

### 3. Modelarea digitală a terenului

În sensul prezentat în [Hengl et al., 2003], modelarea digitală a terenului este un set de tehnici prin care se obține un model numeric altitudinal (*Digital Elevation Model*, DEM). Însă, după cum este de așteptat, modelarea suprafeței terestre, reprezentarea sa într-un spațiu virtual, comportă anumite probleme care țin de specificul suprafeței, în sine și de modul nostru de a o măsura.

Modelele numerice altitudinale, o dată realizate, își găsesc utilitatea ca date de input pentru derivarea unor atribute topografice [Wilson, Gallant, 2000], a unor parametri geomorfometrici, a unor variabile morfometrice [Shary et al., 2002] sau a unor informații generale [Martinoni Daria, 2004] despre terenul respectiv.

#### 3.1. Sursele de date altitudinale

Sunt cele care provin din măsurarea altitudinii suprafeței terestre. În prezent există cinci surse principale de date altitudinale [Hengl et al., 2003]:

- ridicări topografice;
- aerofotograme;
- hărți, planuri topografice deja existente;
- scanare laser din avion;
- imagini satelitare stereoscopice sau radar.

Dintre acestea, datele furnizate de scanarea laser din avion prezintă cea mai mare acuratețe. De asemenea, se pot obține atât altitudinea suprafeței topografice, cât și cea a obiectelor de pe aceasta, clădiri, linii de înaltă tensiune putându-se astfel determina volumele obiectelor. Imaginile satelitare obținute prin intermediul radarului sunt a doua sursă foarte precisă. Poate fi dat ca exemplu programul SRTM (*Shuttle RADAR Topography Mission*), care în februarie 2000 a determinat altitudinea pentru aproximativ 80% din suprafața terestră, furnizând astfel primul set global de date altitudinale, continue, la rezoluții spațiale bune: 1 arc-secundă (aproximativ 30 m), disponibile gratuit pentru SUA și contra cost pentru restul lumii, distribuite de NASA, și 3 arc-secunde (aproximativ 60 m la latitudinea României), disponibile gratuit pe site-ul USGS\*. Versiunea actuală a acestor date oferă o acuratețe verticală de 20 metri și orizontală de 16 metri (față de 80 m acuratețea verticală a primelor versiuni..).

În Tab.3. 1 sunt prezentate succint principalele caracteristici ale metodelor de achiziție a datelor de altitudine. Față de acestea, care furnizează datele într-o reprezentare spațială continuă, practic direct ca DEM-uri, hărțile rezultate în urma ridicărilor topografice sunt o sursă mai accesibilă, însă au dezavantajul că suprafața terestră este reprezentată discontinuu, prin curbe de nivel și cote. Cu alte cuvinte altitudinea este măsurată în puncte de prelevare. Și, în plus, conțin deja o serie de erori de reprezentare a altitudinii, provenite fie din erori de măsurare, în etapa de ridicare topografică, sau din generalizarea suprafeței. Dar ca

---

\* <http://seamless.usgs.gov/>

avantaj, oferă un control mai mare asupra modului de realizare a modelului, utilizatorul având la dispoziție algoritmi diferiți de interpolare și posibilitatea de a-i modifica.

Parcursul tipic, urmărit și în lucrarea de față, de la harta topografică tipărită la modelul numeric altitudinal digital presupune:

- scanarea și georeferențierea hărții topografice: rezultă o imagine digitală care însă nu are nici o semnificație pentru modelarea terenului, fiind pur și simplu o fotografie;
- vectorizarea hărții scanate: rezultă o bază de date spațiale, cu elemente diferite: curbe de nivel, puncte cotate, rețea hidrografică, limite. Nici acestea nu sunt încă modele numerice altitudinale, întrucât prezintă suprafața terestră fragmentat, cu valori de altitudine doar pe curbele de nivel și în punctele cotate;
- interpolarea punctelor de prelevare: în urma acestei operații se obține modelul numeric altitudinal, ca formă de reprezentare spațială continuă a topografiei.

Metoda de colectare	Descriere	Exemple de sisteme utilizate	Acuratețea tipică a DEM-urilor
Ridicare topografică	- cea mai mare acuratețe; - densitate mică a punctelor de prelevare; - costuri foarte mari	- sistemele DGPS; - tahimetrie cu stație totală; - sisteme de nivelment	< 1 m 1 mm – 1m ≈ 1mm
Imagistică stereoscopică	- densitate mare a punctelor de prelevare; - poate fi parțial sau complet automatizată; - pot apărea erori induse de vegetație	- fotografii aeriene; - imagini satelitare (SPOT, ASTER)	0,1 – 1 m 10 m (20 m)
Scanare laser	- scannerul laser este montat în avion, care este dotat cu sistem de navigație prin GPS; - datele brute necesită filtrare și <i>resampling</i> înainte de a putea fi folosite; - poate penetra frunzișul vegetației măsurând atât suprafața vegetației cât și a terenului	- scanare laser din avion (LIDAR)	≈ 0.2 – 1 m
Imagistică radar	- cel mai mic cost pe kmp; - necesită puncte terestre de control; - procesare complexă	- SAR ( <i>Synthetic Aperture Radar</i> ), aeropurtat; - din sateliți (ERS, SRTM)	≈ 0.5 – 2 m 10m (20 m)

Tab.3. 1: Comparatie între diferite sisteme de achiziție a datelor de altitudine după [Hengl et al., 2003]

### 3.1.1. Scanarea și georeferențierea hărții topografice

Pentru elaborarea modelului numeric altitudinal al bazinului montan al Teleajenului, autorul a avut la dispoziție harta topografică, la scară 1:25 000, ediția din 1982, foile L-35-88-B-d și L-35-88-D-b. Acestea au fost scanate color și stocate în format .ecw. S-a preferat acest format datorită algoritmului de compresie, care a redus mărimea fișierelor la aproximativ 4 MB (față de peste 150 MB, în format .tif).

Georeferențierea presupune alinierea imaginii la un sistem de coordonate. Este etapa în care imaginea devine o formă de date spațiale, întrucât acestea se caracterizează prin raportarea la un sistem de coordonate, definit prin parametri precum proiecția și punctul de origine (*datum*). Prima consecință a acestui fapt este că scara hărții devine variabilă, se poate naviga „deasupra” imaginii la „înălțimi” diferite, controlate prin factorul de zoom.

În cazul nostru, georeferențierea s-a realizat cu aplicația Global Mapper 8\*, în sistemul de coordonate al hărții: Gauss-Kruger (Fig.3. 1). Însă din cauza unor probleme de interpretare ale acestui sistem de coordonate de către aplicația ArcGIS\*\*, s-a realizat o reproiectare în sistemul Stereo 70. Diferențele dintre cele două sisteme de coordonate sunt redată în (Tab.3. 2).

<pre>PROJCS["Pulkovo 1942(83) / Gauss Kruger zone 5",   GEOGCS["Pulkovo 1942(83)",     DATUM["Pulkovo_1942_83",       SPHEROID["Krassowsky 1940",         6378245,298.3,         AUTHORITY["EPSG","7024"]],       TOWGS84[24,-123,-94,0.02,-0.25,-0.13,         1.1],         AUTHORITY["EPSG","6178"]],     PRIMEM["Greenwich",0,       AUTHORITY["EPSG","8901"]],     UNIT["degree",0.01745329251994328,       AUTHORITY["EPSG","9122"]],     AUTHORITY["EPSG","4178"]],     UNIT["metre",1,       AUTHORITY["EPSG","9001"]],     PROJECTION["Transverse_Mercator"],     PARAMETER["latitude_of_origin",0],     PARAMETER["central_meridian",15],     PARAMETER["scale_factor",1],     PARAMETER["false_easting",5500000],     PARAMETER["false_northing",0],     AUTHORITY["EPSG","2168"]]</pre>	<pre>PROJCS["Dealul Piscului 1970/ Stereo 70",   GEOGCS["Dealul Piscului 1970",     DATUM["Dealul Piscului 1970",       SPHEROID["Krassowsky 1940",         6378245,298.3,         AUTHORITY["EPSG","7024"]],       AUTHORITY["EPSG","6317"]],     PRIMEM["Greenwich",0,       AUTHORITY["EPSG","8901"]],     UNIT["degree",0.01745329251994328,       AUTHORITY["EPSG","9122"]],     AUTHORITY["EPSG","4317"]],     UNIT["metre",1,       AUTHORITY["EPSG","9001"]],     PROJECTION["Oblique_Stereographic"],     PARAMETER["latitude_of_origin",46],     PARAMETER["central_meridian",25],     PARAMETER["scale_factor",0.99975],     PARAMETER["false_easting",500000],     PARAMETER["false_northing",500000],     AUTHORITY["EPSG","31700"]]</pre>
---	---

Tab.3. 2: Descrierea sistemelor de coordonate Gauss Kruger și Stereo 70 în limbaj Human Readable OGC WKT (sursa [www.spatialreference.org](http://www.spatialreference.org))

\* [www.globalmapper.com](http://www.globalmapper.com)  
\*\* [www.esri.com](http://www.esri.com)

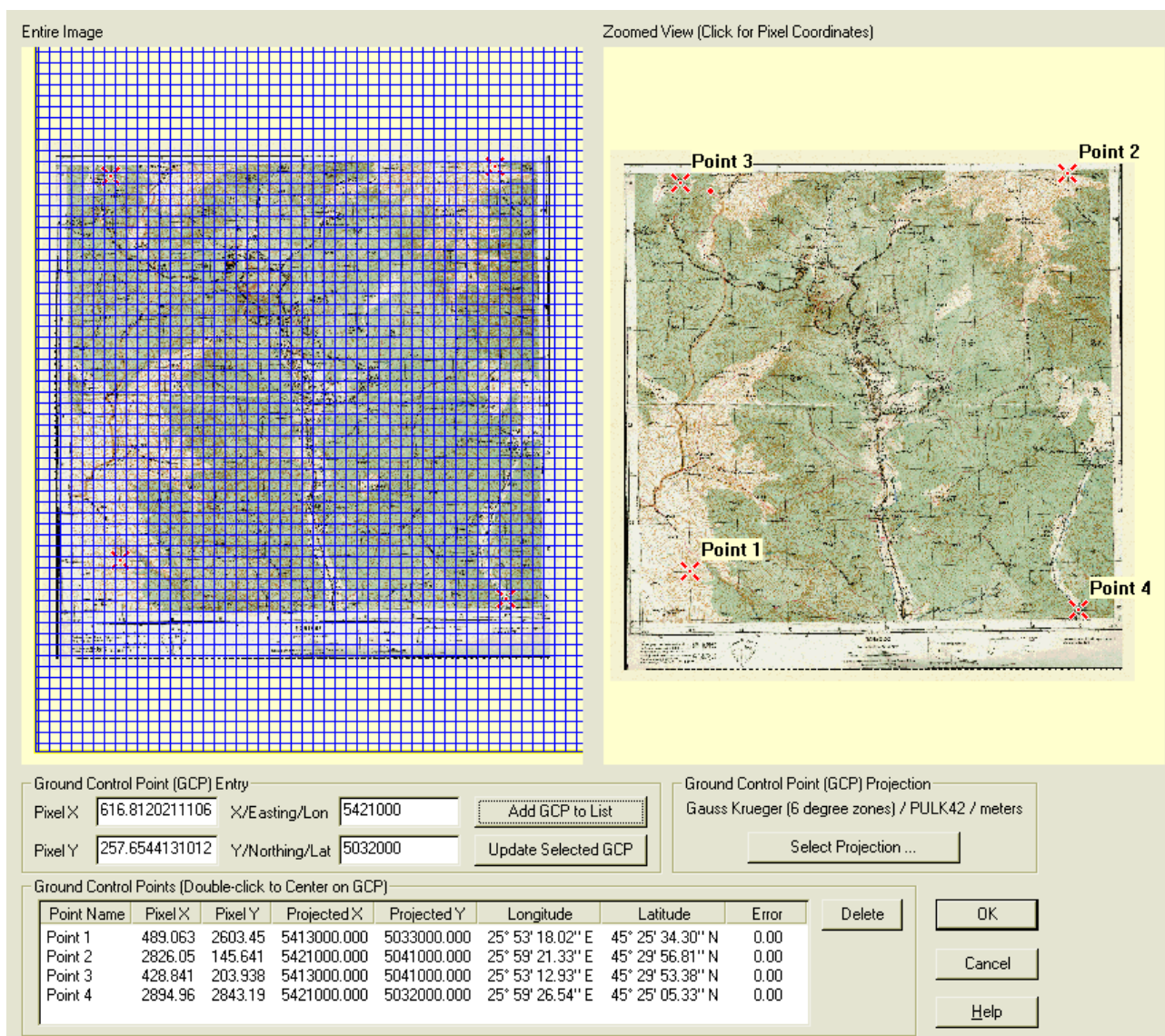


Fig.3. 1: Detaliu asupra ferestrei care permite georeferențierea în aplicația Global Mapper. Se selectează puncte de control pe hartă și li se precizează coordonatele (de obicei sunt puncte la intersecția liniilor de caroiaj). În funcție de numărul acestora, algoritmul este diferit. Pentru cazul nostru, cu 4 puncte de control, aplicația a folosit algoritmul affine.

Detaliile de georeferențiere ale fiecărei imagini sunt stocate de regulă într-un fișier text separat, cu aceeași denumire, dar cu extensie diferită\*, și care conține informațiile următoare: (Tab.3. 3)

3.33307226247083400	dimensiunea primului pixel al imaginii, pe abscisa sistemului de coordonate, măsurată în direcție estică.
0.000000000000000000	
0.000000000000000000	
-3.33307226247082020	dimensiunea primului pixel al imaginii, pe ordonata sistemului de coordonate (semnul - indică faptul că se măsoară distanța către sud).
567871.49218175816000000	coordonatele din centrul primului pixel al imaginii, din stânga sus
445287.44782849733000000	(prima este valoarea pe axa X și a doua pe axa Y)

Tab.3. 3: Informațiile precizate într-un fișier world, cu datele despre georeferențierea imaginii la care este asociat (în coloana din stânga)

\* .evw asociate fișierelor .ecw; .tfw asociate fișierelor .tif; .jgw asociate fișierelor .jpg



### 3.1.2 Vectorizarea hărții scanate

Această etapă, denumită și digitizare, este cea care consumă cel mai mult timp, întrucât presupune, în esență, prelevarea tuturor punctelor necesare pentru elaborarea modelului, atât cele care definesc altitudinea (de pe curbele de nivel și punctele cotate), cât și cele care descriu morfologia (rețeaua hidrografică). Operația se numește vectorizare pentru că se obțin date spațiale în format vectorial, adică definite prin puncte ale căror coordonate se raportează la sistemul de coordonate al hărții. Există trei tipuri de date vectoriale asociate entităților spațiale de bază, prin care se poate reprezenta orice element al unei hărți:

- de tip punct, potrivit pentru reprezentarea vârfurilor, înșeuărilor, confluențelor, și a punctelor în care se realizează orice măsurătoare;
- de tip linie, pentru reprezentarea elementelor liniare, adică cele care se definesc prin aceeași proprietate în lungul unei linii, precum izoliniile de orice tip, rețelele de orice tip (hidrografică, de căi de comunicație), falii, axe de sinclinal/anticlinal, etc.;
- de tip poligon, pentru reprezentarea entităților ale căror proprietăți se mențin pe o anumită suprafață, precum parcele construite, bazine hidrografice, lacuri, suprafețe cu o anumită utilizare a terenurilor, tip de sol, unitate geologică, etc.

Toate acestea se organizează într-o bază de date spațiale, și pot fi folosite selectiv, pe baza atributelor asociate, pentru realizarea unor hărți, fie digitale, fie tipărite.

Pentru lucrarea de față această etapă s-a realizat în cadrul aplicației ArcMap, din pachetul ArcGIS 9.2 (Fig.3.2). S-au vectorizat:

- curbele de nivel: entități de tip linie, cu echidistanța 10 m, lungimea totală, cumulată, 3608.75 km;
- vârfurile: date vectoriale de tip punct, total 53 de puncte;
- punctele cotate în microdepresiuni (*sinks*): confluențe și înșeuări, în total 7 puncte;
- rețeaua hidrografică: date vectoriale de tip linie, vectorizate în sensul de scurgere al apei, ierarhizată în sistem Horton-Strahler, lungimea cumulată a segmentelor de râu 183,7 km;
- limita modelului: date vectoriale de tip poligon, suprafața 91,8 km<sup>2</sup>, corespunde unui cadru în exteriorul cumpenei de ape, care delimitează bazinul hidrografic de 56,5 km<sup>2</sup>.

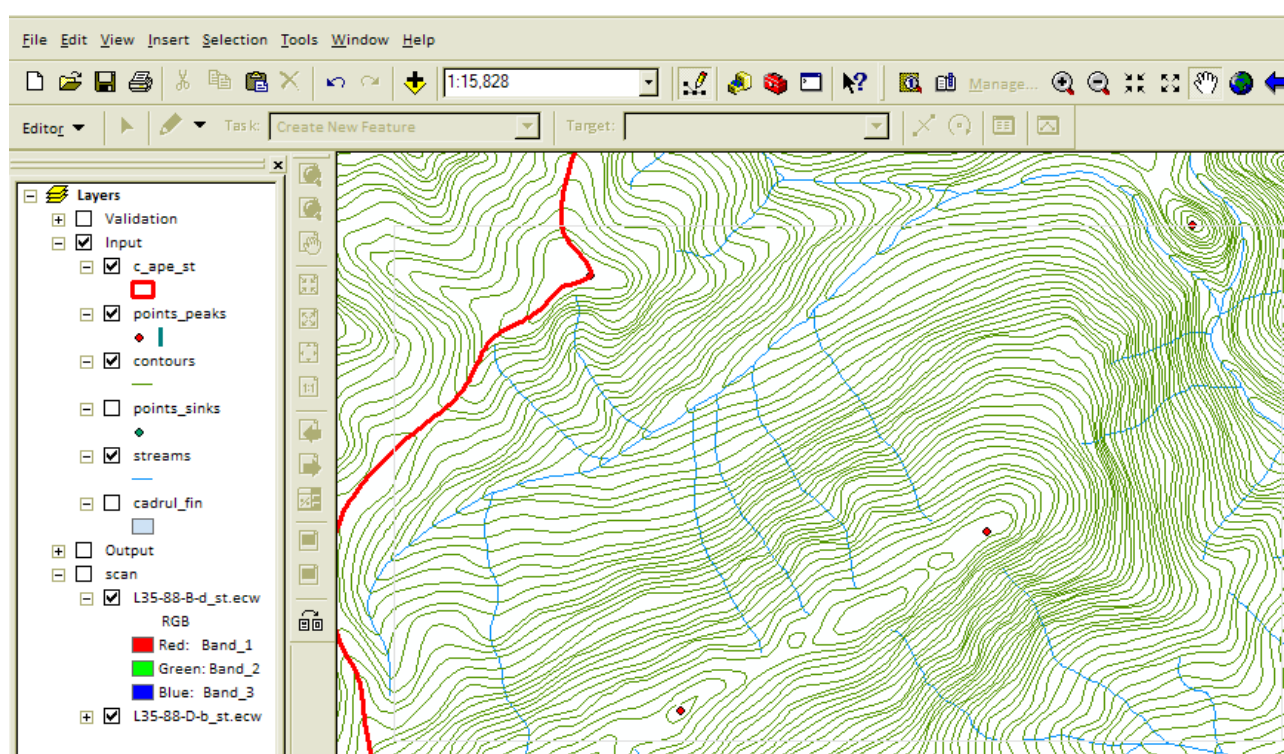
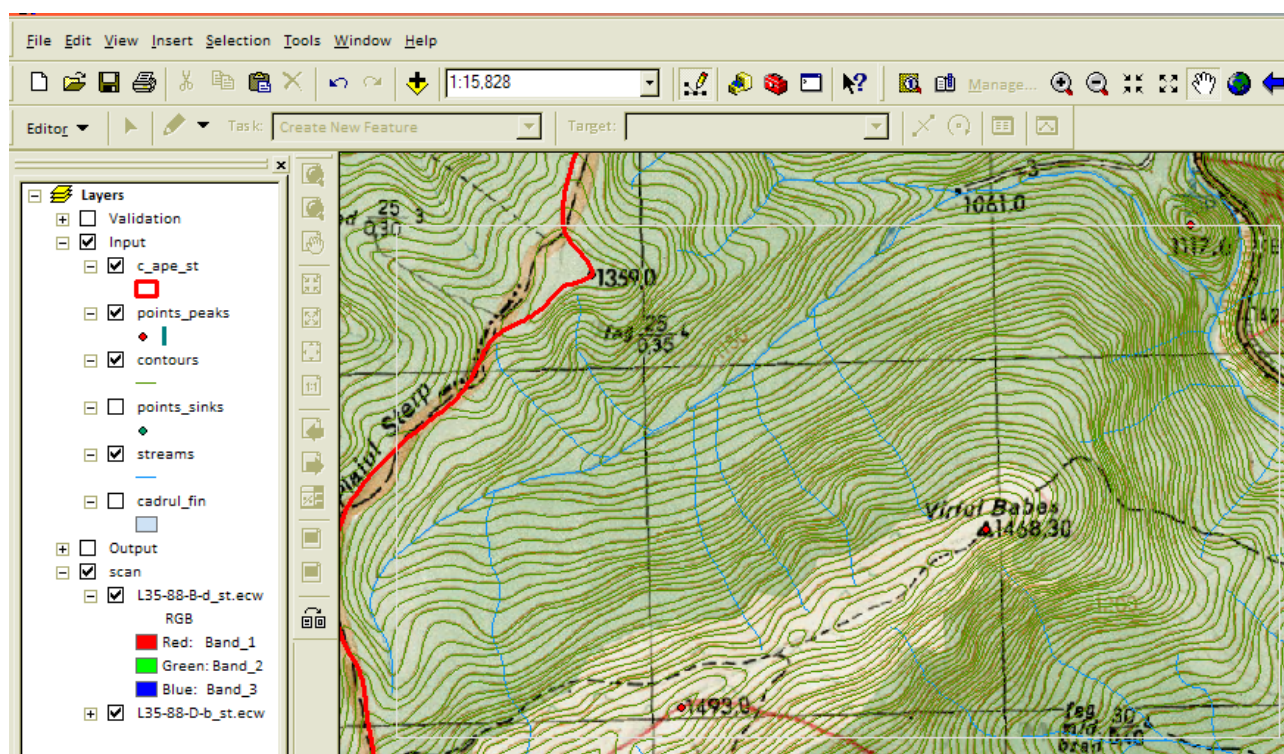


Fig.3. 2: Detalii din etapa de vectorizare. Prima imagine conține și harta topografică scanată (L-35-88-B-d\_st.ecw), iar cea de-a doua doar entitățile extrase: cumpăna de ape (c\_ape\_st), vârfurile (point\_peaks), curbele de nivel (contours), rețeaua hidrografică (streams) așa cum este definită de inflexiunile curbelor de nivel.

### 3.2 Interpolarea punctelor de prelevare

Este etapa în care se obține o reprezentare continuă a suprafeței terestre, iar metoda de interpolare este o funcție matematică prin care se estimează valorile altitudinilor în locurile în care nu există puncte de prelevare. În cazul nostru, punctele de prelevare sunt capetele segmentelor ce compun fiecare izohipsă, cărora li se asociază valoarea de altitudine a curbei de nivel, și punctele cotate, fie ca vârfuri, fie ca microdepresiuni.

#### 3.2.1. Structurile de date pentru reprezentarea DEM

Pentru a reprezenta variația continuă a unui parametru (altitudine, temperatură, concentrație chimică, porozitate, etc) pe o anumită suprafață, se folosesc două tipuri de structuri de date [Hengl et al., 2003]:

1) Rețea triangulară neregulată (*Triangulated irregular network*, TIN), structură compusă din noduri, muchii și triunghiuri. Nodurile sunt punctele de prelevare care se unesc prin muchii, în așa fel încât să se formeze o rețea de triunghiuri, care să respecte criteriul Delauney\*. Întrucât fiecare nod este reprezentat prin tripletul de coordonate pe axele X, Y (coordonatele rectangulare) și Z (altitudinea, în cazul nostru), este posibil să se definească panta fiecărei muchii și o serie de parametri pentru fiecare față triangulară în parte: panta, expoziția, aria și lungimea. Rezultă astfel o formă continuă de reprezentare a suprafeței terestre, care prezintă avantajul că permite redarea unor trăsături structurale precum vârfurile, rupturile de pantă și microdepresiunile (Fig.3. 3).

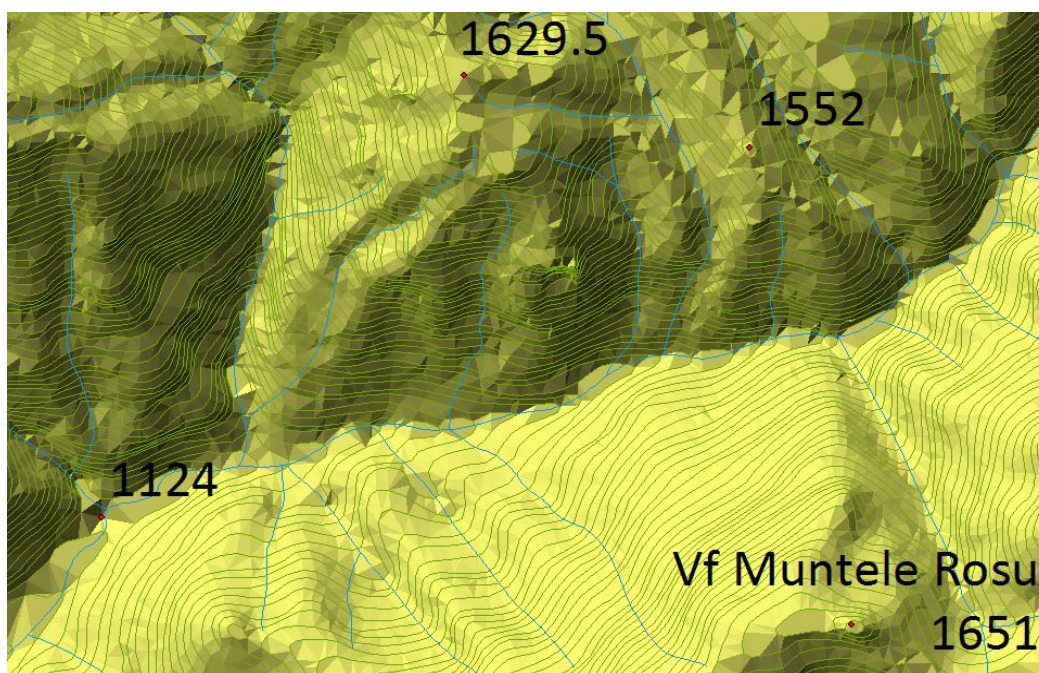


Fig.3. 3: Detaliu din modelul numeric altitudinal al bazinului montan al Teleajenului reprezentat ca rețea triangulară neregulată. Se observă efectele de terasare în locurile cu densitate redusă a punctelor de prelevare (pe interfluvii și în talvegurile văilor).

\* Suprafețele cercurile circumscrise triunghiurilor să nu conțină noduri.



2) Rețea rectangulară regulată (GRID), stocată ca raster, în care fiecărui pixel îi corespunde o valoare a parametrului reprezentat, în cazul nostru, o valoare de altitudine. Se definește prin rezoluția spațială (Fig.3. 4), dată de mărimea, în unitatea de măsură a terenului, a laturii fiecărei celule. Aceasta controlează calitatea modelului, în sensul că reprezintă limita de reprezentare a elementelor morfologice. Obiectul matematic corespunzător gridului este matricea și de aceea, deși prezintă o serie de dezavantaje față de TIN, este preferat datorită posibilității ridicate de integrare în operații GIS. De asemenea, este mai ușor de procesat mai ales în etapa de analiză digitală a terenului și de aceea eforturile s-au concentrat mai degrabă în îmbunătățirea tehnicilor de interpolare decât în integrarea TIN-urilor în analiză.

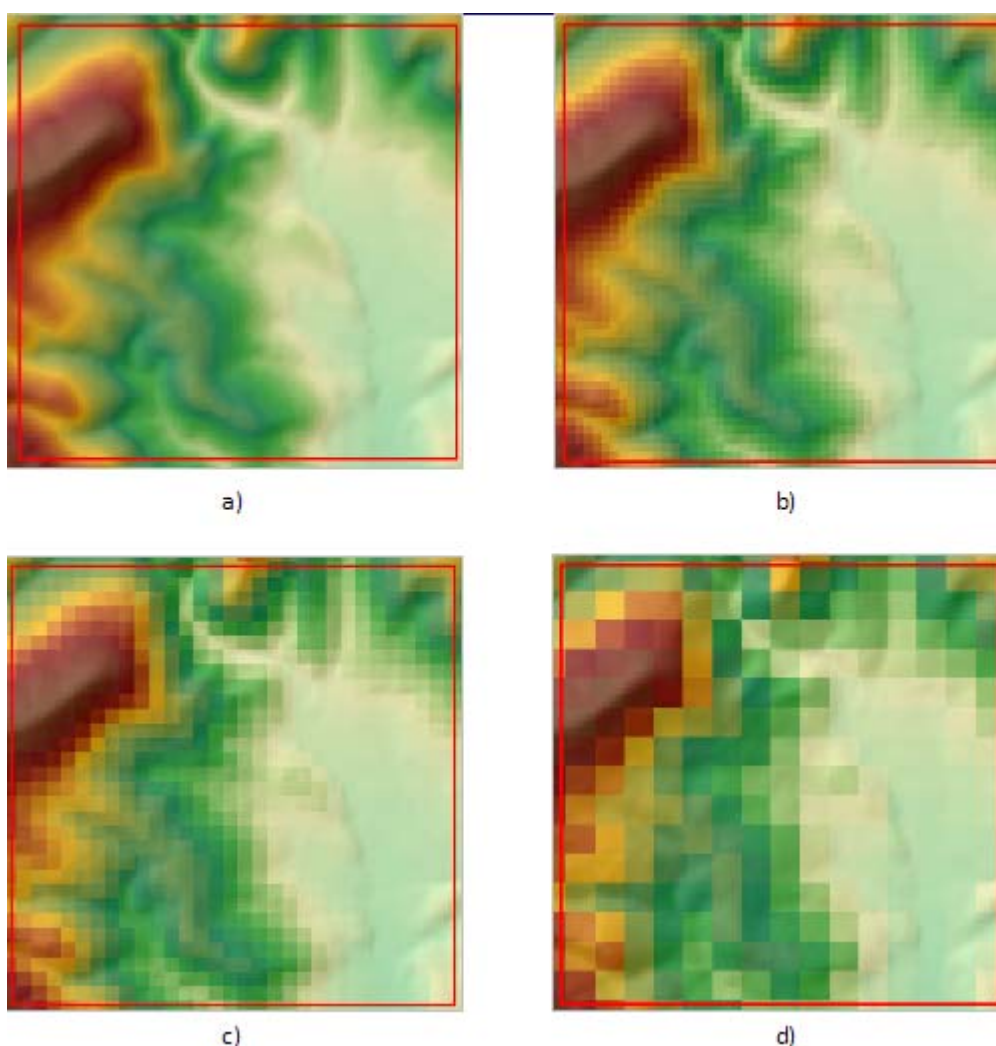


Fig.3. 4: Detalii din modelul numeric altitudinal al bazinului montan al Teleajenului, reprezentat ca rețea rectangulară regulată (grid). Imaginile reprezintă aceeași regiune, la rezoluții diferite, pentru a ilustra dependența calității modelului de mărimea celulei ( $p$ ): a)  $p=20$  m, b)  $p=60$  m, c)  $p=100$  m, d)  $p=200$  m.

### 3.2.2. Metoda de interpolare

Există diverse metode de interpolare disponibile în diferite pachete software, aplicabile diferitelor tipuri de date, precum: *natural neighbour*, *nearest neighbour*, *polynomial regression*, *kriging*, *inverse distance*, *spline*, *triangulation*, *minimum curvature*, etc. Acestea se clasifică în funcție de efectul de netezire (*smoothing effect*) sau după efectul de proximitate (*proximity effect*) [Hengl et al., 2003].

După efectul de netezire interpolarea poate fi:

- exactă: dacă păstrează valorile în punctele de prelevare. Metodele *kriging* (dacă parametrul *nugget effect* se setează la valoarea 0), *spline*, *nearest neighbour*, *triangulation* sunt exemple de astfel de metode;
- aproximativă: în care valorile în punctele de prelevare nu sunt conservate, în metode precum *kriging* (cu *nugget effect*), *polynomial regression*, *natural neighbour*.

După efectul de proximitate pot fi:

- metode locale, în care interpolarea se face local, pe un subset al punctelor de prelevare: *natural neighbour*, *nearest neighbour*, *kriging*;
- globale, în care pentru estimarea unei valori se includ în calcul valorile tuturor punctelor de prelevare: *polynomial regression*, *spline*.

O altă clasificare împarte metodele în [Sárközy, 1998]:

- metode bazate pe vecinătatea geometrică, considerând divizarea spațiului în celule Voronoy
- metode statistice bazate pe media ponderată, care estimează o valoare aplicând o medie ponderată asupra valorilor din apropiere. Metode locale, acestea diferă după modul de calcul al coeficientului de ponderare precum și numărul valorilor considerate. Exemple: *inverse distance*, *kriging*;
- metode care utilizează funcții elementare, utile în analiza tendinței dintr-un set de date. Sunt metodele globale menționate anterior;
- metode care utilizează rețele neurale artificiale pentru predicția valorilor necunoscute. Acestea au fost recent aplicate în analiza spațială, inițial în clasificarea pixelilor din imaginile satelitare multispectrale, și apoi în estimarea unor variabile, precum cantitatea de precipitații.

Pentru studiul de față s-a folosit un algoritm de interpolare denumit ANUDEM și dezvoltat de Centrul pentru Resurse și Studii de Mediu (*Centre for Resource and Environmental Studies, CRES*), Universitatea Națională Australiană, Canberra, Australia, și implementat în programul ArcGIS 9.2, prin intermediul unelei Topo to Raster (care preia versiunea 4.6.3 a ANUDEM). Aceasta este o metodă de interpolare optimizată pentru a avea eficiența de calcul a metodelor locale, fără a pierde continuitatea suprafeței, asigurată de metodele globale, fiind concepută pentru modelele numerice altitudinale destinate modelării hidrologice. Este o

metodă prin care se propune să se țină cont de particularitățile seturilor de date spațiale, precum: [Hutchinson, 1993]

- numărul mare de puncte de prelevare: de exemplu, pentru studiul de față, de pe un bazin hidrografic de 56,5 km<sup>2</sup> s-au obținut 67495 de puncte din vectorizarea curbilor de nivel. Pentru orice altă suprafață de interpolat, numărul de puncte de prelevare este de maxim câteva sute. Tehnicile de interpolare globală, precum *plate splines*, în care fiecare punct interpolat depinde explicit de toate punctele de prelevare, devin astfel foarte greu de folosit din cauza timpilor mari de calcul. De cealaltă parte, tehnicile de interpolare locală au o eficiență de calcul sporită datorită împărțirii suprafeței în areale de dimensiuni mai mici, și aplicarea unor funcții simple pe fiecare areal în parte, însă acestea sunt restricții arbitrare care pot avea consecințe de nedorit, precum prezența unor efecte de terasare;

- întrucât, de cele mai multe ori, punctele de prelevare a altitudinilor sunt obținute din hărțile topografice, acestea se caracterizează printr-o acuratețe mare (ele corespund exact curbilor de nivel de pe harta topografică; dacă aceasta prezintă erori de reprezentare, acestea vor apărea în aceeași proporție și în DEM-ul final), iar suprafața topografică este rareori netedă. Aceste aspecte nu sunt surprinse de metodele de interpolare care descriu tendința unei suprafețe;

- suprafața topografică prezintă numeroase vârfuri și puține microdepresiuni (*sinks*) care nu sunt considerate în metodele de interpolare generală;

- datele de altitudine nu sunt prelevate aleatoriu: ele sunt fie puncte deosebite, vârfuri alinate pe o cumpănă de ape, sau puncte în talvegul râurilor, fie sunt puncte de pe curbe de nivel. Un algoritm de interpolare a altitudinilor ar trebui să țină cont de aceasta: dacă toate cotele vârfurilor au fost prelevate, algoritmul ar trebui să nu genereze maxime locale prea depărtate de acestea, iar inflexiunile curbilor de nivel, ce descriu fie cursuri fie cumpene de apă, ar trebui considerate de asemenea;

- rețeaua hidrografică extrasă de pe harta topografică (care nu reprezintă, în fapt, date de altitudine) ar trebui folosită ca mijloc de constrângere a DEM-ului astfel încât altitudinile să descrească uniform în lungul fiecărui curs de apă și existe o ruptură de pantă în dreptul talvegului, în profilurile transversale ale văilor;

- în zonele cu pantă mică, unde curbele de nivel sunt distanțate determinând scăderea densității punctelor de prelevare, algoritmul ar trebui să se mențină stabil și să nu genereze forme de relief aberante; în special, integritatea drenajului trebuie menținută, prin includerea vectorilor ce descriu rețeaua hidrografică.

Schema de implementare a algoritmului, cu evidențierea tuturor parametrilor accesibili utilizatorului, este redată în Fig.3. 5

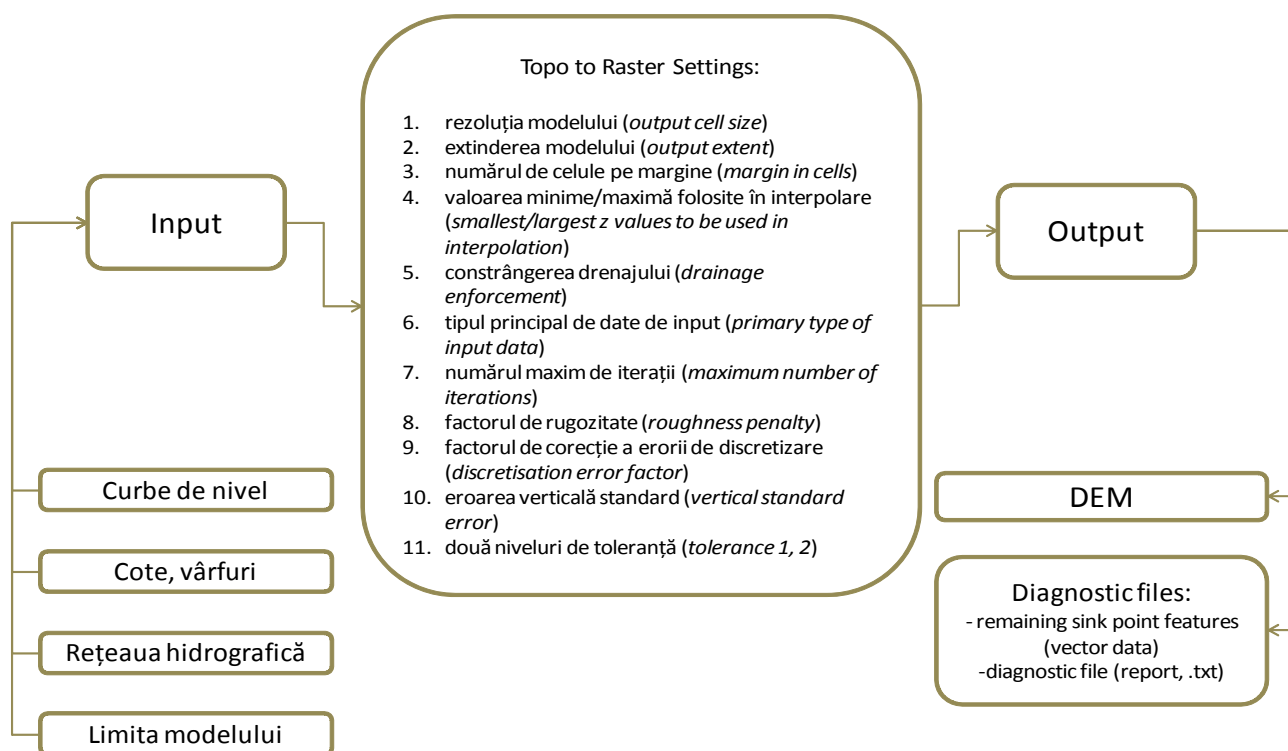


Fig.3. 5: Schema de implementare a unei Topo to Raster pentru obținerea modelului altitudinal al bazinului montan al Teleajenului.



### 3.2.2.1. Rezoluția modelului

Este un parametru general, definit de dimensiunea celulei, aplicabil oricărui set de date raster, însă care, în cazul celor altitudinale, prezintă importanță pentru că este limita reprezentării elementelor geomorfologice: nu se pot reprezenta forme de relief cu dimensiuni mai mici decât rezoluția rasterului. În general, o rezoluție mai mică a unui model altitudinal se reflectă în creșterea acurateții determinării parametrilor morfometrici. Însă aceasta depinde de variabilitatea terenului. Într-o regiune în care altitudinile variază puțin, în câmpii sau depresiuni, nu este neapărat necesar un model cu o rezoluție mică, deoarece scăderea rezoluției determină creșterea nejustificată a numărului de celule și deci, a mărimii setului de date. Alegerea rezoluției optime se bazează pe un compromis între acuratețea parametrilor morfometrici și dimensiunea setului de date. În cazul nostru, întrucât regiunea este una de munte, variabilitatea terenului este mare și deci, este de dorit reducerea cât mai mult posibil a rezoluției. Însă aceasta trebuie să se facă în limitele datelor disponibile. Ca regulă generală, mărimea pixelului trebuie să fie mai mică decât distanța medie la care produce o schimbare în morfologia terenului. De asemenea, trebuie să se țină cont de faptul că modelul nu se realizează plecând de la măsurători directe ale suprafeței terestre, ci de la harta topografică, care la scara 1:25 000 prezintă deja un grad semnificativ de generalizare a formelor de relief.

Ținând cont de aceste aspecte, pentru un set de date se pot defini trei rezoluții standard pentru modelele derivate[Hengl et al., 2003]:

- cea mai grosieră rezoluție: rezoluția maximă care se poate folosi ținând cont de scara hărții topografice inițiale, acuratețea localizării, dimensiunea formelor de relief și complexitatea terenului. Utilizând rezoluții mai mari decât aceasta înseamnă că nu se respectă acestea. Pentru estimarea acesteia, autorul citat propune următoarea formulă:

$$P = \frac{A}{Sl} \quad (3.1),$$

unde  $P$  este mărimea celulei,  $A$  este aria în plan a zonei pentru care se derivă DEM-ul iar  $Sl$  este suma lungimilor tuturor curbilor de nivel digitizate.

- cea mai fină rezoluție: cea mai mică posibilă, corespunde acurateții maxime de localizare, suficientă pentru a reprezenta 95% din obiectele spațiale sau elementele morfologice. O rezoluție mai mică decât acesta înseamnă doar un consum inutil de memorie. Se poate afla aplicând formula:

$$P = \frac{Wmld}{2} \quad (3.2),$$

unde  $Wmld$  este distanța minimă dintre două curbe de nivel

- o rezoluție intermediară, între acestea, iar soluția recomandată este:

$$P = \frac{A}{(2 \cdot SI)} \quad (3.3)$$

Aplicând formulele (1) și (3) la setul nostru de date<sup>\*</sup>, se obțin valorile  $P = 12.7$  m, pentru rezoluția intermediară și  $P=24$  m, pentru rezoluția maximă. Lungimile curbelor de nivel și suprafața de studiu se precizează automat, de către program, în tabelul de atribute, aceasta fiind o caracteristică a formatului de bază de date spațiale implementat de ESRI: *geodatabase*.

Vom considera acestea limitele intervalului de valori pentru rezoluția modelului numeric altitudinal. Alegerea unei valori din acest interval se va face prin compararea unor modele la rezoluții diferite, în funcție de acuratețea verticală și de distribuția unor parametri derivați ai terenului, precum panta sau curbura suprafeței.

#### 3.2.2.2. Extinderea modelului și numărul de celule pe margine

Reprezintă limita, în coordonatele sistemului în care se lucrează, până la care se realizează interpolarea. Se definește fie prin precizarea coordonatelor direct de către utilizator, fie prin preluarea coordonatelor poligonului folosit ca limită. Deoarece pe marginea modelului sunt mai puține date disponibile pentru interpolare, apar erori, aberații față de restul modelului. Pentru înlăturarea acestora, unealta permite precizarea unui număr de celule în care să se continue interpolarea, dincolo de limita modelului. O altă soluție este definirea unui cadru mai extins decât bazinul hidrografic delimitat prin cumpăna de ape, însă aceasta presupune și prelungirea timpului de vectorizare pentru extragerea unor curbelor de nivel din exteriorul cumpenei de ape.

#### 3.2.2.3. Valorile minime și maxime folosite în interpolare

Se pot preciza pentru a constrânge interpolarea să nu genereze rezultate nerealiste. Pentru modelul din lucrare s-a definit doar valoarea maximă 1955 m, puțin mai mare față de valoarea maximă reală, a vârfului Ciucaș, de 1954.2 m, pentru a permite eventuala aplicare ulterioară a unor filtre, care vor reduce din această valoare.

#### 3.2.2.4. Constrângerea drenajului (*drainage enforcement*)

Este opțiunea care controlează acuratețea reprezentării rețelei hidrografice în modelul final, prin înlăturarea microdepresiunilor (*sinks*) cauzate de erori în interpolare. Utilizatorul poate alege dintre:

- *Enforce*: algoritmul va înlătura toate microdepresiunile, indiferent dacă sunt reale sau nu, care se opun drenajului descris de rețeaua hidrografică.

- *Enforce with sinks*: algoritmul va înlătura doar microdepresiunile care apar ca erori, păstrându-le pe cele din datele de input.

<sup>\*</sup> Autorul citat a realizat și un site special dedicat acestei probleme, de pe care se poate descărca un fișier .xls cu formulele predefinite, cu ajutorul căruia se pot determina aceste rezoluții: <http://spatial-analyst.net/pixel.php>

- *No enforce*: algoritmul nu va înlătura nici o microdepresiune.

Pentru datele noastre, deși conțin 7 puncte definite ca microdepresiuni, s-a constatat că opțiunea *enforce* oferă rezultate mai bune.

#### 3.2.2.5. Tipul principal de date de input și numărul maxim de iterații

Pentru tipul principal de date de input sunt două variante, fie curbe de nivel, adică linii, fie vârfuri, adică puncte. Este importantă precizarea aceasta pentru reducerea timpului de calcul. În cazul în care datele principale sunt curbe de nivel, algoritmul va realiza mai întâi o morfologie generalizată a suprafeței bazată pe inflexiunile curbelor de nivel, iar ulterior acestea vor fi considerate ca sursă de altitudini.

Numărul maxim de iterații este important pentru reducerea erorilor reprezentate prin microdepresiuni și în general, cu cât se realizează mai multe iterații, cu atât se reduc mai multe microdepresiuni. Însă de la un anumit prag în sus, operația devine redundantă și consumatoare de resurse. Documentația aplicației indică valoarea de 40 de iterații ca medie, valoare care a și fost folosită.

#### 3.2.2.6. Factorul de rugozitate (*roughness penalty*)

Reprezintă valoarea curburii în profil, care exprimă modul în care variază panta în direcția în care are cea mai mare valoare. Alocând acestui parametru o valoare mică (chiar 0), algoritmul va fi constrâns să reducă variația pantei în lungul direcției ce exprimă orientarea versanților, având ca efect o netezire a suprafeței finale. Pentru studiul de față s-a ales valoarea 0, recomandată de documentație pentru a compensa efectul de ușoară terasare a versanților cauzat de faptul că algoritmul acordă o importanță mare curbelor de nivel în definirea modelului final.

#### 3.2.2.7. Factorul de corecție a erorii de discretizare (*discretisation error factor*)

Această eroare apare ca urmare a faptului că între punctul folosit pentru estimarea valorii fiecărei celule și centrul celulei există o oarecare distanță, în plan. Atribuirea acelei valori în centrul celulei are ca efect apariția unei diferențe între aceasta și valoarea care ar fi trebuit să fie dacă se ține cont de panta suprafeței. Aceasta este o eroare verticală care se compensează prin multiplicarea valorii inițiale, cea care a dat valoarea celulei, cu acest factor de corecție, care are ca efect diminuarea pantei fiecărei celule și obținerea unei suprafețe mai netede (*smooth*). Valorile tipice sugerate în documentația aplicației variază de la 0.5 la 2. Valorile subunitare ar accentua panta locală și deci, ar furniza o suprafață mai „aspră”, iar cele supraunitare ar diminua panta și deci, eroarea verticală dintre valoarea atribuită în centrul celulei și valoarea reală, efectul fiind unul de netezire a suprafeței.

În Fig.3. 6 este ilustrată situația în care apare această eroare [Hutchinson, 2000]: A este punctul a cărui valoare este atribuită centrului celulei (punctul B), care se află la distanța  $d$  de centru. C este valoarea reală din centrul celulei, calculată pe baza pantei și a distanței  $d$ . Între valoarea reală și valoarea atribuită

centrului celulei (și deci celulei întregi) apare o diferență, denumită eroarea de discretizare și notată cu  $z$ , care se poate corecta prin înmulțirea valorii  $A$  cu un factor de corecție.

Pentru a testa efectul acestui parametru s-a realizat o serie de modele, la rezoluții diferite, cu valori diferite ale acestuia și s-a analizat variația erorii altitudinale, precizată în fișierul diagnostic al fiecărui model ca eroare medie pătratică a diferențelor dintre altitudinea precizată în punctele de interpolare și altitudinea modelului în acele puncte. Datorită faptului că algoritmul realizează griduri succesive, la rezoluții mai întâi mari, apoi din ce în ce mai mici, în fișierul diagnostic al fiecărui model se precizează valoarea RMS a diferențelor dintre punctele de prelevare și model pentru fiecare rezoluție anterioară celei finale, setată de

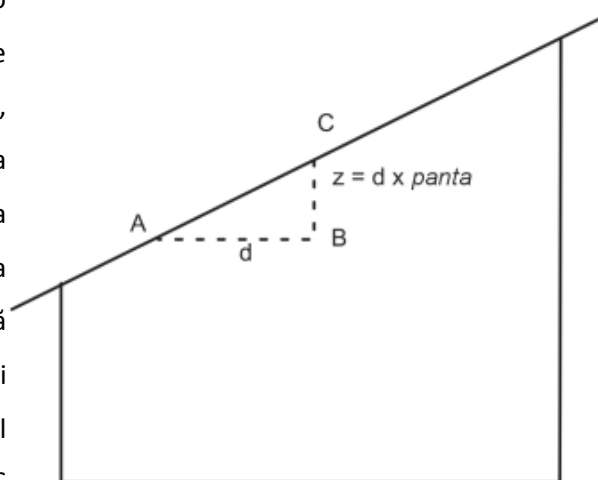


Fig. 3. 6: Ilustrare a modului în care rezultă eroarea de discretizare în procesul de interpolare.

utilizator. De exemplu, dacă se dorește un grid cu o rezoluție de 20 m, algoritmul realizează 6 griduri, începând cu rezoluția de 640 m și apoi înjumătățind de fiecare dată rezoluția, până la valoarea finală. Pentru fiecare în parte, se precizează numărul de microdepresiuni rezultate și eroarea altitudinală, ca medie aritmetică a diferențelor dintre punctele de prelevare și fiecare grid. Pentru acest test s-au realizat 12 modele, cu rezoluții de 15, 18, 20 și 25 m, iar pentru fiecare câte unul cu valori diferite ale factorului de corecție a erorii de discretizare, respectiv 0.5, 1 și 1.5. Reprezentarea rezultatelor în graficul din Fig. 3. 7 a dus la formularea următoarelor concluzii:

- factorul de corecție a erorii de discretizare influențează direct acuratețea modelului. Valorile mici, subunitare, au ca efect o suprafață mai puțin netezită și deci, mai apropiată de valorile punctelor de prelevare, pe când valorile mari, supraunitare, dau un efect de netezire care se transpune în creșterea diferenței dintre altitudinea punctului de prelevare și cea a modelului;
- aceasta se întâmplă cu o importanță mai mare decât are rezoluția finală a modelului: se observă că curbele corespunzătoare celor 4 rezoluții se suprapun aproape perfect, diferind doar în funcție de factorul de corecție a erorii de discretizare. Cu alte cuvinte, algoritmul interpolează cu aceeași acuratețe modele la rezoluțiile din intervalul definit anterior, între 12.8 și 24 metri.

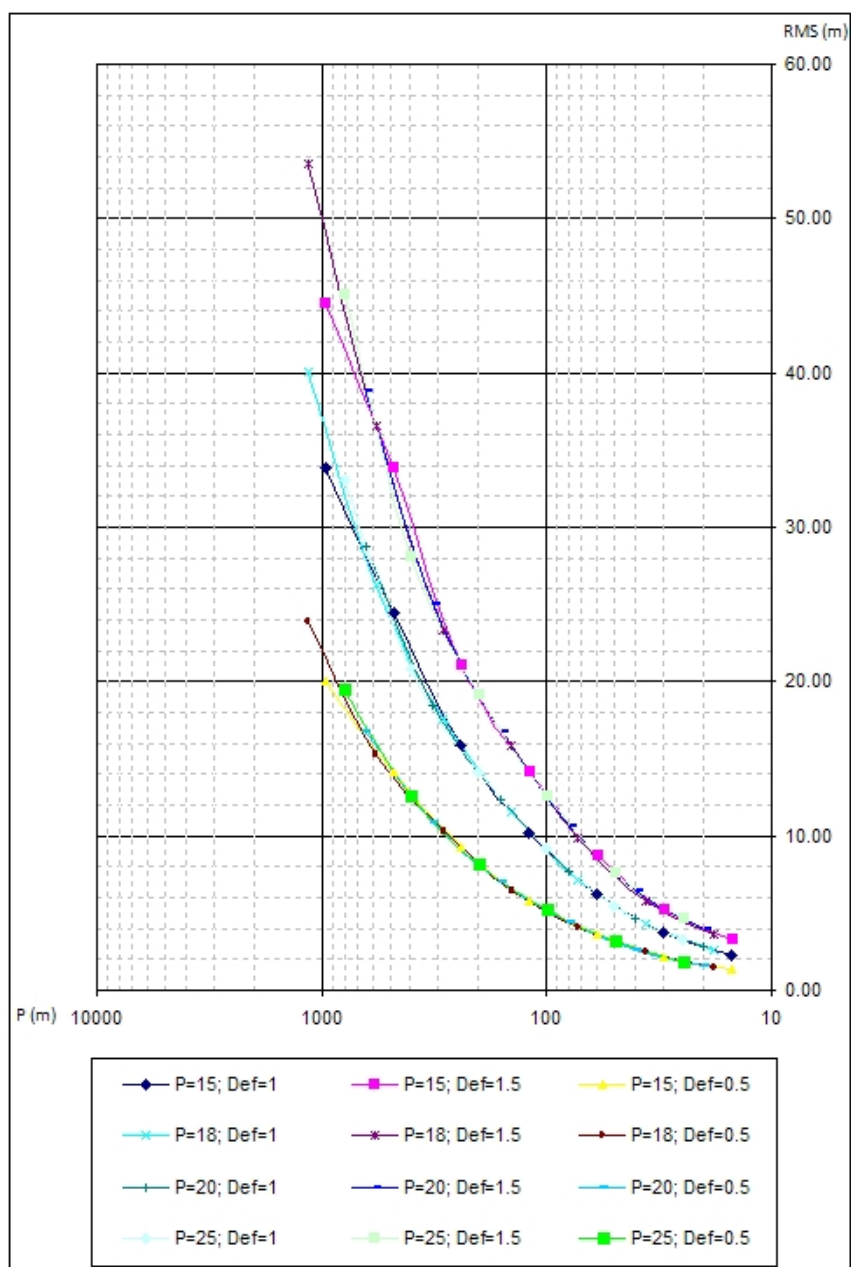


Fig.3. 7: Reprezentarea grafică a variației erorii medii pătratice, ca măsură a acurateții modelului, în funcție de rezoluție (P) și de factorul de corecție a erorii de discretizare (Def). Se observă că cele 12 curbe aproape se suprapun câte patru, pentru fiecare rezoluție și variază foarte semnificativ doar în funcție de valoarea factorului de corecție a erorii de discretizare.

#### 3.2.2.8. Eroarea verticală standard

Este un parametru ce permite includerea erorii aleatorii a valorilor de altitudine. În cazul valorilor preluate direct de pe harta topografică, și nu prin intermediul instrumentelor (altimetre, receptoare GPS) acestui parametru i se poate aplica valoarea 0, indicând faptul că preluarea curbelor de pe harta topografică s-a realizat cu acuratețe maximă.

#### 3.2.2.9. Două niveluri de toleranță

Asupra acestor parametri, documentația algoritmului este lipsită de detalii suplimentare în afara faptului că asigură un control al drenajului, primul având valoarea recomandată jumătate din echidistanța curbelor de nivel și al doilea, jumătate din amplitudinea reliefului. S-au folosit așadar valorile de 5 m și respectiv 600 m.

### 3.3. Validarea și optimizarea modelului

Validarea modelului este operația prin care se evaluează acuratețea sa, până chiar la nivel de pixel. Precizăm o definiție a termenului „acuratețe”, formulată de ISO\*: „diferența dintre valorile observate și valorile reale, sau acceptate ca reale” (ISO/TC211 1999, [Martinoni, 2002]).

[Hengl et al., 2003] distinge două tipuri de acuratețe a unui model numeric altitudinal:

- absolută, măsurabilă prin valoarea *RMS* a diferențelor dintre altitudinile reale și cele ale modelului, în punctele de prelevare, sau într-un set de puncte de control;
- relativă, care exprimă modul în care modelul redă morfologia și aspectul general al reliefului și care prezintă o importanță mai mare pentru analiza terenului, decât acuratețea absolută.

Calitatea modelului poate fi evaluată prin analiza atât a factorilor care influențează generarea sa și cât și a unor parametri derivați, a căror distribuție este foarte sensibilă la valorile modelului, precum:

- metoda de colectare și densitatea punctelor de prelevare: în cazul nostru metoda de colectare și densitatea punctelor de prelevare asigură acuratețea maximă față de reprezentarea cartografică, însă nu neapărat și față de suprafața reală; modelul preia acuratețea și, implicit, erorile din harta topografică;
- rezoluția modelului: după cum s-a arătat, alegerea valorilor de rezoluție în intervalul optim determinat (între 12.8 și 23 m, cap. 2.2.2.1.) nu afectează acuratețea absolută a modelului, însă poate fi determinantă în definirea acurateții relative;
- algoritmul de interpolare: influențează prin efectele de netezire și de proximitate, prin numărul de parametri de interpolare care pot fi ajustați și prin includerea unor metode de autodiagnostic; algoritmul folosit în prezenta lucrare este foarte potrivit pentru interpolarea corectă din punct de vedere hidrologic,

---

\* *International Organization for Standardization*, Asociația Internațională pentru Standardizare

iar prin parametri de interpolare care pot fi ajustați, asigură și posibilitatea derivării unei suprafețe corecte din punct de vedere morfologic;

- o serie de parametri derivați, sensibili la variațiile locale ale modelului altitudinal, precum: expoziția versanților (*aspect*), panta și curbura suprafeței în profil (*profile curvature*); o măsură bună este numărul de pixeli a căror valoare a parametrilor derivați nu a putut fi determinată (*NoData value*).

Optimizarea modelului, este o operație de post-procesare, prin care se reduc erorile depistate în etapa de validare. Două metode eficiente de optimizare a modelului, aplicate și în lucrarea de față, sunt filtrarea și medierea mai multor rezultate [Hengl et al., 2004].

### 3.3.1. Evaluarea acurateții absolute

În contextul validării acurateții absolute a unui model numeric altitudinal, eroarea medie pătratică este indicatorul cel mai folosit [Martinoni, 2002]. Acesta se calculează cu formula:

$$RMSE := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_{DEM}(x_i) - z_0(x_i))^2}{n}},$$

unde  $RMSE$  este eroarea medie pătratică (*Root Mean Square Error*),  $z_{DEM}(x_i)$  reprezintă valorile altitudinii precizate de model în punctele de prelevare  $x_i$ , iar  $z_0(x_i)$  reprezintă valorile măsurate în punctele de prelevare și deci, considerate a fi cele reale.

Metoda de interpolare folosită include și calcularea acestui indicator, pentru fiecare rezoluție intermediară, iar rezultatul este precizat într-un fișier text de diagnostic. Valorile acestui indicator, pentru cele 12 modele testate, au fost precizate deja în contextul explicării parametrilor algoritmului de interpolare (cap. 2.2.2.7). În Tab.3. 4 sunt precizate valorile a căror distribuție este prezentată în graficul din Fig.3. 7. Pentru cele patru rezoluții finale valorile erorii medii pătratice cresc proporțional atât cu valorile rezoluției, arătând faptul că modelul cu cea mai mare acuratețe absolută este cel cu rezoluția cea mai mică (15 m) cât și cu valoarea factorului de corecție a erorii de discretizare, cele cu cea mai bună acuratețe rezultând în urma setării Def = 0.5 (Tab.3. 4, rândul de jos). Valorile acestei erori variază de la 1.32 m pentru rezoluția de 15 m, la 4.62 m, pentru rezoluția de 25 m.



P	Def=1	Def=1.5	Def=0.5	P	Def=1	Def=1.5	Def=0.5	P	Def=1	Def=1.5	Def=0.5	P	Def=1	Def=1.5	Def=0.5
960	33.80	44.50	20.00	1152	40.10	53.50	23.90	640	28.70	38.80	16.80	800	33.10	45.10	19.50
480	24.50	33.80	14.20	576	26.30	36.60	15.30	320	18.40	25.00	10.90	400	20.80	28.10	12.60
240	15.90	21.10	9.32	288	17.50	23.30	10.30	160	12.30	16.80	6.97	200	14.20	19.10	8.19
120	10.20	14.10	5.75	144	11.50	15.80	6.49	80	7.66	10.60	4.42	100	9.13	12.60	5.22
60	6.25	8.67	3.57	72	7.12	9.85	4.07	40	4.65	6.46	2.65	50	5.48	7.59	3.12
30	3.77	5.18	2.13	36	4.29	5.83	2.44								
15	2.32	3.27	1.32	18	2.61	3.66	1.47	20	2.83	3.94	1.59	25	3.30	4.62	1.86

Tab.3. 4: RMS pentru cele 4 modele, pentru fiecare rezoluție intermediară din procesul de interpolare. Culoarea sunt ale curbelor corespunzătoare de pe graficul din Fig.3. 7. Valorile scrise cu caractere înclinare sunt ale modelelor intermediare elaborate temporar în procesul de interpolare și care au fost șterse la finalul interpolării. Valorile din rândul de jos sunt ale celor 12 modele finale.

Sintetizarea tuturor diferențelor dintre model și terenul real într-un singur indicator este o metodă robustă de evaluare a acurateții modelului. Însă eroarea medie pătratică nu oferă și o descriere a abaterii medii a valorilor modelului față de valorile din punctele de prelevare, abatere care în mod curent este considerată 0, ceea ce implică o stare de staționaritate, iar aceasta nu se justifică întotdeauna într-un model general al erorii. [Martinoni, 2002].

Pe de altă parte punctele de prelevare sunt deja o reprezentare incertă a terenului real, iar aceasta înseamnă că modelul va prelua erorile\* acesteia. În plus, discretizarea suprafeței terestre în curbe de nivel generează un efect care pune probleme pentru derivarea parametrilor morfometrici: efectul de terasare al versanților în lungul curbelor de nivel. Algoritmul de interpolare folosit nu este suficient de elaborat pentru a înlătura acest efect care se pare a fost rezolvat în versiunile mai recente, prin introducerea unui parametru care permite adaptarea locală a interpolării la variația pantei [Hutchinson, 2000].

Iată de ce în cazul datelor provenite din reprezentări cartografice acuratețea absolută este mai puțin importantă decât cea relativă.

### 3.3.2. Evaluarea acurateții relative

În secțiunea precedentă s-a arătat că modelul prezintă o eroare medie în intervalul 1.32 m – 4.62 m. Aceasta poate fi considerată acceptabilă, însă, după cum s-a arătat, nu poate cuprinde măsura în care modelul corespunde realității. Pentru aceasta, câteva metode sunt la îndemână:

- analiza distribuției microdepresiunilor rezultate ca erori în procesul de interpolare;
- extragerea rețelei hidrografice și a curbelor de nivel din model și compararea cu cele vectorizate direct de pe harta topografică;
- derivarea unor parametri foarte sensibili la variațiile de altitudine și analiza distribuției lor;

\* Aici termenul „eroare” trebuie înțeles în sens statistic, ca prezență a incertitudinii și nu neapărat a unei valori eronate.

### 3.3.2.1. Distribuția erorilor ca microdepresiuni

Unul din fișiere de diagnostic create automat în procesul de interpolare cuprinde erorile reprezentate de microdepresiunile artificiale. Numărul și distribuția acestora pot oferi indicații asupra validității interpolării. Succesiunea de hărți de la Fig. 2.8. la Fig. 2.17. prezintă distribuția acestor erori pentru cele nouă modele realizate\*. Se observă că numărul de erori scade pe măsură ce cresc valorile rezoluției și coeficientului de corecție a erorii de discretizare, în concordanță cu observația că factorul *Def* controlează netezirea suprafeței. Cel mai mic număr de erori,  $S = 11$ , corespunde modelului cu rezoluția  $P = 20$  m și  $Def = 1.5$ .

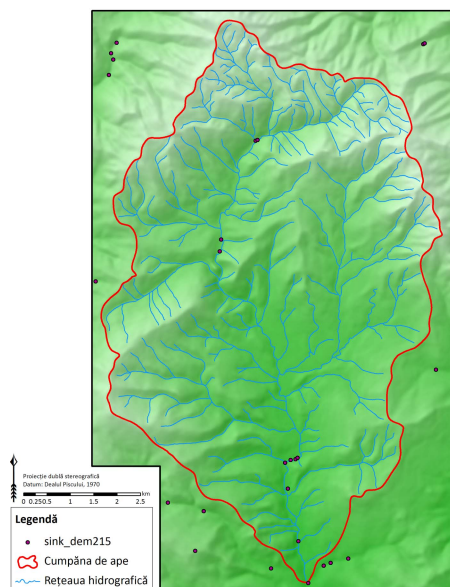


Fig.3. 8.  $P = 15$  m,  $Del = 1.0$ ,  $S = 26$

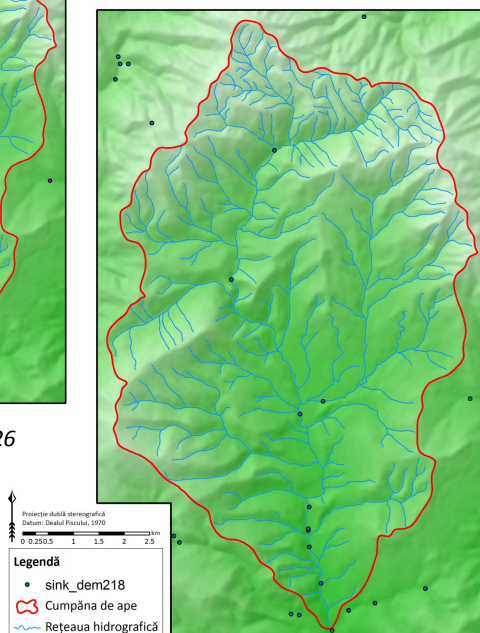


Fig.3. 9:  $P = 18$  m,  $Def = 1.0$ ,  $S = 24$

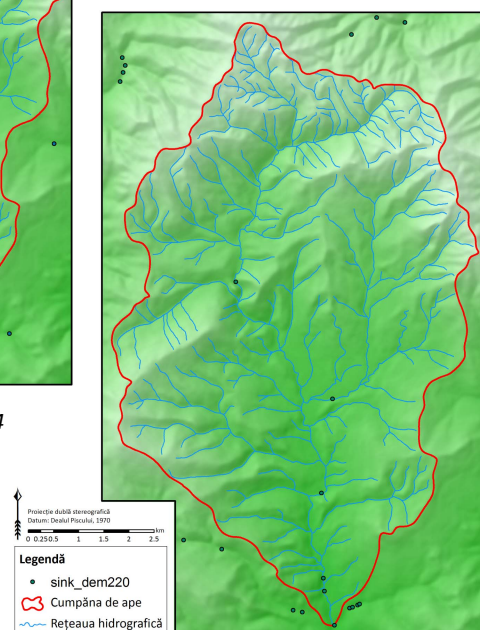


Fig.3. 10:  $P = 20$ ,  $Def = 1.0$ ,  $S = 21$

\* Pentru fiecare hartă,  $P$  este valoarea rezoluției,  $Def$  – valoarea coeficientului de corecție a erorii de discretizare (v. 2.2.2.7.), iar  $S$  reprezintă numărul de microdepresiuni rezultate.

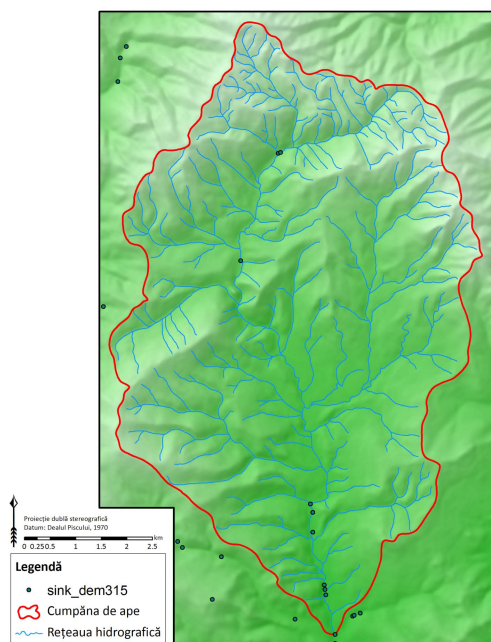


Fig.3. 11:  $P = 15$  m,  $Def = 1.5$ ,  $S = 23$

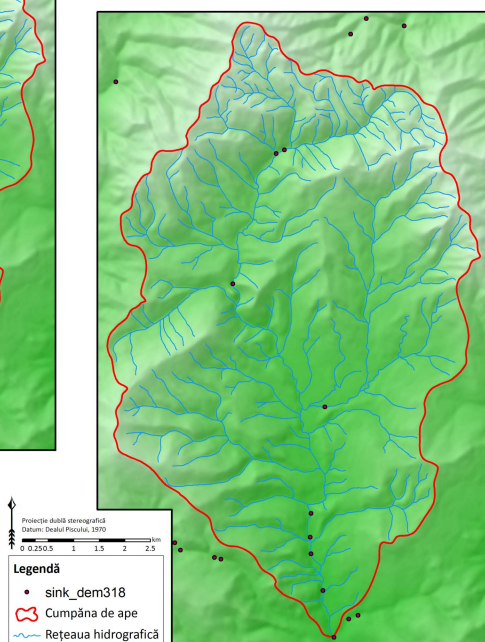


Fig.3. 12:  $P = 18$  m,  $Def = 1.5$ ,  $S = 19$

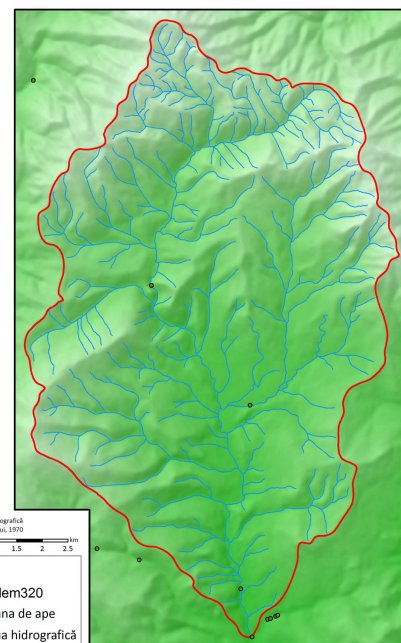


Fig.3. 13:  $P = 20$ ,  $Def = 1.5$ ,  $S = 11$

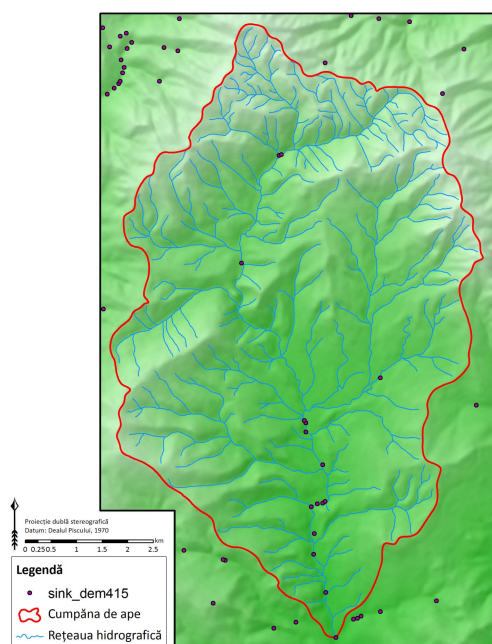


Fig.3. 14:  $P = 15$  m,  $Def = 0.5$ ,  $S = 52$

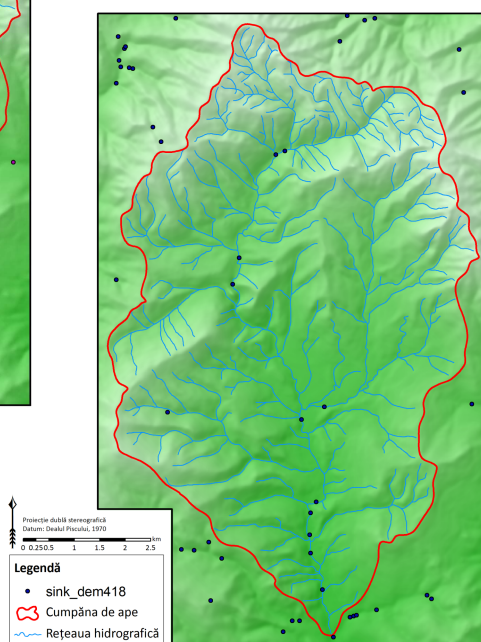


Fig.3. 15:  $P = 18$  m,  $Def = 0.5$ ,  $S = 46$

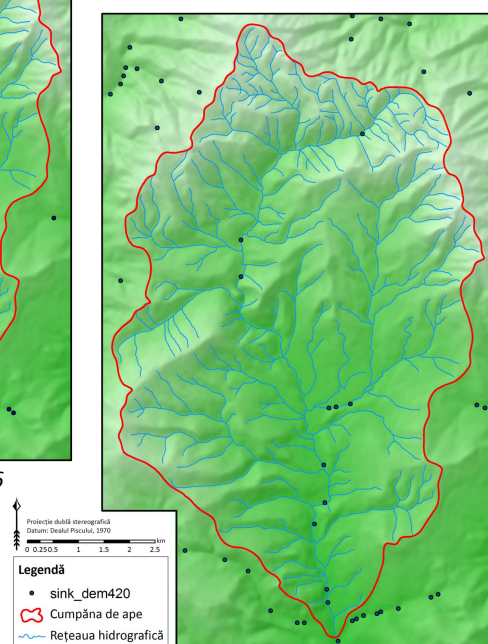


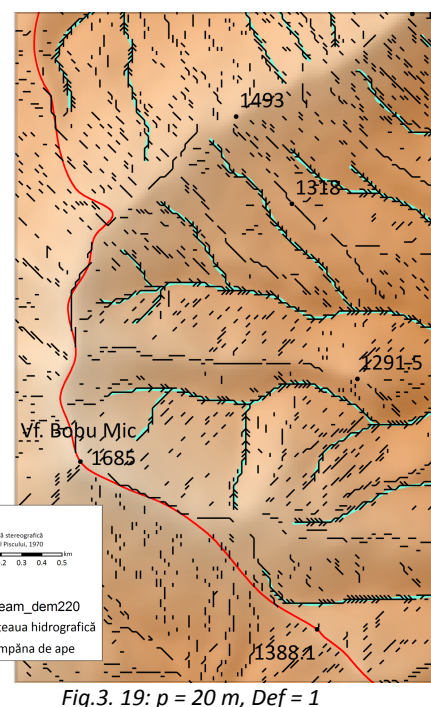
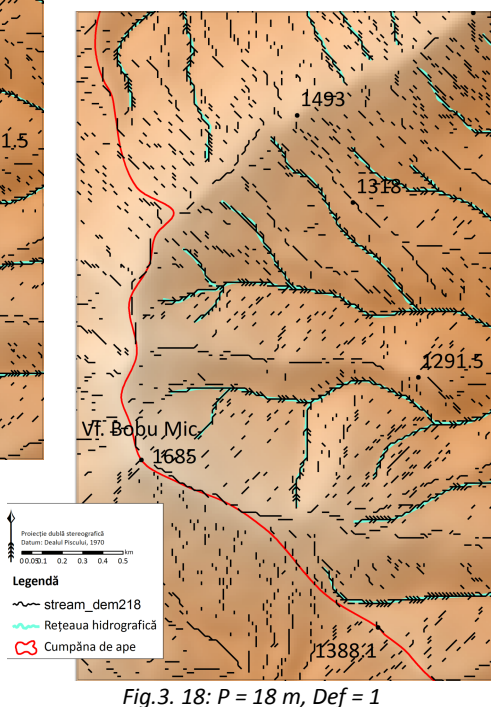
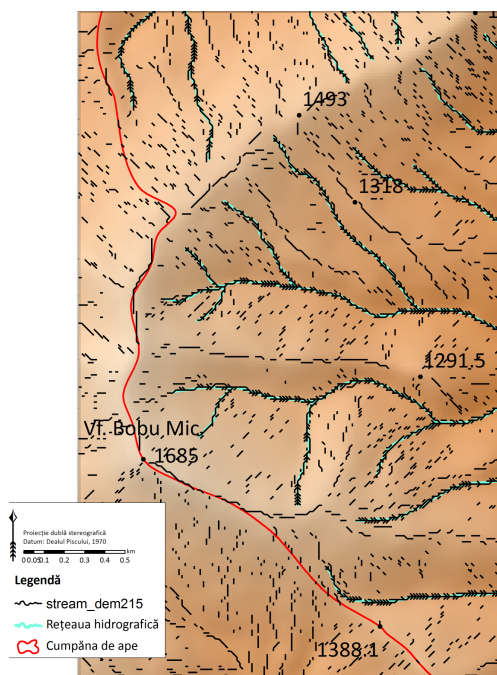
Fig.3. 16:  $p = 20$  m,  $Def = 0.5$ ,  $S = 45$



### 3.3.2.2. Compararea rețelei hidrografice și a curbelor de nivel

Pentru compararea rețelei hidrografice digitizate cu cea derivată din model, se poate folosi layerul derivat automat în procesul de interpolare, ca fișier de diagnostic. În Fig.3. 17, Fig.3. 18 și Fig.3. 19 sunt redată detalii din rețelele hidrografice vectorizate și extrase din model. Următoarele observații se impun:

- Rețeaua a fost extrasă din model pe baza unui algoritm ce compară valorile fiecărui pixel cu valorile pixelilor din jur și trasează o linie în direcția în care descresc aceste valori. Se realizează astfel mai degrabă o reprezentare a câmpului de drenaj al suprafeței topografice. De aceea și aspectul relativ dezordonat și prezența segmentelor care nu confluează. Astfel liniile de concentrare a drenajului, reprezentate prin segmentele ce par că se „acumulează”, se orientează exact pe traiectoria liniilor din rețeaua hidrografică reală, ceea ce arată că modelul este corect din punct de vedere hidrologic, în sensul că nu conține bariere în liniile de drenaj.
- Aceasta este valabil pentru toate modele din intervalul de rezoluții testat, precum și pentru diferite valori ale *Def*, ceea ce demonstrează oportunitatea folosirii algoritmului pentru interpolarea unor modele ce pot fi folosite în analize hidrologice.



Compararea curbelor de nivel extrase din model cu cele vectorizate se realizează în mod analog, operația de extragere a izoliniilor din orice set de date de tip raster fiind una curentă în toate aplicațiile GIS. Vom analiza distribuția acestora tot pe o suprafață redusă din zona de studiu, pentru a surprinde detaliile, și tot comparativ, între modele create cu diferiți parametri (rezoluția și coeficientul de corecție a erorii de discretizare). Și pentru a observa și mai amănunțit rezultatul interpolării, curbele de nivel au fost extrase din modele cu o echidistanță de 5 metri, jumătate din cea a hărții topografice.

În Fig.3. 20, Fig.3. 21 și Fig.3. 22 sunt prezentate curbele de nivel extrase din modele de rezoluție 15 m. Se observă că cea mai bună reprezentare a curbelor de nivel s-a obținut din modelul interpolat cu  $Def = 0.5$ . Cum acest factor controlează netezirea modelului, valoarea cea mai mică va impune ca interpolarea să se facă cu valori mai apropiate de datele de input decât în cazul celorlalte modele, de aici și asemănarea mai mare a curbelor de nivel. Pe ansamblu, însă, izohipsele extrase din toate modelele se suprapun bine cu cele vectorizate de pe harta topografică. Aceasta indică faptul că interpolarea s-a realizat fără erori majore în toate cazurile și că, din acest punct de vedere, compararea curbelor de nivel este utilă pentru validarea rezultatelor, însă nu este un criteriu consistent pentru alegerea celui mai adecvat model.

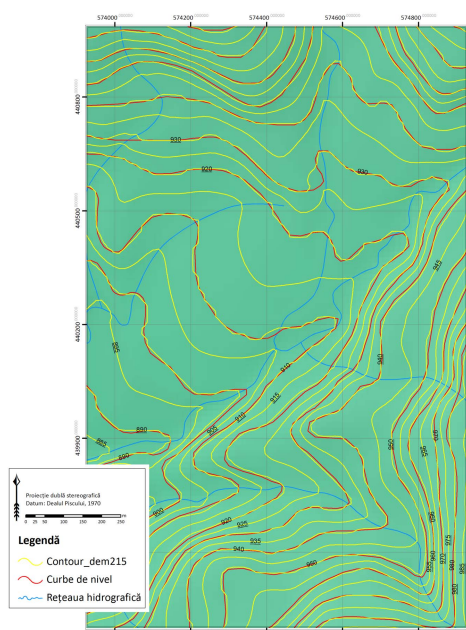


Fig.3. 20:  $P = 15\text{ m}$ ,  $Def = 1.0$

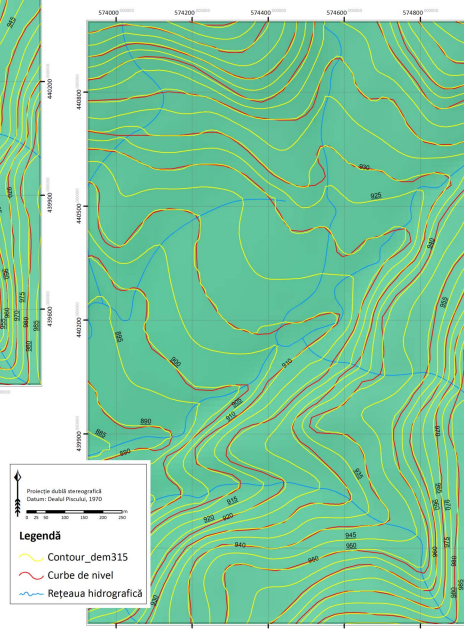


Fig.3. 21:  $P = 15\text{ m}$ ,  $Def = 0.5$

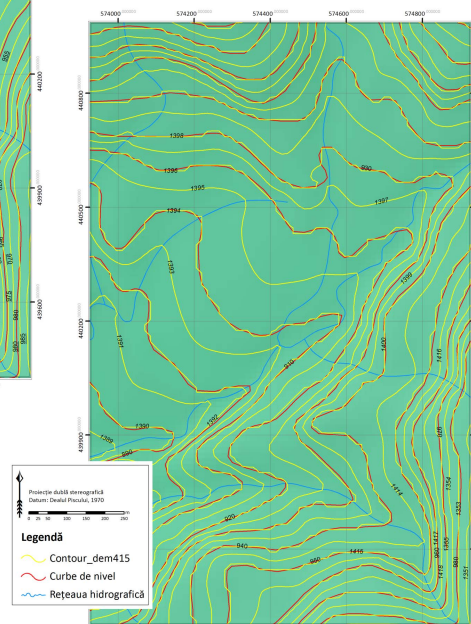


Fig.3. 22:  $P = 15\text{ m}$ ,  $Def = 1.5$

### 3.3.2.3. Distribuția parametrilor morfometrici diagnostic

Doi parametri derivați din modelul numeric altitudinal sunt importanți pentru că distribuția lor poate valida rezultatul interpolării, mai ales în ceea ce privește prezența versanților terasați. Rezultă astfel o metodă eficientă de evaluare a acurateții relative a modelului, cea care vizează forma generală a reliefului.

Cei doi parametri sunt:

- Panta: fiind un indicator al variației altitudinii cu distanța, derivarea hărții pantelor și observarea modului în care panta variază în lungul versanților poate pune în evidență aceste eventuale erori de interpolare; aceasta și datorită faptului că este foarte bine percepută în teren de cel care face analiza. Se va reprezenta în grade sexagesimale.

- Curbura în profil, este un indicator mai greu de sesizat în teren, care indică modul în care variază panta cu distanța, în lungul direcției cu cea mai mare pantă; un versant terasat va apărea foarte evident pe această hartă, prin dispunerea în benzi a suprafețelor cu diferite curburi și în special prin alternanța benzilor concave cu cele convexe. Se va reprezenta în clase de curbură, care vor indica forma versantului în lungul lungul pantei astfel:

- valorile mai mici decât -0.002, formă concavă în amonte;
- între -0.002 și 0.002 suprafață plană, fără curbură;
- mai mari de 0.002, formă convexă în amonte.

Efectul de terasare al versanților presupune schimbarea atât a pantei cât și a formei suprafeței, în lungul versantului. Acesta apare datorită importanței mai mari pe care o acordă algoritmul de interpolare curbelor de nivel, care se dispun transversal față de versant. Pe hărțile pantelor și curburii acest efect este vizibil prin alternanța pe distanțe scurte, a unor fâșii cu pante și respectiv curburi diferite, ca în Fig.3. 23 și Fig.3. 24, care reprezintă detalii din hărțile obținute pe baza modelelor în care această eroare este cel mai accentuată. Succesiunea completă a hărților celor doi parametri pentru toate cele nouă modele testate\* este prezentată în pag. 41-43.

Se observă că efectul este cu atât mai accentuat cu cât rezoluția și *Def* sunt mai mici. Aceasta pentru că o rezoluție mică presupune un grad mai mare de detaliere și un coeficient *Def* mai mic - o acuratețe absolută mai mare. Creșterea rezoluției și a *Def* au ca efect netezirea suprafeței, prin reducerea variației locale a altitudinii și este o măsură de îmbunătăți reprezentarea din model.

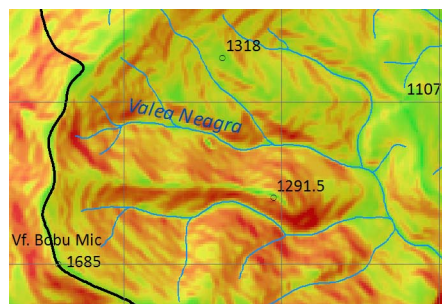


Fig.3. 23: Detaliu din harta pantelor sugestiv pentru efectul de terasare al versanților. Harta întregă este redată în Fig. 3. 27

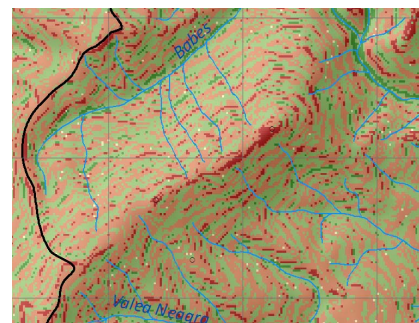


Fig.3. 24: Detaliu din harta curburii în profil. Harta întregă în Fig. 3. 30

\* câte trei modele diferite în funcție de factorul de corecție a erorii de discretizare, pentru trei rezoluții din intervalul optim: la 15, 18 și 20 m



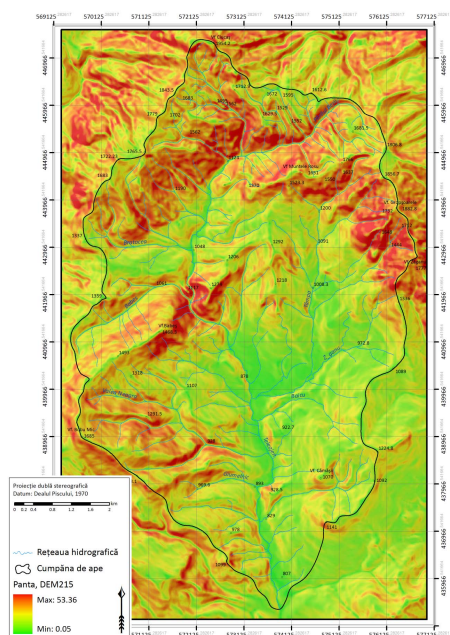


Fig.3. 25: Pantele din modelul:  
 $P=15m$ ,  $Def=1.0$

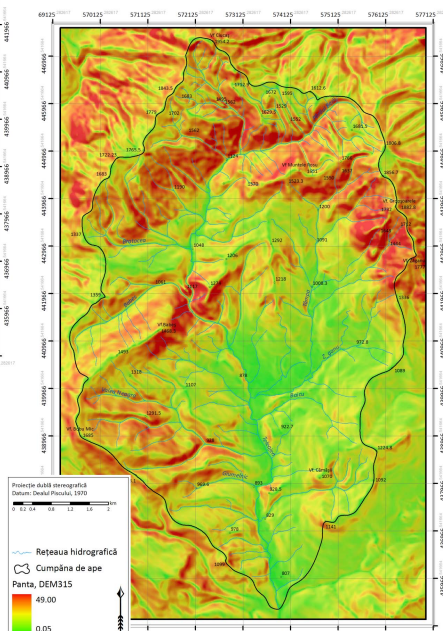


Fig.3. 26: Pantele din modelul:  
 $P=15m$ ,  $Def=1.5$

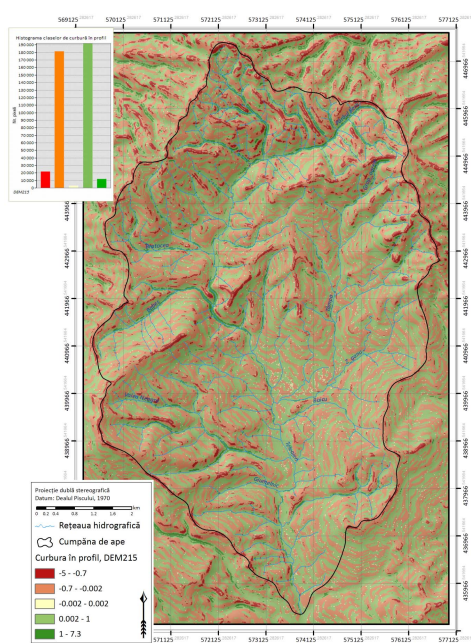


Fig.3. 28: Curbura în profil din modelul:  
 $P=15m$ ,  $Def=1.0$ .

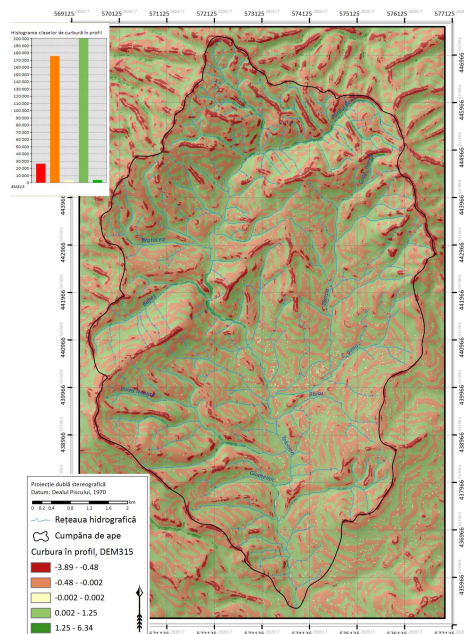


Fig.3. 29: Curbura în profil din modelul:  
 $P = 15m$ ,  $Def = 1.5$

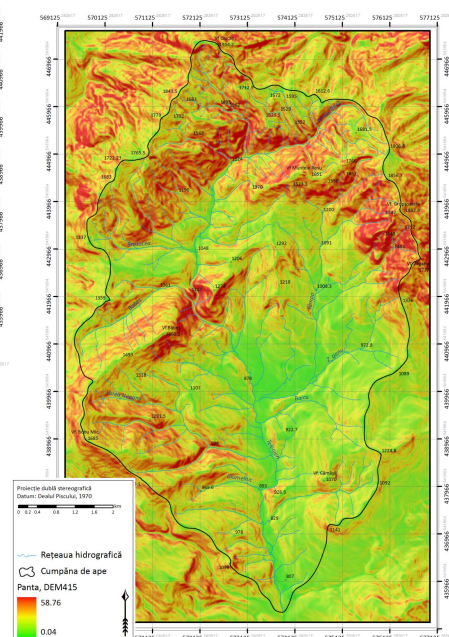


Fig.3. 27: Pantele din modelul:  
 $P=15m$ ,  $Def=0.5$

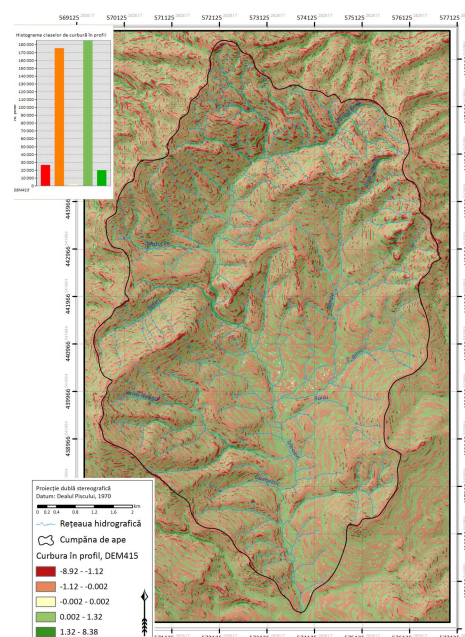


Fig.3. 30: Curbura în profil din modelul:  
 $P = 15m$ ,  $Def = 0.5$



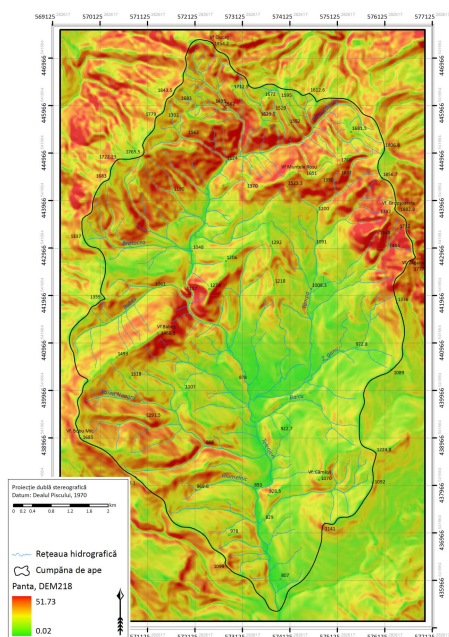


Fig.3. 31: Pantele din modelul:  
 $P = 18 \text{ m}$ ,  $\text{Def} = 1.0$

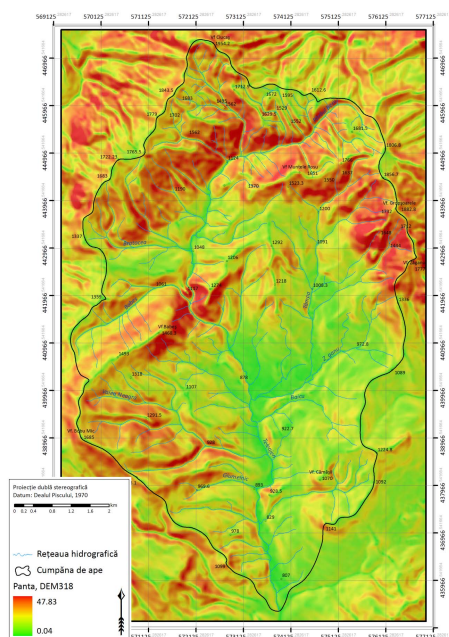


Fig.3. 32: Pantele din modelul:  
 $P = 15 \text{ m}$ ,  $\text{Def} = 1.5$

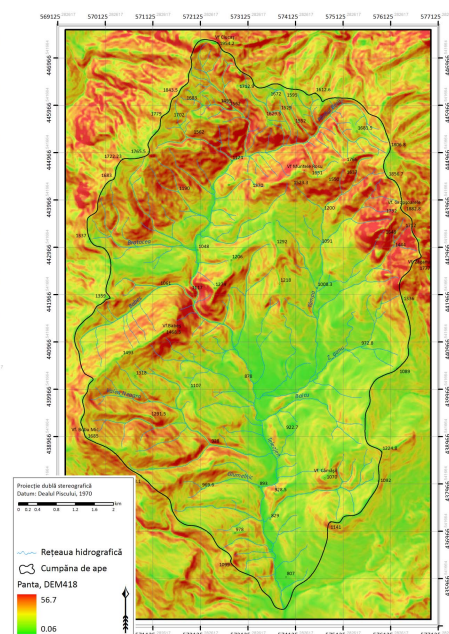


Fig.3. 33: Pantele din modelul:  
 $P = 15 \text{ m}$ ,  $\text{Def} = 0.5$

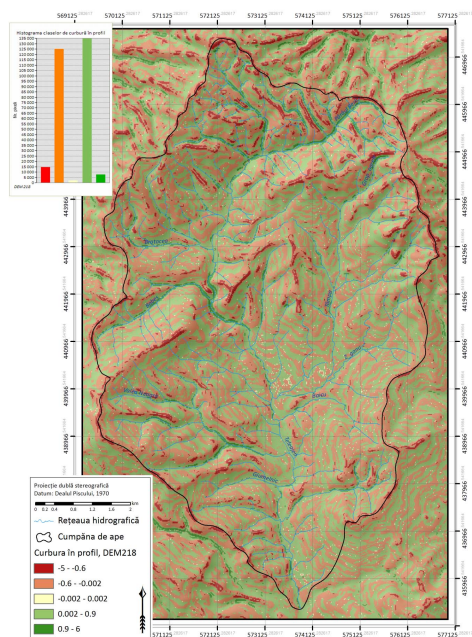


Fig.3. 34: Curbura în profil din modelul:  
 $P = 18 \text{ m}$ ,  $\text{Def} = 1.0$

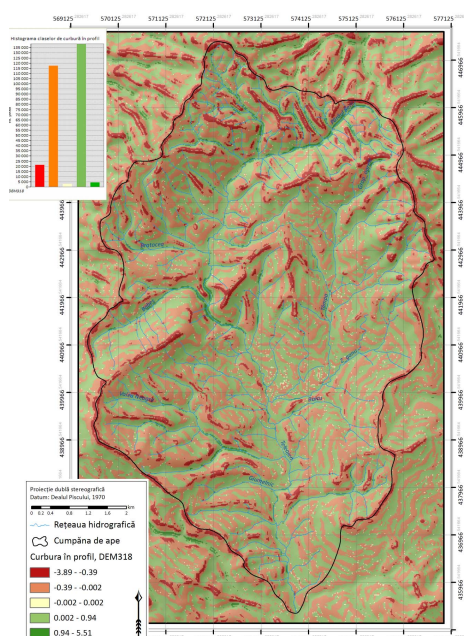


Fig.3. 35: Curbura în profil din modelul:  
 $P = 18 \text{ m}$ ,  $\text{Def} = 1.5$

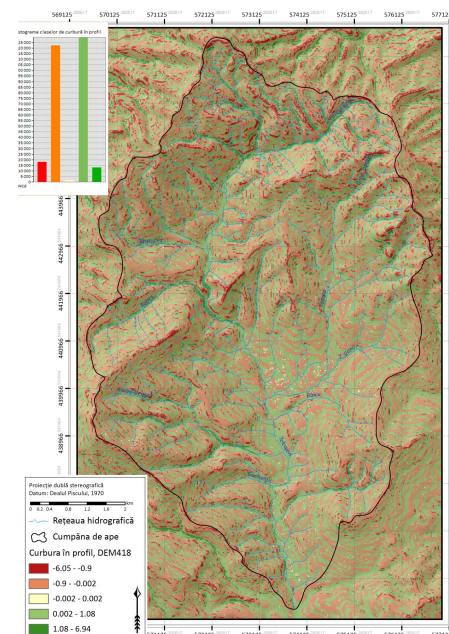


Fig.3. 36: Curbura în profil din modelul:  
 $P = 18 \text{ m}$ ,  $\text{Def} = 0.5$



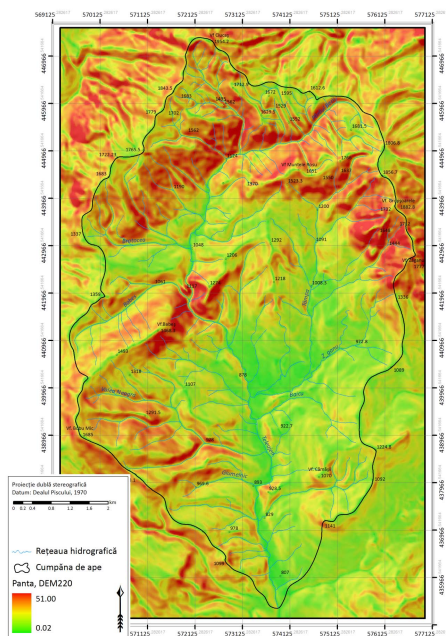


Fig.3. 37: Panta din modelul:  
 $P = 20 \text{ m}$ ,  $\text{Def} = 1.0$

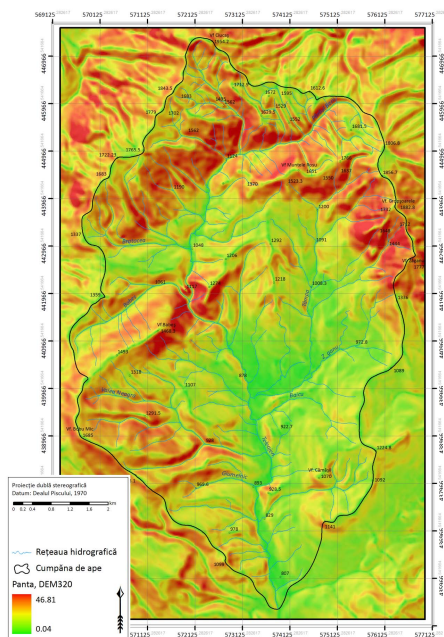


Fig.3. 38: Panta din modelul:  
 $P = 20 \text{ m}$ ,  $\text{Def} = 1.5$

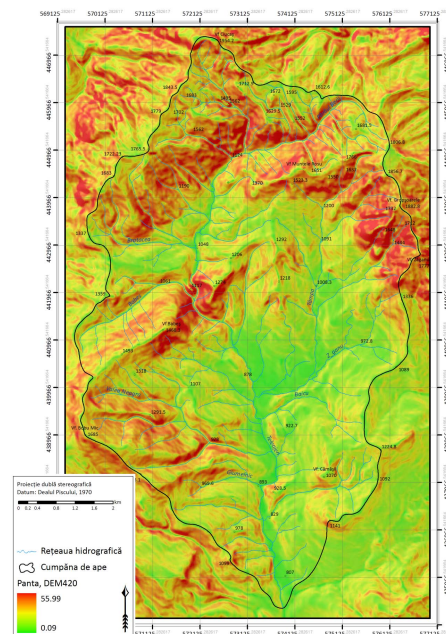


Fig.3. 39: Panta din modelul:  
 $P = 20 \text{ m}$ ,  $\text{Def} = 0.5$

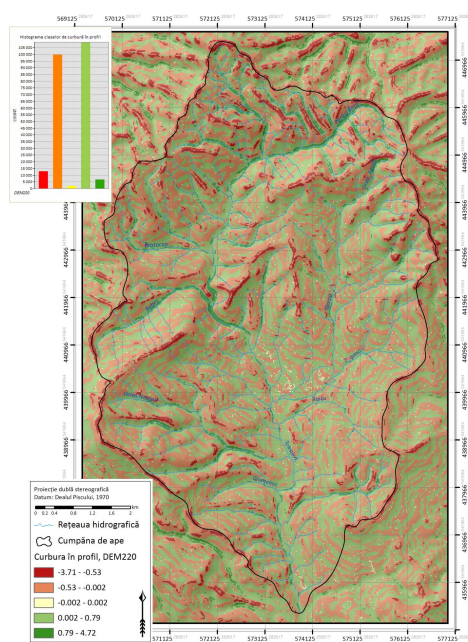


Fig.3. 40: Curbura în profil din modelul:  
 $P = 20 \text{ m}$ ,  $\text{Def} = 1.0$

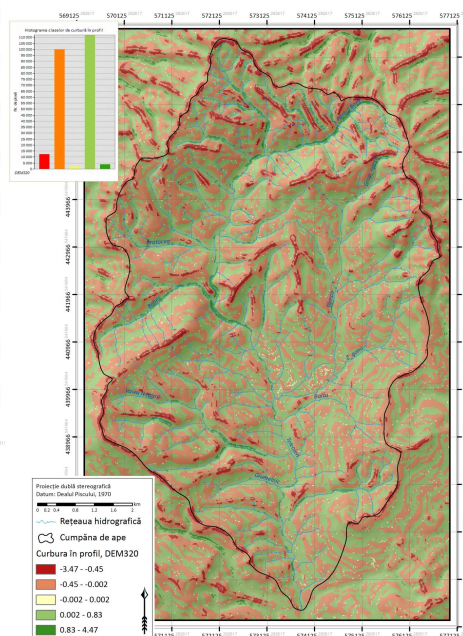


Fig.3. 41: Curbura în profil din modelul:  
 $P = 20 \text{ m}$ ,  $\text{Def} = 1.5$

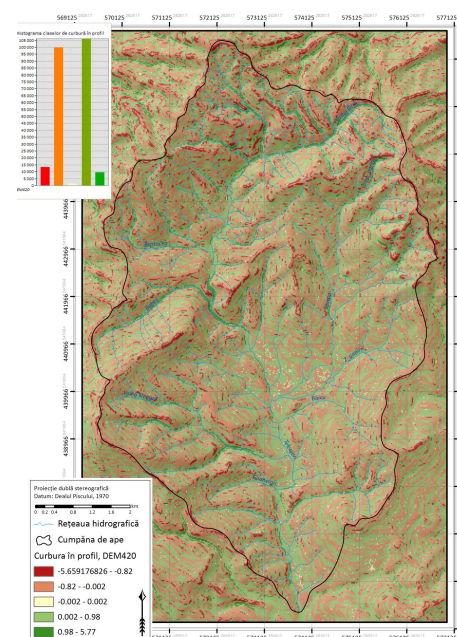


Fig.3. 42: Curbura în profil din modelul:  
 $P = 20 \text{ m}$ ,  $\text{Def} = 0.5$

Din distribuția pantelor și curburii în profil, se pare că modelul cel mai apropiat de cel natural este cel cu rezoluția  $P = 20$  m și  $Def = 1.5$ , deoarece efectul de terasare al versanților este cel mai estompat, iar intervalul în care ia valori curbura în profil este cel mai mic (între  $-3.47$  și  $+4.47$ ) arătând că pe ansamblu valorile curburii sunt cele mai mici dintre modele testate. Însă după cum s-a arătat în cap. 2.3.1., acesta este și cel cu acuratețea absolută cea mai mică. Cu alte cuvinte, este cel mai neted, dar și cel mai puțin precis.

De aceea, în cazul în care se dorește utilizarea unor modele cu acuratețea relativă mai puțin bună (după distribuția curburii în profil), însă cu cea absolută mai mare, adică a unor modele cu rezoluții mai mici, se impune optimizarea acestora, adică reducerea erorilor precum cea de terasare a versanților prin aplicarea unor filtre succesive.

### 3.3.3. Optimizarea modelului numeric altitudinal

Modelele vizate pentru optimizare și pentru utilizarea în etapa de analiză a terenului sunt cele la rezoluția de 15 m și 18 m, cu  $Def = 0.5$ . Acestea sunt modelele cu cea mai bună acuratețe absolută, însă prezintă acel efect de terasare a versanților vizibil pe hărțile curburii în profil (Fig.3. 30 și Fig.3. 36)

Se vor aplica următoarele metode:

- corectarea microdepresiunilor descrise în 3.3.2.1;
- aplicarea unui filtru pentru reducerea efectului de terasare.

#### 3.3.3.1. Corectarea microdepresiunilor (*sinks*)

Microdepresiunile rezultate din procesul de interpolare sunt pixeli cu valori mai mici decât ale tuturor celor din jur. În mod ideal, există un singur astfel de pixel acceptabil, acela este punctul de ieșire al râului din bazinul hidrografic. Celelalte nu sunt acceptabile pentru că definesc puncte în care drenajul nu mai este posibil și sunt cu atât mai de nedorit cu cât se aliniază rețelei hidrografice, făcând ca în dreptul lor, aceasta să prezinte întreruperi. După cum s-a arătat în Fig.3. 14 și Fig.3. 15, în urma interpolării acestor modele au rezultat 56 și respectiv 46 de microdepresiuni. Deoarece acest tip de eroare este foarte întâlnit, există unelte pentru corectarea sa în toate pachetele standard ale celor mai cunoscute aplicații GIS\*. Pentru studiul de față s-a aplicat unealta *Fill* din aplicația ArcGIS 9.2. Algoritmul presupune, în esență, căutarea valorilor mai mici decât toate cele din jur și înlocuirea lor cu cea mai mică dintre ele. Acesta prevede și o modalitate de selecție a microdepresiunilor, prin stabilirea, ca prag, a diferenței dintre valoarea microdepresiunii și cea mai mică dintre valorile vecine. Astfel algoritmul va ignora microdepresiunile mai adânci decât această diferență, permițând modelarea terenurilor care conțin asemenea puncte (de exemplu cele carstice). S-a aplicat această corecție pe ambele modele ce se doresc a fi îmbunătățite.

---

\* IDRISI, GRASS, ArcGIS, Landserf, Saga, PCRaster

### 3.3.3.2. Filtrarea modelului

Filtrele sunt funcții care determină modificarea controlată a valorilor unui set de date. Filtrele spațiale sunt cele care se aplică datelor spațiale și, datorită asemănării datelor raster, sub care formă sunt cel mai utilizate, cu imaginile digitale, au fost preluate din domeniul procesării digitale a acestora. Cele mai cunoscute filtre, incluse în toate pachetele de GIS, sunt cele liniare, așa numite *low-pass* sau *high-pass* și cele nonliniare. Ambele sunt funcții locale, care se aplică pe o vecinătate de pixeli, formată de regulă dintr-o matrice de 3 linii și 3 coloane. Diferența constă în faptul că primele înlocuiesc valoarea unui pixel cu media ponderată a tuturor celor din vecinătatea sa, iar cele nonliniare, cu un alt indicator statistic, de exemplu cu mediana, sau abaterea standard a valorilor din respectiva vecinătate [Smith et al., 2008].

În cazul nostru, este de dorit aplicarea unui filtru care să atenueze diferențele locale dintre valorile pixelilor, să „netezească” suprafața. Acesta este un filtru *low-pass*, și în special, un filtru care înlocuiește valoarea fiecărui pixel cu media aritmetică a celor din vecinătatea sa. Un astfel de filtru este implementat în ArcGIS în unealta *Filter*, selectând opțiunea *Low*.

S-a aplicat acest filtru pe cele două modele cu rezoluțiile de 15 și 18 m, iar validarea acestora s-a realizat, prin comparație cu modelul la rezoluție de 20 m cu  $Def = 1.5$ , astfel:

- acuratețea absolută s-a evaluat prin calcularea erorii medii pătratice (*RMS*) a fiecăruia pe un setul de 53 de vârfuri folosit ca date de input în interpolare (cap. 2.1.2.). S-au obținut valori de aproximativ 5.7 m pentru ambele modele, comparabile cu modelul la rezoluție de 20 m;

- acuratețea relativă – prin derivarea hărților curburii în profil și analizarea acestora.

Comparând hărțile din Fig.3. 44 și Fig.3. 43, care prezintă distribuția curburii în profil pentru modelele optimizate, cu cea din Fig.3. 41, care prezintă curbura în profil din modelul cu cea mai bună acuratețe relativă, neoptimizat, se pot formula următoarele concluzii:

- Toate cele trei modele au aceeași acuratețe absolută:  $RMS = 5.72$  m, deci sunt similare din acest punct de vedere;

- Pentru obținerea acestei acurateți, pe modelul cu rezoluția de 15 m filtrarea s-a aplicat de două ori. Acest model avea inițial  $RMS = 2.7$ , ceea ce înseamnă că aplicând un filtru se reduce din acuratețea absolută, fapt explicabil prin efectul de „netezire” a datelor, pe care îl presupune filtrarea *Low – Pass*.

- Modelul cu rezoluția de 18 m prezenta inițial o acuratețe absolută de 3.1 m și, ținând cont și de faptul că a fost generat cu aceeași valoare  $Def = 0.5$  a modelului cu rezoluția de 15 m, rezultă că și creșterea rezoluției determină scăderea acurateții absolute;

- Prin aplicarea filtrului s-au obținut modele pentru care valorile curburii în profil se înscriu într-un interval mai restrâns decât cele inițiale, demonstrând efectul de netezire prin eliminarea valorilor extreme ale curburii; de asemenea, noile intervale sunt similare celui în care ia valori curbura în profil din modelul cu



rezoluția de 20 m;

- Deși pentru modelele filtrate distribuția curburii în profil încă prezintă alternarea valorilor concave cu cele convexe mai accentuat decât în cazul modelului cu rezoluția de 20 m (Fig.3. 41), valorile care alternează se încrui în intervale de curbura mică, fie concavă, fie convexă (a se vedea histogramele claselor de curbura din fiecare figură); aceasta înseamnă că, în fapt, alternează suprafețe foarte puțin concave, cu foarte puțin convexe, iar acestea sunt predominante pe toată suprafața de studiu. De aceea această alternanță poate fi considerată acceptabilă, iar acuratețea relativă a ambelor modele validată.

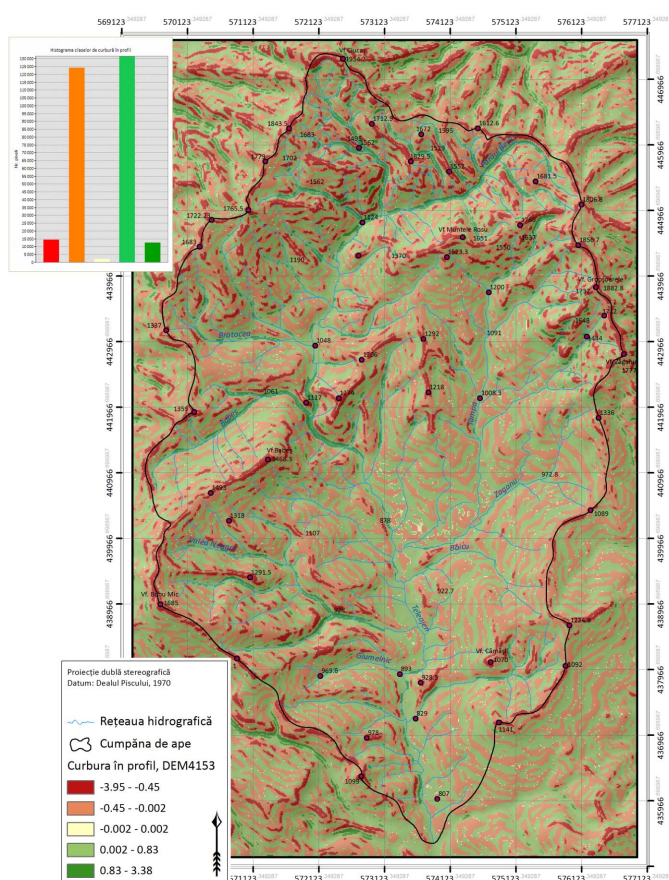


Fig.3. 44: Curbura în profil pentru modelul:  $P = 15$  m,  $Def = 0.5$ , după aplicarea a două filtre succesive Low-Pass.  $RMS = 5.72$  m. Vezi și Fig.3. 30 pentru modelul inițial.

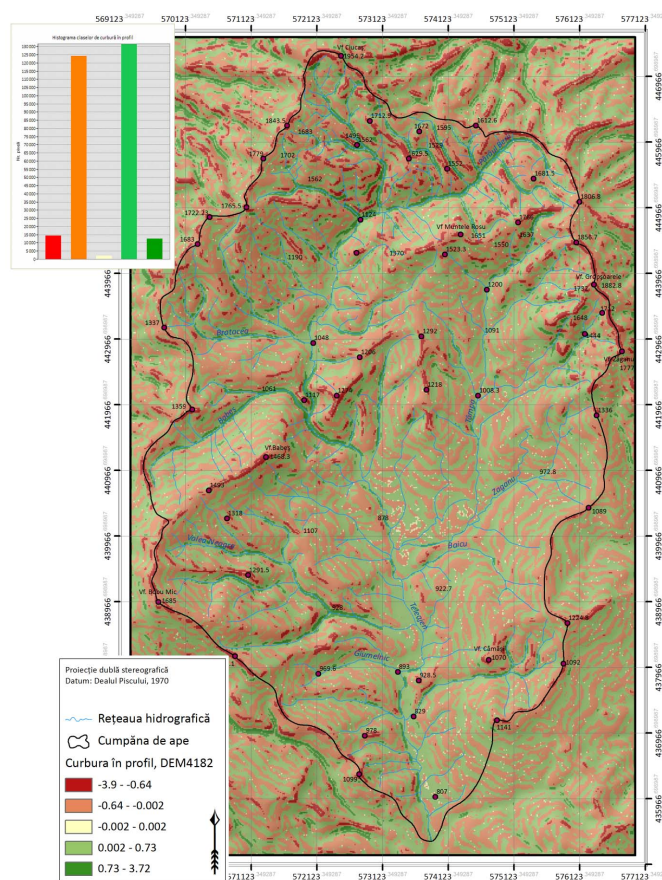


Fig.3. 43: Curbura în profil pentru modelul:  $P = 18$  m,  $Def = 0.5$ , după aplicarea unui filtru Low-Pass.  $RMS = 5.72$  m. Vezi și Fig.3. 36 pentru modelul inițial.

### 3.3.3.3. Mediarea mai multor rezultate

O altă metodă de optimizare este mediarea mai multor rezultate. Acesta presupune:

- că modelele se suprapun exact și au aceeași rezoluție;
- media se realizează la nivel de pixel, între valorile diferite din modele mediate, corespunzătoare fiecărui pixel;

S-a realizat aceasta între cele 3 modele cu rezoluția de 15 m. A rezultat un model cu  $RMS = 3.7$ , deci cu o acuratețe absolută mai mare decât cele anterioare, și cu o distribuție a curburii în profil redată în Fig.3. 45 care reflectă că intervalul de valori al curburii (- 5.41 – 7.28) este mai mare decât în cazul modelelor anterioare și există mai multe valori în intervalele extreme, după cum rezultă din histograma atașată. Aceasta înseamnă că acest model prezintă variații locale ale curburii mai mari decât celelalte și deci, suprafața are un aspect mai puțin neted. Acestea se pot corecta prin aplicarea unui filtru, însă aceasta nu se mai justifică deoarece s-ar obține o acuratețe absolută similară cu a celorlalte modele.

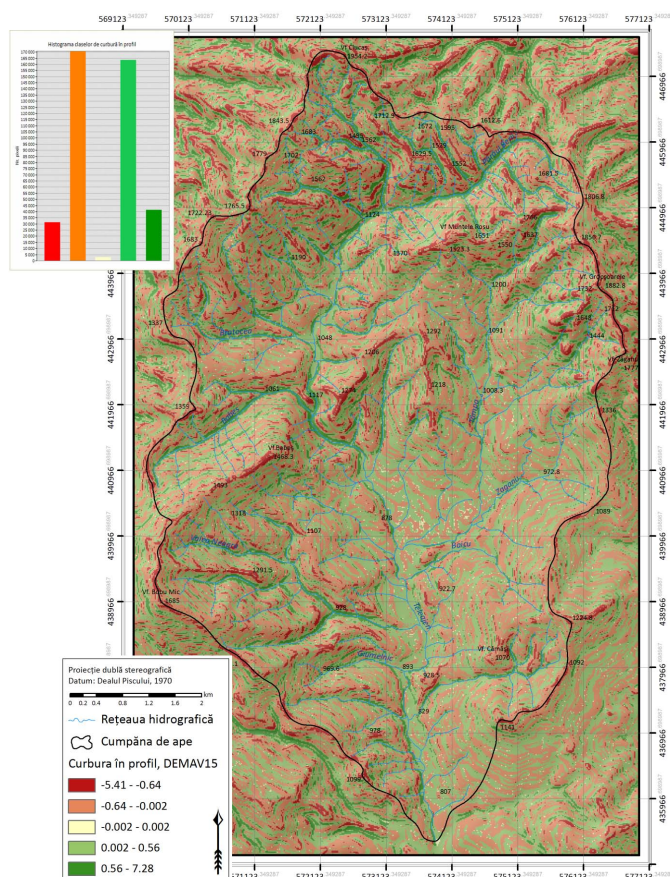


Fig.3. 45: Distribuția curburii în profil dintr-un model cu rezoluția  $P = 15$  m, obținut ca medie aritmetică a trei modele cu  $Def = 0.5, 1.0$  și  $1.5$

### 3.4. Concluzii

În capitolul ce tocmai s-a încheiat s-au abordat aspecte ce se referă la modelarea digitală a terenului. Aceasta este etapa de bază, importantă pentru că de calitatea modelului numeric altitudinal rezultat depinde calitatea analizei ulterioare, a parametrilor derivați. Este clar că aceste modele nu se pot realiza decât în cadrul unui sistem informatic geografic, prin operații tipice. Accentul s-a pus pe obținerea unui set de date raster, însă datele vectoriale de input se pot folosi ca atare în probleme ce țin de determinarea distanțelor, a lungimilor, a intersecțiilor și a incluziunilor.

Sucesiunea subcapitolelor poate fi considerată o metodologie, întrucât descrie etapele necesare construirii unui model valabile indiferent de tipul de date de input, de metoda de interpolare, de suprafața de studiu. Acesta este un proces în care pot interveni erori, de aceea atenția utilizatorului trebuie să fie concentrată către minimizarea lor, către controlarea lor. Din acest punct de vedere, calitatea unei aplicații GIS poate fi evaluată prin prezența metodelor de control al erorilor.

S-a arătat că algoritmul de interpolare oferă rezultate diferite în funcție de parametri folosiți, care sunt în număr generos (cap. 2.2.2.) și că doar variind doi parametri, rezoluția modelului și coeficientul de corecție a erorii de discretizare, se poate obține un număr mare de rezultate comparabile. S-au obținut trei modele similare în ceea ce privește acuratețea reprezentării, cu rezoluții diferite, 15, 18 și 20 m., arătând prin aceasta că pentru un set de date de input nu se poate realiza un singur model, ci, în funcție de scopul urmărit, se alege unul din mai multe variante posibile.

\* Fragment din:

Mihai Terente (2008), *Modelarea și analiza digitală a terenului*, Lucrarea de licență, Universitatea din București, Facultatea de Geografie



## Bibliografie

1. \*\*\*. 1986. *Metodologia elaborării studiilor pedologice*. ICPA.
2. Blaszczyński J. 2003. Estimating watershed runoff and sediment yield using a GIS interface to curve number and MUSLE models. USDI, Bureau of Land Management. <http://www.blm.gov/nstc/resourcenotes/rn66.html>.
3. Ciucă Maria. 1984. *Flora și vegetația pajiștilor din Masivul Ciucaș*. București: ed. Academiei Române.
4. Eastman J. R. 2006. IDRISI Andes. Guide to GIS and Image Processing. Clark Labs, Clark University. [planet.uwc.ac.za/nisl/Gwen's%20Files/GeoCourse/Resource%20Mapping/Andes%20Manual.pdf](http://planet.uwc.ac.za/nisl/Gwen's%20Files/GeoCourse/Resource%20Mapping/Andes%20Manual.pdf).
5. Gallant C., and Hutchinson M. 1997. Scale dependence in terrain analysis. *Mathematics and Computers in Simulation* 43: 313-321.
6. Gallant C., and Wilson J.P. 2000. Primary Topographic Attributes. In *Terrain Analysis: Principles and Applications*. New York: John Wiley & Sons, Ltd.
7. Hengl T., Gruber S., and Shrestha D. P. 2003. Digital Terrain Analysis in ILWIS. Lecture notes. ITC - International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. [http://www.itc.nl/library/Papers\\_2003/misca/hengl\\_digital.pdf](http://www.itc.nl/library/Papers_2003/misca/hengl_digital.pdf).
8. Hengl T. 2004. Reduction of errors in digital terrain parameters used in soil-landscape modelling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 5.
9. Huber Viorela. 2001. Cercetări asupra regimului meteoclimatic al spațiului montan (în Carpații de la Curbură). Teză de doctorat, Universitatea din București.
10. Hutchinson M. F. 1993. Development of a continent-wide DEM with applications to terrain and climate analysis. In *Environmental Modelling with GIS*. Oxford University Press.
11. Hutchinson M. F. 2000. Optimising the degree of data smoothing for locally adaptive finite element bivariate smoothing splines. *ANZIAM* 42: C774-C796.
12. Ielenicz M. 1984. *Munții Ciucaș-Buzău. Studiu geomorfologic*. București: ed. Academiei Române.
13. Koethe R., and Lehmeier F. 1996. SARA – System zur Automatischen Relief-Analyse. *Benutzerhandbuch* 2.
14. Lee G.S., and Lee K.H. 2006. Scaling effect for estimating soil loss in the RUSLE model using remotely sensed geospatial data in Korea. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 3. [www.copernicus.org/EGU/hess/hessd/3/135/](http://www.copernicus.org/EGU/hess/hessd/3/135/).

15. Maciu M., Chioreranu Aurora, and Văcaru V. 1982. *Enciclopedia geografică a României*. București: ed. Științifică și Enciclopedică.
16. Marchi L., and Fontana G. 2005. GIS morphometric indicators for the analysis of sediment dynamics in mountain basins. *Environmental Geology* 48: 218-228.
17. Martinoni Daria. 2002. Models and Experiments for Quality Handling in Digital Terrain Modelling. PhD Thesis, University of Zurich. <http://www.geo.uzh.ch/gis/services/downloads/phd/daria/index.html>.
18. Moore I. D., Grayson R. B., and Ladson A. R. 1991. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes* 5, no. 1: 3-30.
19. Moțoc M., Munteanu S., Băloiu V., Stănescu P., and Mihai G. 1975. *Eroziunea solului și metodele de combatere*. București: ed. Ceres.
20. Niculescu G. 1982. Modelarea reliefului în masivul Ciucaș. *BSSGR VI(LXXVI)*.
21. Niculescu G., and Velcea I. 1973. *Județul Prahova*. București: ed. Academiei Române.
22. Oancea D., and Velcea Valeria. 1987. Geografia României III. Carpații Românești și Depresiunea Transilvaniei. In . București: ed. Academiei Române.
23. Olaya V. 2004. *A gentle introduction to SAGA GIS*. 1st ed. <http://www.saga-gis.uni-goettingen.de/html/index.php>.
24. Oprea R. 2005. *Bazinul montan al Prahovei. Studiul potențialului natural și al impactului antropic asupra peisajului*. București: ed. Universitară.
25. Patriche C.V., Căpățână V., and Stoica D.L. 2006. Aspects regarding soil erosion spatial modeling using the USLE/RUSLE within GIS. *Geographia Technica* 2.
26. Patrulius D., Dimitrescu R., and Gherasi N. 1968. *Brașov. Harta geologică, scara 1:200 000, foaia L-35-XX. Notă explicativă*. București: Institutul Geologic.
27. Popescu G. 1958. Contribuții la stratigrafia flișului cretacic dintre valea Prahovei și valea Buzăului, cu privire specială asupra văii Teleajenului. *Studii și cercetări de geologi* III, no. 3-4.
28. Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., and Yoder D.C. 1996. *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. USDA Agriculture Handbook 703. United States Departement of Agriculture.
29. Săndulescu M. 1984. *Geotectonica României*. București: ed. Tehnică.
30. Sárközy F. 1998. GIS Functions - Interpolation. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*.

[http://www.agt.bme.hu/public\\_e/funcint/funcint.html](http://www.agt.bme.hu/public_e/funcint/funcint.html).

31. Savel Aurelia. 1955. Izvorul Chilia Popii, Cheia. In *Apele minerale și nămolurile terapeutice din România*, 1: București: Institutul de Balneologie și Fizioterapie.
32. Shary P., Sharaya L., and Mitusova A. 2002. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma* 107.
33. Smith M.J., Goodchild M. F., and Longley P. A. Geospatial Analysis - a comprehensive guide. Electronic book. <http://www.spatialanalysisonline.com/output/>.
34. Țicleanu N., and Csiki Z. 2004. *Introducere în geologia României*. București: Universitatea din București, centrul CREDIS.
35. Wilson J.P., and Gallant C. 2000. *Terrain analysis: principles and applications*. New York: John Wiley & Sons, Ltd.
36. Wischmeier W.H., and Smith D.D. 1978. *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. USDA Agriculture Handbook 537.