

Geomorfológiai egységek szétválasztása robusztus síkillesztés alkalmazásával

Tudományos Diákköri Dolgozat



Készítette:

Koma Zsófia Viktória
III. évfolyam földtudomány BSc, geofizikus szakirány

Témavezető:

Dr. Székely Balázs
egyetemi docens

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet
Geofizikai és Űrtudományi Tanszék

2012. január

Tartalom

1. Absztrakt	3
2. Bevezetés.....	4
3. A robusztus síkillesztés módszertani áttekintése.....	5
3.1. A szegmentálás fogalma.....	5
3.2. Robusztus síkillesztés.....	5
3.3. Robusztus síkillesztés alkalmazása a földtudományokban	6
3.4. Robusztus síkillesztés a szegmentálási algoritmus alkalmazásával	6
3.5. A robusztus síkillesztés során használt paraméterek	8
3.6. A szegmentálás során kapott eredmények.....	10
4. A Közép-Andok térségének modellezése robusztus síkillesztéssel	11
4.1. Közép-Andok felszínének rövid áttekintése.....	11
4.2. A Közép-Andok területéről rendelkezésre álló digitális domborzatmodell	13
4.3. Szegmentált eredmények.....	13
4.4. Reziduál értékek elemzése	19
4.5. A szegmentált eredmények további elemzése, kiértékelése	22
5. Mars felszínének modellezése robusztus síkillesztés módszerével	26
5.1. Digitális domborzatmodellek a Mars felszínéről.....	26
5.2. Szegmentált eredmények.....	28
5.3. Reziduál értékek vizsgálata	31
5.4. A terület nagyobb léptékben történő vizsgálata	32
5.5. A szegmentált eredmények elemzése.....	35
6. Összefoglalás.....	43
7. Köszönetnyilvánítás	44
8. Irodalomjegyzék.....	45

1. Absztrakt

A távérzékelés rohamos fejlődésével egyre több és több digitális domborzatmodell áll rendelkezésünkre a Föld és más égitestek (pl. Mars) felszínéről. Ezek feldolgozása és kiértékelése egyre fontosabb feladat.

Vizsgálatom tárgya geomorfológiai egységek automatikus szétválasztása és geomorfometriai vizsgálata egy, a Bécsi Műszaki Egyetemen kifejlesztett robusztus síkillesztő eljárással.

Ehhez egyrészt a Mars Expressz űrszonda keringőegységén lévő HRSC (High Resolution Stereo Camera) műszer által készített felvételek sztereó-fotogrammetriai kiértékelése alapján létrehozott digitális domborzat modellekből másrészt az SRTM adatbázisból nyert digitális domborzatmodellekből nyert adatokra alkalmaztam a szegmentáló algoritmust.

Vizsgálataim során a Mars és a Közép-Andok felszínét vizsgáltam. Közép-Andok területének vizsgálatára azért volt szükség, hogy egy olyan földi felszínt is vizsgáljak a szoftverrel, ahol rendelkezésünkre állnak különböző geomorfológiai és geológiai adatok.

Az eljárás a geofizikai inverzióhoz hasonlóan robusztus eljárással síkokat illeszt a 3D pontfelhőre. Eredményként a domborzatot közelítő síkok halmazát kapjuk. Az így nyert adatokat további térinformatikai szoftverek alkalmazásával megjelenítettem, a reziduálértékeket megvizsgáltam és az eredményeket kiértékeltem.

Megállapítható, hogy a robusztus síkillesztés segítségével képesek vagyunk bizonyos lejtős tömegmozgásokat és becsapódási krátereket automatikusan detektálni. Ugyanakkor az eredmények értelmezése további vizsgálatokat (pl. osztályozást) kíván, mivel a síkillesztés által létrehozott síkok nem mindegyike hordoz geomorfológiai/geológiai értelmet.

Az értelmezett eredmények jelentősége kettős: az eljárás egyrészt képes síkszerű, de felszínfejlődési folyamatok által átalakított (pl. erózió által felszabdalt) felületek kimutatására, másrészt a robusztus síkillesztés alkalmazásával képesek lehetünk egyes felszíninformák kvantitatív alapon nyugvó, kiterjedt vizsgálatára, pl. a Marson. A módszer újszerűsége ugyanis, hogy nagy területek automatikus geomorfológiai vizsgálatát teheti lehetővé, könnyítve ezzel az adatok feldolgozását.

Köszönet a Bécsi Műszaki Egyetemnek, hogy lehetővé tette számomra a szegmentáló algoritmus használatát, és hozzáférést biztosított a marsi digitális domborzat modellekhez.

2. Bevezetés

Alapszakos tanulmányaim ideje alatt lehetőségem nyílt csatlakozni egy, a Bécsi Műszaki Egyetemen és a Eötvös Loránd Tudomány Egyetemen folyó közös kutatásba. A kutatócsoport célja, az ESA Mars Express űrszonda HRSC kamerája által készített felvételekből elkészített digitális domborzatmodellek feldolgozása, nagyfokú adattömörítés elérése és a felszínformák elemzése egy szegmentáló algoritmus segítségével, mely különböző paraméterek figyelembe vételével síkokat illeszt a 3 dimenziós pontfelhőre. A robusztus síkillesztő szoftvert a Bécsi Műszaki Egyetem Fotogrammetriai és Távérzékelési Intézetben fejlesztették ki.

A kutatás keretein belül lehetőségem nyílt a szegmentáló algoritmus alkalmazására, és mivel érdekes kérdésnek tartottam, hogy a szoftver által szolgáltatott, a szegmentálásból nyert többletinformációk mennyire, milyen mértékben és hogyan alkalmazhatóak földtudományi vizsgálatokban, ezért készítettem ebből a témából el tudományos diákköri dolgozatomat.

A téma igencsak interdiszciplináris, egyrészt a digitális domborzat modellek kvantitatív feldolgozása alapján a geomorfológia, ezen belül is a geomorfometria tudományágába sorolható, másrészt viszont a vizsgálathoz alkalmazott szoftver robusztus paraméterbecslésen alapuló eljárása lényegileg azonos elven működik ahhoz, ezért alkalmazható a geofizikai inverzióhoz alkalmazott gondolkodásmód.

A digitális domborzatmodellek elemzése lehetőséget teremtett különböző, főleg geomorfológiai célú kvantitatív alapú vizsgálatok elvégzésére, megteremtve ezzel pl. a vízgyűjtő területek analízisét (Tarboton et al, 1991) vagy a lepusztulás mértékének becslését (Kuhlemann, 2000) és magának a geomorfometria tudományágának a kiszélesedését (Pike, 2000).

A mai napig is tart az újabb és újabb metodikai eljárások fejlesztése a digitális domborzatmodellek elemzése céljából. A légi és földi lézerszkennelés elterjedésével még inkább fontossá vált a távérzékelés útján szerzett adatok minél hatékonyabb feldolgozása, hiszen az eljárás óriási adatmennyiségeket, milliárdnyi térbeli pontot eredményez.

A geomorfológiai egységek automatikus szétválasztására már szintén léteznek különböző elgondolások, mint pl. Romstad és Etzelmüller, (2012) munkája, mely cikkben a felszín görbületeinek vizsgálatával szeparálják a különböző felszínformákat.

Az én általam alkalmazott algoritmushoz jóval közelebb áll, a Tóvári és Pfeifer, (2005) cikkben olvasható metódus, ahol a szegmentálás szintén a normálvektorok iránya, valamint az illesztett sík és a hozzá tartozó pontok távolságának meghatározásán alapul, ahogy a robusztus síkillesztésnél is, itt azonban szerepet játszik a szegmentálás során az interpoláció, mely információ veszteséssel jár.

Dolgozatomban a Mars felszínére, illetve a Közép-Andok térségére is alkalmaztam a szoftvert, célom pedig annak a kérdésnek a megválaszolása volt, hogy miként, milyen mértékben, milyen lehetőségeket nyújt ennek a szegmentáló algoritmusnak az alkalmazása a digitális domborzatmodellek feldolgozásában.

Dolgozatom ennek fényében a következőképpen épül fel: az első részben magát a szoftver működését ismertetem, majd a Közép-Andok és a Mars felszínére végzet szegmentálás eredményeit mutatom be és értékelem ki, majd vonok le következtetéseket.

3. A robusztus síkillesztés módszertani áttekintése

A robusztus síkillesztés egy szegmentálási algoritmus alkalmazásával történik, amit a Bécsi Műszaki Egyetemen fejlesztettek ki. A továbbiakban azt fogom bemutatni, hogy mi is az a szegmentálás, milyen eljárással illesztjük a síkokat a 3D pontfelhőre, hogyan értelmezzük, és miként dolgozzuk fel az adatokat.

3.1. A szegmentálás fogalma

A szegmentálás széles körben elterjedt módszer a különböző képalkotási folyamatok révén létrejött képek vizsgálatában. A szegmentálás célja általában, hogy a szegmensekkel jellemzett képek könnyebben elemezhetővé, értelmezhetővé váljanak. A szegmensek gyakran az egyes objektumok körvonalait, kontúrjait adják meg, különböző algoritmusok segítségével. A képrészletek elkülönítése általában az egyes pixelek (vagy voxelek) vizsgálatán alapul.

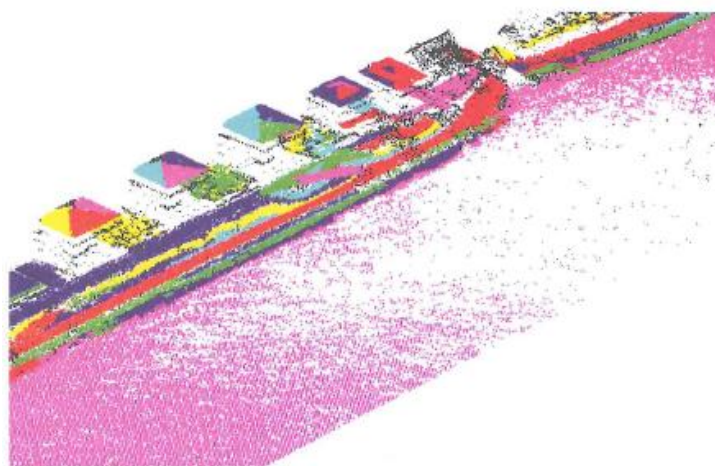
A szakirodalmat áttekintve láthatjuk, hogy rengeteg algoritmus létezik a szegmentálás megvalósítására. Különböző szempontok alapján történhet a szegmentálás pl. hisztogram elemzésen alapuló (Zhang és Hu, 2008), vagy összehasonlításon alapuló módszerek (Mobahi et al, 2011).

A szegmentálás eljárását a digitális képek különböző célzatú szegmentálásán kívül, alkalmazzák orvostudományban is, például az MRI-ben (Magnetic Resonance Imaging: Mágneses Rezonancia Képalkotás) egyebek között a fehér- és a szürkeállományt ábrázoló képtartományokat választják szét szegmentálással ezzel könnyítve az orvostudományi vizsgálatokat (pl. Mechelli et al, 2005).

A légi lézerszkennelés elterjedésével egyre inkább kutatási területté vált, a lézerszkennelés nyújtotta esetlegesen több millió pontból álló adathalmaz hatékony feldolgozása (pl. Filin és Pfeifer, 2006; Douillard et al, 2011)

3.2. Robusztus síkillesztés

A Bécsi Műszaki Egyetemen fejlesztett szegmentáló algoritmus, a légi lézerszkennelt adatokból származó pontfelhőből történő 3 dimenziós városmodellek automatikus generálását valósította meg (Dorninger és Nothegger, 2007).



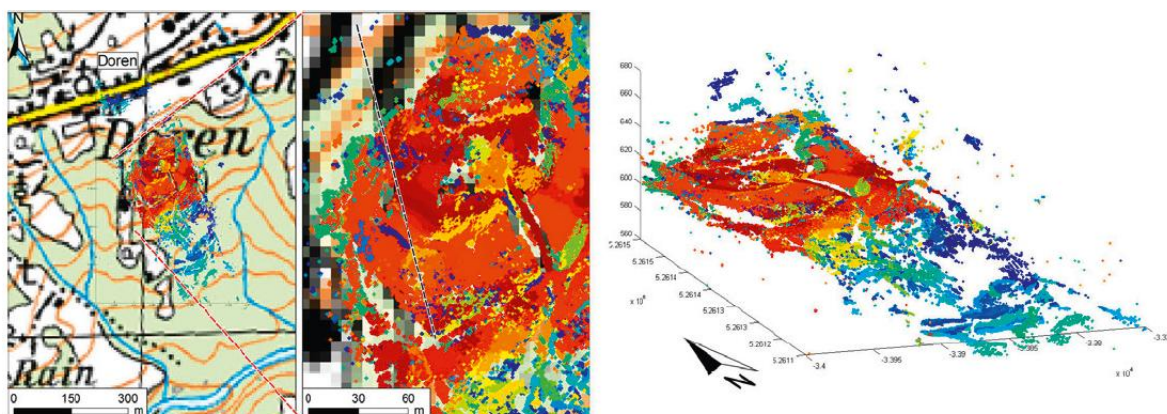
1. ábra Városok, épületek 3D differenciálatlan pontfelhőből történő modellezése a robusztus síkillesztési eljárással (Dorninger, 2011)

Az 1. ábrán láthatjuk az eljárás lényegét: a szegmentáló algoritmus síkok illesztésével az eredeti 3 dimenziós differenciálatlan pontfelhő halmaz helyett, szegmensekkel modellezett felszínt kapunk. Láthatjuk, hogy az eljárás elkülönítette a folyót, a parton hozzá vezető lépcsőfokokat és az egyes háztetőket. Azaz az eredetileg több millió pontból álló adathalmazt mindössze pár száz síkra redukálta, ezzel nagyfokú adattömörítést érve el.

Más eljárások esetén az adatok feldolgozása gyakran interpoláció segítségével történt, ezzel veszítve az adatok pontosságából azokon a helyeken ahol kevesebb adat állt rendelkezésre (pl. falak, tetők). A robusztus síkillesztő eljárás újdonsága, hogy a grid alapú 2,5D kivitelezésnél jobban alkalmazható, mert nem szisztematikus, hanem véletlen hibával terhelt esetben (kiugró értékek jelenléte esetében is) az adatsor szűrés és simítási eljárások során sem veszít pontosságából (Dorninger és Pfeifer, 2008).

3.3. Robusztus síkillesztés alkalmazása a földtudományokban

A módszert a fent említett városmodellezésen kívül is előzőleg alkalmazták már geomorfológiai vizsgálatok céljából, mégpedig az ausztriai Vorarlberg tartományban lévő doreni földcsuszamlás vizsgálatára, ahol földi és légi lézerszkennelt adatok álltak rendelkezésre a vizsgálatokhoz. Az eredményeken láthatjuk (2. ábra), hogy az illesztett síkok segítségével, már előzetesen kompasszal kimért vetőket sikerült azonosítani. (Dorninger et al, 2011, Zámolyi et al, 2010)



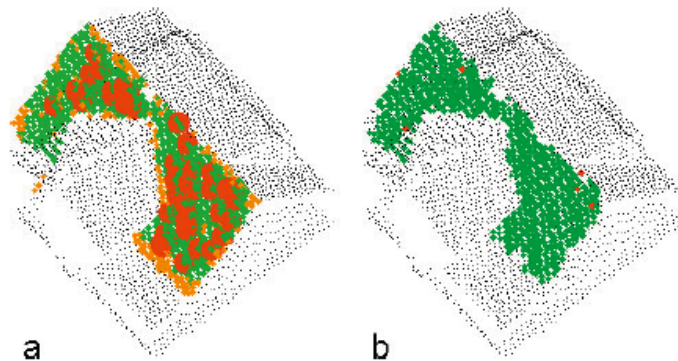
2. ábra: Vorarlberg tartományban lévő doreni földcsuszamlás lézerszkennelt szegmentálási algoritmussal történt vizsgálata, ahogy a bal oldali térkép is mutatja, hogy sikerült néhány vetőt automatikusan felismerni (Dorninger et al, 2011)

3.4. Robusztus síkillesztés a szegmentálási algoritmus alkalmazásával

Fentebb láthattuk, hogy a szegmentálás egy olyan algoritmus, ami képes a háromdimenziós pontfelhőre szegmenseket illeszteni, és ezek segítségével, képes különböző formák, egységek automatikus szétválasztására. A városmodellek automatikus generálása esetén csak az automatikus szétválasztás a lényeg, de a szoftver geomorfológiai vizsgálatokra alkalmazva ennél jóval többet mutathat, hiszen az adott felszínforma modellezésére is alkalmas lehet a síkok (szegmensek) illesztésével.

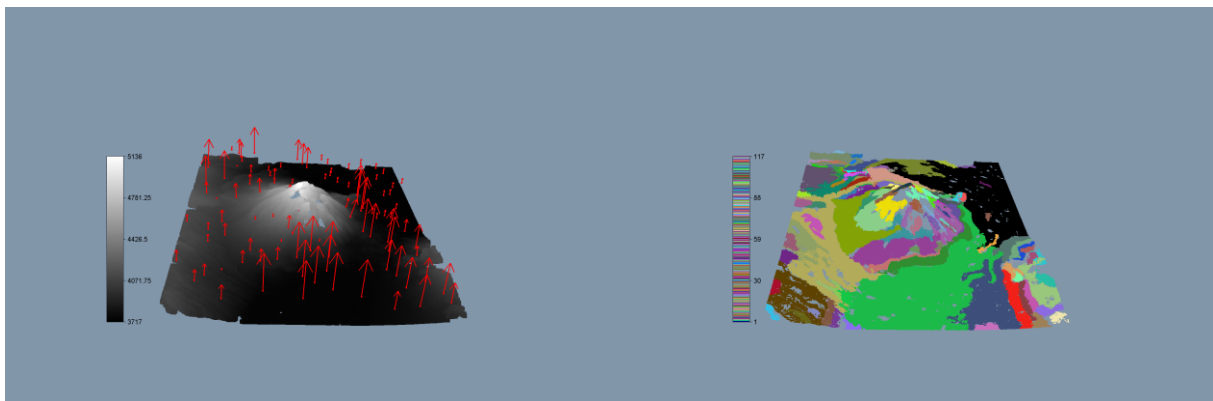
A kiinduló adatunk egy háromdimenziós pontfelhő. Ezt a szoftverbe beolvasva létrejön egy effektív adatrendszer egy k - d dimenziós fa (Bentley, 1975), mely lehetővé teszi számunkra, hogy meg tudjuk állapítani minden ponthoz adott számú legközelebb eső szomszédot. Erre az adatrendszerre azért van szüksége a szoftvernek, mert a kifejlesztett eljárás a normálvektorok

robusztus kalkulációján alapul, azaz minden ponthoz egy lokális érintő síkot rendel (Dorninger et al, 2011). Mint tudjuk, a pontoknak önmagában nem létezik normálvektora, viszont a valamilyen értelemben szomszédos pontokból síkillesztéssel generálható. Ezek meghatározásához beállítjuk a szomszédos pontok számát, ami alapján felületeket hoz létre a szoftver, és e felületek normálvektorát rendeli hozzá az egyes pontokhoz az algoritmus. Ezzel a módszerrel minden ponthoz egy-egy normálvektort rendelünk. Ez az adatbázis olyan óriási lesz, hogy önmagában még nem alkalmas a szegmentálásra. A feldolgozás könnyítéséhez szükséges ún. magpontok kialakítása (3. ábra) a normálvektorok x, y, z komponenseinek, illetve az origótól való távolság komponensenkénti eloszlásfüggvények vizsgálatának segítségével. A magpontok a leginkább egy irányba mutató pontokat tömörítik egy-egy felszínelembe, ezzel megteremtve a potenciális síkkezdeményeket.



3. ábra: Háztetők megtalálására alkalmazva a síkillesztő szoftvert először az (a) ábrán jelölt piros magpontokat találja meg a szoftver (az illesztett normálvektorok eloszlásfüggvényeinek vizsgálatával) majd a további argumentumok megadásával létrejön a sík (b)) (Dorninger et al, 2011)

A szoftver a további beállított paraméterek értékei alapján (minimum pontok száma, többi pontok száma, szórás, maximum pont-sík távolság, sík-sík távolság, összetartozás és iterációk száma) illeszti a végleges síkokat, azaz szegmenseket (ld. pl. 4. ábra).



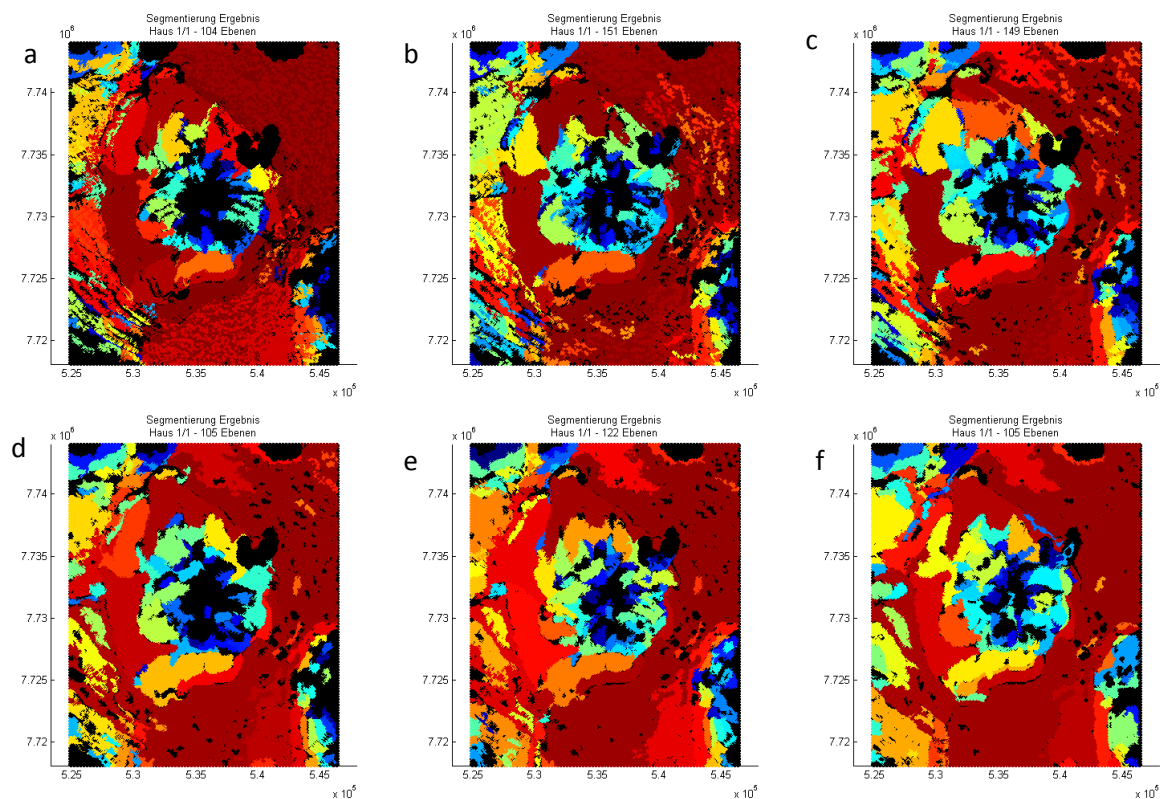
4. ábra: A magpontok kialakítása után különböző paraméter-együttesek függvényében illeszti a szoftver a végleges síkokat, azaz szegmenseket, jelen esetben egy vulkán domborzati modelljét szegmentálva (saját eredmény, ld. később).

A módszer robusztussága abból adódik, hogy azokat a pontokat, mely a megadott argumentumok alapján egyik síkhoz sem tartoznak, akkor kieső pontként kezeli, hasonló módon, mint a közismertebb RANSAC eljárás esetén (Fischler és Bolles, 1981).

A felszínre illesztett síkok (szegmensek) a különböző paraméter-együttesek alkalmazásával, különbözőképpen modellezik a felszínt, maga az illesztett síkok összessége a modell. Attól függően, hogy milyen felszíninformákat, milyen módon kívánunk modellezni, más-más paraméter-együttes által illesztett síkok lesznek legmegfelelőbbek az adott feladatra. Az illesztett síkok és a digitális domborzatmodell magasságadatainak összehasonlításával (reziduálok kiszámításával) tudhatjuk meg, mennyire modellezi pontosan az adott felszíninformát az általunk illesztett sík. Ha ez megfelel a vizsgálat céljainak, el lehet kezdeni szoftver további adatainak feldolgozását. Mindebből következően, a módszer áttételes felfogható geofizikai inverzióként, ahol szintén különböző modellek és az eredeti mért adatok összehasonlításából következtetünk pl. a föld alatti egyes rétegek elhelyezkedésére, de geofizikai inverziónál a kőzettestek kőzetfizikai paramétereire vonatkozólag is történik becslés, míg esetünkben csak a geometriai felületet igyekszünk modellezni..

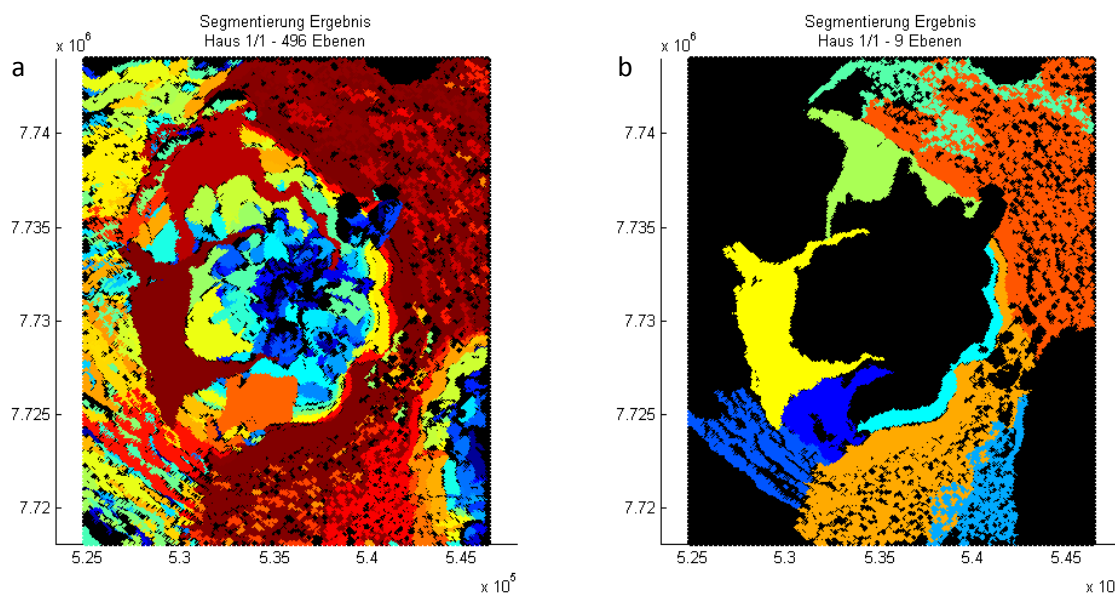
3.5. A robusztus síkillesztés során használt paraméterek

A szoftver használata különböző argumentumok (paraméterek) értékeinek megadásával történik. Az előfeldolgozó fázis során, legelőször azt határozzuk meg, hogy mennyi legyen a szomszédos pontok száma, ami alapján az algoritmus kiszámolja az egyes pontokhoz tartozó normálvektorok komponenseit. Az 5. ábrán a különböző értékek beállításainak hatását érzékeltetem egy vulkánon végzett szegmentálási eredmények bemutatása esetén. Itt csakis a normálvektorok meghatározásához megadott paraméter értéket változtattam a többi paraméter konstans mindegyik futtatás esetében. Egyértelműen látszik, hogy ennek az egy paraméter értékének állításával sok helyütt más és más síkokat kapunk eredményül, hiszen a lokális normálvektorok iránya esetenként eltérhet..



5. ábra: A szomszédos pontok meghatározásának hatása egy vulkánra alkalmazott szegmentálás során (a) 10 db szomszédos pont, (b) 25 db szomszédos pont, (c) 50 db szomszédos pont, (d) 80 szomszédos pont, (e) 100 szomszédos pont, és (f) 150 szomszédos pont esetén. A színek különböző illesztett síkokat jeleznek.

Az előfeldolgozó fázist követően a minimum pontok számát határozzuk meg, azaz, hogy minimum hány pontot tartalmazzon az adott sík, ahhoz, hogy síknak definiáljuk. A 6. ábrán ennek hatását szemléltettem ugyanarra a példaterületre. Ha a minimum pontok értéke 10, akkor 496 kis szegmens keletkezik, míg ha ugyanez a paraméter 1000 és a többi paraméteren nem változtatok, az eredmény 9 sík lesz. Ezzel befolyásoljuk leginkább, hogy milyen érzékenységű legyen a módszer, és hogy milyen, és főleg mekkora geomorfológiai egységet mutasson ki. Így például, ha mi csak a nagy platókat szeretnénk megtalálni, akkor célszerű a minimum pontok számát magas értékkel alkalmazni, de ha kíváncsiak vagyunk kisebb síkokra is pl. jelen esetben a vulkán kürtőjét jellemzik, akkor célszerű kisebb értéket alkalmazni. Másrészt megfigyelhető a program működési mechanizmusa is: a szoftver először mindig a legpotenciálisabb (azaz legnagyobb) síkot találja meg, és a legvégén már csak iterációk segítségével képes még újabb síkokat találni. Viszont ha túl kis szegmenseket keresünk, általában tényleg sok síkot talál a szoftver, akkor az eredmény értelmezhetetlenné, „túlszegmentálttá” válik.



6. ábra: Minimum pontok számának növelése egy vulkán szegmentálásán szemléltetve: ((a) 10 db pont (b) 1000 db pont.)

A következő paraméter a többi (maradvány) pontok számának meghatározása. Ha valamilyen okból nem akarjuk az összes síkot meghatározni (mert teszteljük a beállítást, vagy csak a legnagyobbakat akarjuk megkapni először) Szemléletesen ez a paraméter azt mondja meg, ha például egymillió pontom a térben, és a többi pontok száma 950.000 akkor a síkhoz tartozó pontok legalább 50.000. Ez csak akkor változik, ha a szoftver érzékeli, hogy van néhány pont, ami mindenképpen még az adott síkhoz tartozik, akkor ezeket a pontokat még hozzáveszi a szegmenshez. Más esetben, ha teljesül, hogy a szegmens 50.000 pontból áll, akkor nem keres újabb pontokat az adott szegmenshez. Teljes feldolgozás esetén a minimum pontok száma és a maradványpontok száma célszerűen megegyezik.

Ezek után meghatározzuk az egyszeres szórás értékét. Ez Gauss-eloszlás esetén feltételezi, hogy az illesztett síktól való pontok eltéréseinek 68%-a egyszeres szóráson belül van és az adatok 95%-a kétszeres szóráson belül, háromszoros szóráson kívül pedig gyakorlatilag alig helyezkednek a síkhoz tartozó pontok. Ez a paraméter határozza meg, hogy a síkok milyen mértékben „simulnak rá” a pontfelhőre.

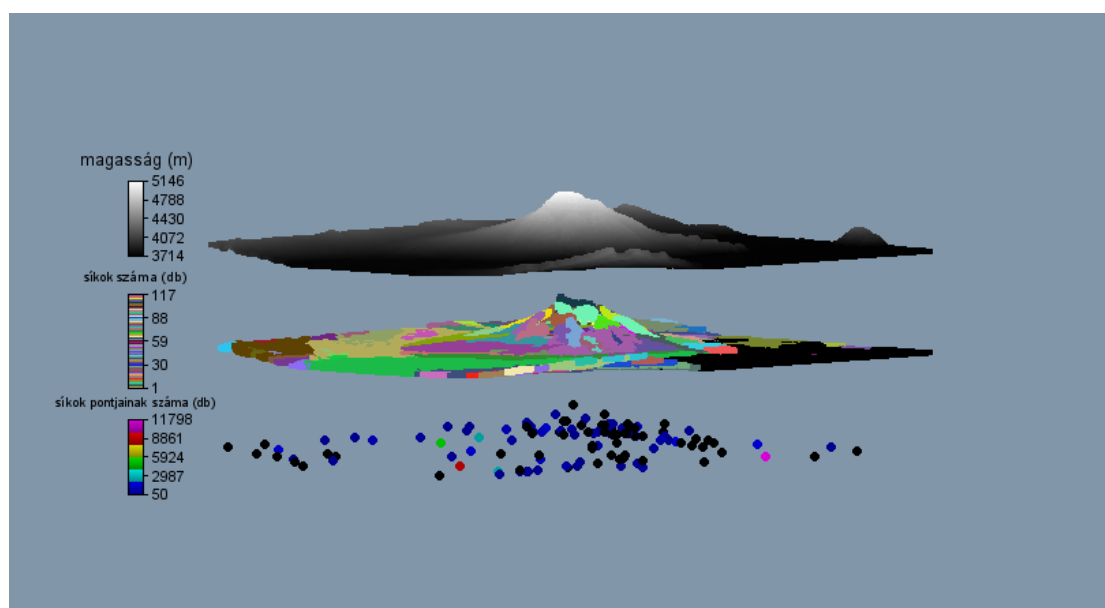
Az illeszkedést biztosító további paraméter, amely azért felelős, hogy megmondja, mekkora legyen bármely pont és az illesztett sík maximális távolsága, ezzel az illesztett sík és a hozzá tartozó pontok szigorú feltételeknek kell megfelelniük. A módszer robusztussága itt tapintható ki igazán, hiszen azon pontokat, amelyek ezt a kritériumot nem teljesíti, az eljárás egyszerűen eldobja. Így a kieső pontok nem tudják befolyásolni a síkillesztést.

Egy speciális paraméter felelős még ezeken felül a két sík egymáshoz képesti viszonyának meghatározásáért (lényegében az általuk bezárt szöggel kapcsolatosan). A síkok összetartozását, illetve felszabdaltságát is tudjuk kontrollálni, annak érdekében, hogy egymástól távol eső, de azonos normálvektor irányokkal rendelkező pontok tartozzanak vagy éppen ne tartozzanak egy síkba. Ezt egészíti ki, hogy meghatározzuk, hány iterációs eljárás lefutásával keresse meg a síkokat a szoftver.

3.6. A szegmentálás során kapott eredmények

A szegmentálási algoritmus lefutása után, a szoftverben megadott argumentumok alapján, előre definiált hibával a 3D pontfelhőre illesztett szegmenseket kapjuk. A szoftver ezenkívül még különböző, az egyes síkokra vonatkozó adatokat is szolgáltat, minden egyes síkelem középpontjára vonatkoztatva.

Így a szegmentálás eredményeképpen megtudjuk minden egyes síkhoz, hogy az hány pontból áll, mekkora a területe, mi a sík lejtőszög és kitettség értéke. Ezenkívül megkapjuk a reziduál értékekből számolt szórásnégyzetet is minden egyes síkra.



7. ábra: Eredeti digitális domborzatmodell (egy dél-amerikai vulkán), alatta az illesztett síkok különböző színekkel megjelenítve ezalatt pedig az egyes illesztett síkok középpontjaira vonatkozó adatok közül a síkhoz tartozó pontok száma van megjelenítve (2-szeres magasságtorzítás)

Dolgozatomban különböző területekre különböző paraméter-együttesek alkalmazásával síkokat illesztettem, alkalmazva fentebb ismertetett paramétereket, majd az így kapott síkokat illetve a síkokhoz tartozó adatokat vizsgáltam meg és elemeztem. A 7. ábrán látható a módszer előnye: nagy területekre alkalmazva a 3 dimenziós pontfelhőre illesztett síkokból jelentős mértékű adattömörítést érünk el, így az adott esetben több millió pont helyett néhány 100-1000 sík vizsgálatával lehetőség nyílik a digitális domborzatmodellek automatikus feldolgozására, az egyes felszínformák elkülönítésére egymástól.

4. A Közép-Andok térségének modellezése robusztus síkillesztéssel

Legelőször szükséges volt a szoftvert, egy olyan területen alkalmazni, ahol rendelkezésünkre állnak konkrét terepi megfigyelésen mérésen alapuló adatok, melyekkel az eredmények összevethetőek. Célszerű ehhez olyan területet választani, ahol a felszínformáló folyamatokat a növényzet kevésbé befolyásolja.

Az első terület, ahol alkalmaztam a szoftvert geomorfológiai egységek elkülönítése céljából a Közép-Andok területére esik. A következőkben ezért röviden bemutatom a vizsgált területet is.

A Közép-Andok területének éghajlatát nagyban befolyásolja a Humbolt(Perui)-áramlás, mely hidegáramlat alapvetően módosítja a térség éghajlatát, mely következtében a térségben kialakult például az Atacama-hidegsivatag is. A térség éghajlata száraz, hideg, és a felszínen kialakuló állandó por van jelen, éppen ezért a térség morfológiát hasonlatosnak tartják a Marséhoz.

4.1. Közép-Andok felszínének rövid áttekintése

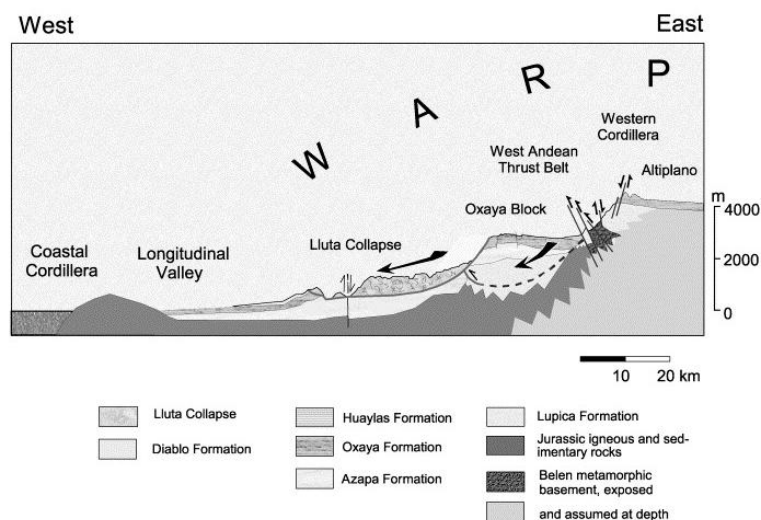
A következőkben egy rövid áttekintő jelleggel összefoglalom azokat a geológiai, geomorfológiai ismereteket, melyek a szegmentálási eredmények értelmezésében fontosak lesznek.

A Közép-Andok területének fejlődését meghatározza, a Farallon-Nazca lemez szubdukciója a Dél-Amerikai lemez alá. Az alábukás a jura időszakban kezdődött sebessége és szöge folyamatosan változott (Wörner et al, 2002).

A szegmentálás során a Közép-Andok területén elhelyezkedő WARP (West Andean Escarpment) területét vizsgáltam. A terület rétegsora kiemelkedési, lepusztulási vulkanizmus és üledékképződési folyamatok egymásutánisága határozza meg

A Wörner et al. (2002) szerint 30 millió éve a terület fejlődését kiemelkedés és ezzel egy időben zajló erózió jellemezte. A terület rétegsorát tekintve az óceántól távolabbi részeken megtaláljuk a Belen metamorf aljzatot, míg az alacsonyabban fekvő óceánközeli területeken jura és kora kréta üledékeket találunk, amire ráakódott a 25-23 millió éves Azapa formáció, amely az Andok lejtőin szállított folyami hordalékot, konglomerátumot foglalja magába.

Az aktív vulkanizmus következtében több helyen is időről időre ignimbrit rétegek rakodtak le, amelyek korolásával lehet következtetni a terület fejlődéstörténetére (Wörner et al, 2000). A WARP területén megtalálható formációk közül a Oxaya Formáció, a Lauca Formáció és a Huaylillas formáció tartalmaz ignimbriteket. A miocénben rakódott le a Diablo Formáció, mely szintén konglomerátumból áll.



9. ábra: A WARP térség 18° déli szélesség fokának Ny-K irányú áttekintő sematikus földtani szelvénye (Wörner et al, 2002)

4.2. A Közép-Andok területéről rendelkezésre álló digitális domborzatmodell

A robusztus síkillesztéshez a Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) keretében készült ingyenesen hozzáférhető adatbázisból töltöttem le a terület digitális domborzatmodelljét.

Az SRTM program keretében a északi 60 és a déli 57 szélességi fokok között feltérképezésre került a felszín 2000. februárjában radar interferometrián alapuló mérések segítségével (Werner, 2001). A digitális domborzatmodellek ezen mérési eredményekből lettek generálva 3 szögmásodperces oldalhosszúságú foktrapézok, amelyeket térinformatikai szoftver segítségével 90m x 90m felbontásúra mintavételeztem át. Az adatrendszer 5 méter hibával rendelkezik.

Az én területválasztásom azért a Közép-Andok térségére esett, mivel a SRTM DTM-ben ugyan nincs eltávolítva a növényzet, de ebben a térségben az éghajlat folytán elhanyagolható mennyiségű az ebből származó hiba.

4.3. Szegmentált eredmények

Amint fent láttuk, a vizsgált felszín geomorfológiailag, geológiailag összetett.. A szegmentáló algoritmussal a különböző formációkat, csuszamlásokat és az Oxaya blokk területét vizsgáltam különböző paraméter-együttesek alkalmazásával.

Mivel a módszer lényege, hogy nagy területre alkalmazzuk az egyes geomorfológiai egységek automatikus szétválasztásának céljából, ezért a szegmentációs vizsgálataimat 122 km × 122 km területre végeztem el. A többféle paraméter-együttes alkalmazásának segítségével, különböző eredményeket kaptam, melyek közül hármat szeretnék részletesebben ismertetni.

A szegmentálás eredményein láthatjuk, hogy a különböző paraméter-együttesek alkalmazásával milyen geomorfológiai vagy geológiai egységek elkülönítésére vagyunk képesek a robusztus síkillesztő eljárással.

Az 1. táblázatban foglaltam össze a dolgozatban ismertetett szegmentáláshoz alkalmazott paraméter-együtteseket.

	1. szegmentálás	2. szegmentálás	3. szegmentálás
normálvektor meghatározásához szükséges szomszédos pontok száma (db)	30	60	100
minimum pontok száma (db)	100	1000	200
maradvány pontok száma	100	500	200
szórás (m)	20	25	30
maximum pont–sík távolság (m)	20	25	30
sík-sík „szögtávolság”	0.005	0.005	0.002
összetartozás (m)	100	100	250
iterációk száma	10	10	200

1. táblázat: A WARP területére alkalmazott paraméter-együttesek

A különböző paraméter-együttesek használatával többféleképpen is modellezhetjük a felszínt, úgy alakítva a paraméter-együtteseket, hogy számunkra fontos, vizsgálni kívánt felszínekre illesszük az egyes síkokat.

Az eredményeken megfigyelhető, hogy néhány potenciális sík (Diablo Formáció területén) több paraméter-együttes használatával is „kihozható”, ez jelenti, hogy az adott felszínelem a síkhoz közeli lapos lejtőszöggel rendelkezik így az algoritmus előszeretettel találja meg.

A bevágódott völgyeket nem modelleztem a síkokkal, mivel a normálvektorokat viszonylag sok szomszédos pont segítségével definiálom a normálvektorokat, ezért a kis felülettel rendelkező normálvektorok irányát tekintve gyorsan változó felszínekre a jelenlegi paraméter-együttesekkel nem modelleztem, hanem kieső pontokként kezeltem.

Az eredmények a műholdfelvétellel együtt ábrázoltam, és minden egyes szín egy-egy illesztett síkot jelöl a síkok színének további értelme nincs.

A szegmentálási eredményeket összevetve az Wörner et al 2002 cikkben található keresztszelvénnyel megállapíthatjuk, hogy négy főbb területet minden paraméter-együttes segítségével automatikusan szétválasztottunk.

Az Oxaya blokk antiklinális formája a szegmentált eredmények esetén szabályos csúszottsággal különül el, mutatva ezzel a normálvektorok folyamatos változását.

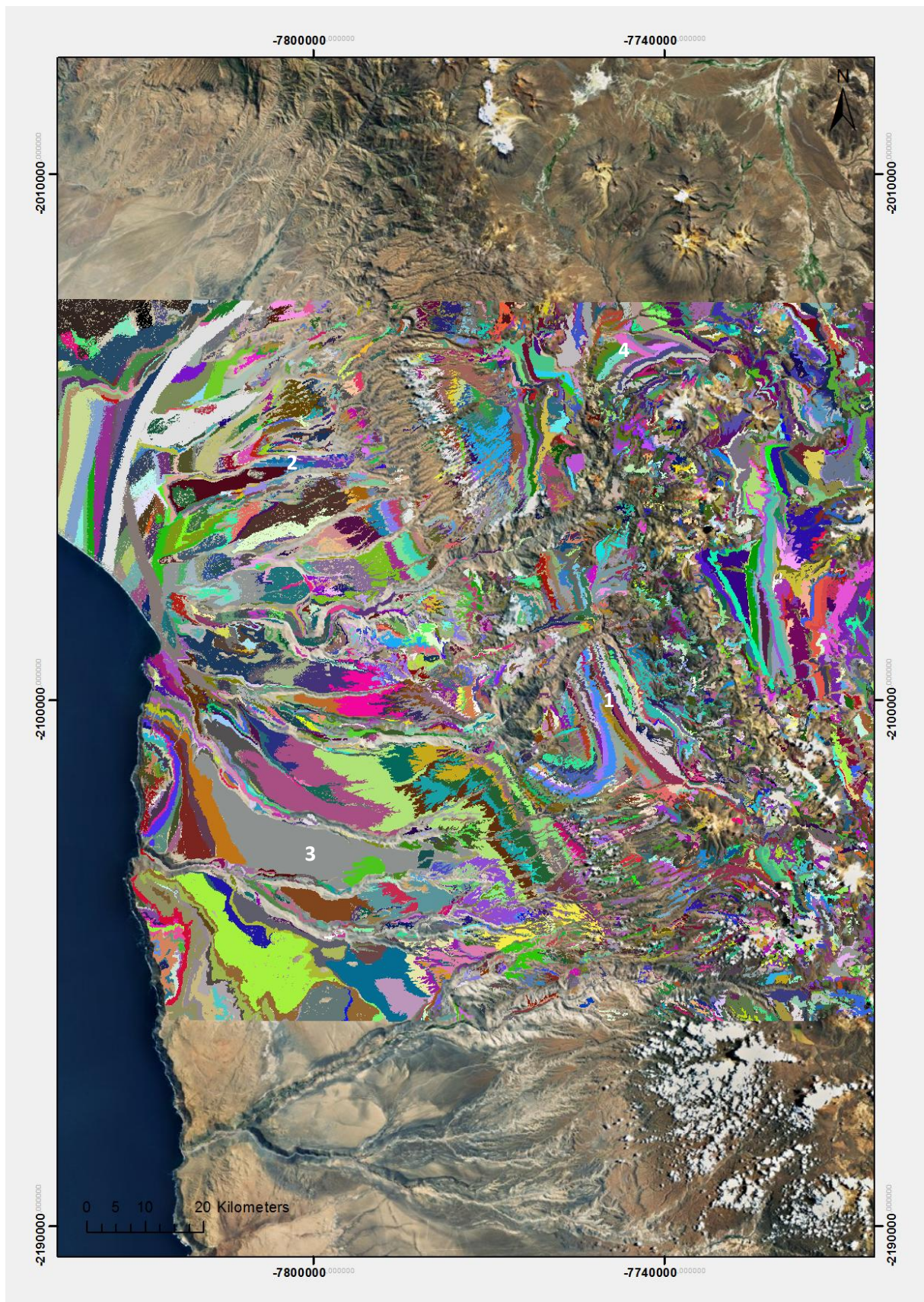
Sikerült automatikusan detektálnia a különböző csuszamlás-nyelveket a síkok pontosan illeszkednek az egyes anyagelmozdulások műhold felvételeken is megfigyelhető kontúrjára.

A alacsonyabb lejtőszöggel rendelkező területen, az eljárás pontosan illeszti az egyes formációkra a síkokat. Ez nyilvánvalóan a terület síkszerű jellegéből adódik a pontos illeszkedés.

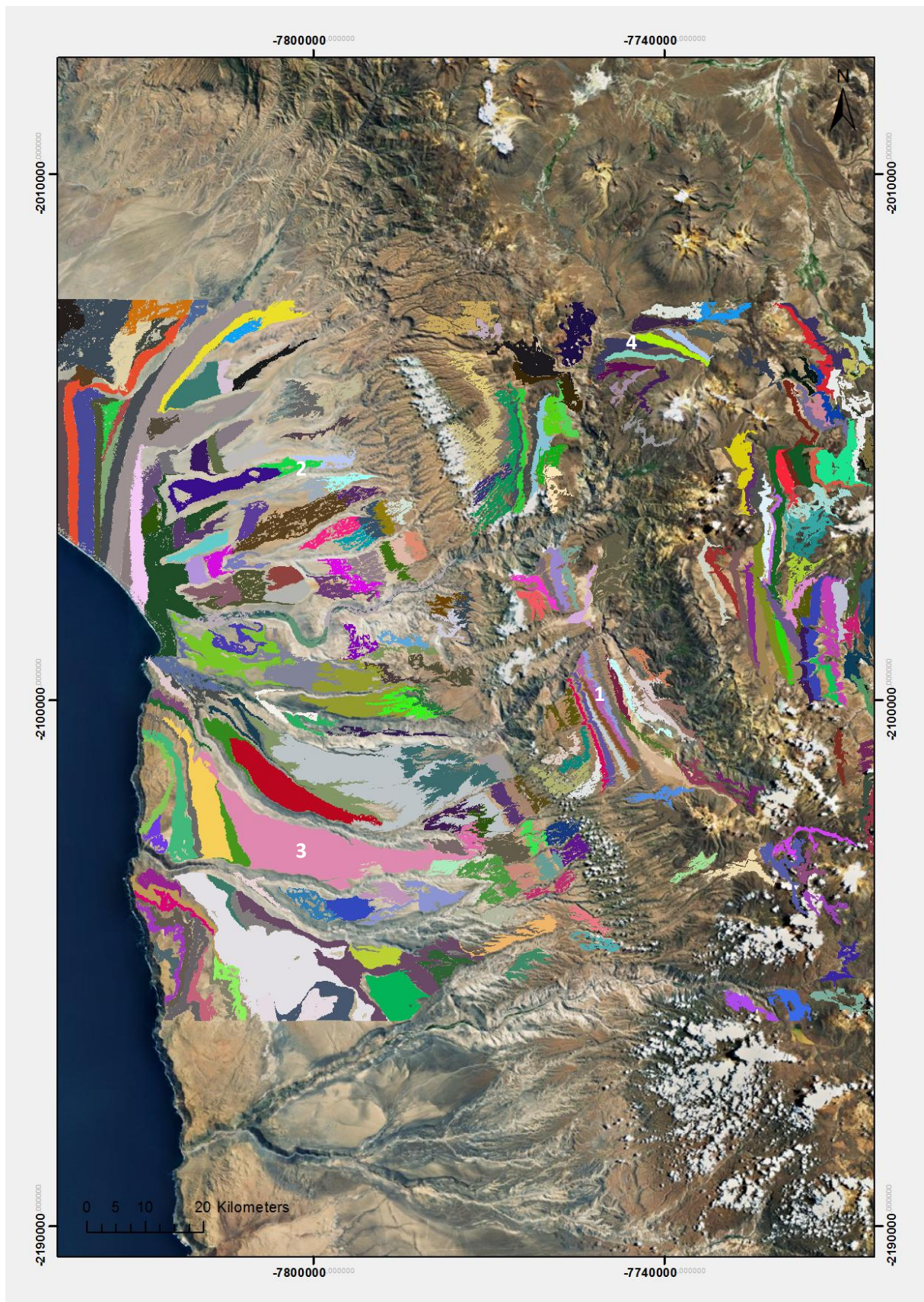
Ezenkívül, az egyes vulkánok kontúrjait is sikerült szétválasztani a differenciálatlan 3D pontfelhőből. Hiszen a vulkánok közvetlen közelében megjelennek a jellegzetesen görbülő szegmensek, illetve kisebb nagyobb lávafolyásra is illeszkednek.

Összességében megállapítható, hogy a módszer segítségével a differenciálatlan pontfelhőből, síkok illesztésével képesek vagyunk egyes felszínformák automatikus megtalálására és ezzel

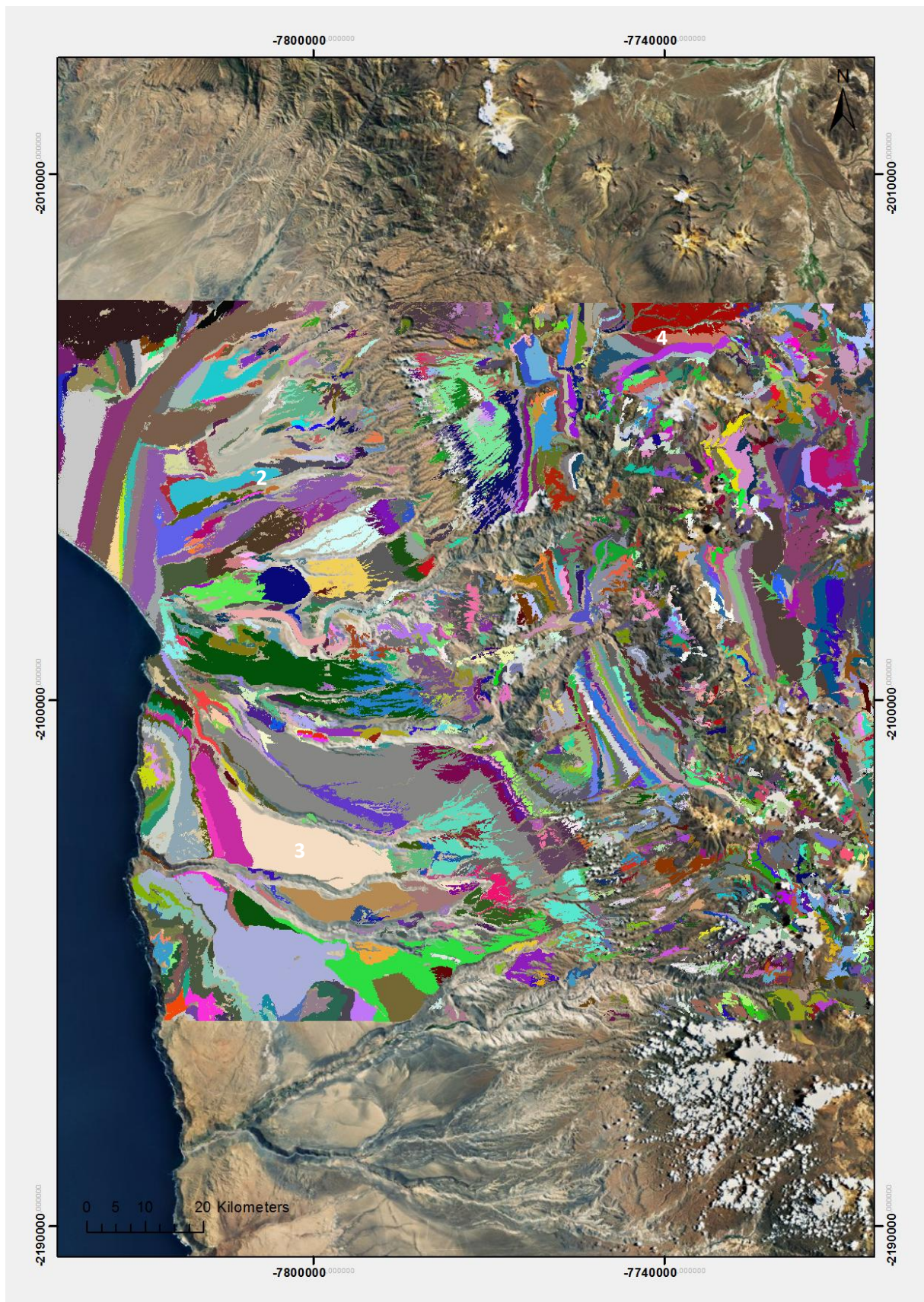
elérhetjük a pontfelhő hatékony adattömörítését. Ezzel egy időben azt is meg kell állapítani, hogy nem minden illesztett sík hordoz geológiai geomorfológiai értelmet, így szükséges az eredmények további értelmezése.



10. ábra: 1. szegmentálás eredménye (1: Oxaya blokk területe, 2: csuszamlások, 3: Diablo Formáció, 4: aktív vulkáni terület)



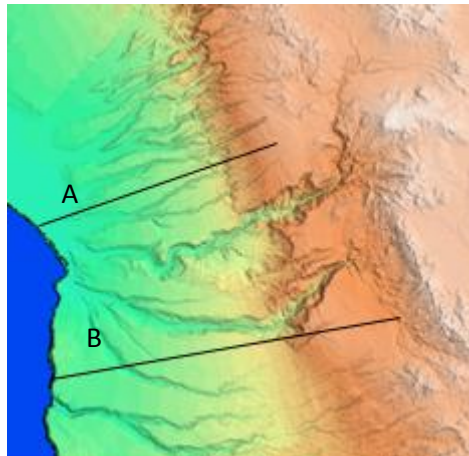
11. ábra: 2. szegmentálás eredménye (1: Oxaya blokk területe, 2: csuszamlások, 3: Diablo Formáció, 4: aktív vulkáni terület)



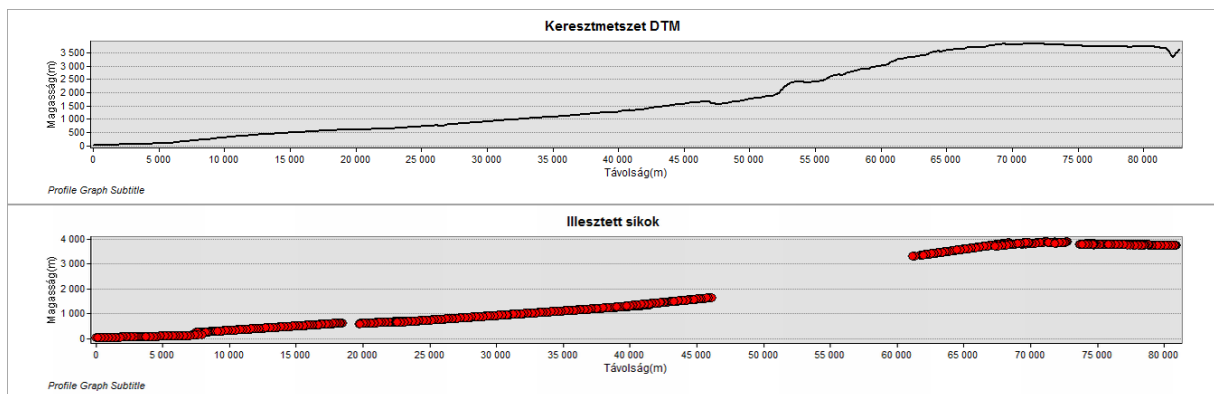
12. ábra: 3. szegmentálás eredménye (1: Oxaya blokk területe, 2: csuszamlások, 3: Diablo Formáció, 4: aktív vulkáni terület)

4.4. Reziduálértékek elemzése

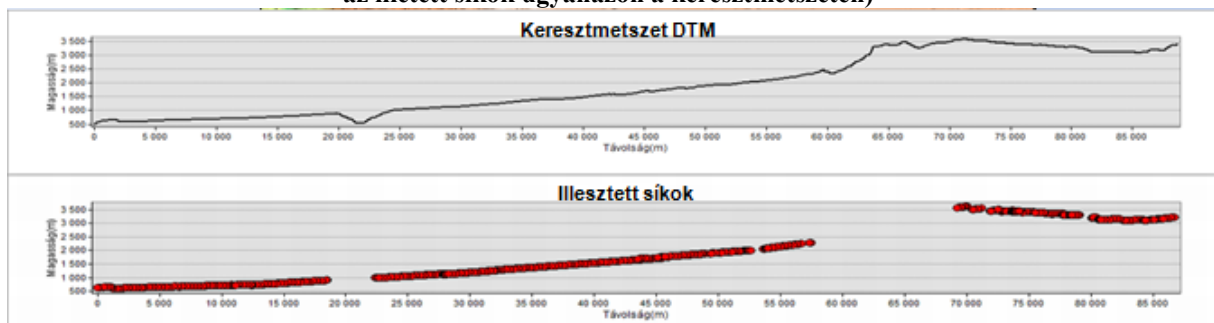
A továbbiakban megvizsgáltam, hogy az illesztett síkjaimhoz tartozó elméleti magasság és a digitális domborzatmodellből származó tapasztalati magasságok hogyan viszonyulnak egymáshoz. Először a területre keresztshelvényeket húzva szemléltetem a síkillesztés alapján kapott és az eredeti felszín viszonyát.



13. ábra: A vizsgált keresztshelvények elhelyezkedése a területen



14. ábra: „A” keresztshelvény (a fenti a DTM-ből készített távolság-magasság keresztshelvény a lenti pedig az illesztett síkok ugyanazon a keresztshelveten)

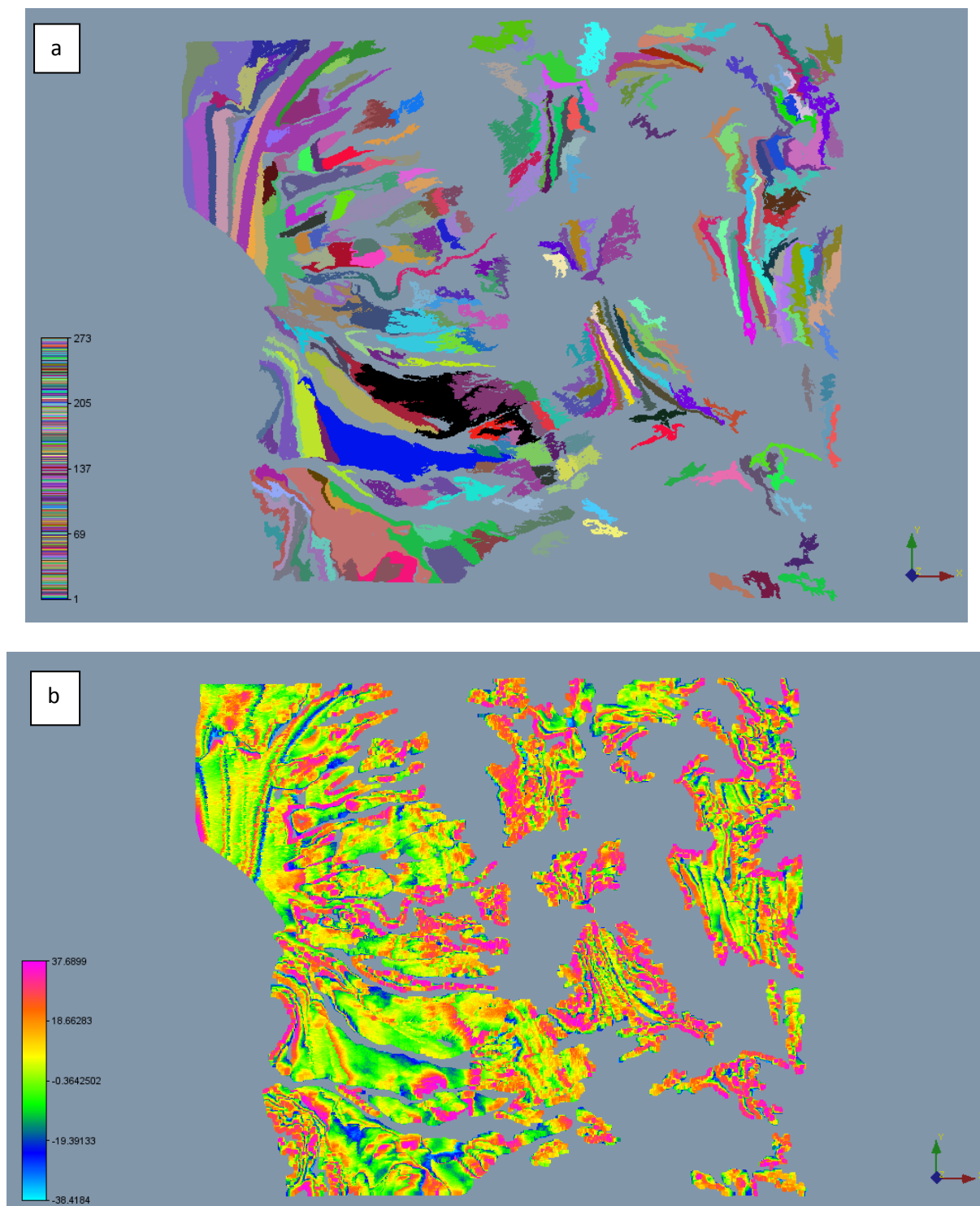


15. ábra „B” keresztshelvény (a fenti a DTM-ből készített távolság-magasság keresztshelvény a lenti pedig az illesztett síkok ugyanazon a keresztshelveten)

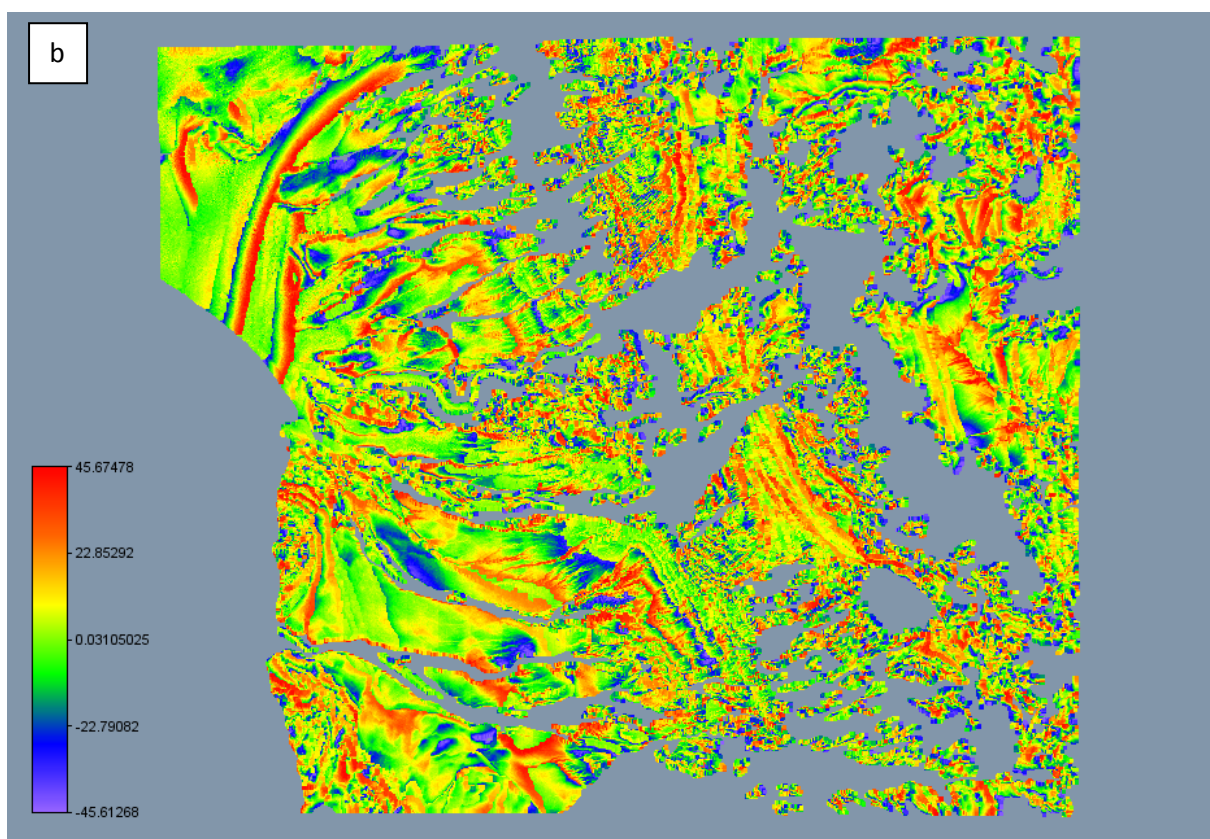
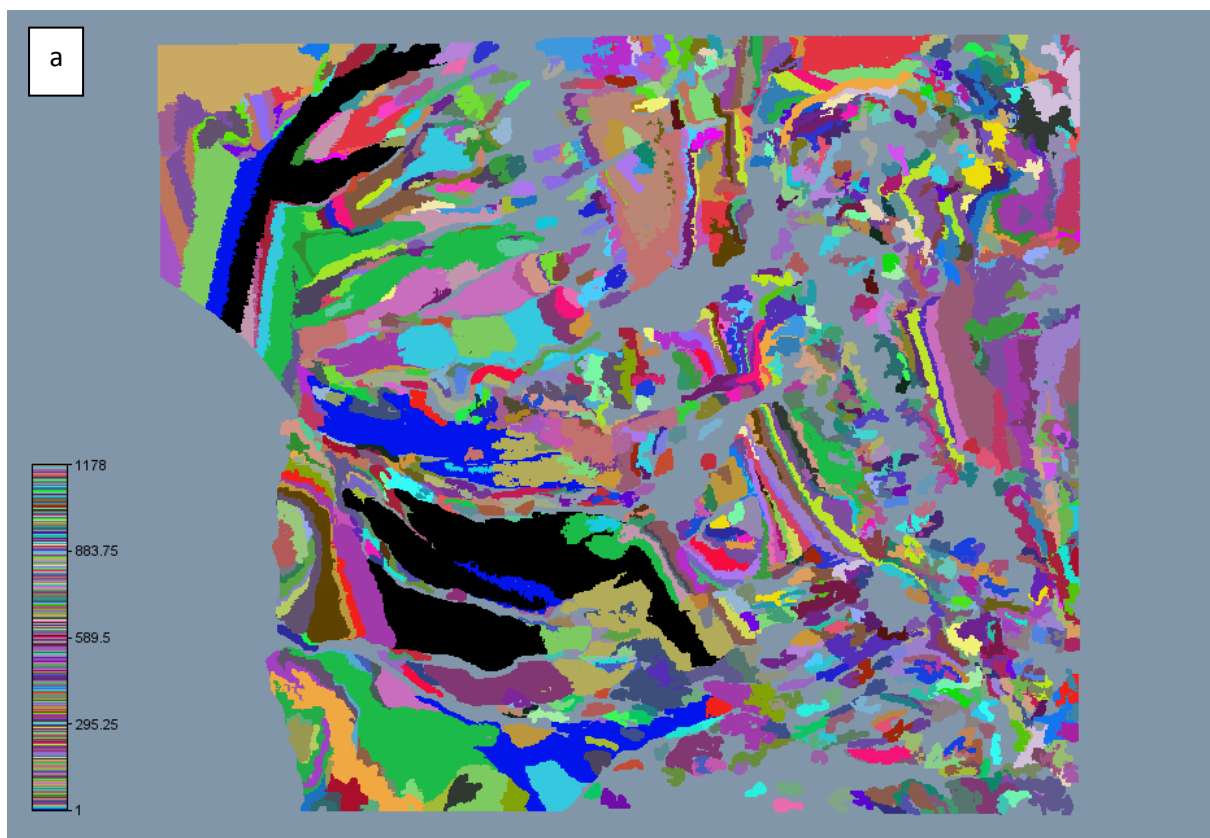
Láthatjuk, hogy az illesztett síkok jól közelítik a felszínt, és megfigyelhető a módszer robusztus tulajdonsága miatt egyes felszínformák (pl. bevágódott folyóvölgyek) területe, ahol

nem illesztett az algoritmus síkokat, mint ahogy már azt fentebb a síkok megjelenítésénél is láthattuk.

A következőkben az 1. és 3. szegmentálásból kapott eredmények reziduál értékeit térben ábrázoltam minden egyes pontra, ezzel vizsgálva, hogy miként modellezi a felszínt az eljárás, mennyire pontosan illeszkednek az adott síkok, hol találhatóak kiugró értékek az illesztésben.



16. ábra: 1. szegmentálás eredményeinek elemzése a.: illesztett síkok, b.: reziduálértékek



17. ábra: 3. szegmentálás eredményeinek elemzése a.: illesztett síkok, b.: reziduálértékek

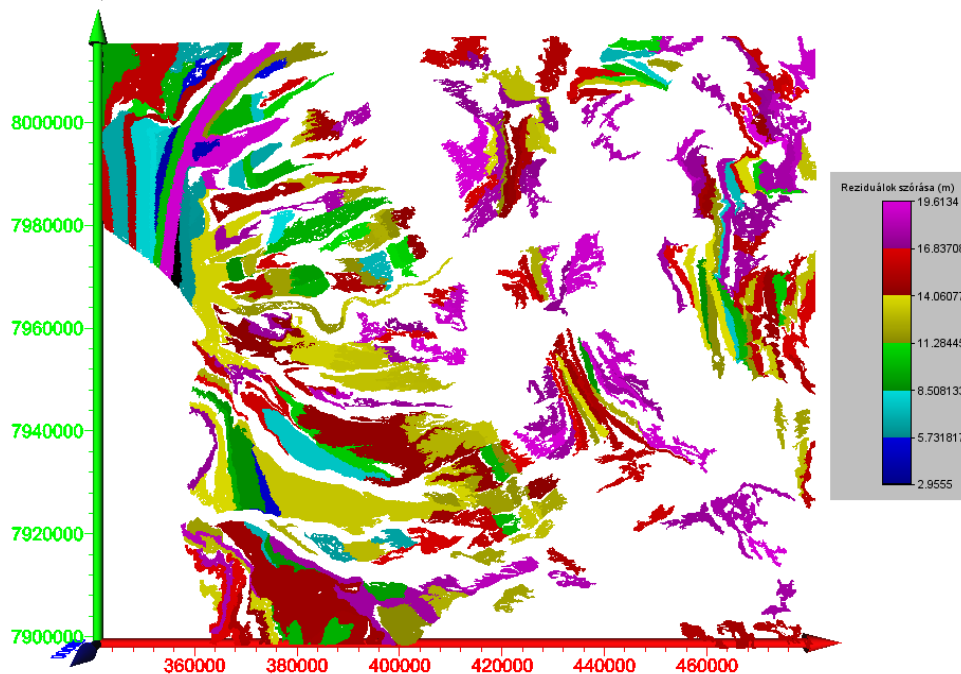
Az eredményeket megvizsgálva megállapítható, hogy kiterjedt területek (a zölddel jelölve) illeszkednek a legjobban az eredeti felszínhez 0 közeli értékkel. Az is megállapítható, hogy leginkább a síkok szélein figyelhetők meg a kék és piros színek. Ezenkívül főleg a csuszamlások területén megjelenő meleg színek a síkon belül utalhatnak magára a területen zajló anyagelmozdulásra is.

4.5. A szegmentált eredmények további elemzése, kiértékelése

A szegmentálás során, a síkok elhelyezkedésén kívül, többféle adatot is nyerünk a területre vonatkozóan melynek elemzésével többletinformációhoz juthatunk a területet illetően. Láthattuk, hogy már a síkok alakzataiból és a geológiai értelmezések összevetéséből is érdekes eredményeket kaphatunk, de a következőkben bemutatom, hogy ezentúl, milyen adatok értelmezésére nyílik lehetőség a szegmentálás adatait feldolgozva.

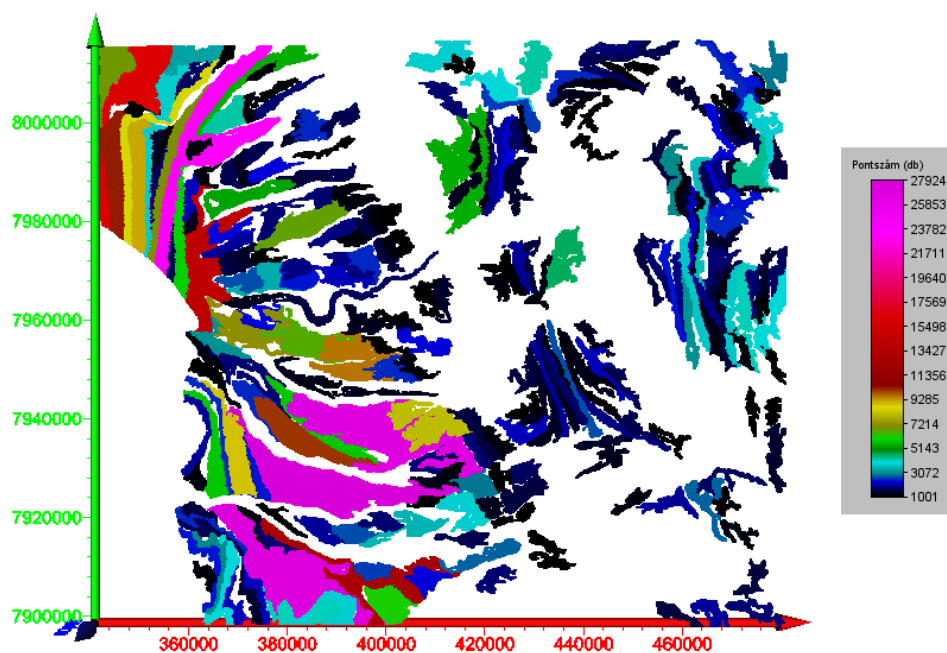
A reziduálértékek jellemzésére még érdemes megvizsgálni a szórások értékeit, amelyek egy-egy sík illeszkedésének mértékét áttekinthetőbbé teszik és sokkal hatékonyabban jellemzik, mintha minden egyes pontra ábrázoljuk az eredeti DTM és a illesztett sík magasságának különbségét.

Láthatjuk az első szegmentálási eredményen vizualizálva, hogy a nagyobb illetve a Oxaya-blokk területén elhelyezkedő kisebb kiterjedésű síkok szórásnégyzet értékei nagyobbak. Ennek magyarázata, hogy a nagyobb síkok esetén, mivel nagyobb területet foglal az adott sík magába, így összességébe a szórás értéke is nagyobb lesz, de a megadott szórásparaméternél (20 m) semmiképpen sem nagyobb, azaz egy felső határt a paraméter-együttessel lehet szabni. A kisebb Oxaya-blokk területén lévő kisebb kiterjedésű síkok pedig azért nagyobb a szórás értéke, mivel a modellezett felület a valóságban görbül (Wörner et al. 2002) és ezt síkokkal nehezebb közelíteni, modellezni.



18. ábra: 1. szegmentálási eredmény szórásértékeinek megjelenítése

A 18. ábrán a szórásértékek ábrázolása mellett az 1. szegmentálás eredményre megjelenítettem, hogy egy-egy sík hány pontból áll (19. ábra). Azért érdekes, mert a pontszámok alapján egyértelműen elkülöníthetőek a nagyobb kiterjedésű síkok, melyek pedig jellegükből adódóan laposabbak síkszerűbbek, ezért is alkotnak egy síkot, annak ellenére is, hogy kisebb mélyedések és kiemelkedéseket tartalmaznak. A legkisebb pontszámokat az aktív vulkanizmus folytán kiömlött ignimbriteket magába foglaló területeknél láthatjuk, hiszen, itt a bevágódott folyóvölgyek, illetve a egyenetlenebb topográfia (vulkánok) területén kisebb, jobban illeszkedő síkokat talált a szoftver.

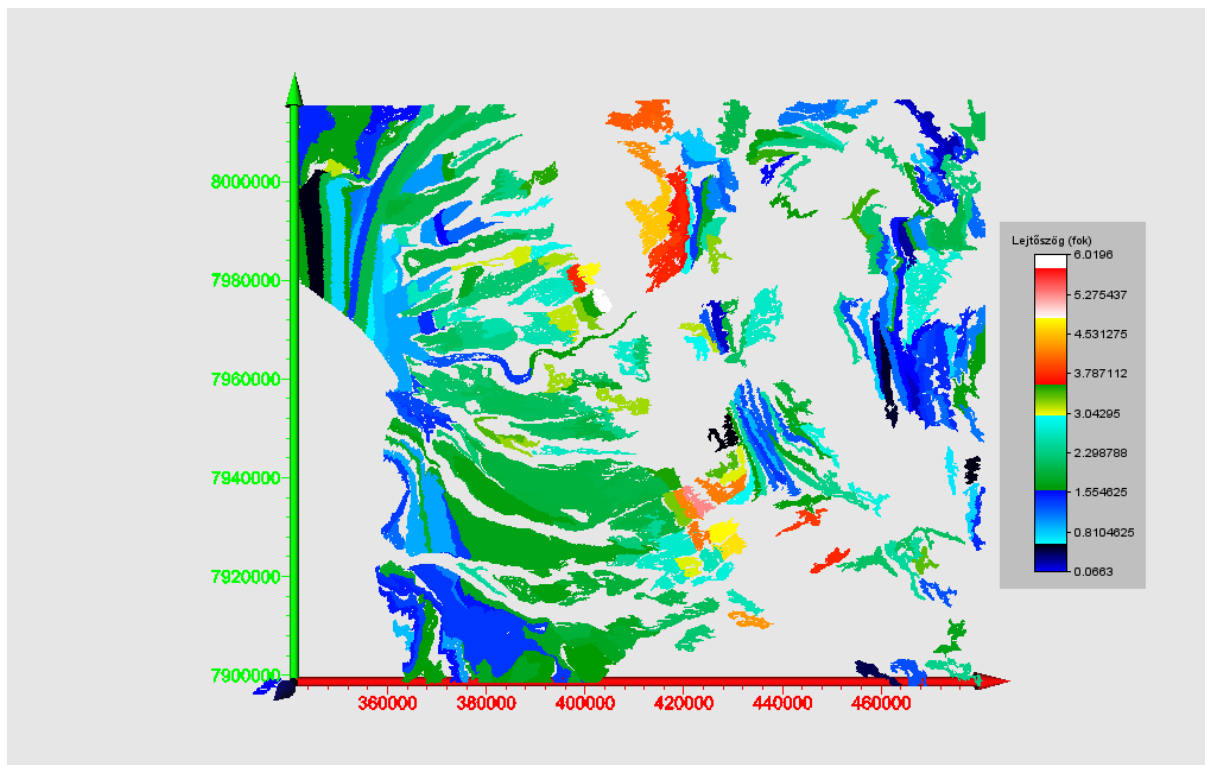


19. ábra: 1. szegmentálási eredményen a síkhoz tartozó pontok számának megjelenítése

Megvizsgálhatjukhoz a kapott lejtőszög-értékeket is, amelyeket a szoftver egy-egy síkra értékel ki (20. ábra). Ezzel áttekinthetőbbé válnak a lejtőszög viszonyok az egész, nagy területet vizsgálva.

A 1. szegmentálás eredményének lejtőszög viszonyait megtekintve, szembetűnő, hogy milyen lapos is a terület, hiszen a lejtőszög értékek 0 és 7 fok közé esnek. Ezt alátámasztja a Wörner et al. (2002), a szerzők szintén kiemelik a terület lapos lejtőszögű jellegét.

A vulkáni területek lejtőszögei 0.8° és 2° közé esnek, ezek az értékek magukba foglalják a vulkánok körül elhelyezkedő lávakiömléseket, illetve az Oxaya-blokk területén elhelyezkedő ignimbriteket is. A bevágódott folyóvölgyek területén a lejtőszögek értéke magasabb 4 fok és 5 fok közé tömörülnek. A laposabb üledékes területek 2 és 3 fokos lejtőn terülnek el.



20. ábra 1. szegmentálási eredmény lejtőszög értékei

Az ábrázolt eredményeket egy táblázatban foglaltam össze. Megállapítható, hogy a terület összetettsége miatt, az elválasztás nem teljes körű, de néhány következtetés levonható belőle.

A szoftver adatai felhasználásnak segítségével megfelelően megválasztott intervallumokkal az ábrákon jól láthatóak a különböző jellegű területek, illetve a különböző szempontokat figyelembe véve, egy-egy intervallumba sorolhatóak. Pl. megfigyelhető, hogy az Oxaya-blokk területe, nagyrészt a kategorizálás során minden ezen a területen elhelyezkedő síkot alkotó pontok száma viszonylag alacsony, a topográfiából adódóan, a lejtőszög viszont éppen a rotáció folytán szélesebb intervallumban mozog, a reziduálok szórásának értéke pedig viszonylag magas.

A csuszamlások, illetve különböző üledékeket tartalmazó formációkat magukba foglaló területek reziduálértékeinek szórása azonos intervallumba esik a Oxaya blokkra illesztett síkjaival, viszont a síkokat alkotó pontok száma jellemzően magasabb illetve a lejtőszögek értéke is.

A vulkánok esetén az alacsony síkokat alkotó pontszám illetve a alacsony lejtőszög értékek a szembeötlőek.

A bevágódott folyóvölgyek esetén, a pontfelhőben ezeket a pontokat nagyrészt outlierként azonosította az algoritmus, de ahol illesztettünk síkokat, ott a lejtőszög értéke egyértelműen elkülöníti e régiókat a többi területtől.

	Reziduálok szórása (m)	Síkok pontszámai (db)	Lejtőszög értékek (fok)
Oxaya-blokk	11-19	1000-2000	0.8-2.5
Csuszamlások, üledékkal fedett területek	11-19	1000-3000	2.5-3
Vulkánok	8-19	1000-1500	1.5-3
Bevágódott folyóvölgyek területe	16-19	5000-6000	3-6

2. táblázat: 1. szegmentálási eredmény különböző szempontok alapján történő osztályozása

Összességében azonban megállapítható, hogy a terület lejtőszög-viszonyai illetve összetettsége folytán igencsak nehéz a különböző robusztus síkillesztés eljárásával nyert adatok alapján markánsan elkülöníteni egymástól a különböző felszínformákat. Azonban ha átfedésekkel is, megállapíthatjuk, hogy egy-egy jól megválasztott szempont, intervallumok és paraméter-együttes használatával a mindenképpen képesek vagyunk, nagy területek automatikusan történő vizsgálatára, ami olyan bolygón ahol, csakis távérzékelte adatok állnak nagy mennyiségben rendelkezésre mindenképpen alkalmas lehet az digitális domborzatmodellekben lévő adat hatékony adattömörítésére és az egyes felszínformák vizsgálatára.

5. Mars felszínének modellezése robusztus síkillesztés módszerével

Az előző fejezetben bemutatam egy földi példaterületen miként működik a szoftver, a következőkben, pedig a Mars felszínére végzett modellezés eredményeit ismertetem.

A Mars felszíne modellezésének fontossága, illetve lehetősége abban áll, hogy a módszer alkalmas lehet digitális domborzatmodellek nagy tömegű automatikus feldolgozására, azaz nagyfokú adattömörítést érhetünk el a síkok illesztésével, mely későbbi elemzések során geomorfometriai elemzések kiinduló pontja lehet.

A robusztus síkillesztés eljárást ebben az esetben az ESA Mars Express HRSC kamerájának felvételeiből sztereo-fotogrammetriai kiértékelés során létrehozott digitális domborzatmodellre hajtottam végre.

A fejezetben először a Mars felszínéről rendelkezésre álló adatbázisokat ismertetem, illetve a különböző domborzatmodellek pontosságát.

Először egy kisebb $51 \text{ km} \times 52 \text{ km}$ becsapódási kráterekre fókuszáló területet vizsgáltam meg, majd ezt a területet magába foglaló mintegy $215 \text{ km} \times 500 \text{ km}$ terület szegmentálási eredményét vettem össze a kisebb kivágaton elért eredményekkel.

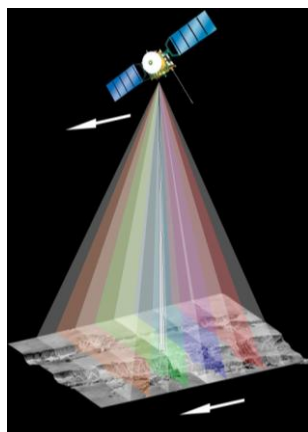
5.1. Digitális domborzatmodellek a Mars felszínéről

Az űrkutatás rohamos fejlődésével egyre több és több adat áll rendelkezésünkre a Mars felszínéről. 1964-től a Mariner 4 flyby (elhaladó) űrszonda készítette az első felvételeket a Marsról, de ezek után rohamos fejlődésnek indult a Mars kutatása.

A marskutatás eszközei az űrszondák, melyek lehetnek keringő egységek és leszálló egységek. Ezek az eszközök végeznek számunkra értékes méréseket, információt szolgáltatva a Mars bolygó felszínéről, légköri viszonyairól. A marskutatás fontossága abban rejlik, hogy úgy gondoljuk, a Mars megismerésével jobban megérthetjük Földünk folyamatait is (Ferencz, 2009).

Ma is aktív a Mars Odyssey, ami 2001 óta kering a Mars körül, ma már adatokat nem gyűjt, de az információk továbbításában még mindig szerepe van. Régebben működő THEMIS (Thermal Emission Imaging System) kamerája 19 méter/pixel felbontásban készített felvételeket.

Az ESA Mars Express 2003 karácsonyán állt pályára a bolygó körül, keringő egysége mai napig aktív. A HRSC (High Resolution Stereo Camera, 21. ábra) színes sztereo kamerája egyetlen területről 9 különböző hullámhossz-tartományba eső felvételt készít. Van egy előretekinő és egy hátratekinő felvétel, ebből fotogrammetriai eljárással a magassági adatok kinyerhetők, így a HRSC felvételek sztereo kiértékelése során (erre különböző algoritmusok léteznek) digitális domborzatmodellekhez jutunk (Neukum et al, 2004). Viszont a digitális domborzatmodell létrehozása során illesztési problémák léphetnek fel (Heipke et al, 2007), melyre az általunk alkalmazott robusztus síkillesztés érzékeny lehet.



21. ábra: Mars Express HRSC kamerájának működési elve (Neukum et al, 2004)

A felvételek legjobb térbeli felbontása 10 méter/pixel, de léteznek szuper jó felbontású felvételek (SRC, Super Resolution Channel), ezek 2 méter/pixel felbontásúak. Négy csatorna adatai érhetők el: kék (440 ± 45 nm), zöld (530 ± 45 nm), vörös (750 ± 20 nm) és közeli infravörös (970 ± 45 nm) adatokat mér, de létezik szuper pankromatikus kép is más felbontásban. A felvételek jellemző mérete több $100 \text{ km} \times$ több ezer km, így igen nagy területekről készít felvételeket egy-egy keringés során.

Aktív még a Mars Reconnaissance Orbiter melynek HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment) eddigi legjobb felbontású és minőségi képeket biztosítják a vörös bolygóról. Térbeli felbontása a képeknek 0,3 méter/pixel de a felvételek jellemző mérete csak 6×12 km.

Jelentős adatokat kaphattunk a Mars Global Surveyor-ról, ami 1997-2006-ig vizsgálta a Mars felszínét a MOC (Mars Orbiter Camera) és a MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter) segítségével. A MOC felszínre merőleges helyzetű letapogató elven működő optikai kamera és a MOLA minden MOC képhez készített domborzati profilt, ebből a két adatból interpoláció segítségével megszerkeszthető a kiválasztott terület digitális domborzatmodellje. Ezeket az adatokat felhasználták a HRSC által létrehozott digitális domborzati modellek pontosságának vizsgálatakor is. (Heipke et al, 2007)

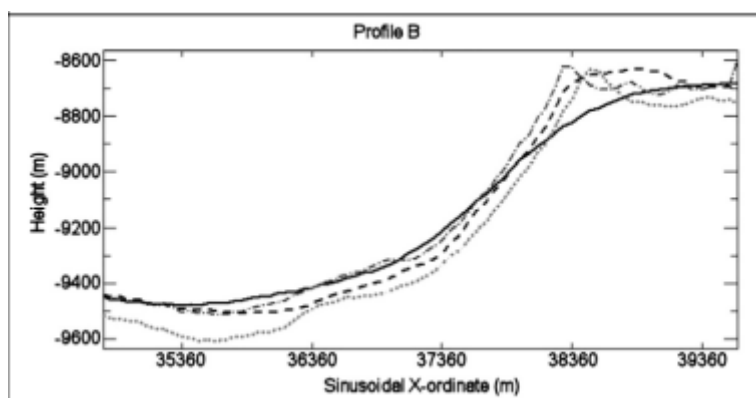
Készítő	Keringőegység neve	Kamera neve	Felbontás	Jellemző méret
NASA	Mars Odyssey	THEMIS	19 m/pixel	$18 \text{ km} \times 65 \text{ km}$
ESA	Mars Express	HRSC	10 m/pixel (normál), 2 m/pixel (szuper)	több $100 \text{ km} \times$ több 1000 km
NASA	Mars Global Surveyor	MOC, MOLA	1,4 m/pixel, 0,3 m függőleges pontosság	$3 \text{ km} \times 30 \text{ km}$
NASA	Mars Reconnaissance Orbiter	HiRISE	0,3 m/pixel	$6 \text{ km} \times 12 \text{ km}$

3. táblázat Áttekintő táblázat a közelmúltban vagy ma is aktív Mars felszínéről adatot szolgáltató keringő egységekről (Sík és Kereszturi, 2006 nyomán)

Az összefoglaló táblázatból is látható, hogy a Mars Express felvételeinek jellemző mérete a legnagyobb, felbontása ugyanakkor nem a legjobb, mégis jól alkalmazható geomorfológiai elemzésekre.

Az egyes digitális domborzatmodellek egymástól kisebb-nagyobb mértékben eltérnek, ezt több cikk is vizsgálja (pl. Lin et al, 2010), így maga az eredeti domborzatmodell is hibával terhelt.

Lin et al. (2010) alapján látható, hogy egy kráter széle esetén mennyire különböznek is az egyes felvételekből létrehozott különböző eljárással készített digitális domborzatmodellek.

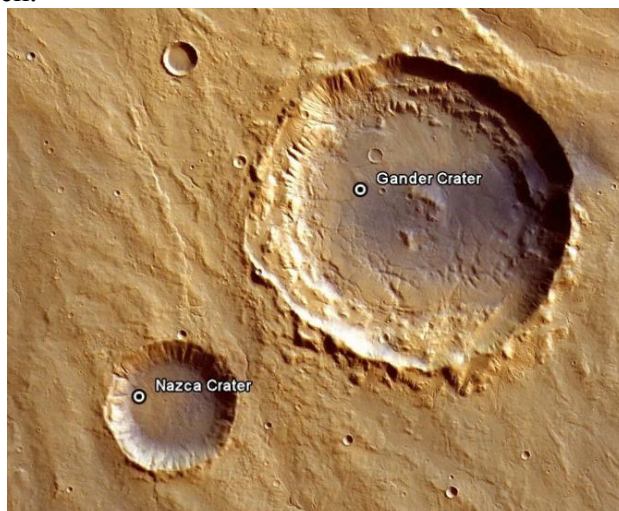


22. ábra: Egy kráter peremén a különböző kamerák felvételeiből előállított domborzatmodellek egymástól való eltérése (folytonos vonal: általam is használt HRSC kamera felvételeiből készített DTM, pontozott: HiRISE kamera felvételeiből készített DTM, szaggatottan pontozott vonal: MOLA DTM, halványan pontozott: eredeti felszín (Lin et al, 2010)

5.2. Szegmentált eredmények

A vizsgált terület a Hadriaca Patera alacsony lejtőszögű vulkánján (Déli-magasföld és a Hellas-medence északkeleti részén található) elhelyezkedő Nazca és Gander becsapódási kráterek.

A 23. ábra alapján is megfigyelhető, hogy a nagyobb Gander-kráter jobban erodálódott a szabályos alakú Nazca-kráterhez képest. Illetve megfigyelhető, hogy valószínűleg a lávafolyásokból adódó letörések, peremek, egyenetlenségek vannak a becsapódási kráterek közvetlen környezetében.



23. ábra: 51 km × 52 km-es kivágat a Hadriaca Patera közelében lévő két becsapódási kráterről (forrás: Google Mars)

A becsapódási kráterek modellezésére kétféle paraméter-együttesből származó eredményt kívánok bemutatni (4. táblázat).

	1. szegmentáció	2. szegmentáció
normálvektor meghatározásához szükséges szomszédos pontok száma (db)	16	10
minimum pontok száma (db)	50	50
maradvány pontok száma	100	50
szórás (m)	50	50
maximum pont-sík távolság (m)	50	50
sík-sík „szögtávolság”	0.005	0.005
összetartozás (m)	300	200
iterációk száma	10	10

4. táblázat: 1. és 2. szegmentálási eredmény paraméter-együttese a becsapódási kráterekre vonatkozóan

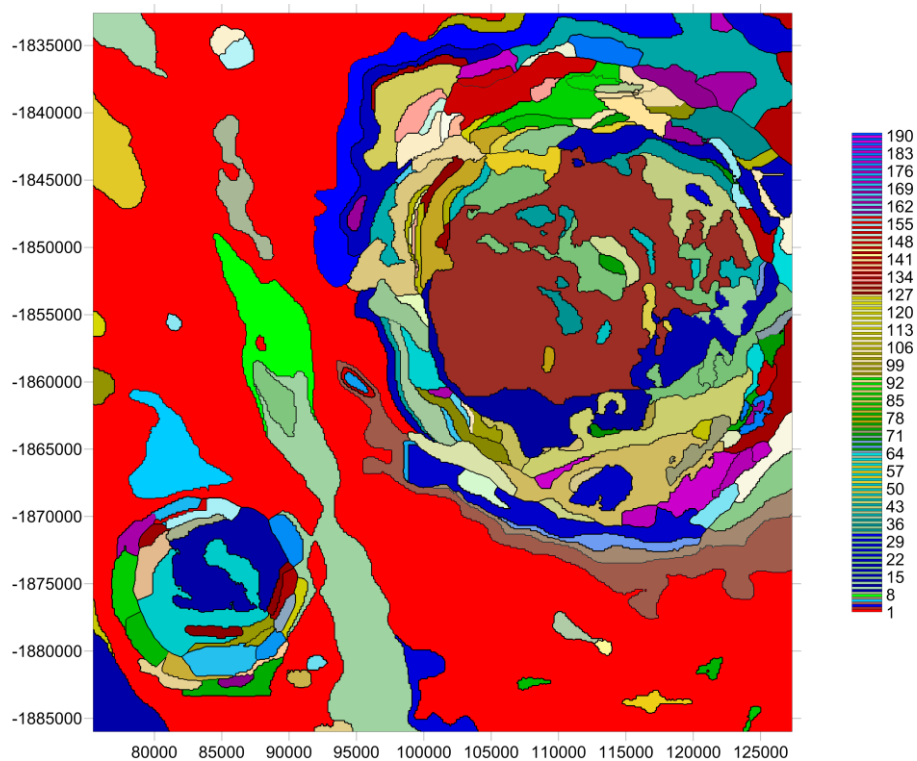
A két becsapódási kráterekre fókuszáló kivágat esetén, mivel főként a kráter falát kívántam modellezni, ezért erre érzékeny paraméter-együttest alkalmaztam. Így a normálvektorok meghatározásához szükséges szomszédos pontok száma viszonylag alacsony. A minimum pontok száma hasonló megfontolásokból szintén alacsony.

A szórás viszonylag magas, 50 méterben állapítottam meg az egyszeres szórás értékeket, kiegészítve egy magas maximum sík pont távolsággal (50 m). Ezekre szintén a kráter falának modellezésére kitalált optimális értékek.

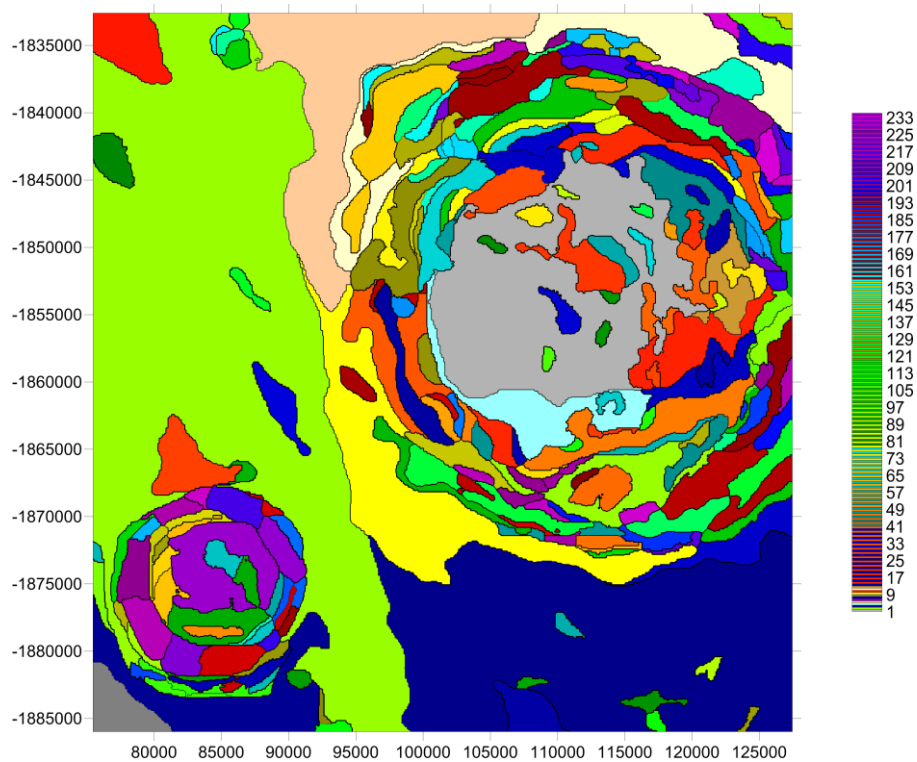
Az eredményeken (24., 25. ábra) minden szín különböző síkokat jelöl, amelyek jól elkülöníthető szegéllyel rendelkeznek. A színeknek további jelentésük nincs, illetve a fehér területek a kieső pontokat jelölik.

A szegmentált eredményeken jól elkülöníthető a síkok alakjából is a kráterek helyzete, illetve megfigyelhető, hogy a nagyobb Gander-krátert alkotó síkok alakja az erodált jellegéből fakadóan teljesen más jellegű, mint a szabályos síkok a kisebb kráter esetén.

Az is látható, hogy a két modellezési eredmény, a kráter alját és a középén található jellegzetes kiemelkedést kimutatja. Viszont a két különböző paraméter-együttes másképpen modellezi a kráterek közvetlen környezetét, az első esetben egy síkot illeszt és csak a mélyedések jelennek meg különböző síkokként, a második esetben pedig egy egyértelmű törésvonalat jelöl ki a szegmentálási eredmény, ami adott esetben a Heipke et al. (2007) által is említett (sztereo-fotogrammetriai) matching-probléma is lehet.



24. ábra: 1. szegmentálás eredménye 189 síkkal modellezi a Nazca- és Gander-krátert és közvetlen környezetét



25. ábra: 2. szegmentálás eredménye 233 síkkal modellezi a Nazca- és Gander-krátert és közvetlen környezetét

5.3. Reziduálértékek vizsgálata

A modellezés helyességének vizsgálatához szükséges a reziduálértékek vizsgálata, amely megmutatja, hogy az eredeti felszíni pontok és a illesztett síkok magassága mennyiben különböznek egymástól. Ebből tudjuk levonni a következtetést, hogy mely síkjaink illeszkednek, az adott paraméterek alapján jól, illetve melyek kevésbé.

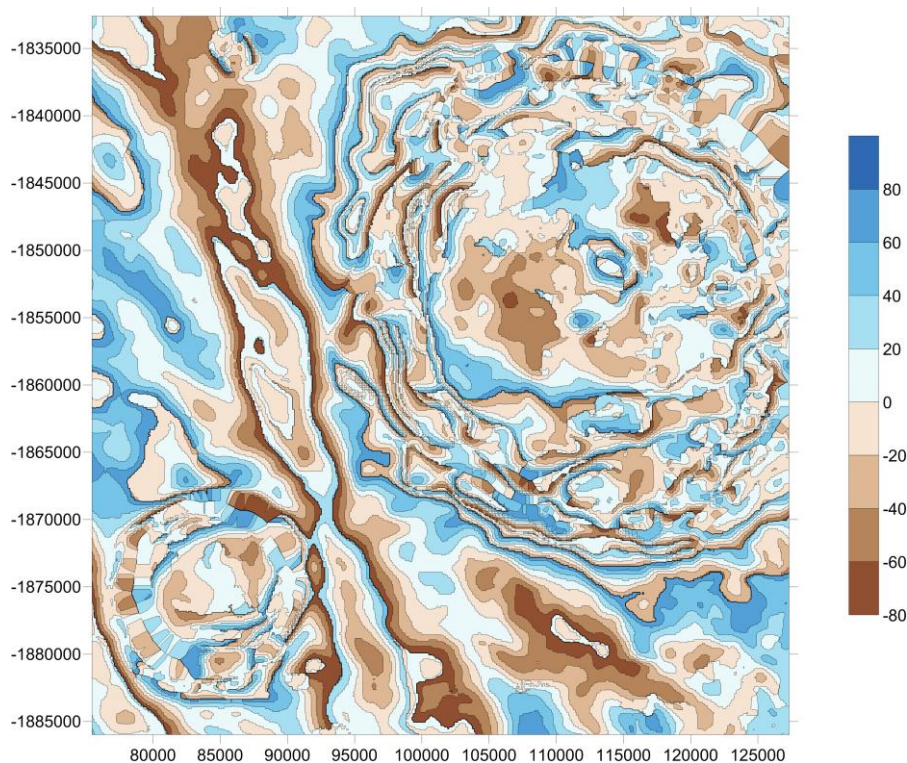
A következő két ábrán a szegmentálási eredményeimet jelenítettem meg, minden egyes pontra kiszámolva és ábrázolva a reziduál értékeit. A számítást a sík egyenletéből számított elméleti magasság és a digitális domborzatmodell magasság adatainak különbségének meghatározásával értem el.

Sötétbarnával a legjobban eltérő negatív értékek (-80 m) világoskékkel a pozitív értékben való eltérést ábrázoltam (80 m). Az eltérések ingadozását főként a szórás paramétere határozta meg, mert ott adjuk meg, hogy mi számít egyszeres szórásnak, és ehhez képest tartozhatnak a síkhoz a különböző pontok, illetve eshetnek ki.

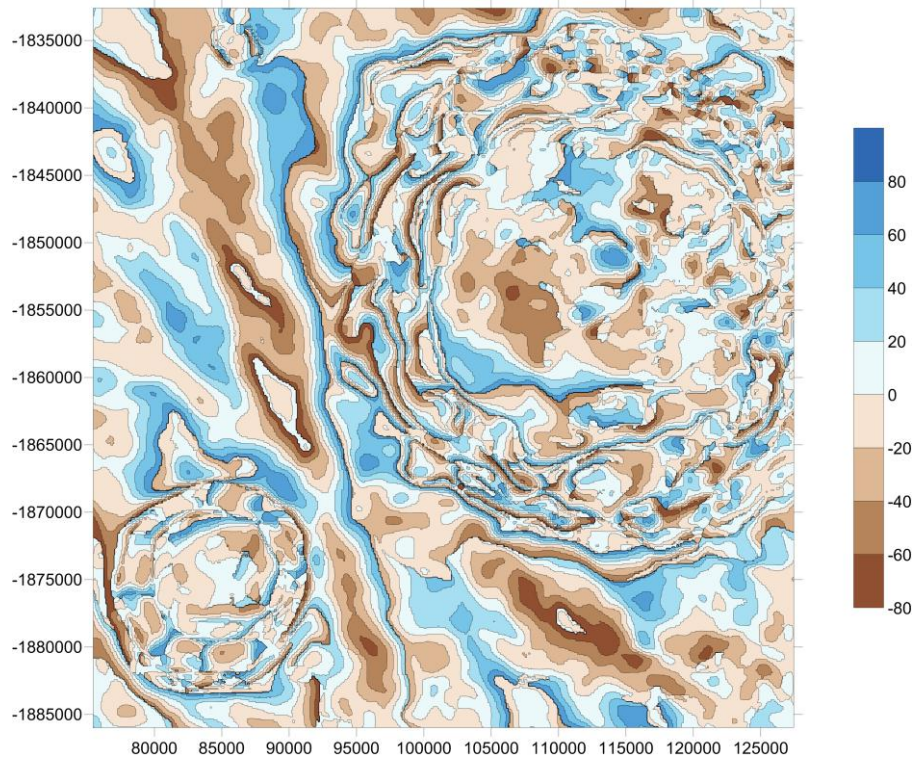
Mindkét eredményen megfigyelhető, hogy a sötétbarna és a világoskék színek egymásba „fogazódnak”, és kimutatják az egyes illesztett síkok határait. Ezt el is várjuk szoftvertől, hiszen az illesztett síkok szélén legnagyobb az eltérés.

Amire nagyon fontos odafigyelni, hogy a két különböző szegmentálás eredménye, markánsan ugyanolyan reziduál értékeket hoz a terület nagy részére, pl. a síkok ábrázolásánál megfigyelhettük a markánsan eltérően modellezett kráterek közvetlen környezetét, ami viszont a reziduálok ábrázolásával mindkét esetben egységesnek tűnik.

Azt is láthatjuk, hogy a kisebb szabályos kráter esetén egyértelműen a 10 pont alapján meghatározott normálvektor értékek adják a tisztább illeszkedést.



26. ábra: 1. szegmentált eredmény reziduálértékeinek ábrázolása minden pontra vonatkozóan



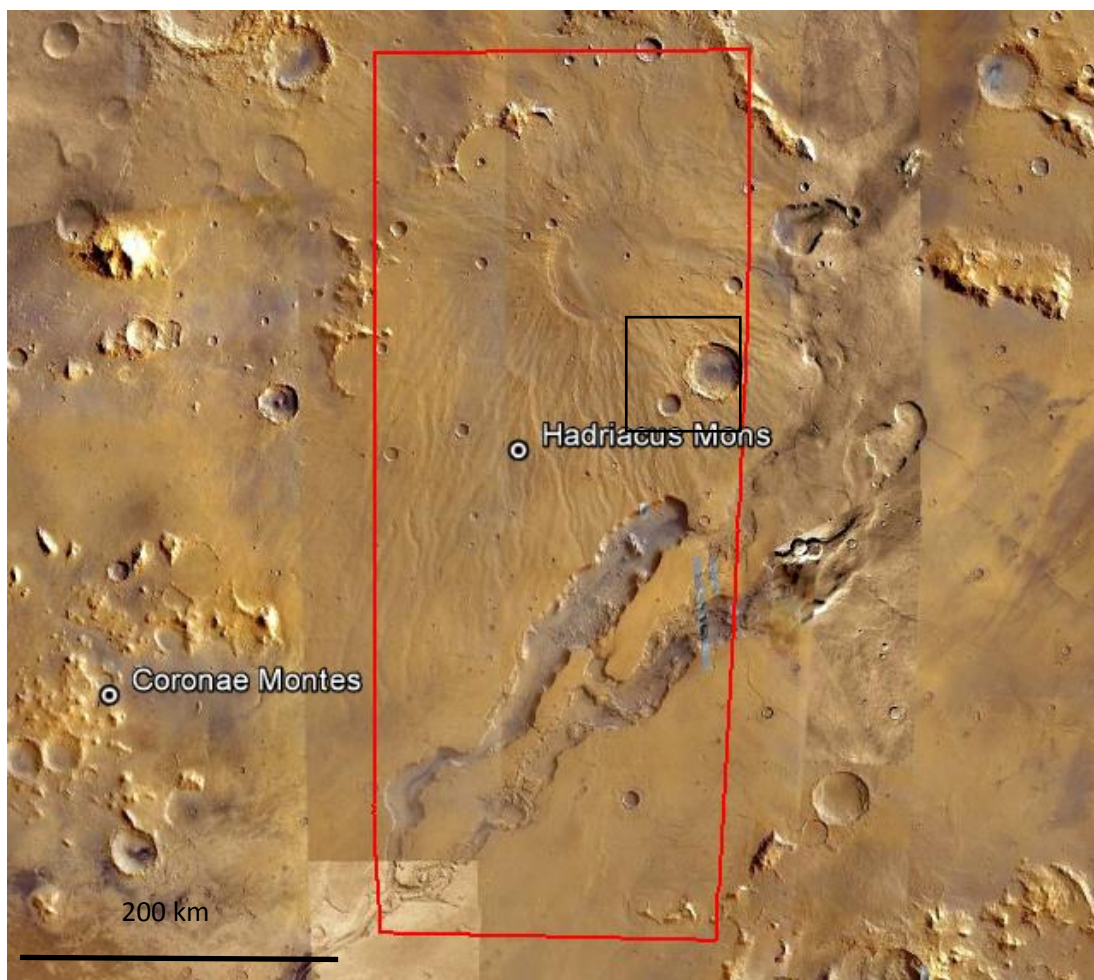
27. ábra: 2. szegmentált eredmény reziduálértékeinek ábrázolása minden pontra vonatkozóan

5.4. A terület nagyobb léptékben történő vizsgálata

Mint a fejezet bevezetőjében is említettem, egy jóval nagyobb területre készített szegmentálási eredményt összevetek az eddigi eredményeimmel, ami magába foglalja az előzetesen modellezett 51 km x 52 km-es kivágatot is.

Láthatjuk, hogy az eddig fókuszáltan kráterek és annak közvetlen környezetére irányuló kivágaton, nem tudtuk értelmezni a kráterek mellett megjelent egyenetlenségeket, amelyek főként a nagy pontszámot tartalmazó síkok reziduálértékeiben jelentek meg.

Mostani szegmentálási eredmények ki fogják hozni a jelen képen sejthető lávafolyások kontúrajait és ezzel értelmet nyer, a kisebb kivágatokon látható mélyedések, a reziduálvizsgálatok eredményeképpen egyértelműen kirajzolódó keskeny mélyedések.



28. ábra A h0550 számú orbitot magába foglaló terület(piros) és az előzőekben vizsgált (fekete) (forrás: Google Mars)

A területre egy paraméter-együtteshez tartozó eredményt mutatnék be. Látszik, hogy a szórás kisebb értéket vesz fel az eddigi 50-hez képest, ez adódik abból, hogy jelenleg nem a becsapódási kráterek modellezése a cél, ezért engedhető meg, hogy a normálvektorok meghatározása is magasabb pontszám figyelembevételével történjen.

	1. szegmentálás
normálvektor meghatározásához szükséges szomszédos pontok száma (db)	25
minimum pontok száma (db)	100
maradvány pontok száma	100
szórás (m)	30
maximum pont-sík	30

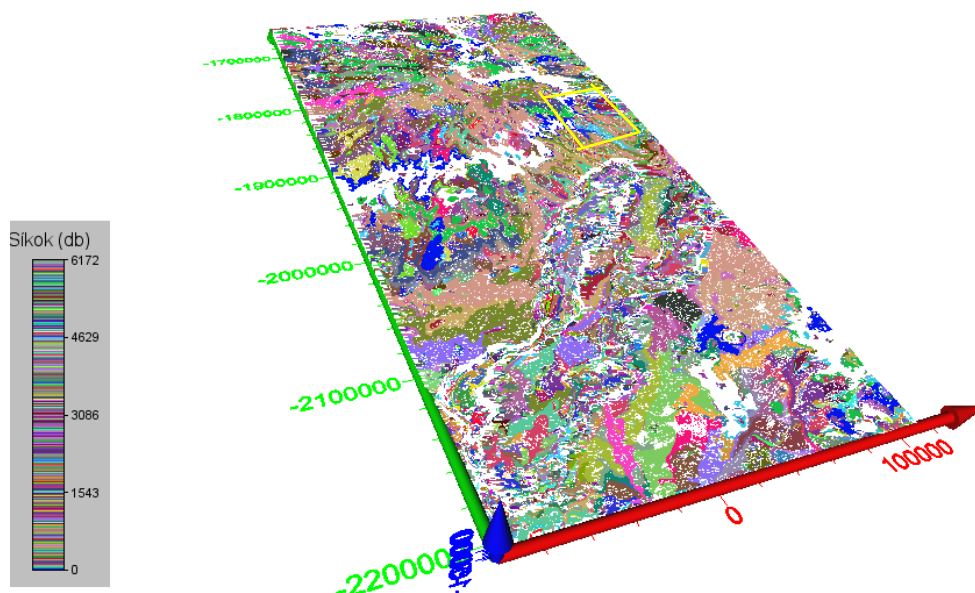
távolság (m)	
sík-sík „szögtávolság”	0.002
összetartozás (m)	250
iterációk száma	100

5. táblázat: A h0550 orbitra végzett szegmentáláshoz felhasznált paraméter-együttese (Székely et al, 2012)

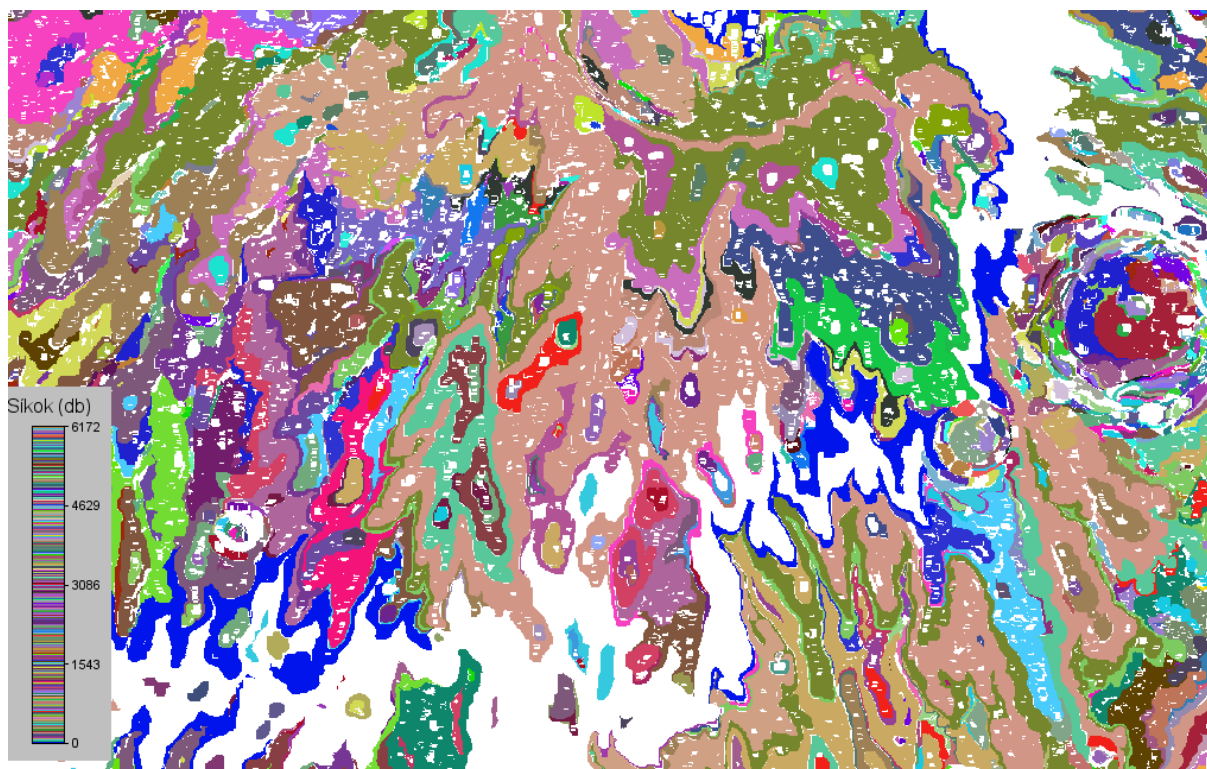
A szegmentálás eredménye 6172 db sík lett. Megfigyelhető az eredmény „lyukacsossága”, ez a módszer robusztusságából adódik. A jelenleg alkalmazott paraméter-együttes nem kívánja modellezni a kisebb krátereket, illetve érzéketlen marad a nagyobb lejtőszögű területekre, illetve a bevágódó völgyek meredek oldalaira.

Így ezen a szegmentálási eredményen megkeresve az előzőekben vizsgált területet, láthatjuk, hogy a módszer ilyen nagy $215 \text{ km} \times 500 \text{ km}$ területű h0550-es orbiton is modellezve van, bár nyilvánvalóan a paraméter-együttesből adódóan több a kieső pont, melyek a kisebb kráterek helyét hagyják üresen. Tapasztalni lehet viszont a síkok alakzatának összehasonlításakor az illesztett síkok formájának egyezését a $51 \text{ km} \times 52 \text{ km}$ végzett szegmentálási eredményekkel összehasonlítva.

Megállapíthatjuk, hogy a szoftver nagy területeket is képes egyszerre modellezni, hiszen az így modellezett felszínből nyert szegmentálási eredmények összehasonlítva egy kisebb léptéken készülttel, az illesztett síkok alakzatai megfeleltethetők egymásnak, mint például a kráter aljának modellezése, a széle, és a közvetlen környezete.



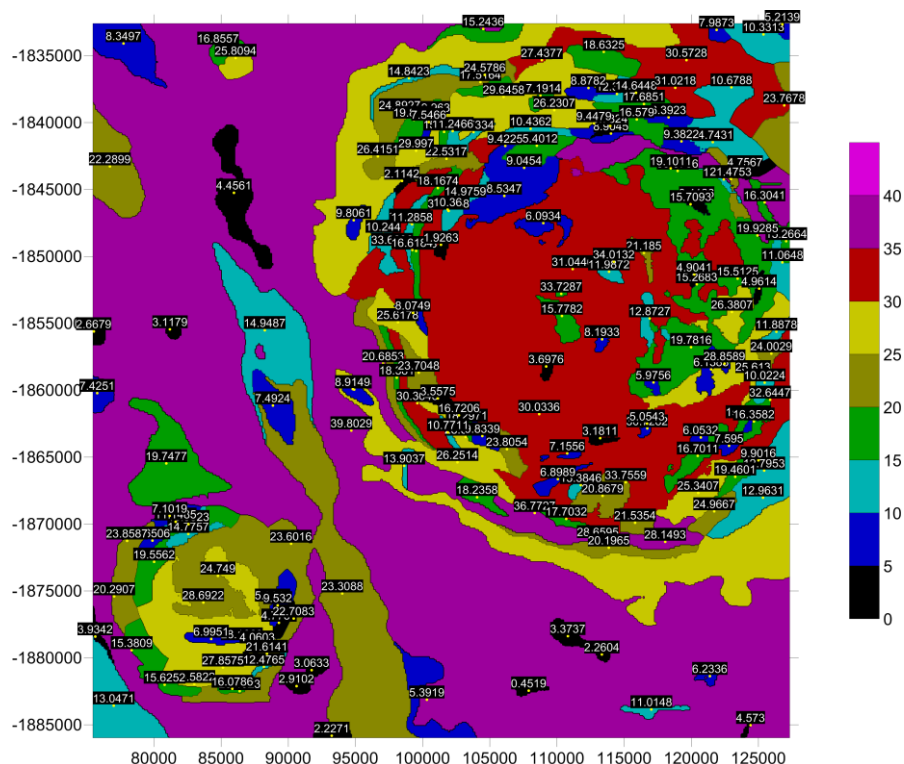
29. ábra: A h0550 orbiton végzett szegmentálás eredménye (6172 db sík) (Székely et al, 2012)



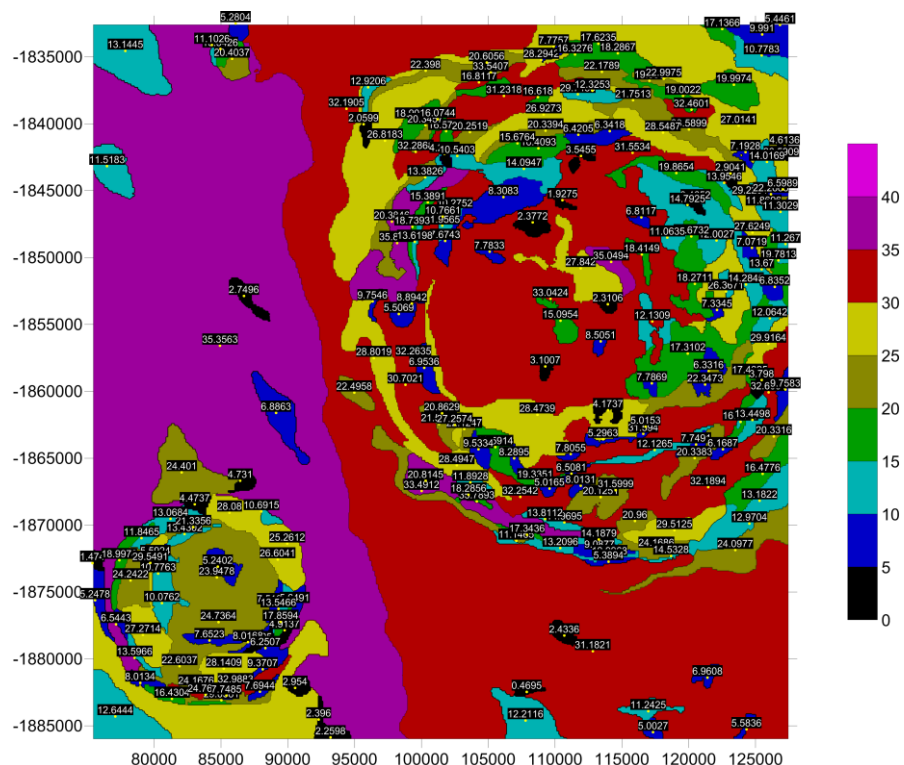
30. ábra: Felülnézetből közelítve látható a Nazca és a Gander becsapódási kráterek

5.5. A szegmentált eredmények elemzése

A szoftverből nyert adatok elemzését a kráterek esetében is elvégeztem. Először a szórás értékeit jelenítettem meg, kiegészítve az egyes síkokhoz tartozó pontos értékekkel, amiket a sík középpontja felett elhelyezkedő számadatok mutatnak, minden egyes síkra vonatkozóan.



31. ábra: Az egyes síkok szórás értékeinek (m) ábrázolása 1. szegmentálási eredményre



32. ábra: Az egyes síkok szórás értékeinek (m) ábrázolása 2. szegmentálási eredményre

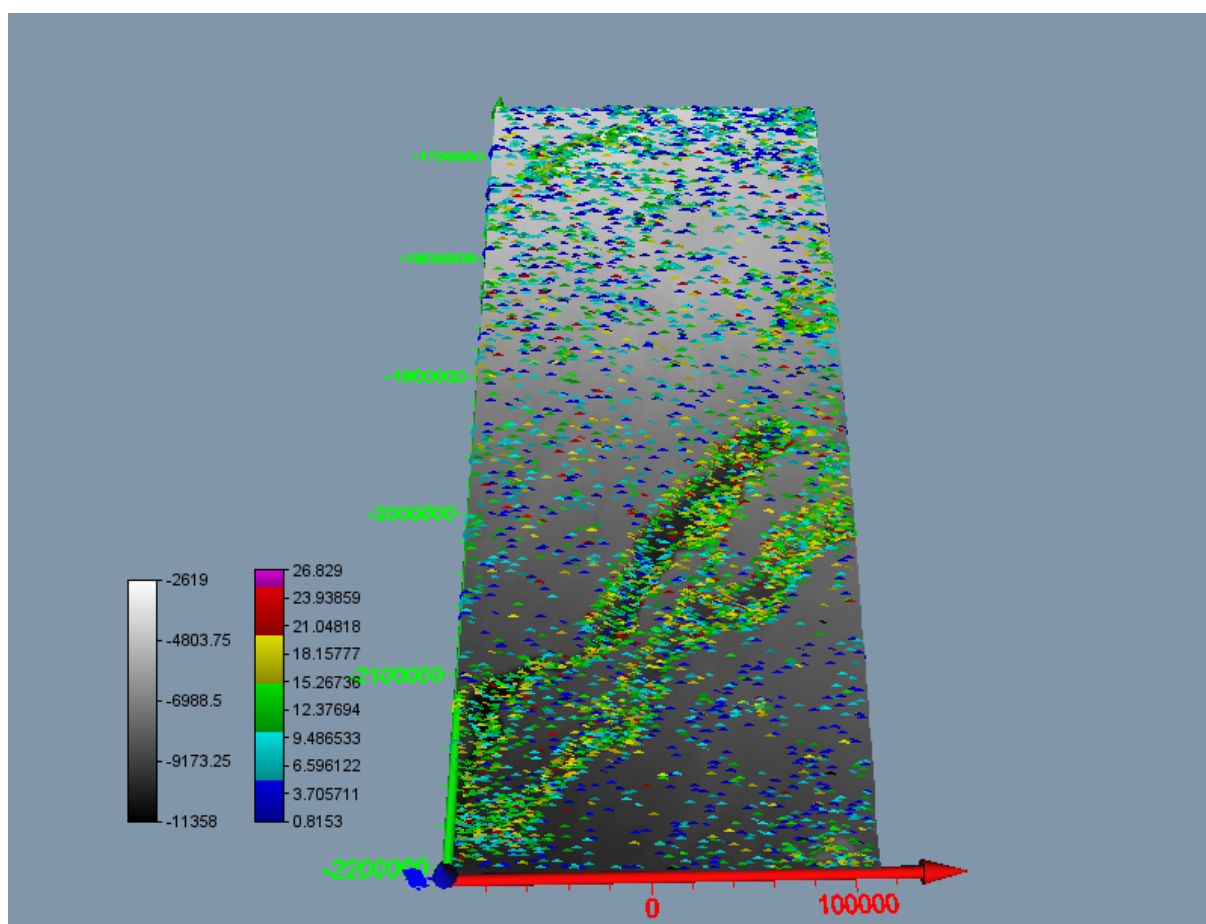
Itt is megfigyelhető, hogy a nagyobb, több pontot tartalmazó síkok esetén a szórás értéke nagyobb, ez következik, a reziduál elemzésnél bemutatott ábrákból, hiszen a nagyobb kivágoton megállapított lávafolyás eredményeképpen habár normálvektorok iránya és

különböző paraméterek alapján egy síknak számítanak, nyilvánvalóan ezek a területek foglalják magukba a legnagyobb topográfiai egyenetlenségeket is.

Ezenkívül, látható, hogy a Gander-kráter lepusztulását modellező síkok esetében 5-30 méter közé tehetők a szórás értékei. A kisebb Nazca kráter esetén szintén azonos intervallumba esnek az értékek 20-30 méter közé, bár a két paraméter-együttes nyújtotta eredmények némileg eltérnek egymástól, hiszen másképpen modellezzik a valóságot.

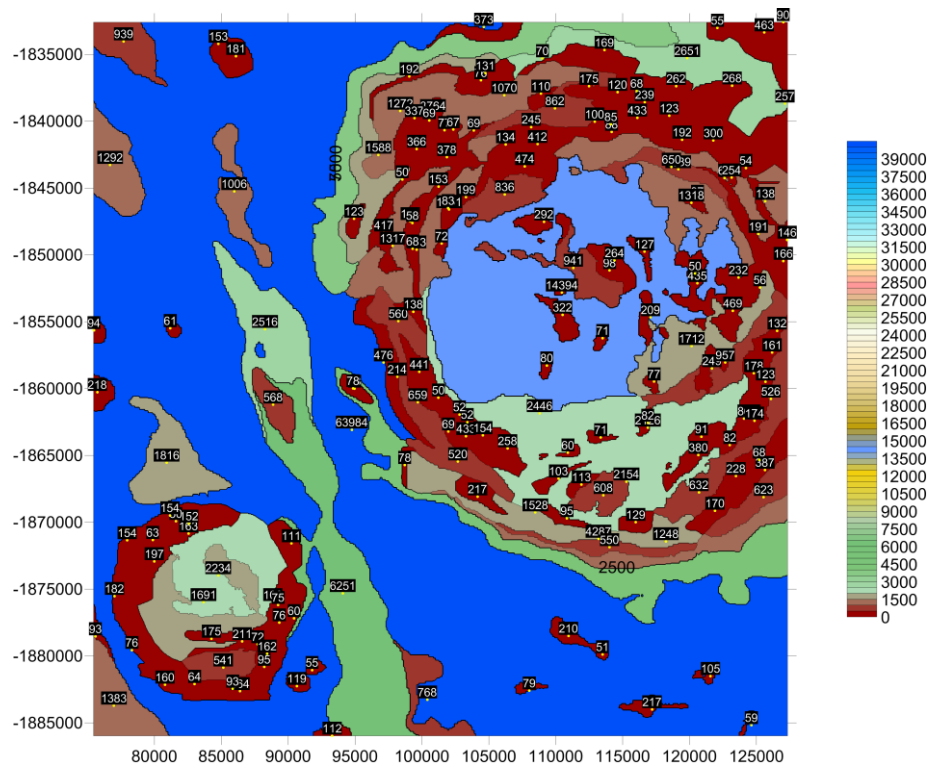
Mindezek után, a jóval nagyobb kiterjedésű kivágratra is megjelenítettem ugyanezeket az értékeket azonos skálát alkalmazva, de most már csak a síkok középpontjait színezve.

A paraméter-együttes egyszeres szórás értéke itt 30 méter, ennek megfelelően a szórás eredményei 0.8-30 méter között alakulnak. A színezés alapján jól látható, hogy a Nazca-kráter és a Gander-kráter szórás értékei ez esetben is 5-25 méter közé esnek.

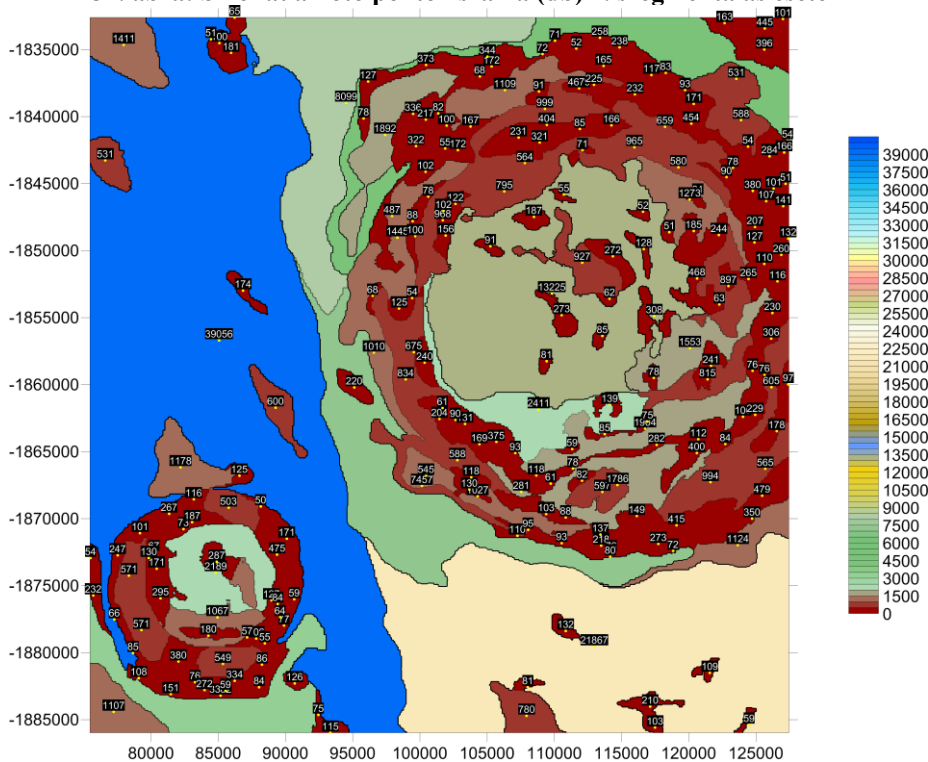


33. ábra: A h0550-es orbitra végzett szegmentálás reziduál szórás értékeinek megjelenítése (m) az illesztett középpontokra vonatkozóan

Ezt követően a síkokat alkotó pontok számát ábrázoltam, ahol a skálákat összehangoltam a különböző szegmentálások esetén és szintén az egyes középpontok fölé helyeztem az adott sík pontszámainak számát.



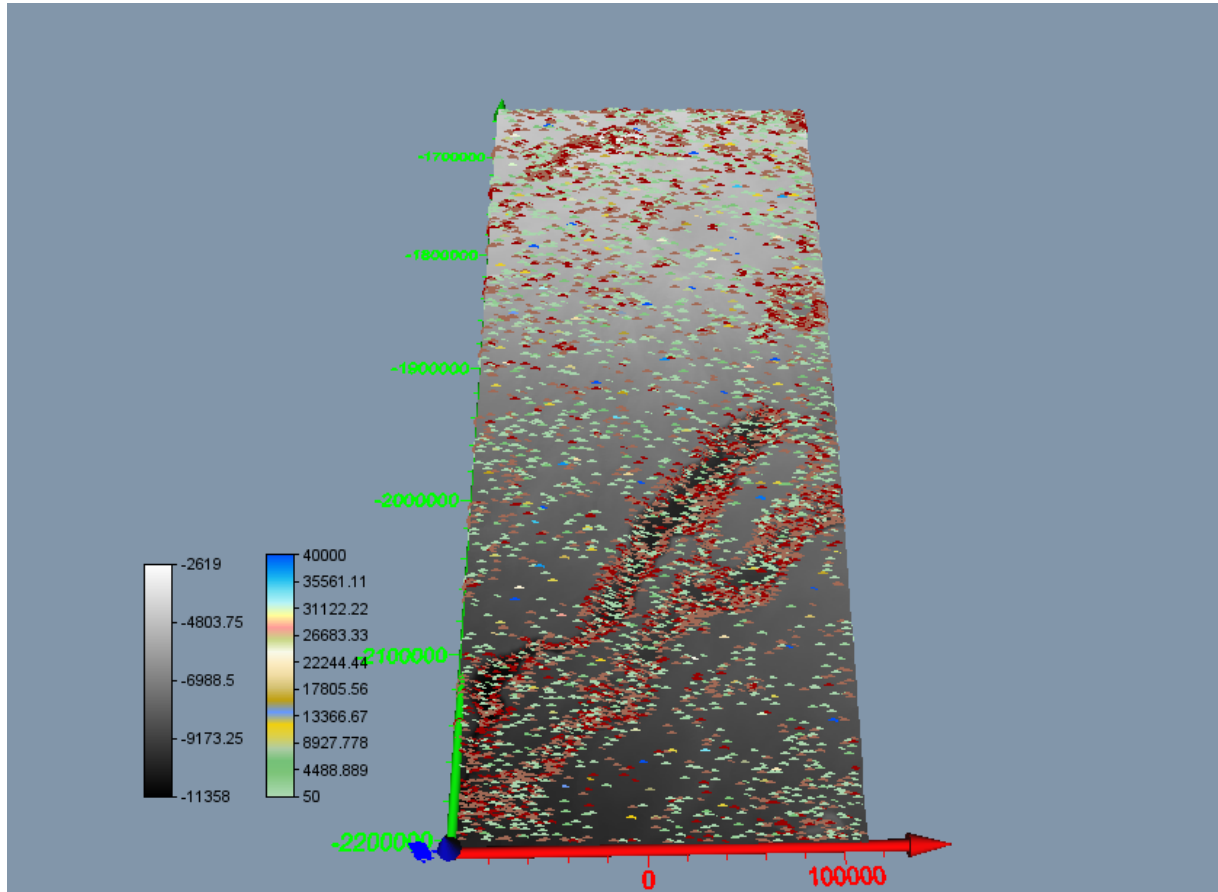
34. ábra: Síkokat alkotó pontok száma (db) 1. szegmentálás esetén



35. ábra: Síkokat alkotó pontok száma (db) 2. szegmentálás esetén

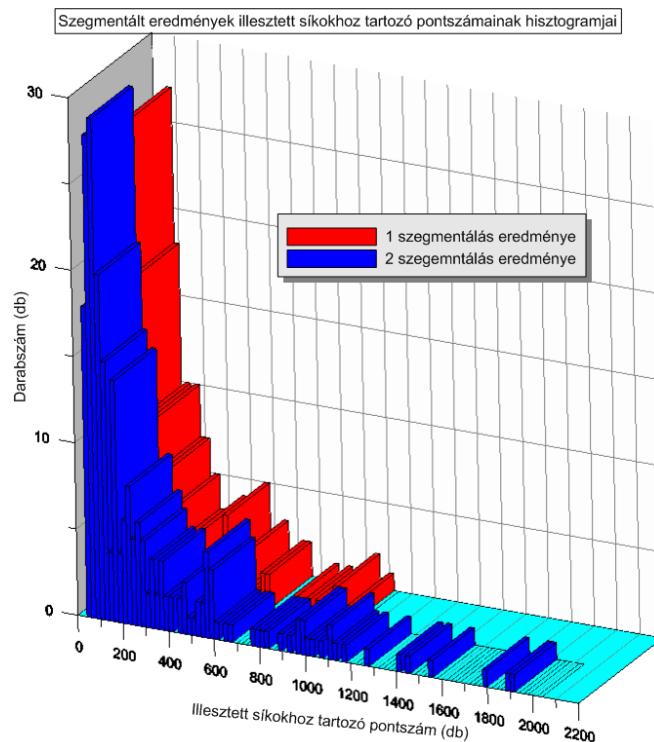
Az eredményeken jól elkülönülnek vörös színnel a becsapódási kráterek falai, ahová csak kisebb pontszámú síkokat volt képes illeszteni szoftver, a normálvektorok irányának változásai miatt. Mindkét szegmentálás esetén a kráter falát modellező síkok pontszámainak értéke 50-1500 intervallumba tehető. Megfigyelhető, hogy a kráter központi kiemelkedését

modellező síkok is ebbe a tartományba esnek. Viszont a Nazca-kráter alját modellező sík első esetben 2234 második esetben 2189 pontból álló sík modellezi. Ez a két érték elég közel esik egymáshoz. A Gander-kráter alját az első paraméter-együttes esetében 14394 pont, második esetben 13225 pontból álló sík modellezi. Mindezt összevetve az egész h0550-es orbitra történt szegmentálás eredményeivel kráterek fala itt is szintén az 50-1500 intervallumba esnek a Nazca-kráter alját modellező két sík 1134 és 1256 pontot foglal magába a Gander-kráter alját modellező sík pedig 15779 pontból áll.



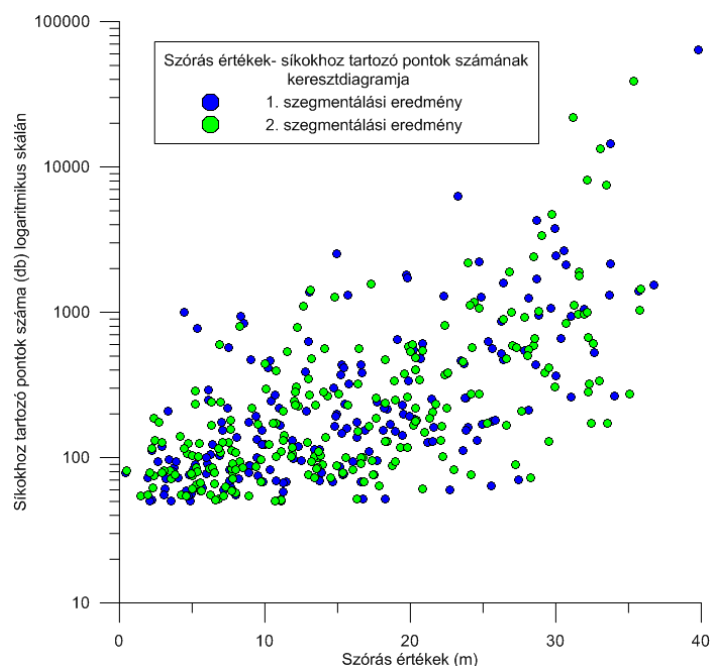
36. ábra: h0550-es orbitra végzett szegmentálás síkhoz tartozó pontszámainak (db) ábrázolása az előző kisebb kivágaton alkalmazott skála összehangolásával.

Érdeemesnek tartottam a pontok számának eloszlását hisztogramokban ábrázolni az első két szegmentálás esetében. Az eredményen látható, hogy mindkét esetben hasonló az eloszlás, a különbség, hogy a második szegmentálás esetén több síkot sikerült illeszteni, így több nagyobb sík is keletkezett.



37. ábra: 1. és 2. szegmentált eredmény síkokat alkotó pontszámok hisztogramjai

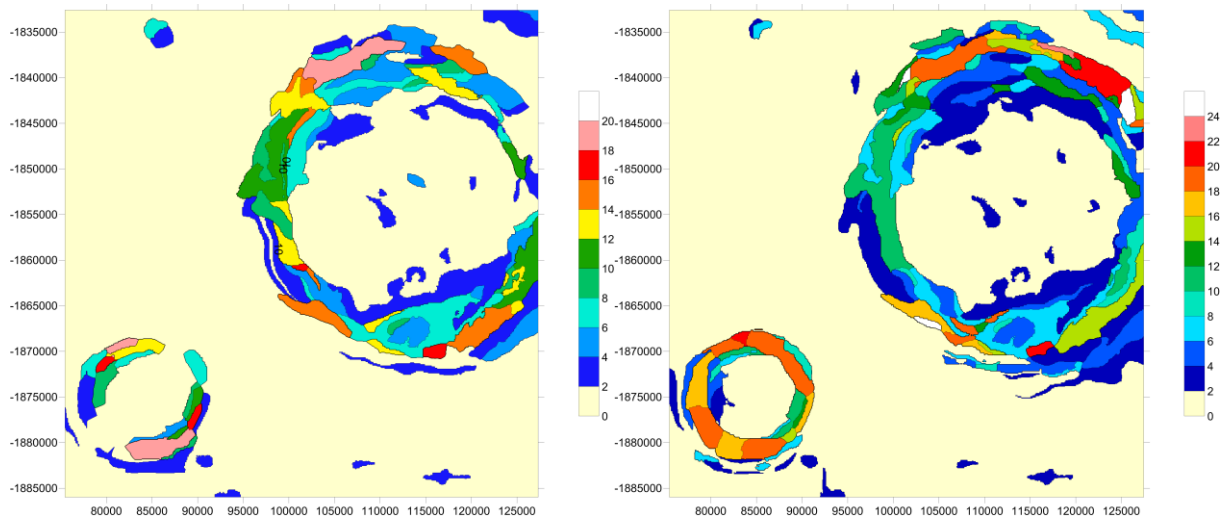
Ezek után ábrázoltam a reziduál értékek szórását és a különböző síkokhoz tartozó pontok számát logaritmikus skálán szintén az 1. és 2. szegmentálás eredményére. Felismerhető egy laza összefüggés, miszerint a kevesebb pontot tartalmazó síkok szórása tendenciájában kisebb, a nagyobb kiterjedésű pedig nagyobb mindkét szegmentálás esetén, ahogy azt az előző ábrák összevetéséből is megfigyelhető. A jelenséget az magyarázza, hogy általában a nagyobb kiterjedésű, nem teljesen sík felületre illeszkedő síkok eltérései nagyobbak, mint egy kis felületdarabnál, ahol a síkillesztés jobb közelítés.



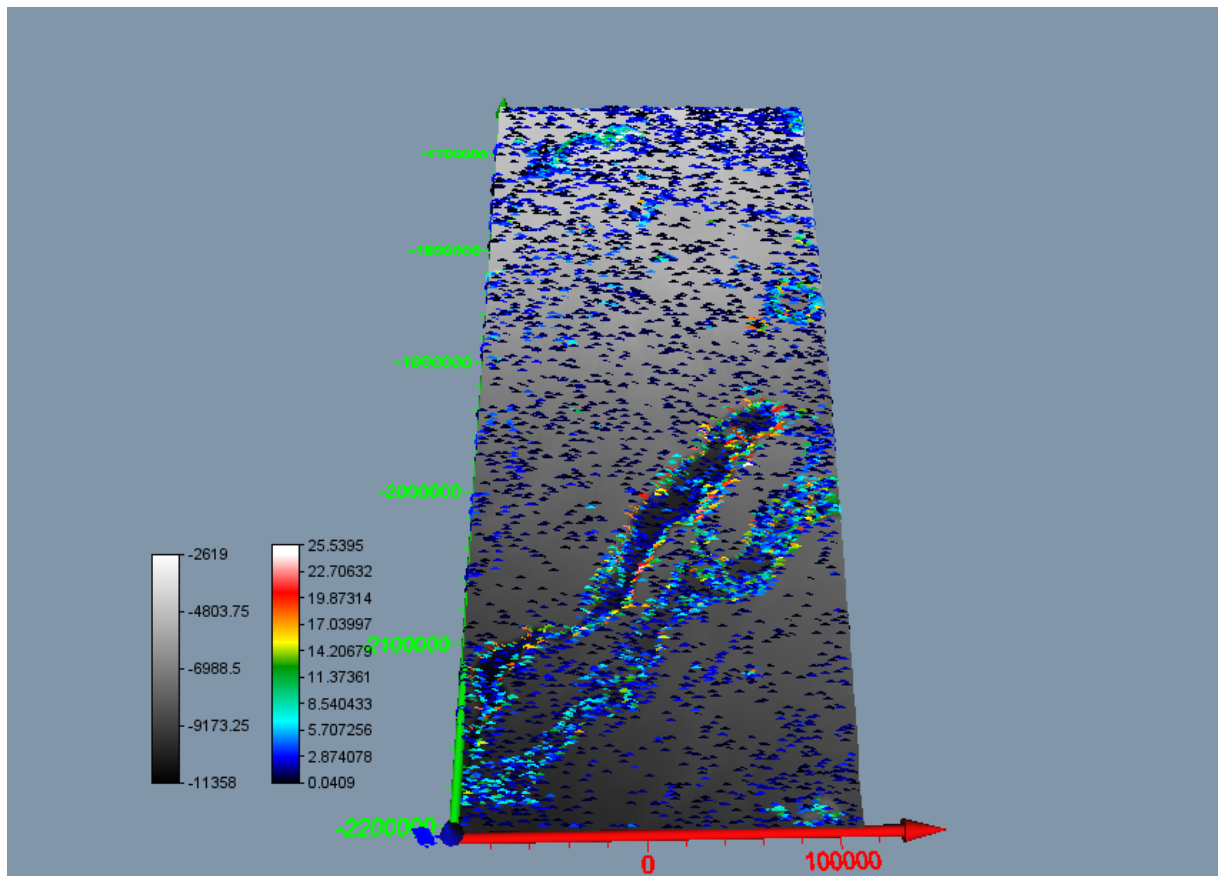
38. ábra 1. és 2. szegmentálás eredményeinek reziduál szórása (m) és a síkok pontjainak számának összefüggése keresztliagramon ábrázolva

A szórás és a síkokhoz tartozó pontok vizsgálatán kívül, összehasonlítottam a szoftverből leszármaztatott lejtőszög és kitettség adatokat. A szoftver előnye, hogy ezeket az adatokat is síkokra vonatkoztatva adja meg egyszerűsítve ezzel az adatok feldolgozását.

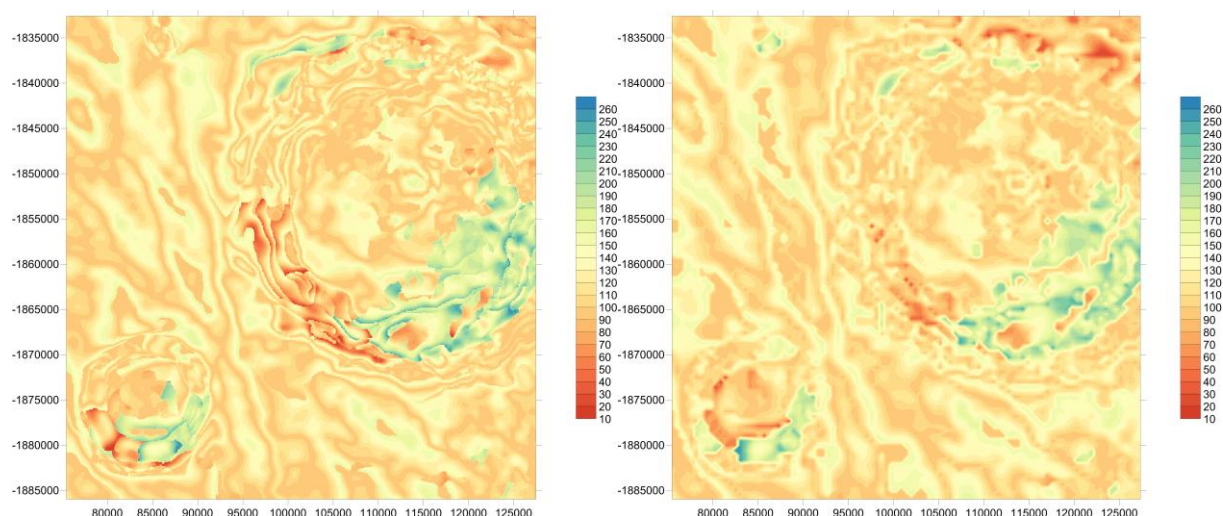
A síkokhoz azokra jellemző lejtőszög adat van rendelve. Először a két kisebb területre majd a h0550-es nagy területre is ábrázoltam ezeket az értékeket s a skálák összehangolásával látható, hogy a nagyobb és kisebb léptékben történt szegmentálás eredményei nem térnek el nagyban egymástól.



39. ábra: 1. és 2. szegmentálás eredményeinek lejtőszög értékeinek (fok) ábrázolása



40. ábra A h0550-es orbitra vonatkozó lejtőszög értékek fokban centroidpontként megjelenítve



41. ábra: 1. és 2. szegmentálás eredményeinek kitettség (fok) értékeinek ábrázolása

Lejtőszögek alacsonyak, ahogyan ezt a Mars felszínén várjuk is, a lapos vulkán környezetéből egyértelműen kivehető a két becsapódási kráter alakzata a lejtőszögek értékei alapján.

A kitettség-adatok esetén is a két eredmény nagyban nem különbözik egymástól zöldes színnel azonos helyen jelennek meg a DNY irányba dőlő síkok.

Összefoglalásul készítettem egy táblázatot, ami a kráterekhez tartozó síkokat vizsgálja különböző szempontok szerint. Mindezt összehasonlítottam a h0550-es orbitra végzett szegmentálás eredményéből kapott értékekkel erre az adott területre.

Az intervallumokat megvizsgálva látható, hogy némiképp a kiválasztott szempontok intervallumai néhol jó egyezést mutatnak pl. lejtőszög és a pontok száma esetén, de a szórás értékeiben a kisebb területre is 30 méteres szórást lett volna érdemes alkalmazni, hogy a két eredmény összehasonlítható legyen.

Nazca- és Gander-kráter	Reziduálok szórásnégyzete (m)	Síkokhoz tartozó pontok száma(db)	Lejtőszög (fok)	Kitettség (fok)
1. szegmentálás	5-30	0-1500, Gander kráter alja: 14394	2-20	10-260
2. szegmentálás	5-30	0-1500, Gander kráter alja: 13225	2-24	10-260
h0550 szegmentálás	5-25	0-1500, Gander kráter alja: 15779	1.8-20	-

6. táblázat: áttekintő táblázat a kapott eredményekről az 1. 2. és a h0550-re végzett szegmentálás eredményeképpen

6. Összefoglalás

Dolgozatomban a Bécsi Műszaki Egyetemen eredetileg városmodellek automatikus generálására alkalmazott szoftver földtudományokban való alkalmazhatóságát vizsgáltam meg. Célom a szoftver segítségével a digitális domborzatmodellek síkokkal történő modellezése robusztus paraméterbecslés alkalmazásával, melynek eredményeképpen nagyfokú adattömörítést érhetünk el, és lehetőség nyílik nagy területek kvázi automatikus feldolgozására.

Munkám során két területre alkalmaztam a szoftvert: egyrészt a Közép-Andok WARP térségét vizsgáltam az SRTM adatbázisból elérhető ingyenes domborzatmodell alapján, másrészt a Mars h0550-es orbitszámú HRSC felvételeiből elkészített digitális domborzatmodell alapján.

A Közép-Andok térségében illesztett síkok alapján elkülöníthetővé vált az Oxaya-blokk, a különböző csuszamlások, a bevágódó folyóvölgyek és a aktív vulkáni rész elkülönítése. Nem minden sík hordoz geológiai vagy geomorfológiai értelmet, azonban az eredményeket összehasonlítva a műholdképekkel, illetve a geológiai térképekkel és a szakirodalommal, megállapítható, hogy a különböző alakzatú síkok ezeket a geomorfológiai egységeket választják el egymástól.

Ezekután kiszámítottam a különböző paraméter-együttesekhez tartozó szegmentálási eredmények minden egyes pontra vonatkoztatott reziduál értékeit és ezt 3 dimenzióban ábrázoltam, ezzel megmutatva, hogy mely részeken pontos mely részeken kevésbé pontos a modellezés. Továbbá a szoftver többletinformációit felhasználva, megjelenítettem az egyes síkokra a reziduálok szórását, síkok pontszámainak számát és a lejtőszög értékeket különböző színezésű skálán megjelenítve az értékeket és megvizsgáltam az egyes szétválasztott egységekhez tartozó értékek, mely intervallumokba esnek bele ezt pedig egy táblázatba foglaltam és megállapítható, hogy bizonyos felszínformák bizonyos reziduál szórásnégyzet, síkokat alkotó pontok száma és lejtőszög alapján egységes intervallumba tartoznak.

Ugyanezeket a vizsgálatokat végeztem el a Mars Hadriaca Patera alacsony lejtőszögű vulkánján található Nazca- és Gander-kráterre, majd az itt kapott eredményeket összehasonlítottam a területet magába foglaló 215 km × 500 km területű h0550-es orbit szegmentálási eredményeivel.

A szegmentálás eredménye, hogy a jobban erodálódott Gander-kráter és a szabályos alakú Nazca-kráterre illesztett síkok formái különböznek egymástól, mintegy utalva a nagyobb átmérőjű kráter erodálódott jellegére. Ezenkívül, minden paraméteregyüttes esetén sikerült modellezni, a becsapódási kráterek jellegzetes kráter közepén megjelenő kiemelkedését és a viszonylag lapos kráter „aljzatát”.

Megállapítható, hogy a szoftver nagy léptékben is hatékonyan modellezte az előzetesen fókuszáltan vizsgált Nazca és Gander becsapódási krátert, a reziduál-szórások értéke illetve a síkokat alkotó pontok száma és a síkokhoz tartozó lejtőszög kis és nagy léptékben történő szegmentálás esetén is azonos intervallumokba sorolható.

Összefoglalóan a szoftver alkalmas lehet a Marsról származó rendkívül hatalmas napról napra növekvő számú digitális domborzatmodellek automatikus vizsgálatára, de a szoftver által illesztett síkok osztályozásához még további futtatásokra és az abból kapott adatok rendezésére van szükség, hogy többet állíthassunk az egyes területekről a szoftver adatai alapján.

7. Köszönetnyilvánítás

Elsősorban szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek Dr. Székely Balázsnak, aki támogatta és segítette a munkámat.

Ezenkívül szeretném megköszönni Dr. Peter Doringernak a szoftverhasználata során felmerült kérdések megválaszolásában nyújtott segítségét.

Harmadrészt pedig barátaimnak, családomnak, ismerőseimnek szeretném megköszönni a támogatást, amit tőlük kaptam.

A rövid bécsi tartózkodásaimat az Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) által finanszírozott TMIS.ascrea projekt anyagi támogatása tette lehetővé.

8. Irodalomjegyzék

1. Bentley, J.L., 1975. Multidimensional binary search trees used for associative searching. *Commun. ACM*, 18(9): 509-517.
2. Dorninger, P., 2011. Eine praktikable und genaue Methode zur Bestimmung von Wasser-Land-Grenzen aus Laser-Scanner-Daten. *Bundesanstalt für Gewässerkunde*, 3: 93-100.
3. Dorninger, P., Nothegger, C., 2007. 3D segmentation of unstructured point clouds for building modelling, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI-3/W49A*, pp. 191-196.
4. Dorninger, P., Pfeifer, N., 2008. A Comprehensive Automated 3D Approach for Building Extraction, Reconstruction, and Regularization from Airborne Laser Scanning Point Clouds. *Sensors*, 8(11): 7323-7343.
5. Dorninger, P., Székely, B., Zámolyi, A., Roncat, A., 2011. Automated Detection and Interpretation of Geomorphic Features in LiDAR Point Clouds. *Vermessung & Geoinformation*, 2: 60-69.
6. Douillard, B., Underwood, J., Kuntz, N., Vlaskine, V., Quadros, A., Morton, P., Frenkel, A., 2011. On the segmentation of 3D LIDAR point clouds, *Proceedings of ICRA*, pp. 2798-2805.
7. Ferencz, C., 2009. Űrtan. Az űrkutatás és gyakorlati alkalmazásai. ELTE Eötvös Kiadó, Budapest.
8. Filin, S., Pfeifer, N., 2006. Segmentation of airborne laser scanning data using a slope adaptive neighborhood. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 60: 71-80.
9. Fischler, M.A., Bolles, R.C., 1981. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Commun. ACM*, 24(6): 381-395.
10. Heipke, C., Oberst, J., Albertz, J., Attwenger, M., Dorninger, P., Dorrer, E., Ewe, M., Gehrke, S., Gwinner, K., Hirschmüller, H., Kim, J.R., Kirk, R.L., Mayer, H., Muller, J.P., Rengarajan, R., Rentsch, M., Schmidt, R., Scholten, F., Shan, J., Spiegel, M., Wählisch, M. and Neukum, G., 2007. Evaluating planetary digital terrain models—The HRSC DTM test. *Planetary and Space Science*, 55(14): 2173-2191.
11. Kuhleemann, J., 2000. Post-collisional sediment budget of circum-Alpine basins (Central Europe). *Memorie di Scienze Geologiche*, 52(1): 1-91.
12. Lin, S.-Y., Muller, J.-P., Mills, J.P., Miller, P.E., 2010. An assessment of surface matching for the automated co-registration of MOLA, HRSC and HiRISE DTMs. *Earth and Planetary Science Letters*, 294(3–4): 520-533.

13. Mechelli, A., Price, C., Friston, K., Ashburner, J., 2005. Voxel-Based Morphometry of the Human Brain: Methods and Applications. *Current Medical Imaging Reviews*, 1(2): 105-113.
14. Mobahi, H., Rao, S., Yang, A., Sastry, S., Ma, Y., 2011. Segmentation of Natural Images by Texture and Boundary Compression. *International Journal of Computer Vision*, 95(1): 86-98.
15. Neukum, G., Jaumann, R. and The HRSC Co-Investigator and Experiment Team, 2004. The High Resolution Stereo Camera of Mars Express. *ESA SP-1240*: 17-35.
16. Pike, R., 2000. Geomorphometry – diversity in quantitative surface analysis. *Progress in Physical Geography*, 24(1): 1-20.
17. Romstad, B., Etzelmüller, B., 2012. Mean-curvature watersheds: A simple method for segmentation of a digital elevation model into terrain units. *Geomorphology*, 139–140: 293-302.
18. Sík, A., Kereszturi, Á., 2006. A Mars felszínalaktani vizsgálata űrfelvételek alapján. *Geodézia és Kartográfia*, LVIII(9): 12-20.
19. Székely, B., Dorninger, P., Koma, Z., Jansa, J., Kovács, G., Nothegger, C., 2012. Feasibility analysis and residual evaluation of automated planar segmentation results of large-scale Martian surface structures, European Geosciences Union General Assembly 2012. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 14, EGU2012-13584.
20. Tarboton, D., Bras, R., Rodriguez-Iturbe, I., 1991. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elavation Data. *Hydrological Processes*, 5(1): 81-100.
21. Tóvári, D., Pfeifer, N., 2005. Segmentation based robust interpolation- A new Approach to laser data filtering, ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop “Laser scanning 2005”, Enschede, the Netherlands, September 12-14, 2005.
22. Werner, M., 2001. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Mission overview. *Journal of Telecommunication*, 55: 75-79.
23. Wörner, G., Lezaun, J., Beck, A., Heber, V., Lucassen, F., Zinngrebe, E., Rössling, R., Wilke, H.G., 2000. Precambrian and Early Paleozoic evolution of the Andean basement at Belen (northern Chile) and Cerro Uyarani (western Bolivia Altiplano). *Journal of South American Earth Sciences*, 13(8): 717-737.
24. Wörner, G., Uhlig, D., Kohler, I., Seyfried, H., 2002. Evolution of the West Andean Escarpment at 18oS (N. Chile) during the last 25 Ma: uplift, erosion and collapse through time. *Tectonophysics*, 345(1): 183-198.
25. Zámolyi, A., Székely, B., Molnár, G., Roncat, A., Dorninger, P., Pocsai, A., Wyszynski, M., Drexel, P., 2010. Comparison of LiDAR-derived directional topographic features with geologic field evidence: a case study of Doren landslide (Vorarlberg, Austria). *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 12, EGU2010-9875.

26. Zhang, J., Hu, J., 2008. Image Segmentation Based on 2D Otsu Method with Histogram Analysis, Proceedings of the 2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering - Volume 06. IEEE Computer Society, pp. 105-108.