

## SKAITMENINIO RELJEFO MODELIO SUDARYMAS IR TOBULINIMAS GEOSTATISTINIAIS METODAIS

Algirdas Kumetaitis

Geodezijos ir kadastro katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,  
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius-40, Lietuva, el. paštas: [Algirdas.Kumetaitis@bite.lt](mailto:Algirdas.Kumetaitis@bite.lt)

[iteikta 2003 12 21, priimta 2004 02 10

**Santrauka.** Straipsnyje analizuojami skaitmeninio reljefo modelio sudarymo ir tikslumo įvertinimo metodai. Modeliuojant paviršių stačiakampio rastro modeliu, didžiausias tikslumas (vidutinė kvadratinė paklaida  $m_f = 3,03$  m) pasiektas sudarant skaitmeninį reljefo modelį (SRM) universaliojo kriginio metodu. Palyginus paviršiaus modelius, sudarytus taikant netaisyklingą trikampių tinklą (TIN), buvo gauti analogiški rezultatai ( $m_f = 3,07$  m). Sudarant didesnės teritorijos skaitmeninius paviršiaus modelius didesniai tikslumui pasiekti siūloma suskaidyti nagrinėjamą teritoriją, skirstant paviršių pagal reljefo įvairovę ir žemėnaudos tipą bei kiekvienai šių teritorijų eksperimentiniu būdu parenkant tinkamiausią paviršiaus modeliavimo metodą. Straipsnyje pateikiama, kad geriausių rezultatų pasiekama, kai SRM vertinamas ne tik pagal pavienius aukščių taškus, bet ir pagal eksperimentinį paviršiaus modelio fragmentą, sudarytą iš tikslesnių aukščių duomenų. Modeliuojant paviršių, įvertinamas ne tik sudaromo modelio tikslumas, bet ir pradinių duomenų tikslumas.

**Raktažodžiai:** skaitmeninis reljefo modelis, geostatistinis paviršiaus modeliavimas, universalusis kriginas.

### 1. Įvadas

Geostatistinis paviršiaus modeliavimas – santykinai nauja paviršiaus modeliavimo šaka. Taikomi ne tik sudėtingi paviršiaus modeliavimo algoritmai, bet ir statistiniai matavimo duomenų apdorojimo metodai kartu su ekspertinėmis sprendimų paramos sistemomis, pagrįstomis daugiakriterinės duomenų analizės metodais. Randamos kintamųjų, esančių tarp atsitiktinai pasirinktų ir išmatuotų paviršiaus taškų, reikšmės. Pagalbiniai kintamieji aprašo geografinių taškų pasiskirstymą [1, 2]. Modeliuojamas plotas, paviršiaus forma, orientacija ir erdvinis išsidėstymas – pagrindinės charakteristikos, turinčios įtakos, skaičiuojant nežinomus paviršius. Keičiantis bet kuriai iš šių charakteristikų, keisis ir nežinomosios reikšmės. Pagalbiniai kintamieji parenkami, modelio parametrai nustatomi, skaičiavimai atliekami taip, kad tiriamo paviršiaus kitimą būtų galima pavaizduoti horizontalėmis.

Straipsnyje nagrinėjami geostatistiniai paviršiaus modeliavimo metodai. Sudarytas skaitmeninis reljefo modelis lyginamas su rezultatais, gautais modeliuojant paviršių kaip netaisyklingą trikampių tinklą.

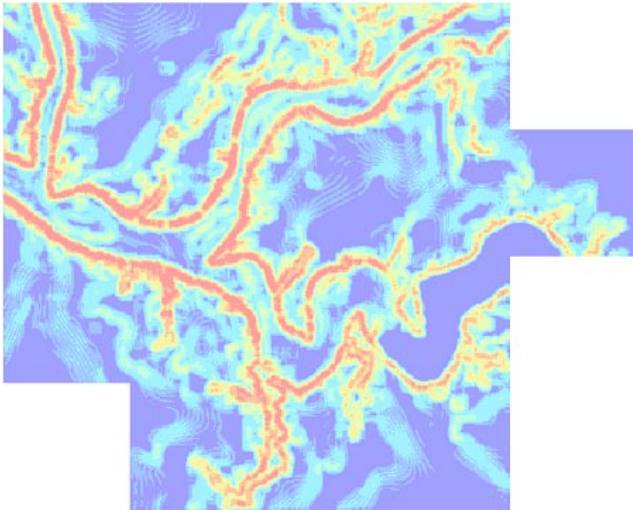
### 2. Lietuvos teritorijos skirstymas pagal reljefo tipą

Lietuvos teritorijos reljefo modelis buvo sudarytas ANUDEM metodu [3]: interpoliuojant reljefo modelį, panaudojami taškiniai, linijiniai ir plotiniai duomenys. Tyrimas parodė, kad reljefo paklaidos visoje Lietuvos teritorijoje pasiskirsčiusios netolygiai ir priklauso nuo reljefo tipo. Šiam tyrimui buvo sudarytas reljefo kintamumo žemėlapis (1 pav.), kur skirtingomis spalvomis pavaizduotas reljefo kitimas. Žemėlapis sudarytas pagal sveikosiomis reikšmėmis nusakomo reljefo modelį. Tyrimui atlikti paviršius buvo suskaidytas į 300 m dydžio kvadratus ir analizuota, kiek skirtingų ląstelių reikšmių yra paviršiaus imtyje. Pagal skirtingų aukščių reikšmių skaičių reljefas buvo suskirstytas į 4 kategorijas. Tuomet apskaičiuotos paklaidos kiekvienoje reljefo kategorijoje (1 lentelė). Matome, kad didžiausios paklaidos (3,38 m) teritorijų, kur didžiausi reljefo pokyčiai. Mažiausios – teritorijų, kur aukščių reikšmių įvairovė mažiausia.

1 lentelė. Skirtingų reljefo kategorijų vidutinės kvadratinės paklaidos kitimas

Table 1. Variation of standard errors of DEM in different type of surface

Kodas	Reljefo tipas	Aukščių reikšmių skaičius, vnt.	Vidutinė reljefo paklaida, m	Mediana	Vidutinė kvadratinė reljefo paklaida $m_f$ , m
1	lyguma	247	0,05	0,02	2,52
2	mažas reljefo pokytis	290	0,96	0,49	3,07
3	vidutinis reljefo pokytis	290	0,46	0,47	3,27
4	didelis reljefo pokytis	84	0,79	1,71	3,39
	Iš viso	911	0,54	0,35	3,24



**1 pav.** Reljefo kintamumo žemėlapis  
**Fig 1.** Terrain surface variability map

Siekiant išsiaiškinti kitas paklaidų kaupimosi tendencijas, buvo atliktas tyrimas – nagrinėta, ar vidutinės paklaidos dydis priklauso nuo žemėnaudos rūšies. Tam visa Lietuvos teritorija buvo suskirstyta į 9 skirtingas žemėnaudos kategorijas (2 lentelė). Nepastebėjus koreliacijos tarp reljefo paklaidų dydžio ir žemėnaudos tipų, buvo analizuojamas kontrolinių taškų išsidėstymas ir taškų skaičius kiekvienoje žemėnaudos kategorijoje bei šių žemėnaudos tipų teritorijų plotai.

Tyrimas parodė, kad kai kurių žemėnaudų kategorijų teritorijose kontrolinio paviršiaus modelio taškai išdėstyti netinkamai ir jų tankumas nepakankamas. Kadangi skirtingų žemėnaudos kategorijų plotai Lietuvos teritorijoje nevienodi (labai mažą jos plotą užima upių slėniai), todėl tolygiai išsidėstę kontroliniai taškai šiuose platuose reljefo beveik neatspindi (2 pav.). Norint ištirti reljefo modelio vidutinių kvadratinų paklaidų dydžio

priklausomybę nuo žemėnaudos tipo, reikalingas detalus paviršiaus modelis, sudarytas parinkus optimalų metodą.

### 3. Optimalių paviršiaus modeliavimo parametru parinkimas

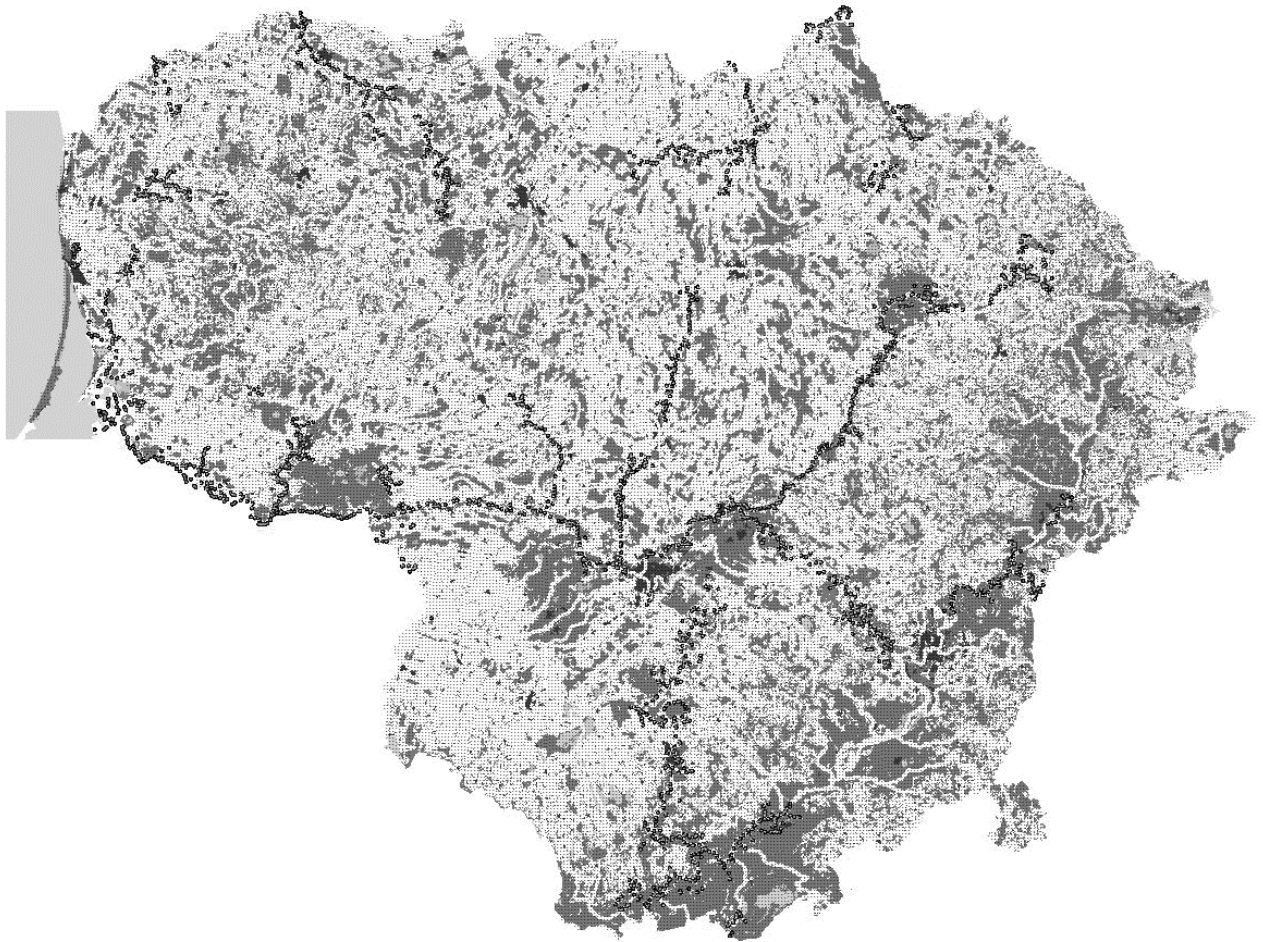
Ieškant optimalaus metodo pasirinktos teritorijos reljefui modeliuoti buvo sudaryta 10 eksperimentinių skaitmeninių paviršiaus modelių. Trys modeliai buvo sudaryti paviršių suskirstant trikampiais, keturi modeliai – kriginio metodais, atliekant reljefo tikslumo tyrimą. Iš reljefo modelio tikslumo tyrimų paaiškėjo, kad sudarant skaitmeninį paviršiaus modelį, reikia taikyti trupmenines paviršiaus parametru reikšmes. Taikant sveikąsias paviršiaus modelio parametru reikšmes, gautas mažesnio tikslumo paviršiaus modelis. Apie didžiausią sveikųjų reikšmių tipo paviršiaus modelio trūkumą bylojo nubraižyti raižyto paviršiaus vietovių profiliai (3 pav.).

Iš 3 pav. matome, kad paviršiaus kontūrai sveikųjų reikšmių tipo modelyje linksta terasomis. Todėl straipsnyje rekomenduojama atliekant skaičiavimus, kuriuose būtina remtis sveikųjų reikšmių tipo paviršiaus modeliu, taikyti tokį šio tipo modelį, kurio ląstelių reikšmės išreikštos sveikaisiais decimetrais, centimetrais arba milimetrais.

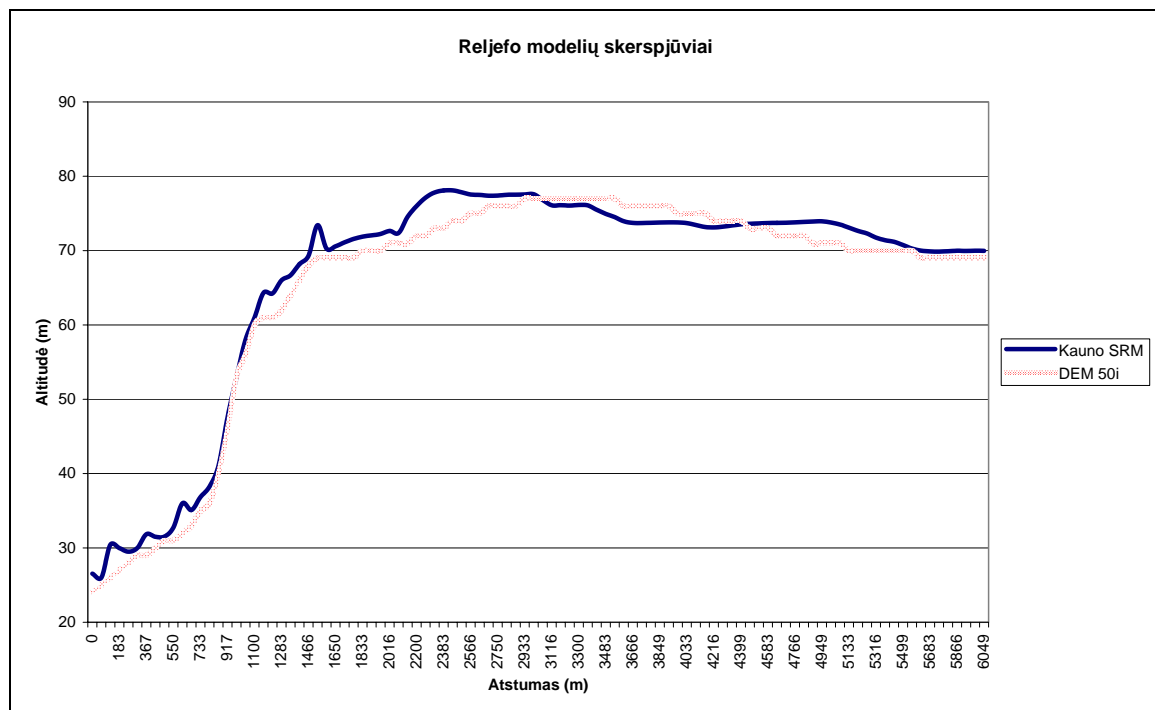
Remiantis žemėnaudos kategorijų sluoksnio žemėlapyje informacija, tirta, ar paklaidos dydis priklauso nuo žemėnaudos nagrinėjamame plote tipo, ar skirtingi modeliavimo metodai yra pranašesni, modeliuojant paviršių skirtingo reljefo ir skirtingų žemėnaudų sluoksnių teritorijose. Tyrimas parodė, kad paviršiaus modelio tikslumas mažėja, kai vietovės raižytos, ir yra tiesiog proporcingas paviršiaus nuolydžiams tiriamoje teritorijoje. Nustatyta, kad geriausi rezultatai gaunami modeliuojant reljefą universaliojo kriginio metodu. Šio modelio paviršiaus profilis mažiausiai skiriasi nuo didesnio tikslumo 1:10 000 reljefo profilio (4 pav.).

**2 lentelė.** Vidutinės kvadratinės reljefo paklaidos kitimas skirtingo žemėnaudos tipo platuose  
**Table 2.** Variation of standard errors of DEM in areas of different land use categories

Kodas	Žemėnaudos tipas	Kiekis, vnt.	Vidurkis, m	Mediana	Vidutinė kvadratinė paklaida $m_f$ , m
1	daugiaaukščiai statiniai	247	0,05	0,02	2,52
2	miestas	290	0,96	0,49	3,07
3	užstatyta teritorija	84	0,79	1,71	3,39
4	miškai	290	0,46	0,47	3,27
5	sodai	47	0,71	-0,25	3,77
7	dirbama žemė	338	0,36	0,58	3,42
9	upės	14	5,38	4,95	1,31
10	ežerai	8	-0,26	-1,02	3,51
100	upių ir ežerų krantai	237	0,54	0,06	3,44
	Iš viso	1555	0,54	0,35	3,24



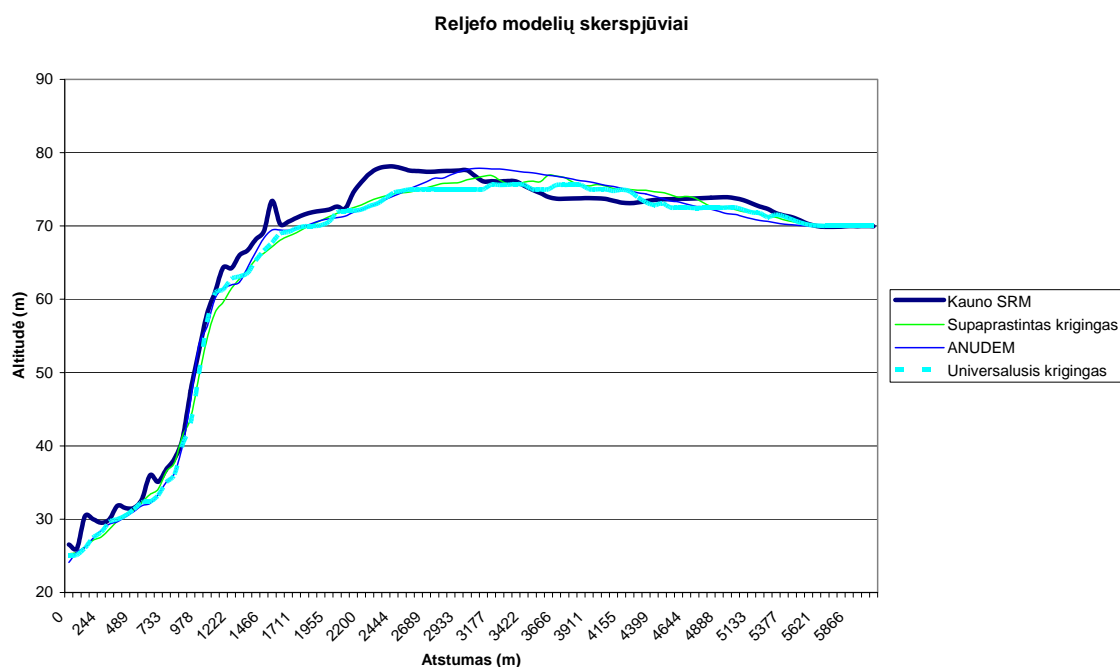
**2 pav.** Kontrolinių aukščio taškų išsidėstymas žemėnaudos kategorijų sluoksnyje  
**Fig 2.** Distribution of height points in land use layer



**3 pav.** Sveikųjų reikšmių tipo paviršiaus modelio profilis  
**Fig 3.** Profile of integer DTM

**3 lentelė.** Statistiniai reljefo modelių paklaidų parametrai  
**Table 3.** Statistical parameters of DTM errors

Paviršiaus modeliavimo metodas	Kontrolinių taškų sk.	Vidurkis, m	Dispersija, m	Vidutinė kvadratinė paklaida, $m_f$ , m	Minimumas, m	Maksimumas, m	Asimetrijos koeficientas	Eksceso koeficientas
<i>DISJ_KRIG</i>	1555	0,44	10,45	3,23	-9,37	9,57	-0,08	1,73
<i>H2000</i>		0,54	10,47	3,24	-9,71	9,99	0,64	4,92
<i>IDW</i>		0,47	10,54	3,25	-8,83	9,71	-0,02	0,51
<i>ORKRIG</i>		0,50	11,12	3,33	-11,32	9,74	-1,38	2,98
<i>RBF</i>		0,60	11,68	3,42	-8,73	19,14	10,34	21,90
<i>SIMP_KRIG</i>		0,38	11,08	3,33	-9,34	9,84	-0,35	2,04
<i>TIN_HARD</i>		0,53	9,41	3,07	-9,94	9,08	0,75	2,27
<i>TIN_PTS</i>		0,54	9,39	3,06	-9,91	9,11	0,84	2,25
<i>TIN_SOFT</i>		0,53	9,41	3,07	-9,94	9,08	0,75	2,27
<i>UNIV_KRIG</i>		0,50	9,18	3,03	-8,56	9,84	1,23	2,61



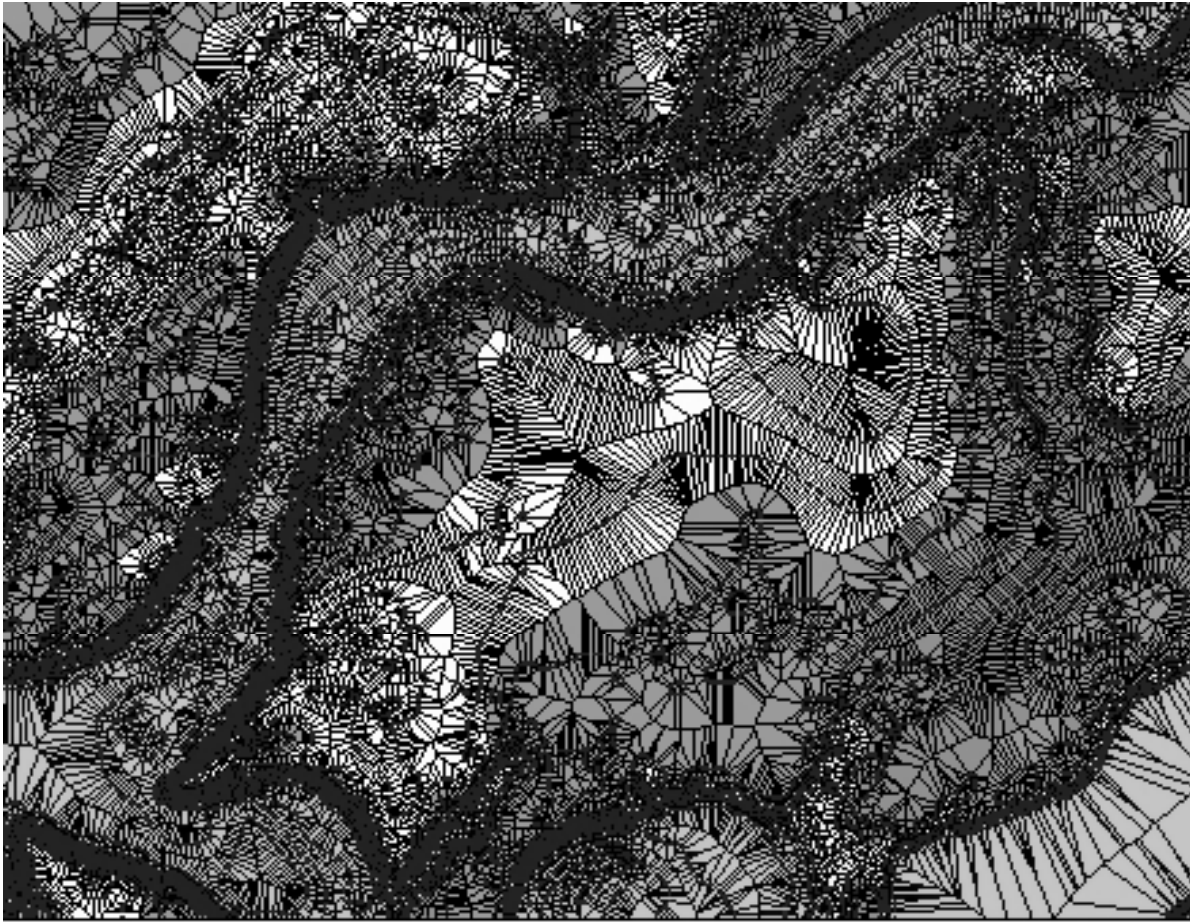
**4 pav.** Rastrinių paviršiaus modelių profiliai  
**Fig 4.** Profiles of gridded surface

#### 4. SRM tikslinimas taikant netaisyklingą trikampį tinklą (*TIN*)

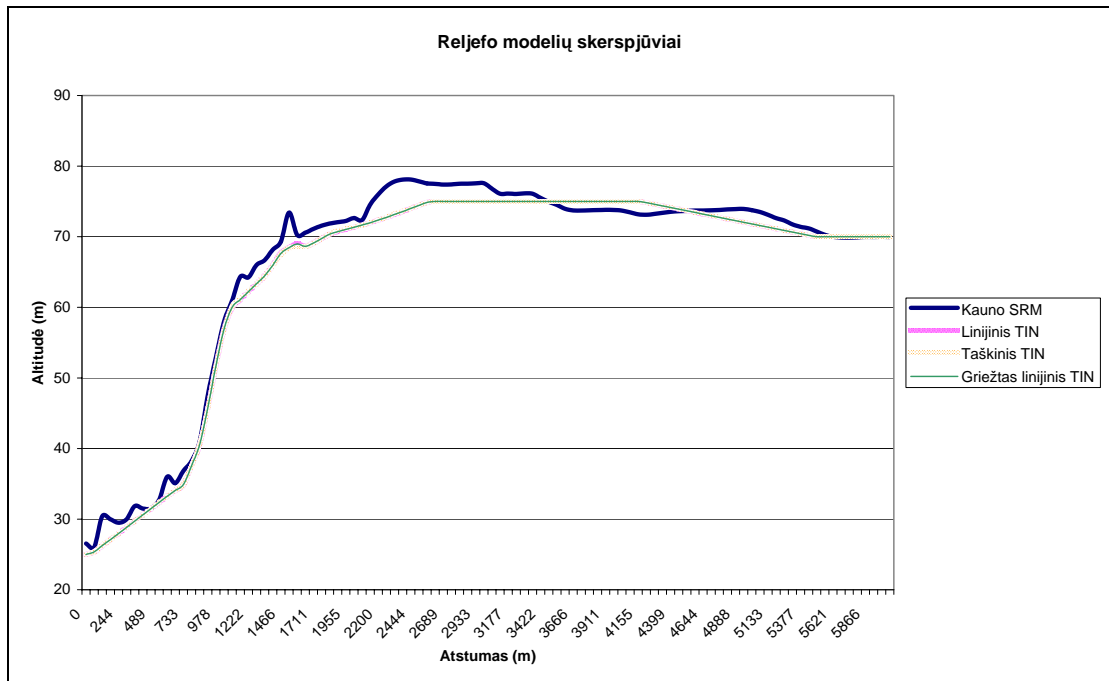
Paviršiaus modelio, pagrįsto netaisyklingu trikampį tinklu (*TIN*), taikymas sudarant tikslus skaitmeninius paviršiaus modelius yra perspektyvi paviršiaus modeliavimo kryptis [4]. Šio modelio pranašumas – netaisyklinga trikampė struktūra (5 pav.), savo forma tiksliai atkartojanti natūralius paviršius. Taip pat netaisyklinga struktūra leidžia išvengti parametru pertekliaus lygumų teritorijose ir perteikti visą raižyto reljefo plotų reljefo sudėtingumą. Kitas *TIN* privalumas – galimybė tiesiogiai, netaikant interpoliavimo metodų, panaudoti pradinis matavimų duomenis paviršiaus

modeliui sudaryti [5]. *TIN* metodu sudaryti paviršiaus modeliai nuo sudarytųjų universaliojo kriginio metodu (6 pav.) tikslumu atsilieka labai mažai (3 lentelė). Vertinant įvairias paviršiaus kategorijas, matomas *TIN* modelio pranašumas kitų paviršiaus modeliavimo metodų atžvilgiu teritorijų, kur yra didesnė reljefo įvairovė.

Didelis skaidymo trikampiais privalumas – galimybė naujus paviršiaus duomenis tiesiogiai įtraukti į paviršiaus modelį, perskaičiuojant ne visą tinklą, o tik aktualias vietas [6]. Taip pat paviršiui sudaryti galima tiesiogiai panaudoti ne tik aukščių taškus, bet ir plotus su tam tikromis aukščių reikšmėmis (hidrografijos objektų bei horizontales.



5 pav. Delauney trianguliacija  
Fig 5. Delauney triangulation



6 pav. TIN paviršiaus modelių profiliai  
Fig 6. Profiles of TIN surface

## 5. Išvados

1. Modeliuojant paviršių pagal stačiakampio rastro modelį, didžiausias tikslumas pasiektas sudarant SRM universaliojo kringo metodu ( $m_f = 3,03$  m). Paviršių modeliuojant *TIN* metodu gauti analogiški rezultatai ( $m_f = 3,07$  m).

2. Sudarant didesnės teritorijos skaitmeninius paviršiaus modelius, didesniame tikslume pasiekti siūloma nagrinėjama teritoriją suskaidyti į tam tikras teritorijas, skirstant paviršių pagal reljefo įvairovę ir žemėnaudos tipą bei kiekvienai iš šių teritorijų eksperimentiniu būdu parenkant tinkamiausią paviršiaus modeliavimo metodą.

3. Paviršiaus tikslumas turi būti vertinamas atsižvelgiant į visumą veiksnių: bendrąsias ir tam tikrų teritorijų aukščių taškų paklaidas, tęstinio paviršiaus modelio paklaidas, reljefo skerspjūvių tikslumą.

4. Geriausi rezultatai pasiekti, SRM vertinant ne tik pagal pavienius aukščių taškus, bet ir pagal eksperimentinį paviršiaus modelio fragmentą, sudarytą iš didesnio tikslumo aukščių duomenų.

## Literatūra

1. Isaaks, E. H. and Srivastava, R. M. An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford: Oxford University Press, 1989. 592 p.
2. Davis, J. Statistics and data analysis in geology. New York: Wiley, 1986. 564 p.
3. Hutchinson, M. F. ANUDEM version 4. 6. 3. Canberra, Centre for Resources, Environmental Studies, Australian National University, 2001.  
<http://cres.anu.au/software/anudemtxt.html>
4. Rocchini, C.; Cignoni, P.; Ganovelli, F.; Montani, C.; Pingi, P.; Scopigno, R. Marching Intersections: an Efficient Resampling Algorithm for Surface Management. International Conference on Shape Modeling and Applications (SMI 2001). Genova, Italy, May 7–11, 2001, p. 296–305.
5. Environmental Systems Research Institute (ESRI), Inc. Arc/Info, Surface Modelling with TIN. User's Guide. Redlands, CA: ESRI, 1992. 431 p.
6. Little, J. J., Shi, P. Structural lines, TINs, DEMs. Proc. of International Symposium on Spatial Data Handling 8th, July 11–15, Vancouver BC, 1998, p. 627–636.