galima teigti, kad regresinis modelis atitinka matavimo rezultatus ir juo aprašoma iki 67% visų reikšmių. Likę 33% reikšmių yra ta išmatuotų dydžių dalis, kurių neatspindi regresinis modelis, t. y. kurios nepaklūsta regresiniu modeliu prognozuojamų standartinių nuokrypių priklausomybei nuo SRM ląstelės matmenų ir atstumo tarp pradinių duomenų taškų.



4.33 pav. Daugialypės regresijos grafinis vaizdas (splain metodas)

Įvertinus splain metodu sudaryto SRM, suskaidyto į zonas, daugialypės regresijos modelio grafinę analizę (4.33 pav.), matosi, kad didžioji dalis standartinių nuokrypių įverčių išsidėstę pagal tiesinę priklausomybę, tačiau, kaip ir krigingo metodu sudaryto SRM, didžiausias nuokrypis nuo tiesinės regresijos yra 35, 43 ir 45 zonose. (4.20 lentelė). Splain metodu sudaryto SRM standartinio nuokrypio įverčiai 43 zonoje siekia 15 m.

Svorinis metodu sudaryto SRM statistinis įvertinimas

4.34 lentelė. Regresijos lygties parametų įverčiai (splain metodas)

Priklausomas kintamasis σ				
Lygties koeficientai	Parametro reikšmė	Standartinis nuokrypis	Stjudento T statistika	Patikimumo lygmuo q
a_0	-2,537	0,765	-3,317	0,001
a_1	0,036	0,017	2,080	0,039
a_2	0,160	0,046	3,459	0,001
a_3	0,234	0,014	16,307	$q < 0,001$
a_4	0,504	0,024	1,924	0,056

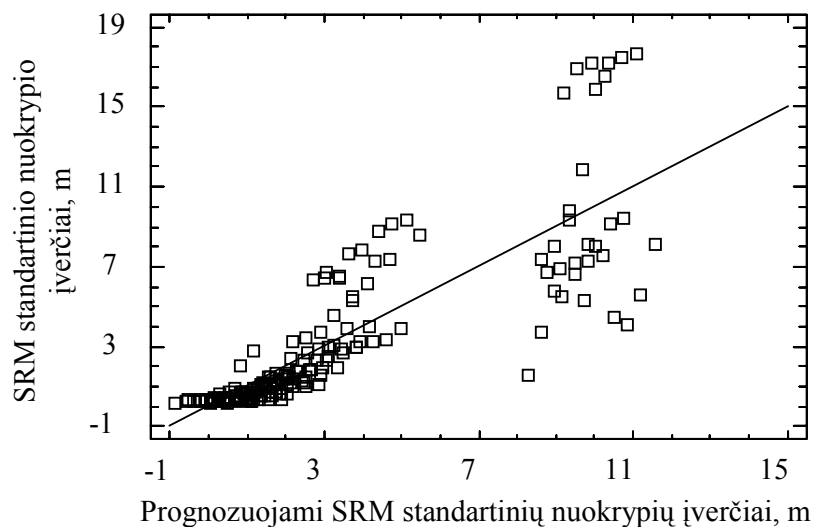
4.35 lentelė. Regresijos lygties dispersinė analizė

	Kvadratų suma	Laisvės laipsniai	Dispersijos įverčiai	<i>F</i> statistika	Patikimumo lygmuo
Regresijos	1848,85	4	462,211	80,66	$q < 0,001$
Liekamųjų paklaidų	888,219	155	5,730		
Visa	2737.06	159			
Determinacijos koeficientas = 67,548%					
Standartinės paklaidos įvertis = 2,394					

Pagal šiuos duomenis gautas regresinis modelis

$$\sigma = -2,537 + 0,036 \cdot X_1 + 0,160 \cdot X_2 + 0,234 \cdot X_3 + 0,050 \cdot X_4. \quad (4.26)$$

Su tikimybe $p = 0,95$ galima teigti, kad regresinis modelis atitinka matavimo rezultatus ir juo aprašoma iki 67,5% visų reikšmių. Likę 32,5% reikšmių yra ta išmatuotų dydžių dalis, kurių neatspindi regresinis modelis, t. y. kurios nepaklūsta regresiniu modeliu prognozuojamų standartinių nuokrypių priklausomybei nuo SRM ląstelės matmenų ir atstumo tarp pradinių duomenų taškų bei teritorijos geomorfologinių rodiklių.



4.34 pav. Daugialypės regresijos grafinis vaizdas (svorinis metodas)

Svoriniu metodu sudaryto SRM, suskaidyto į zonas, daugialypės regresijos analizės (4.34 pav.) rezultatai yra patys prasčiausi. Didžiausias nuokrypis nuo tiesinės regresijos yra 35, 43 ir 45 zonose. Šiose zonose yra sudėtingas reljefas (reljefo kintamumas ir nuolydis). Standartiniai nuokrypiai didelio raizgumo zonose (4.21 lentelė) siekia net 18 m.

Įvertinus kriginio, splain ir svoriniu metodais sudarytų SRM, suskaidytų į zonas, regresinę analizę, matome, kad tiksliausias yra kriginio metodu sudarytas SRM. Mažiausiai tinkamas tokio reljefo modeliavimui yra svorinis metodas. Tačiau visuose metoduose pasireiškiančios anomalijos parodo, kad reikia atskirų sprendimų, norint įvertinti didelio ražytumo reljefo zonas, t. y. reljefo nuolydį ir kintamumą.

4.6. Skaitmeninio reljefo modeliavimo metodų kokybės ir prioritetų vertinimas, taikant daugiakriterinę analizę

4.6.1. Analizės metodika

Skaitmeninių reljefo modeliavimo metodų kokybės kompleksiniam vertinimui daugiakriterinės analizės metodika iki šiol taikyta nebuvo.

Vienas svarbiausių daugiakriterinės analizės etapų – alternatyvas apibūdinančių kriterijų reikšmių ir reikšmingumo nustatymas. Apskaičiavus kriterijų reikšmes ir reikšmingumus bei taikant daugiakriterinės analizės metodus, nustatomas lyginamų variantų prioritetiškumas, naudingumo laipsnis ir vertė.

Skaitmeninio reljefo modeliavimo metodams palyginti daugiakriterinės analizės metodais naudojamas TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) metodas (Zavadskas ir kt., 2001). Daugiakriterinės analizės pradinius duomenis sudaro sprendiniui turinčių įtakos rodiklių visuma: reljefo geomorfologinės charakteristikos (nuolydžio reikšmė, reljefo kintamumas), reljefo modelio charakteristikos (ląstelės matmenys), pradinių duomenų charakteristikos (atstumai tarp taškų). Gali būti naudojama ir daugiau rodiklių, susietų su techniniais vieno ar kito metodo panaudojimo ypatumais, modelio taikymu konkrečioms uždaviniams spręsti.

Pradinių duomenų matricą sudaro rodiklių reikšmės $F=(f_{ij})$, čia i – rodiklių numeriai, j – variantų numeriai.

Toliau atliekamas pradinių duomenų matricos vektorinis normalizavimas (Zavadskas ir kt., 2001). Normalizuotos matricos elementų reikšmės

$$\bar{r}_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n f_{ij}^2}}. \quad (4.27)$$

Rodiklių įtaka yra skirtinga.

TOPSIS metode reikšmingumo rodikliai normalizuojami, kad jų suma būtų lygi vienetui. Šiuo atveju reikšmingumo rodikliai bus:

$$q_i = \frac{r_{i_0}}{\sum_i r_{i_0}}, \quad (4.28)$$

čia i – rodiklio, kuriam skaičiuojamas reikšmingumas, numeris.

Apskaičiavus reikšmingumus, sudaroma normalizuota svorinė matrica, kurios elementai

$$v_{ij} = q_i \bar{r}_{ij}. \quad (4.29)$$

Toliau pagal realiu normalizuotos svorinės matricos duomenis sudaromas virtualus modelis, atitinkantis geriausias rodiklių reikšmes:

$$a^* = \left\{ \left\langle \max_j v_{ij} \mid i \in I \right\rangle, \left\langle \min_j v_{ij} \mid i \in I' \right\rangle, j = 1, 2, \dots, n \right\} = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*\}, \quad (4.30)$$

$$a^- = \left\{ \left\langle \min_j v_{ij} \mid i \in I \right\rangle, \left\langle \max_j v_{ij} \mid i \in I' \right\rangle, j = 1, 2, \dots, n \right\} = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\}, \quad (4.31)$$

čia I – maksimizuojamų rodiklių aibė; I' – minimizuojamų rodiklių aibė.

Rodiklių prioretitiškumas nustatomas, lyginant atskirų variantų euklidinius atstumus iki virtualaus geriausiojo ir blogiausiojo varianto.

Alternatyvos atstumas iki geriausiojo varianto yra:

$$S_{j^*} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (v_{ij} - v_{i^*})^2}, \quad (4.32)$$

o atstumas iki blogiausiojo varianto –

$$S_{j^-} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (v_{ij} - v_{i^-})^2}, \quad (4.33)$$

Santykinis atstumas iki virtualaus geriausiojo varianto yra

$$C_{j^*} = \frac{S_{j^*}}{S_{j^*} + S_{j^-}}. \quad (4.34)$$

Santykinio atstumo reikšmės yra $1 \geq C_{j^*} \geq 0$. Pagal C_{j^*} reikšmes sudaroma alternatyvų prioritentinė eilė. Geriausia alternatyva ta, kurios C_{j^*} reikšmė yra didžiausia.

4.6.2. Analizės rezultatai

Interpoliavimui naudojamų gretimų taškų skaičiaus įtakos vertinimas

Atliekant vertinimą, neatsižvelgiama į variogramos tipą. Pradiniai duomenys analizei paimti iš 4.5 lentelės.

Eksperto alternatyvos – taškų skaičius, rodikliai – variogramų tipai, rodiklių įverčiai – standartiniai nuokrypiai. Gauta $C_{3(9)} > C_{2(6)} > C_{4(12)} > C_{1(3)}$ ($0,71 > 0,63 > 0,54 > 0,46$). Pagal prioritetiškumą geriausias yra trečiasis variantas (4.5 lentelė), blogiausias – pirmasis variantas. Taigi, sudarant SRM kriginio metodu visų tipų variogramomis, skaičiavimams labiausiai tinka naudoti 9 gretimus taškus visų tipų variogramoms, o mažiausiai tinka – 3 gretimus taškus (santykinis atstumas iki geriausio varianto yra 0,46). Likusiųjų variantų santykiniai atstumai iki geriausio virtualaus varianto yra nuo 0,54 iki 0,63, t. y. didesni už 0,5 ir yra arčiau geriausio virtualaus varianto.

Tinkamiausios variogramos, sudarant SRM kriginio metodu, parinkimas

Tyrimas atliktas neatsižvelgiant į interpoliavimui naudojamų gretimų taškų skaičių, t. y. nustatomas apibendrintas rodiklis, nepriklausomai nuo taškų skaičiaus. Pradiniai duomenys analizei paimti iš 4.5 lentelės.

Eksperto alternatyvos – variogramų tipai, rodikliai – taškų skaičius, rodiklių įverčiai – standartiniai nuokrypiai. Gauta $C_{1(\text{apskritiminė})} > C_{2(\text{sferinė})} = C_{3(\text{tetrasferinė})} = C_{4(\text{pentasferinė})} = C_{5(\text{eksponentinė } 1)} > C_{6(\text{eksponentinė } 2)} > C_{9(\text{K.Beselio})} > C_{7(\text{kvadratinė})} > C_{10(\text{Gauso})} > C_{8(\text{slenksčio efekto})}$ ($1,00 > 0,99 = 0,99 = 0,99 = 0,99 > 0,98 > 0,96 > 0,50 > 0,20 > 0,02$), tai pagal prioritetiškumą geriausias yra pirmasis variantas (4.5 lentelė), blogiausias – aštuntasis variantas. Taigi, sudarant SRM kriginio metodu, apskritiminė variograma mažiausiai priklauso nuo matavimams naudojamų taškų skaičiaus, o daugiausiai priklauso nuo Gauso bei slenksčio efekto variogramos (santykiniai atstumai iki geriausio virtualaus varianto yra nuo 0,02 iki 0,20). Labai nedaug nuo geriausio varianto atsilieka sferinė, tetrasferinė, pentasferinė, eksponentinė 1–2 variogramos, kurių santykiniai atstumai iki geriausio virtualaus varianto yra nuo 0,96 iki 0,99.

Labiausiai tinkamų variogramų visų reljefo tipų SRM sudaryti, nustatymas

Tyrimo tikslas – nustatyti, kokio tipo variogramą mažiausiai priklauso nuo reljefo geomorfologinių savybių, sudarant SRM kriginio metodu. Pradiniai duomenys analizei paimti iš 4.12 lentelės.

Eksperimento alternatyvos – variogramų tipai, rodikliai – reljefo geomorfologinės zonos, rodiklių įverčiai – standartiniai nuokrypiai. Gauta $C_{1(\text{apskritiminė})} > C_{2(\text{sferinė})} = C_{3(\text{tetrasferinė})} = C_{4(\text{pentasferinė})} = C_{5(\text{eksponentinė } 1)} > C_{9(\text{eksponentinė } 2)} > C_{8(\text{K.Beselio})} > C_{7(\text{kvadratinė})} > C_{6(\text{Gauso})}$ ($0,99 > 0,97 = 0,97 = 0,97 = 0,97 > 0,95 > 0,92 > 0,34 > 0,00$). Pagal prioritetiškumą geriausias yra pirmasis variantas (4.12 lentelė), blogiausias – šeštasis variantas. Taigi, sudarant SRM kriginio metodu, apskritiminė variograma mažiausiai priklauso nuo reljefo tipo, o daugiausiai priklauso – Gauso variograma (santykinis atstumas iki geriausio virtualaus varianto yra 0,00). Labai nedaug nuo geriausio varianto atsilieka sferinė, tetrasferinė, pentasferinė, eksponentinė 1–2 variogramos, kurių santykiniai atstumai iki geriausio virtualaus varianto yra nuo 0,92 iki 0,97.

Tinkamiausio reljefo modeliavimo metodo visoms reljefo zonoms modeluoti nustatymas

Pradiniai duomenys analizei paimti iš 4.15 lentelės.

Eksperimento alternatyvos – reljefo modeliavimo metodai, rodikliai – reljefo zonos, rodiklių įverčiai – standartiniai nuokrypiai. Gauta $C_{1(\text{krigingas})} > C_{5(\text{daugianaris})} > C_{2(\text{kokringingas})} > C_{3(\text{splain})} > C_{4(\text{svorinis})}$ ($0,78 > 0,76 > 0,69 > 0,54 > 0,33$). Pagal prioritetiškumą geriausias yra pirmasis variantas (4.15 lentelė), blogiausias – ketvirtasis variantas. Taigi, visų tipų reljefą labiausiai tinka modeliuoti kriginio metodu, o mažiausiai – svoriniu metodu (santykinis atstumas iki geriausio virtualaus varianto yra 0,33). Likusiųjų variantų santykiniai atstumai iki geriausio virtualaus varianto yra nuo 0,54 iki 0,76, t. y. didesni už 0,5.

Tinkamiausio SRM ląstelės matmenų ir atstumo tarp taškų visoms reljefo zonoms nustatymas

Pradiniai duomenys analizei paimti iš 4.19 lentelės.

Eksperimento alternatyvos – ląstelės matmenys ir atstumai tarp taškų, rodikliai – reljefo zonos, rodiklių įverčiai – standartiniai nuokrypiai. Gauta $C_1 > C_2 > C_5 > C_6 > C_9 > C_7 > C_{10} > C_{11} > C_3 > C_{13} > C_{14} > C_8 = C_{12} > C_{15} > C_{16} > C_4$ ($0,89 > 0,82 > 0,80 > 0,74 > 0,66 > 0,64 > 0,61 > 0,54 > 0,51 > 0,49 > 0,44 > 0,43 = 0,43 > 0,42 > 0,33 > 0,28$). Pagal prioritetiškumą geriausias yra pirmasis variantas (4.19 lentelė), blogiausias – ketvirtasis variantas. Pagal gautus rezultatus matyti, kad visų tipų reljefą labiausiai tinka modeliuoti, parenkant 1×1 matmenų ląstelę bei 7,7 m atstumą tarp pradinių duomenų taškų.

Reljefo zonos, mažiausiai priklausomos nuo ląstelės matmenų ir atstumo tarp pradinių duomenų taškų nustatymas

Pradiniai duomenys analizei paimti iš 4.19 lentelės.

Eksperto alternatyvos – reljefo zonos, rodikliai – ląstelės matmenys ir atstumai tarp taškų, rodiklių įverčiai – standartiniai nuokrypiai. Gauta $C_{1(z11)} > C_{4(z21)} > C_{2(z13)} > C_{5(z23)} > C_{3(z15)} > C_{6(z25)} > C_{7(z33)} > C_{10(z45)} > C_{8(z35)} > C_{9(z43)} (0,89 > 0,82 > 0,80 > 0,74 > 0,66 > 0,64 > 0,61 > 0,54 > 0,51 > 0,49 > 0,44 > 0,43 = 0,43 > 0,42 > 0,33 > 0,28)$. Pagal prioritetiškumą geriausias yra pirmasis variantas (4.19 lentelė), blogiausias – devintasis variantas. Iš gautų rezultatų matyti, kad nuo ląstelės matmenų ir atstumo tarp taškų mažiausiai priklauso SRM nedidelio raižytumo reljefo zonose, o labiausiai tikslumas įtakojamas didelio reljefo kintamumo ir nuolydžio zonose (35, 43, 45).

Kadangi didelio reljefo raižytumo zonose SRM tikslumas labai priklauso nuo ląstelės matmenų ir atstumo tarp pradinių duomenų taškų, svarbu išsiaiškinti, nuo kurio iš šių dviejų parametrų labiau priklauso reljefo zonos.

Alternatyvos – a) ląstelės matmenys, b) atstumai tarp taškų, rodikliai – zonos, rodiklių įverčiai – standartiniai nuokrypiai:

a) gauta $C_{1(1 \times 1)} > C_{2(10 \times 10)} > C_{4(30 \times 30)} > C_{3(20 \times 20)} (0,76 > 0,60 > 0,24 > 0,17)$,

b) gauta $C_{1(7,7)} > C_{2(9,9)} > C_{3(13,5)} > C_{4(18,5)} (0,86 > 0,70 > 0,44 > 0,15)$.

Iš tyrimo rezultatų matyti, kad SRM tikslumas geriausias, esant mažiausioms ląstelėms ir mažiausiems atstumams tarp interpoliavimui naudojamų taškų. Atstumai tarp taškų geriausio varianto atveju SRM tikslumą įtakoja daugiau, negu ląstelės matmenys (santykiniai atstumai iki geriausio virtualaus varianto atitinkamai 0,86 ir 0,76). Apskaičiavus alternatyvą kaip santykinį naudingumą, gaunama:

a) ląstelės matmenų priklausomybei $\theta_1 = 100\%$, $\theta_2 = 79\%$, $\theta_3 = 22\%$, $\theta_4 = 32\%$.

b) atstumo tarp taškų priklausomybei: $\theta_1 = 100\%$, $\theta_2 = 81\%$, $\theta_3 = 51\%$, $\theta_4 = 17\%$.

Iš santykinio naudingumo kaitos matyti, kad didėjant atstumui tarp taškų ir ląstelės matmenims, santykinio naudingumo kaita abiem atvejais yra panaši.

4.7. Išvados

1. Skirtingais metodais sudarius ir palyginus tarpusavyje skaitmeninius reljefo modeliavimo metodus, galima teigti, kad:
 - nėra idealaus, t. y. “geriausio” interpoliacijos algoritmo, kuris būtų akivaizdžiai geresnis už kitus ir kurį būtų galima pritaikyti visais atvejais;
 - gaunamo SRM rezultatų kokybė priklauso nuo pradinių duomenų tikslumo, taškų išsidėstymo, taikomo interpoliacijos modelio adekvatumo paviršiaus pobūdžiui;
 - renkantis SRM interpoliacijos metodą svarbu, kad jis atitiktų pradinių duomenų struktūrai, reljefo charakteristikoms, o interpoliavimo funkcijos tikėtų konkrečiai vietai;
 - parenkant interpoliacijos algoritmus, būtina įvertinti pradinių duomenų pobūdį (tipą, tikslumą, svarbą ir t.t.) bei išsidėstymą;
 - kiti parametrai, galintys turėti įtakos interpoliavimo metodo parinkimui, yra norimas gauti modelio tikslumas ir tam reikalingi skaičiavimo resursai.
2. Įvertinta paviršiaus modeliavimo procedūrų įtaka kriginio metodu sudaromo reljefo modelio tikslumui. Didžiausią įtaką reljefo modelio tikslumui turi variogramos tipas.
3. Tiksliausias reljefo modelis gautas, kai skaičiavimams naudojama apskritiminė variograma.
4. Tiksliausias rezultatas gautas, kai nežinomoms aukščių reikšmėms rasti naudojama 12 gretimų interpoliavimo taškų ($\sigma = 0,29$ m). Labai nedaug skiriasi rezultatai, gauti naudojant 9 gretimus taškus ($\sigma = 0,31$ m).
5. Norint gauti didesnę reljefo modelio tikslumą skirtingiems skaitmeninio reljefo modelio plotams, sudarantiems vieną zoną, reikia ne tik skaidyti teritoriją pagal sudarytą metodiką į zonas (4.3 pav.) su skirtingais geomorfologiniais rodikliais, bet ir papildomai įvertinti reljefo anizotropiškumą atskirose zonose. Pavyzdžiui, sudėtingo reljefo plote (44 zonoje) pritaikius šį metodą, tikslumas pagerėjo nuo $\sigma = 0,85$ m iki $\sigma = 0,34$ m.
6. Sudaryti regresiniai modeliai, apibūdinantys skirtingais metodais gautų reljefo modelių tikslumo priklausomybę nuo modeliavimo parametrų ir reljefo geomorfologinių rodiklių.
7. SRM tyrimas skirtingose reljefo raižytumo zonose parodė, kad sudaromo reljefo modelio tikslumas daugiausia priklauso nuo pradinių duomenų tankumo visose zonose ir nuo ląstelių matmenų didelio raižytumo reljefe (pradedant 25 zona).
8. Atliktų eksperimentų pagrindu galima teigti, kad įvairiose situacijose kompleksškai vertinant modeliavimo metodų prioritetiškumą, reikėtų taikyti daugiakriterinę analizę.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Ištirta skaitmeninio reljefo modelio tikslumo priklausomybė nuo pradinių duomenų gavimo būdų. Paviršiaus modelis, gautas iš stereodigitalizuotų taškų aukščių, detalumo ir tikslumo požiūriu įvertintas kaip geriausias. Eksperimentiniame objekte skaitmeninio reljefo modelio standartinio nuokrypio įvertis yra 0,14 m. Didžiausi aukščių nesutapimai siekia iki 0,40 m.
2. Įvertintos žemės paviršiaus geomorfologinės savybės ir reljefo teritorija suklasifikuota į zonas – teritorijas su skirtingomis geomorfologinėmis charakteristikomis. Skaidymo į zonas rezultatai pažymėti dviženkliais skaičiais: pirmasis skaitmuo parodo šlaitų nuolydį ($1 \div 4$), antrasis – reljefo kintamumą ($1 \div 6$).
3. Ištirta modeliavimo metodų parametrinių funkcijų (variogramų ir svorių) įtaka reljefo modelio tikslumui. Nustatyta, kad didelę įtaką modelio tikslumui turi variogramos tipas. Tiksliausi rezultatai modeliuojant reljefą kriginio metodu gauti, taikant apskritiminę variogramą ($\sigma = 0,29 \div 0,54$ m), mažiausias tikslumas gautas, taikant Gauso ($\sigma = 0,85 \div 2,03$ m) ir slenksčio efekto ($\sigma = 0,82 \div 2,42$ m) variogramas.
4. Ištirta modeliavimo parametrų įtaka skirtingiems reljefo tipams. Nustatyta, kad reljefo modelių tikslumas priklauso nuo reljefo nuolydžio ir kintamumo rodiklių. Į reljefo kintamumo rodiklius jautriausiai reaguojama, kai modeliavimo parametrinėmis funkcijomis naudojamos Gauso ir kvadratinės variogramos. Didėjant reljefo kintamumo rodikliams, proporcingai didėja reljefo modelio paklaidos. Reljefo kintamumo rodikliai turi nežymią įtaką, kai parametrinės funkcijos yra apskritiminės, sferinės, tetrasferinės ir pentasferinės variogramos. Taikant šias variogramas, esant didžiausiems reljefo kintamumo rodikliams modelio standartiniai nuokrypiai yra apie 5 kartus mažesni, negu taikant Gauso ir kvadratinės variogramas. Esant mažiems reljefo kintamumo rodikliams, reljefo modeliavimo tikslumas nepriklauso nuo variogramos tipo.
5. Ištirta reljefo modelio tikslumo priklausomybė nuo modeliavimo parametrų – ląstelės matmenų ir atstumo tarp pradinių duomenų taškų. Taikant matematinės statistinės ir daugiakriterinės analizės metodus nustatyta, kad modelio tikslumas didėja, mažinant ląstelės matmenis ir atstumą tarp taškų. Atstumų tarp taškų įtaka tikslumui apie 10–15% didesnė negu ląstelės matmenys.
6. Ląstelės matmenys ir atstumas tarp taškų mažesnę įtaką turi esant mažam reljefo kintamumui ir didesnę, kai reljefo kintamumas didelis.
7. Ištirta modeliavimo metodų įtaka reljefo modelio tikslumui. Skaitmeninis reljefo modelis buvo sudarytas kriginio, splain ir svoriniu metodu iš taškų, tarp kurių vidutinis atstumas nuo 7,7 m iki 26,6 m, ląstelės matmenys imti nuo 1×1 m iki 35×35 m. Gauti rezultatai parodė, kad tiksliausi

rezultatai gauti, modeliuojant reljefą krigingo metodu. Krigingo metodu sudarytų reljefo modelių vidutinis tikslumas didelio reljefo kintamumo zonose ($35 \div 46$) apie 1,5 karto didesnis, negu modeliuojant splain ir apie 2 kartus didesnis, negu modeliuojant svoriniu metodais. Mažo reljefo kintamumo zonų tikslumai skiriasi nežymiai.

8. Sudaryti regresiniai modeliai, apibūdinantys skirtingais metodais gautų reljefo modelių tikslumo priklausomybę nuo modeliavimo parametrų ir reljefo geomorfologinių rodiklių. Empyrinių regresinių modelių determinacijos koeficientai yra $0,67 \div 0,89$ m ribose. Regresinių modelių lygčių parametrų ir bendrasis modelio patikimumo lygmuo $q \leq 0,05$. Todėl galima teigti, kad sudaryti regresiniai modeliai su tikimybe $P \geq 0,95$ patvirtina reljefo modelio tikslumo priklausomybę nuo modeliavimo parametrų ir reljefo savybių. Šią išvadą patvirtina ir regresinio modelio dispersinės analizės rezultatai.

9. Pirmą kartą vertinant skaitmeninių reljefo modelių kokybę ir prioritetus, pritaikyta daugiakriterinė analizė. Atliktų eksperimentų pagrindu galima teigti, kad daugiakriterinė analizė yra efektyvus būdas vertinti reljefo modeliavimo metodų ir jų taikymo ypatumų prioritetus, esant įvairioms sąlygoms ir apribojimams.

10. Suskirsčius reljefą į zonas pagal geomorfologinius rodiklius, susidarė galimybė įvertinti skaitmeninių reljefo modelių kokybę ir parinkti tinkamiausius modeliavimo metodus bei parametrus teritorijoms su konkrečiomis reljefo savybėmis.

AUTORĖS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

Mokslo straipsniai Lietuvos mokslo tarybos pripažintuose leidiniuose

1. Kumetaitienė, A. Application of elevation geomorphologic classification for checking the accuracy of digital elevation model. *Geodezija ir kartografija*, XXXI t., Nr. 2, 2005, p. 69–75.
2. Kumetaitienė, A.; Kumetaitis, A. Optimalaus skaitmeninio reljefo modelio sudarymo technologijos tobulinimas. *Geodezija ir kartografija*, XXXI t., Nr. 2, 2005, p. 57–61.
3. Kumetaitienė, A.; Kumetaitis, A. Urbanizuotos teritorijos 1:10 000 mastelio skaitmeninio ortofotografinio žemėlapio tikslumo analizė. *Geodezija ir kartografija*, XXVIII t., Nr. 2, 2002, p. 54–57.
4. Žalnierukas, A.; Kumetaitienė, A. Topografinių duomenų bazių, sukurtų stereofotogrametriniu būdu, taškų altitudžių tikslumas. *Geodezija ir kartografija*, XXV t., Nr. 3, 1999, p. 113–117.
5. Žalnierukas, A.; Kumetaitienė, A.; Stankevičius, Ž. Skaitmeninio žemėlapių, sudaryto stereofotogrametriniu metodu, tikslumas. *Geodezija ir kartografija*, XXV t., Nr. 2, 1999, p. 60–68.

Publikacijos kituose leidiniuose

1. Kumetaitienė, A.; Kumetaitis, A. Evaluation of the influence of surface modeling parameter on the accuracy of digital elevation models. *The 6th International Conference „Environmental engineering“, May 26–27*. Vilnius: Technika, 2005, p. 919–924.
2. Kumetaitienė, A.; Kumetaitis, A. Fizinio paviršiaus ploto skaičiavimas, naudojant skaitmeninius paviršiaus modelius. *Tarptautinės mokslinės metodinės konferencijos „Žemės naudojimas ir žemėtvarka“ pranešimai*. Kaunas: Akademija, 2004, p. 54.
3. Kumetaitienė, A.; Zakarevičius, A. Daugiakriterinės analizės metodų pritaikymas sprendžiant uždavinius su geografiniais duomenimis. *7 – osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 2004 m. kovo 25 d., pranešimai*. Vilnius: Technika, 2004, p. 141–146.
4. Žalnierukas, A.; Sužiedelytė-Visockienė, J.; Kumetaitienė, A. Lietuvos miestų kartografavimas fotogrametriniu metodu. *XI Pasaulio lietuvių mokslo ir kūrybos simpoziumas, tezių rinkinys*. Vilnius: BĮ „Baltijos kopija“, 2000, p. 119.

LITERATŪRA

1. Agumya, A.; Hunter, G. J. A Risk-Based Approach to Assessing the 'Fitness for Use' of Spatial Data. *URISA Journal*, Vol 11, No 1, 1999, p. 33–44.
2. Ahmadzadeh, M. R.; Petrou, M. Error statistics for slope and aspect when derived from interpolated data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol 39 No 9, 2001, p. 1823–1833.
3. Amer, S.; Sliuzas, R.; Yuxian, S. Spatial Decision Support Systems for Urban Planning and Management. *EGIS Proceedings*. Genua, 1993, p. 116–124.
4. Apanavičienė, R.; Juodis, A. Statybos projektų valdymo efektyvumo modeliavimas taikant dirbtinius neuroninius tinklus. *Journal of Civil Engineering and Management*. Vilnius: Technika IX t, Nr. 1, 2003, p. 59–67.
5. Arentze, T.; Borger, A. Design of a View-Based DSS for Location Planning. *International Journal of Geographical Information Systems*, No 2, 1996, p. 219–236.
6. Armstrong, M. P.; Densham, P.; Polonis, J.; Rushton, G. Cartographic Displays to Support Locational Decision Making. *Cartography and Geographic Information Systems*, No 3, 1992, p. 154–164.
7. Ascila, R.; Dumbrasukas, A.; Mozgeris, G. Nemuno žemupio potvynių užliejamų plotų modeliavimas taikant hidraulinio modeliavimo ir GIS kompleksinę sistemą. Lietuvos hidrografinio tinklo būklė ir vandens išteklių valdymo perspektyvos, 2000, p. 49–60.
8. Atkinson, P. M. Geographical information science – geostatistics, uncertainty. *Progress in Physical Geography*, Vol 23, No 1, 1999, p. 134–142.
9. Badji, M.; Mallants, D. Integrating GIS and Process Models: A New Perspective for Decision Support Systems (DSS) in Irrigation Water Management. *EGIS*, 1991, p. 48–54.
10. Batty, M. Using Geographic Information Systems in Urban Planning and Policy-Making. In: Fischer, M.; Nijkamp, P. (eds.), *Geographic Information Systems, Spatial Modelling and Policy Evaluation*. Wien: Springer Verlag, 1993, p. 51–73.
11. Batty, M.; Densham, P. J. *Decision support, gis, and urban planning*, 1996. URL: http://www.geog.ucl.ac.uk/~pdensham/SDSS/s_t_paper.html (2004.11.24).
12. Batty, M.; Xie, Y. Modelling Inside GIS: Part 1. Model Structures, Exploratory Spatial Data Analysis and Aggregation. *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol 8, No 3, 1994, p. 291–307.

13. Beatley, T. *Habitat conservation planning: Endangered species and urban growth*. Austin: University of Texas Press, 1994.
14. Bennett, D. A. An Extensible Geographical Modeling System for the Development of Dynamic Watershed Models. *Dissertation: The University of Iowa*, Iowa City: Iowa, 1994.
15. Bonham-Carter, G. F. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Pergamon Press, New York, 1994.
16. Brock, J. C.; Wright, C. W.; Sallenger, A. H.; Krabill, W. B.; Swift, R. N. Basin and methods of NASA Airborne Topographic Mapper LiDAR surveys for coastal studies. *Journal of Coastal Research*, Vol 18, No 1, 2002, p. 1–13.
17. Burrough, P. A. and McDonnell, R.A. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, New York, 1998, 333 p.
18. Burton, C. L.; Rosenbaum, M. S. Decision suport to assist environmental sedimentology modelling. *Environmental Geology*, No 43, 2003, p. 457–465.
19. Carroll, D.; Morse, M. A national digital elevation model for resource and environmental management. *Cartography*, Vol 25, No 2, 1996, p. 43–49.
20. Carter, W. E.; Shrestha, R. L.; Tuell, G.; Bloomquist, D.; Sartori, M. Airborne laser swath mapping shines new light on Earth's topography. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, Vol 82, No 46, 2001, p. 549–550, 555.
21. Carver, S. J. Integrating Multi-Criteria Evaluation With Geographical Information Systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, No 3, 1991, p. 321–339.
22. Cattle, J. A.; McBratney, A. B. and Minasny, B. Kriging Method Evaluation for Assessing the Spatial Distribution of Urban Soil Lead Contamination. *Journal of Environmental Quality*, No 31, 2002, p. 1576–1588.
23. Chang, K. and Tsai, B. The effect of DEM resolution on slope and aspect mapping. *Cartography and Geographic Information Systems*, Vol 18, No 1, 1991, p. 69–77.
24. Chao-yi, Lang. Kriging interpolation. *Dept. of Computer Science, Cornell University*, 1995, URL: www.nbb.cornell.edu/neurobio/land/OldStudentProjects/cs490-94to95/clang/kriging.html.
25. Chiueh, P.T.; Lo, S.-L.; Lee, C.D. Prototype SDSS for Using Probability Analysis in Soil Contamination. *Journal of Environmental Engineering*, Vol 123, No 5, 1997, p. 514–519.
26. Clevenger, A.; Wierzchowski, J.; Chruszcz, B.; Gunson, K. GIS-Generated, Expert-Based Models for Identifying Wildlife Habitat Linkages and Planning Mitigation Passages. *Conservation Biology*, Vol 16, No 2, 2002, p. 503–514.

27. Coops, N. C. Comparison of topographic and physiographic properties measured on the ground with those derived from digital elevation models. *Northwest Science*, Vol 74, No 2, 2000, p. 116–130.
28. Cory, M. J.; McGill, A. DTM derivation at Ordnance Survey Ireland. *OEEPE Workshop on Automation in Digital Photogrammetric Production*, June 22–24, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, Marne la Vallée (France), 1999. URL: http://phot.epfl.ch/workshop/wks99/5_2.html (2004.01.11).
29. Couclelis, H.; Monmonier, M. Using SUSS to Resolve NIMBY: How Spatial Understanding Support Systems Can Help With the "Not in My Back Yard" Syndrome. *Geographical Systems*, No 2, 1995, p. 83–101.
30. Czorny, E.; Dresselhaus, W.; Haas, D.; Hamels, B. P. Except: Symbiose aus Forschung, Anwendungsentwicklung und Anwendern. In: Hilty L. et al. (eds.), *Informatik für den Umweltschutz. Metropolis Verlag*, Marburg, 1994, s. 133–143.
31. Čaplinskas, A.; Dzemydienė, D. Kai kurie dirbtinio intelekto taikymo aspektai sprendimų priėmimo sistemose. *Informacinės technologijos '2001 konferencijos pranešimų medžiaga*. Kaunas: Technologija, 2001, p. 189–193.
32. Čaplinskas, A.; Lupeikienė, A. Sistemų inžinerijos intelektualizavimo problemos. *Informacinės technologijos '2001 konferencijos pranešimų medžiaga*. Kaunas: Technologija, 2001, p. 200–205.
33. Čekanavičius, V.; Murauskas, G. *Statistika ir jos taikymai*. II. Vilnius: TEV, 2002, 272 p.
34. Davis, J. C. *Statistics and data analysis in geology*. New York, 1986, 646 p.
35. Davis, J. R.; McDonald, G. Applying a Rule Based Decision Support System to Local Government Planning. In: Wright, J. R. et al. (eds.), *Expert Systems in Environmental Planning*. Springer Verlag, Berlin, 1993, p. 23–46.
36. DeLoach, S. R.; Leonard, J. Making photogrammetric history. *Professional Surveyor*, Vol 20, No 4, 2000, p. 6, 8, 10.
37. Dėjus, T. Daugiatikslio vertinimo metodų elementų jautrumo nustatymo modelis. *Journal of Civil Engineering and Management*. Vilnius: Technika VIII t., Nr. 4, 2002, p. 263–268.
38. Despotakis, V. K.; Gioautzi, M.; Nijkamp, P. Dynamic GIS Models for Regional Sustainable Development. In: Fischer, M.; Nijkamp, P. (eds.), *Geographic Information Systems, Spatial Modelling and Policy Evaluation*. Springer Verlag, Wien, 1993, p. 235–262.
39. Doak, S. C. Enhancing local capacity to use spatial information in ecosystem management. *Pacific GIS*, Portland Oregon, October, 1994.
40. Doucette, P.; Beard, K. Exploring the capability of some GIS surface interpolators for DEM gap fill. *Photogrammetric Engineering, Remote Sensing*, Vol 66, No 7, 2000, p. 881–888.

41. Dowman, I. J. Review of Generation of Digital Elevation Models Through Spaceborne SAR Interferometry. *Photogrammetric Record*, Vol 16, No 95, 2000, p. 870–871.
42. Du, C. J. An Interpolation Method for Grid-Based Terrain Modeling. *Computer Journal*, Vol 39, No 10, 1996, p. 837–843.
43. Duh, J.D.; Brown, D. G. Local reduction of systematic error in 7–1/2 minute DEMs by detecting anisotropy in derivative surfaces. *Chelsea, MI: Ann Arbor Press*, 1999, p. 281–292.
44. Dzemydienė, D. Informacinių sistemų projektavimo alternatyvų formavimas sprendimų priėmimo sistemoje. *Informacinės technologijos '2002 konferencijos pranešimų medžiaga*. Kaunas: Technologija, 2002.
45. Eastman, J. R.; Anyamba, A.; Ramachandran, M. The Spatial Manifestation of ENSO Warm Phase Events in Southern Africa. *Conference Proceedings: RS & GIS in Environmental & Natural Resources Assessment in Afrika*, 1996, p. 269–281.
46. Eastman, J. R.; Jiang, H.; Toledano, J. Multi-criteria and multi-objective decision making for land allocation using GIS. In: Beinart, E.; Nijkamp, P. (eds.). *Multicriteria Analysis for Land-Use Management*. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1998, p. 227–252.
47. Eastman, J. R.; Jin, W.; Kyem, P. A. K.; Toledano, J. An Algorithm for Multi-Objective Land Allocation Using GIS. *Proceedings, International Workshop on GIS*. Chinese Academy of Sciences, Beijing, August 19–22, 1993a, p. 261–270.
48. Eastman, J. R.; Jin, W.; Kyem, P. A. K.; Toledano, J. Raster Procedures for Multi-Criteria/Multi-Objective Decisions. *PE&RS*, Vol 61, No 5, 1995, p. 539–547.
49. Eastman, J. R.; Laney, R. M. Bayesian Soft Classification for Sub-pixel Analysis: A Critical Evaluation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol 68, No 11, 2002, p. 1149–1154.
50. Eastman, J. R.; Toledano, J. Forest Monitoring in Malawi Using Long Time Series Vegetation Data. *Earth Observation Magazine*, Vol 5, No 9, 1996a, p. 28–31.
51. Eastman, J. R.; Toledano, J. An Ecological Strategy for Sustainable GIS Technology Transfer. *EIS News, Secretariat of the Program on Environmental Information Systems in Sub-Saharan Africa* The World Bank, 1996b, p. 8–15.
52. Endreny, T. A.; Wood, E. F.; Lettenmaier, D. P. Satellite-derived digital elevation model accuracy–hydrogeomorphological analysis requirements. *Hydrological Processes*, Vol 14, No 1, 2000, p. 1–20.
53. Environmental Systems Research Institute. *Arc/Info, Surface Modelling with TINÔ User's Guide*. Redlands, CA: ESRI, 1992, 375 p.
54. Evans, I. S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In: Chorley, R. J. (ed.). *Spatial Analysis in Geomorphology*, Methuen, London, 1972, p. 17–90.

55. Evans, I. S. An integrated system of terrain analysis and slope mapping. *Final report on grant DA-ERO-591-73-G0040, University of Durham, England*, 1979.
56. Evans, I. S. An integrated system of terrain analysis and slope mapping. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, Supl-Bd 36, 1980, p. 274–295.
57. Evans, I. Cartographic techniques in geomorphology. In: Goudie, A. (Ed.). *Geomorphological Techniques*, Vol 2, No 9, 1990, p. 97–108.
58. Farr, T.; Kobrick, M. Shuttle radar topography mission produces a wealth of data. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, Vol 81, No 48, 2000, p. 583 and 585.
59. Fedra, K. GIS and Environmental Modeling. In: Goodchild, M. F.; Parks, B. O.; Steyaert, L.T. (eds.), *Environmental Modeling with GIS*. Oxford University Press, New York, 1993, p. 35–50.
60. Fisher, F. Modeling Soil Map–Unit Inclusions by Monte Carlo Simulation. *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol 5, No 2, 1991, p. 193–208.
61. Franke, R. Smooth Interpolation of Scattered Data by Local Thin Plate Splines. *Comp. & Maths. with Apls*, Vol 8, No 4, 1982, p. 237–281.
62. Gao, J. Resolution accuracy of terrain representation by grid DEMs at a micro-scale. *International Journal of Geographic Information Science*, Vol 11, No 2, 1997, p. 199–212.
63. Gens, R. SAR interferometry – software, data format, and data quality. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol 65, No 12, 1999, p. 1375–1378.
64. Gesch, D. B. Accuracy assessment of a global elevation model using Shuttle Laser Altimeter data. *IEEE International Geoscience Remote Sensing symposium (IGARSS)*, Seattle WA, July 6–10. Piscataway NJ, Institute of Electrical Electronic Engineers, 1998.
65. Gesch, D. B.; Larson, K. S. Techniques for development of global 1-kilometer digital elevation models, in Pecora Thirteen. *Human Interactions with the Environment–Perspectives from Space*, 13th, Sioux Falls, SD, August 20–22, 1998.
66. Gesch, D. B.; Oimoen, M. J.; Greenlee, S. K.; Nelson, Ch.; Steuck, M.; Tyler, D. The National Elevation Dataset. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol 68, No 1, 2002, p. 5–11; URL: <http://gisdata.usgs.net/ned/default.htm> (2005.01.17.)
67. Gesch, D. B.; Verdin, K. L.; Greenlee, S. K. New land surface digital elevation model covers the Earth. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, Vol 80, No 6, 1999, p. 69–70. URL: <http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/README.html#h9> (2005.01.20).
68. Giles, P. T.; Franklin, S. E. Comparison of derivative topographic surfaces of a DEM generated from stereoscopic SPOT images with field measurements. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol 60, No 10, 1996, p. 1165–1171.

69. GIS–Centras. VI Skaitmeninė duomenų bazė Lietuvos teritorijos kosminio vaizdo žemėlapis M 1:50 000 leidybinių originalų gamybai LTDBK50000. Versija 1.0.1. *Vartotojo vadovas*, Vilnius, 1999.
70. Gong, J.; Li, Z.; Zhu, Q.; Sui, H.; Zhou, Y. Effects of various factors on the accuracy of DEMs – an intensive experimental investigation.: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol 66, No 9, 2000, p. 1113–1117.
71. Gusakov, A.; Iljina, O.; Kulikova, E.; Melichova, O. Aktualūs statybos daugiakriteriškumo klausimai. *Journal of Civil Engineering and Management*. Vilnius: Technika IX t., Nr. 3, 2003, p. 214–217.
72. Gwinner, K.; Hauber, E.; Jaumann, R.; Neukum, G. High–resolution, digital photogrammetric mapping – a tool for Earth science *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, Vol 81, No 44, 2000, p. 513, 516, 520.
73. Hancock, G. R.; Willgoose, G. R. The production of digital elevation models for experimental model landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol 26, No 5, 2001, p. 475–490.
74. Hassan, M.; Hutchinson, Ch. Natural Resource and Environmental Information for Decision Making. *World Bank Publication*, 1993, p. 157–159.
75. Hanssen, R. F. *Radar Interferometry – data interpretation and error nalysis*. Dordrecht / Boston / London, Kluwer, 2001, 308 p.
76. Heinrich, U. Flächenschätzungen mit geostatistischen Verfahren – Variogrammanalyse und Kriging. In: Schröder, W., Vetter, L. & Fränzle, O. (Hrsg.): *Neuere statistische Verfahren und Modellbildung in der Geoökologie*. Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden, 1994, p. 145–164.
77. Hickey, R. J. *Design and Simulation of Smelter Reclamation Strategies Using an Environmental Decision Suport System*. University of Idaho, 1994.
78. Hill, J. M.; Graham, L. A.; Henry, R. A. Wide–area topographic mapping and aplications using airborne LIght Detection and Ranging (LIDAR) technology. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol 66, No 8, 2000, p. 908–909, 911–914, 927.
79. Holmes, K. W.; Chadwick, O. A.; Kyriakidis, P. C. Error in a USGS 30–meter digital elevation model and its impact on terrain modeling. *Journal of Hydrology*, Vol 233, No 1–4, 2000, p. 154–173.
80. Hutchinson, M. F.; Stein, J. L.; Stein, J.A. Upgrade of the 9 second Australian digital elevation model. *Joint project of Cres and Auslig*, 2001. URL: <http://cres.anu.edu.au/dem/index.html> (2004.02.03).
81. Janssen, R. *Multiobjective Decision Suport for Environmental Management*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1992.

82. Janssen, R.; Rietveld, F. Multicriteria Analysis and Geographical Information Systems: An Application to Agricultural Land Use in the Netherlands. In: Scholten H., Stillwell J. (eds.), *Geographical Information Systems for Urban and Regional Planning*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1990, p. 129–142.
83. Janušaitis, R.; Liubinskaitė, R. Fasadų dažymo daugiakriterinis vertinimas tinklinio modelio mazgų „išpjovimo“ ir sprendimų daugiapakopės sintezės metodais. *Statyba*, VII t., Nr. 6, 2001, p. 468–473.
84. Joerin, F.; Theriault, M.; Musy, A. Using GIS and outranking multicriteria analysis for landuse suitability assessment. *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol 15, No 2, 2001, p. 153–174.
85. Johnston, K.; Ver Hoef, J. M.; Krivoruchko, K.; Lucas, N. *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*. Redlands CA, ESRI Press, 2001, 300 p.
86. Jones, C. B. Surface modeling, spatial interpolation, Chapter 12. *Geographical Information Systems, Computer Cartography*. Harlow, UK, Addison Wesley Longman, 1997, p. 197–213.
87. Jones, K. A comparison of two approaches to ranking algorithms used to compute hill slopes. *Proceedings, Fifth National Conference of GIS Research UK (GISRUK 97), Leeds, UK.*, 1997, p.79–82.
88. Kaklauskas, A. Pastato gyvavimo proceso modelis. *Naujos statybinės medžiagos, konstrukcijos ir technologijos*. Konferencijos straipsniai. Vilnius: Technika Nr. 4, 1999, p. 184–191.
89. Kaklauskas, A.; Kvederytė, N. Pastato visuotinės kokybės daugiakriterinis vertinimas. *Statyba ir architektūra*. Konferencijos pranešimų medžiaga, balandžio 8–10 d. Kaunas: Technologija, 1998, p. 223–228.
90. Kaklauskas, A.; Kvederytė, N.; Banaitis, A. Pastato gyvavimo proceso kompleksinė analizė. *Naujos statybinės medžiagos, konstrukcijos ir technologijos*. Konferencijos straipsniai. Vilnius: Technika Nr. 4, 1999, p. 274–279.
91. Kaklauskas, A.; Turskis, Z. Pastato gyvavimo proceso daugiakriterinio alternatyvino projektavimo metodas. *Naujos statybinės medžiagos, konstrukcijos ir technologijos*. Konferencijos straipsniai. Vilnius: Technika Nr. 4, 1994, p. 280–287.
92. Kaklauskas, A.; Zavadskas, E. K. *Internetinė sprendimų parama. Monografija*. Vilnius: Technika, 2002.
93. Kaklauskas, A.; Zavadskas, E. K.; Kvederytė, N. Vienbučių gyvenamųjų namų gyvavimo proceso daugiakriterinė analizė. *Statyba*, VI t., Nr. 3, 2000a, p. 179–192.

94. Kaklauskas, A.; Zavadskas, E. K.; Kvederytė, N. Decision suport system for Building Life Cycle. – 52nd. Meeting of the European Working Group. *Multicriteria aids for decisions*. Vilnius, Lithuania, October 5–6, 2000b, p. 18–20.
95. Kaklauskas, A.; Zavadskas, E. K.; Kvederytė, N. Pastato gyvavimo proceso daugiakriterinis alternatyvusis projektavimas (Multiple criteria multivariant design of a building life cycle). *Statyba*, VI t., Nr. 2, 2000c, p. 128–142.
96. Kaklauskas, A.; Zavadskas, E. K.; Kvederytė, N.; Simanauskas, L. The Decision Suport System for Multiple Criteria Analysis of Life Cycle of Building. *International Conference, „Information Technologies for Education, Science and Buisnes”*. Minsk: Belarus, 1999, p. 199–204.
97. Kaklauskas, A.; Zavadskas, E. K.; Sloan, B. Europos statybos pramonės daugiakriterinė kompleksinė analizė ir Centrinės bei Rytų Europos šalių ateities prognozės. *Socialiniai mokslai. Vadyba / KTU*, 4 t., Nr. 8, 1996, p. 68–73.
98. Katczinski, R. Digital aerial triangulation, DEM and ortophoto generation in IGIK. *Geodezija ir kartografija*, XXVI t., Nr. 3, 2000, p. 105–110.
99. Katczinski, R.; Ziobro, J. Digital aerial triangulation for DTM and ortophoto generation. *Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol 32, No 4, 1998, p. 281–283.
100. Keller, C. P.; Strap, J. D. Multicriteria Decision Suport for Land Reform Using GIS and API. In: Goodchild, M. F.; Steyaert, L. T.; Parks, B. O. (eds.), *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*. GIS World Inc., Fort Collins, 1996, p. 363–366.
101. Kervyn, F. Modelling topography with SAR interferometry – illustrations of a favourable and less favourable environment. *Computers and Geosciences*, Vol 27, No 9, 2001, p. 1039–1050.
102. Kyem, P. A. K. A Choice Heuristic Algorithm for Managing Land Resource Allocation Problems Involving Multiple Parties and Conflicting Interests. *Transactions in GIS*, Vol 5, No 2, 2000, p. 113–132.
103. Kyem, P. A. K. Embedding GIS Aplications into Resource Management and Planning Activities of Local Communities. A Desirable Innovation or a Destabilizing Enterprise. *Journal of Planning Education and Research*, Vol 20, No 1, 2001, p. 176–186.
104. Kyem, P. A. K. Promoting local community participation in forest management through a PGIS aplication in Southern Ghana. *Community Participation and Geographic Information Systems*. Taylor and Francis, 2002a, p. 218 – 231.
105. Kyem, P. A. K. Using GIS to Suport Multi–Objective Decision Making in Forest Management. An Experience from Ghana, West Afrika. *Multicriteria Evaluation in Forest Management*. Kluwer Academic Publisher, 2002b, p. 16–29.

106. Kumetaitienė, A. Application of elevation geomorphologic classification for checking the accuracy of digital elevation model. *Geodezija ir kartografija*, XXXI t., Nr. 2, 2005, p. 69–75.
107. Kumetaitienė, A.; Kumetaitis, A. Optimalaus skaitmeninio reljefo modelio sudarymo technologijos tobulinimas. *Geodezija ir kartografija*, XXXI t., Nr. 2, 2005, p. 57–61.
108. Kumetaitienė, A.; Kumetaitis, A. Urbanizuotos teritorijos 1:10000 mastelio ortofotografinio žemėlapio tikslumo analizė. *Geodezija ir kartografija*, XXVIII t., Nr. 2, 2002, p. 54–57.
109. Kumetaitis, A. Skaitmeninių reljefo modelių tikslumo tyrimas. *Geodezija ir kartografija*, XXVI t., Nr. 2, 2000, p. 79–83.
110. Kumetaitis, A. Skaitmeninio reljefo modelio sudarymas ir tobulinimas geostatistinėmis metodais. *Geodezija ir kartografija*, XXXt., Nr. 1, 2004, p. 29–34.
111. Kumetaitis, A.; Šimanskis, M.; Paršeliūnas, E.; Kumetaitis, Z.; Pupalaigis, O. Lietuvos Respublikos plotas geodeziniuose paviršiuose pagal skirtingų geoinformacinių sistemų duomenų bazių informaciją. *Geodezija ir kartografija*, XXIX t., Nr. 3, 2003.
112. Krupnik, A. Accuracy assessment of automatically derived digital elevation models from SPOT images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol 66, No 8, 2000, p. 1017–1023.
113. Lane, S. N.; James, T. D.; Crowell, M. D. Application of digital photogrammetry to complex topography for geomorphological research. *Photogrammetric Record*, Vol 16, No 95, 2000, p. 793–821.
114. Leberl, F. W. *Principles and Applications of Imaging Radar*. New York: John Wiley & Sons, 1998, p. 183–269.
115. Lein, J. K. Sensing sprawl: Towards the monitoring of urban expansion using Dempster–Shafer theory. *Geocarto International*, Vol 18, No 2, 2003, p. 61–70.
116. Leitner, M. The Impact of Data Quality Displays on Spatial Decision Support. *Software Demonstration, Science Day, NCGIA Board of Directors' Meeting*. SUNY, Buffalo, 1995.
117. Lemmens, M. J. P. Uncertainty in automatically sampled digital elevation models, Ch. 47. In Lowell, K.; Jaton, A. (eds.), *Spatial Accuracy Assessment – Land Information Uncertainty in Natural Resources*. Chelsea, MI: Ann Arbor Press, 1999, p. 399–407.
118. Lin, H.; Wan, Q.; Kong, Y. A GIS-based multicriteria evaluation for investment environment. *Environment and Planning B, Planning and Design*, Vol 24, No 3, 1997.
119. Little, J. J.; Shi, P. Structural lines, TINs, DEMs. *International Symposium on Spatial Data Handling 8th*, July 11–15. Vancouver BC, 1998, p. 627–636.
120. Little, J. J.; Shi, P. Structural lines, TINs, DEMs. In: Van Kreveld, M. (ed.), Special Issue on Algorithms for Geographic Information, *Algorithmica*, Vol 30, No 2, 2001, p. 243–263.

121. Lloyd, C. D. and Atkinson, P. M. Designing Optimal Sampling Configurations with Ordinary and Indicator Kriging. *University of Southampton, Department of Geography*, Southampton, SO17 1BJ, U.K., 1999.
122. López, C. An experiment on the elevation accuracy improvement of photogrammetrically derived DEM. *International Journal of Geographical Information Science*, Vol 16, No 4, 2002, p. 361–375.
123. Lunkevičius, S.; Ustinovičius, L.; Zavadskas, E. K. Daugiakriterinis kaimo statinių investicinių projektų efektyvumo vertinimas. *Statyba*, VII t., Nr. 3, 2001.
124. Makropoulos, C. K.; Butler, D.; Maksimovic, C. Fuzzy Logic Spatial Decision Support System for Urban Water Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol 129, No 1, 2003, p. 69–77.
125. Malczewski, J.; Moreno–Sanchez, R.; Bojorquez–Tapia, L. A. *Design and development strategy for multimedia GIS to support environmental negotiation, administration and monitoring at the regional level*. Department of Geography, The University of Western Ontario, 1996a.
126. Malczewski, J.; Moreno–Sanchez, R.; Bojorquez–Tapia, L. A.; Ongay–Delhumeau, E. Multicriteria group decision–making model for environmental conflict analysis in the Cape Region. *Journal of Environmental Planning and Management*, 1996b, p.349–374.
127. Malinauskas, P.; Petrašenko, T. Daugiabučių gyvenamųjų namų priežiūros proceso daugiakriterinė analizė. *Statyba*, VII t., Nr. 2, 2001.
128. Mark, D. M. The history of geographic information systems – invention re–Invention of triangulated irregular networks (TINS). *GIS/LIS'97*, Cincinnati, October 28–30, 1997, p. 267–272.
129. Maune, D. F. Digital Elevation Model Technologies and Applications, the DEM Users Manual. *American Society for Photogrammetry & Remote Sensing*. Bethesda, Maryland, 2001, 540 p.
130. McCartney, W.; Thrall, G. Real Estate Acquisition Decision With GIS: Ranking Property for Purchase with an Example from Florida's St. Johns Water Management District. *GIS/LIS Proceedings*. Atlanta, 1991, p. 90–99.
131. McKelvey, K. S.; Noon, B. R. Incorporating Uncertainties in Animal Location and Map Classification into Habitat Relationships Modeling. In: Hunsaker, C. T.; Goodchild, M. F.; Friedl, M. A.; Case, T. J. (eds.), *Spatial Uncertainty in Process Reengineering in Operations*. Riga, 2001, p. 54–55.
132. Mendes; J. F. G. Multi–criteria accessibility evaluation using GIS as applied to industrial location in Portugal. *Earth Observation Magazine*, Vol 10, No 2, 2001, p. 31–35.

133. Mendes, J. F. G.; Motizuki, W.S. Urban Quality of Life Evaluation Scenarios: The Case of São Carlos in Brazil University of São Paulo, Brazil. *CTBUH Review*, Vol 1, No 2, 2001.
134. Mitas, L.; Mitasova, H. General Variational Approach to the Interpolation Problem. *Comput. Math. Applic*, Vol 16, No 12, 1988, p. 983–992.
135. NASA. *Shuttle Radar Topography Mission*. U. S. National Aeronautics and Space Administration, 2002. URL: <http://www.jpl.nasa.gov/srtm> (2005.02.01).
136. Negahban, B.; Fonyo, C.; Campbell, K. L. LOADS: A GIS-Based Decision Support System for Regional Environmental Planning. In: Goodchild, M. F.; Steyaert, L. T.; Parks, B. O. (eds.), *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*. GIS World Inc., Fort Collins, 1996, p. 277–282.
137. Neves N.; Condessa, B. Decision Support Systems for Municipal Planning. In: Harts, J. J.; Ottens, H. F. L.; Scholten, H. J. (eds.), *EGIS/MARI Proceedings*, Paris, (1994). p. 734–745.
138. Nuth, V.; Pulliam, J.; Wilson, C. Migration of radar altimeter waveform data. *Geophysical Research Letters*, Vol 29, No 10, 2002, p. 131–1 to 131–4.
139. Oimoen, M. J. An effective filter for removal of production artifacts in U. S. Geological Survey 7.5-minute digital elevation models. *Conference on Applied Geologic Remote Sensing, 14th*, November 6–8. Las Vegas, NV, Proceedings: Ann Arbor, MI, Veridian ERIM International, 2000, p. 311–319. URL: <http://gisdata.usgs.net/ned/filter/index.html> (2004.11.15).
140. Oliver, M. A.; Webster, R. Kriging: a method of interpolation for geographical information system. *Geographical Information Systems*, Vol 4, No 3, 1990, p. 313–332.
141. Ollier, C. D. Geomorphic indications of contour map inaccuracy. *Cartography*, No 6, 1967, p. 121–124.
142. Øystein, A. *Fotogrammetri grunnkurs / Bind 1*. Norges Landbrukshøgskole, 1982, p. 160.
143. Park, D.; Cho, H.; Kim, Y. A TIN compression method using Delaunay triangulation. *International Journal of Geographical Information Science*, Vol 15, No 3, 2001, p. 255–269.
144. Patnam, K. C. Dynamic Modeling of the Interaction between Urban Transportation and Urban Landuse Change. *Proceedings Of The Fourth Joint International Symposium On Information Technology In Civil Engineering*, November 15–16, Reston, VA: ASCE, 0–7844–0704–5, 2004, p. 1–11.
145. Pereira, J. M. C.; Duckstein, L. A Multiple Criteria Decision-Making Approach to GIS-Based Land Suitability Evaluation. *International Journal of Geographical Information Systems*, No 5, 1993, p. 407–424.
146. Peterson, K. Spatial Decision Support Systems for Real Estate Investment Analysis. *International Journal of Geographical Information Systems*, No 4, 1993, p. 379–392.

147. Pike, R. J. The geometric signature—quantifying landslide—terrain types from digital elevation models. *Mathematical Geology*, No 20, 1988, p. 491–511.
148. Ramonaitis, V.; Kumetaitis A. Telekommunikationslösung aus Litauen. Planung und Beurteilung von Mobilfunknetzen. *Kranzberg: ESRI Geoinformatik GmbH*. Vokietija, 2002, p. 9–11.
149. Rees, W. G. The accuracy of digital elevation models interpolated to higher resolutions. *International Journal of Remote Sensing*, Vol 21, No 1, 2000, p. 7–20.
150. Reitsma, R. F. *Functional Classification of Space: Aspects of Site Suitability Analysis in a Decision Support Environment*. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, 1990.
151. Ribikauskas, A.; Vasilecas, O. Intelektualizuotų techninių informacinių sistemų architektūros. *Pranešimų medžiaga*. Kaunas: Technologija, 2001, p. 365–372.
152. Rimkuvienė, J.; Rimkus E. Maksimalių šiltojo laikotarpio lietais poplūdį sukėlusio kritulių kiekio įvertinimas. *Geografijos metraštis XXXIV t.*, Nr. 1, 2001, p. 170–181.
153. Ritchie, J. C. Airborne laser altimeter measurements of landscape topography. *Remote Sensing of the Environment*, Vol 53, No 2, 1995, p. 91–96.
154. Rivington, M.; Matthews, K. B.; Buchan, K. A Comparison of Methods for Providing Solar Radiation Data to Crop Models and Decision Support Systems. *Integrated Assessment and Decision Support: Proceedings of the 1st biennial meeting of the International Environmental Modelling and Software Society, 24 – 27 June 2002*, University of Lugano, Switzerland, 2002, p. 193–198.
155. Rivington, M.; Matthews, K. B.; Buchan, K. Quantifying the uncertainty in spatially—explicit land—use model predictions arising from the use of substituted climate data. *International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM) 4*, 14–17 July 2003, p. 1528–1533.
156. Ruzgienė, B.; Žalnierukas, A. Aerotrianguliacija naudojant kinematinio GPS metodo rezultatus. *Geodezija ir kartografija*, XXIV t., Nr. 1, 1998, p. 118 – 122.
157. Scholten, H.; Stillwell, J. *Geographical Information Systems for Urban and Regional Planning*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1990.
158. Shortridge, A. M. Characterizing uncertainty in digital elevation models. *Spatial Uncertainty in Ecology – Implications for Remote Sensing and GIS Applications*: New York, Springer, 2001, p. 238–257.
159. Shih, L.–H.; Lin, Y.–T. Multicriteria Optimization for Infectious Medical Waste Collection System Planning. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, Vol, No 2, 2003, p. 78–85.

160. Shim, K.C.; Fontane, D. G.; Labadie, J. W. Spatial Decision Support System for Integrated River Basin Flood Control. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol 128, No 3, 2002, p. 190–201.
161. Skidmore, A. K. A comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model. *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol 3, No 4, 1989, p. 323–334.
162. Slatton, K. C.; Crawford, M. M.; Evans, B. L. Fusing interferometric radar and laser altimeter data to estimate surface topography and vegetation heights. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol 39, No 11, 2001, p. 2470–2482.
163. Small, D. *Generation of Digital elevation Models Through Spaceborne SAR Interferometry*. Department of Geography, Univ. Zurich, Remote Sensing Series, 1998, 150 p.
164. Smith, L. C. Emerging applications of interferometric synthetic aperture radar (InSAR) in geomorphology and hydrology. *Annals of the Association of American Geographers*, Vol 92, No 3, 2002, p. 385–398.
165. Stoffel, A. *GIS als Instrument zur ökologischen Wertanalyse*. Geographisches Institut der Universität in Zürich, Geo-Processing 19, 1992.
166. Strassert, G. *Das Abwägungsproblem bei multikriteriellen Entscheidungen. Grundlagen und Lösungsansatz – unter besonderer Berücksichtigung der Regionalplanung*. Peter Lang Verlag, Frankfurt am Main, 1995.
167. Šaparauskas, J. Daugiakriterinis pastatų įvertinimas darnos požiūriu. *Journal of Civil Engineering and Management*. Vilnius: Technika IX t., Nr. 4, 2003, p. 234–240.
168. Šarka, V.; Ustinovičius, L.; Zavadskas, E. K. Projektų sintezė naudojant kompromiso kompensacinius modelius statyboje. *Statyba*, V t., Nr. 6, 1999.
169. Toutin, T. Error tracking of Radargrammetric DEM from RADARSAT images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol 37, No 5, 1999, p. 2227–2238.
170. Travis, M. R.; Elsner, G. H.; Iverson, W. D. and Johnson, C. G. *VIEWIT: Computation of seen areas, slope and aspect for land-use planning*. U.S. Department of Agriculture Forest Service General Technical Report PSW 11/1975. Pacific Southwest Forest and Range Experimental Station, Berkley, California, 1975.
171. Trinkūnas, V. Statybinių medžiagų ir gaminių pirkimų sprendimų paramos internetinė sistema. Daktaro disertacija. Vilnius: VGTU, 2003.
172. Turner, M. G. Landscape Ecology – The Effect of Pattern on Process. *Rev. Ecol. Syst.*, No 20, 1989, p. 171–197.
173. Ustinovičius, L. Determining integrated weights of attributes. *Statyba*, VII t., Nr. 4, 2001.

174. Ustinovičius, L.; Stasiulionis, A. Komercinių objektų statybos vietos parinkimo vertinimas įvairiais aspektais. *Statyba*, VII t., Nr. 6, 2001, p. 474–480.
175. Varma, V. K.; Ferguson, I. S.; Wild, I. Decision suport system for the sustainable forest management. Proceedings of the First International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry. *Decision Suport, Technology and Aplications*. Lake Buena Vista, Florida, June 1–3, 1998.
176. Velden, H.E.; Kreuwel, G. A Geographical Information System Based Decision Suport System for Environmental Zoning. In: Scholten, H.; Stillwell, J. (eds), *Geographical Information Systems for Urban and Regional Planning*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1990, p. 119–128.
177. Vriens, D.; Hendriks, P. H. J. How to define problems: a systemic aproach. In: Timmermans, H. (ed.), *Decision Suport Systems in architecture and urban planning*. London: Chapman & Hall, 1995.
178. Ware, J. M.; Kidner, D. B. A flexible storage-efficient TIN data model. In: Hodgson, S.; Harts, J. J. (eds.), *Joint European Conference on Geographical Information, 3rd*. Vienna, Austria, Proceedings: Amsterdam: IOS Press, 1997, p. 48–57.
179. Watson, P. M.; Wadsworth, R. A. A Computerised Decision Suport System for Rural Policy Formulation. *International Journal of Geographical Information Systems*, No 4, 1996, p. 425–440.
180. Wood, J. The geomorphological characterisation of Digital Elevation Models. *PhD Thesis, University of Leicester, UK*. (1996). URL: http://www.geog.le.ac.uk/jwo/research/dem_char/thesis (2004.04.25).
181. Wood, J. Modelling the continuity of surface form using digital elevation models. In: Poiker T. and Chrisman N. (eds.). *Proceedings, 8th International Symposium on Spatial Data Handling, IGU, Vancouver*, 1998, p. 725–736.
182. Wright, G. G.; Matthews, K. B.; Cadell, W. M.; Milne, R. Reducing the cost of multi-spectral remote sensing: combining near-infrared video imagery with colour aerial photography. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol 38, No 3, 2003a, p. 175–198.
183. Wright, G. G.; Taping, J.; Matthews, K. B.; Wright, R. Combining Metric Aerial Photography and Near-infrared Videography to Define Within-field Soil Sampling Frameworks. *Geocarto International*, Vol 18, No 4. (2003b). URL: <http://www.mluri.sari.ac.uk/LADSS/papers/wright.pdf> (2004.09.26).
184. Zalieckaitė, L.; Brazaitis, Z. Sprendimų paramos sistemų plėtra: informacinis aspektas. *Informacijos mokslai. Internetinis VU leidinys*, Nr. 22, 2002. URL: <http://www.leidykla.vu.lt/inetleid/inf-mok/22/tomas22.html>.

185. Zavadskas, E. K.; Kaklauskas, A. *Pastatų sistemotechninis įvertinimas*. Vilnius: Technika, 1996.
186. Zavadskas, E. K.; Kaklauskas, A.; Banaitis, A. Gyvenamosios statybos tikslų sisteminimas. *5-osios tarptautinės konferencijos "Naujos statybinės medžiagos, konstrukcijos ir technologijos", įvykusios Vilniuje 1997 m. gegužės 21–24 d., straipsniai*. Vilnius: Technika, Nr. 4, 1997, p. 152–159.
187. Zavadskas, E. K.; Kaklauskas, A.; Bejder, E. *Multiple Criteria Analysis of Projects*. Aalborg, Denmark: Aalborg Universitetscenter, 1992.
188. Zavadskas, E. K.; Kaklauskas, A.; Bejder, E. Raising the Efficiency of building Lifetime with Special Emphasis on Maintenance. *Facilities Management in Central Europe and Commonwealth of Independent States*. Konferencijos pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika, 1998, p. 28–37.
189. Zavadskas, E. K.; Kaklauskas, A.; Bejder, E.; Motekunas, T. *Pastato statybos ir eksploatacijos daugiataikslė selektonovacija*. Vilnius: Technika, 1992.
190. Zavadskas, E. K.; Kaklauskas, A.; Kvederytė, N. *Pastato gyvavimo proceso daugiakriterinė analizė*. Vilnius: Technika, 2001.
191. Zavadskas, E. K.; Kaklauskas, A.; Lepkova, N.; Zalatorius, J. Pastatų ūkio valdymo daugiakriterinė analizė. *Statyba*, VII t., Nr. 6, 2001, p. 481–489.
192. Zavadskas, E. K.; Kaklauskas, A.; Turskis, Z. Multicriteria Decision Making System for Building Refurbishment. *Statyba*, 4 t., Nr. 12, 1997, p. 62–67.
193. Zavadskas, E. K.; Kaklauskas, A.; Turskis, Z.; Ambrasas, G. Hierarchical Refurbishment Decision Support System. *International Conference "Information Technologies for Education, Science and Business"*, Minsk: Belarus, 1999, p. 22–26.
194. Zavadskas, E. K.; Kaplinski, O.; Kaklauskas, A.; Brzezinski, J. Expert systems in construction. *Trends, potential & applications*. Vilnius: Technika, 1995.
195. Zavadskas, E. K.; Peldschus, F.; Kaklauskas, A. Multiple Criteria Evaluation of Projects in Construction. *Institute of Technological and Economic Development (ITED)*. Vilnius: Technika, 1994.
196. Zevenbergen, L. W.; Thorne, C. R. Quantitative Analysis of Land Surface Topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, No 12, 1987, p. 47–56.
197. Zhu, H.; Eastman, J. R. and Toledano, J. Triangulated irregular network optimization from contour data using bridge tunnel edge removal. *International Journal of Geographical Information Science*, Vol 15, No 3, 2001, p. 271–286.

198. Zakarevičius, A. *Dabartinių vertikalių žemės plutos judesių Lietuvos teritorijoje tyrimas*. Vilnius: Technika, 1994, 276 p.
199. Žalnierukas, A.; Kumetaitienė, A. Topografinių duomenų bazių, sukurtų stereofotogrametriniu būdu, taškų altitudžių tikslumas. *Geodezija ir kartografija*, XXV t., Nr. 3, 1999, p. 113–118.
200. Žalnierukas, A.; Kumetaitienė, A.; Stankevičius, Ž. Skaitmeninio žemėlapių, sudaryto stereofotogrametriniu metodu, tikslumas. *Geodezija ir kartografija*, XXV t., (2); (1999), p. 60–68.
201. Žalnierukas, A.; Ruzgienė, B.; Sužiedelytė, J. Miesto GIS bazinio žemėlapių sudarymas stereofotogrametriniu metodu. *Geodezija ir kartografija*, 2 t., Nr. 24, 1996, p. 78–85.