

Nyugat-magyarországi Egyetem
Geoinformatikai Kar

Digitális domborzatmodellek összehasonlító vizsgálata

SZAKDOLGOZAT

Konzulens:

Dr. Mélykúti Gábor
egyetemi docens, dékán

Készítette:

Farkas Gábor
Nappali tagozat
Földmérő és földrendező mérnök szak,
Geoinformatikai szakirány

Székesfehérvár
2010



**Földmérő és földrendező BSc szak,
geoinformatika szakirány
Nappali tagozat
Szakdolgozat száma: 80 / 2010**

FARKAS GÁBOR
szakdolgozati feladata

A szakdolgozat tárgya: Digitális domborzatmodellek összehasonlító vizsgálata

A feladat leírása:

1. Szakirodalom alapján ismertesse a digitális domborzatmodellek kialakításának lehetőségeit, tulajdonságait.
2. Végezzen magassági adatgyűjtést a csór-iszakai mintaterületen
 - a topográfiai mérőgyakorlat anyagainak felhasználásával,
 - légifényképek térkiértékelésével,
 - GPS mérések segítségével.
3. A mérési eredményeket hasonlítsa össze a 2008. évi Laser Scanner felmérés eredményeivel.
4. Vizsgálja meg a mérési alaplapok digitalizálásához felhasznált szkennert geometriai tulajdonságait.
5. Mutassa be és elemezze az összehasonlító vizsgálat eredményeit.
6. Az elvégzett munkát műszaki leírásban összegezze.

Beadandó munkarészek:

- Műszaki leírás a végzett munkáról.
- Az elvégzett mérések és számítások jegyzőkönyvei.

Beadási határidő: 2010. november 29.

Tanszéki konzulens: Dr. Mélykúti Gábor egyetemi docens

Székesfehérvár, 2010. március 31.

Dr. Engler Péter
tanszékvezető



Dr. Mélykúti Gábor
dékán



NYILATKOZAT

Alulírott FARKAS GÁBOR..... (neptun kód: ..) jelen nyilatkozat aláírásával kijelentem, hogy a DIGITALIS DOHBOZATHODELEK ÖSSZEHASONLÍTÓ VIZSGÁLATA..... című

szakdolgozat

(a továbbiakban: dolgozat) **önálló munkám**, a dolgozat készítése során betartottam a szerzői jogról szóló 1999. évi LXXVI. tv. szabályait, valamint az egyetem által előírt, a dolgozat készítésére vonatkozó szabályokat, különösen a hivatkozások és idézések tekintetében¹.

Kijelentem továbbá, hogy a dolgozat készítése során az önálló munka kitétel tekintetében a konzulenszt illetve a feladatot kiadó oktatót **nem tévesztettem meg**.

Jelen nyilatkozat aláírásával tudomásul veszem, hogy amennyiben bizonyítható, hogy a dolgozatot **nem magam készítettem**, vagy a dolgozattal kapcsolatban szerzői jogsértés ténye merül fel, a Nyugat-Magyarországi Egyetem **megtagadja a dolgozat befogadását és ellenem fegyelmi eljárást indíthat**.

A dolgozat befogadásának megtagadása és a fegyelmi eljárás indítása nem érinti a szerzői jogsértés miatti egyéb (polgári jogi, szabálysértési jogi, büntetőjogi) jogkövetkezményeket.

Székesfehérvár, 2010. 11. 28.

Farkas Gábor.....

Hallgató

¹ 1999. évi LXXVI. tv. 34. § (1) A mű részletét - az átvevő mű jellege és célja által indokolt terjedelemben és az eredetihez híven - a forrás, valamint az ott megjelölt szerző megnevezésével bárki idézheti.

36. § (1) Nyilvánosan tartott előadások és más hasonló művek részletei, valamint politikai beszédek tájékoztatás céljára - a cél által indokolt terjedelemben - szabadon felhasználhatók. Ilyen felhasználás esetén a forrást - a szerző nevével együtt - fel kell tüntetni, hacsak ez lehetetlennek nem bizonyul.

Tartalomjegyzék:

1. Bevezetés	3
2. A digitális domborzatmodellek kialakításának lehetőségei, tulajdonságai	4
2.1 Topográfiai adatbázisok típusai	4
2.2 Adatgyűjtési technológiák digitális domborzatmodellek kialakításához	4
2.2.1 Kartometriai eljárások	4
2.2.2 Terepi adatgyűjtési eljárások	5
2.2.3 Távérzékelési módszerek	5
2.3 Interpoláció definíciója, csoportosítási lehetőségei	6
2.3.1 Lokális és globális interpoláció	6
2.3.2 Szabatos és közelítő interpoláció	6
2.3.3 Folyamatos és szakadós interpoláció	6
2.3.4 Determinisztikus, sztochasztikus modellen alapuló interpoláció	6
2.4 Digitális domborzatmodellek adatszerkezetei	7
2.4.1 GRID adatszerkezet	7
2.4.2 TIN adatszerkezet	7
2.4.3 Raszteres adatszerkezet	7
3. A vizsgálat, a feladat végrehajtásának bemutatása	9
3.1 LiDAR felmérés leírása	9
3.2 Adatgyűjtés kartometriai módszerrel	10
3.2.1 A topográfiai felmérés gyakorlat leírása	10
3.2.2 A Leica ScanStation C10 szkennel geometriai vizsgálata	10
3.2.3 A szkennelt alaplapok és pontoleáták EOVS rendszerbe transzformálásának vizsgálata	12
3.2.4 A szkennelt alaplapok és pontoleáták digitalizálásának leírása	13
3.3 Adatgyűjtés fotogrammetriai térkiértékeléssel	14
3.3.1 Térfotogrammetriai kiértékelés általános leírása	14
3.3.2 A 2009-ben készült felvételek légiháromszögelése	16
3.3.3 Automatizált domborzatmodell mérés	18
3.4 Adatgyűjtés terepi módszerrel: GPS mérés	19
3.4.1 Tesztterületek kijelölése a GPS mérés előtt	19
3.4.2 A műholdas helymeghatározás általános leírása	19
3.4.3 A GPS mérés leírása	20
3.4.4 A mérési eredmények irodai feldolgozása	21
3.5 A kijelölt tesztterületek bemutatása	22
3.6 A gyűjtött támpontok megbízhatósági vizsgálata	24
3.6.1 Megbízhatósági vizsgálat hossz-szelvények alapján	24
3.6.2 megbízhatósági vizsgálat véletlenszerűen a tesztterületeken	26
3.7 Interpoláció vizsgálat	30
3.7.1 Inverse Distance Weighted interpolációs eljárás ismertetése	30
3.7.2 Kriging interpolációs eljárás ismertetése	32
3.7.3 Natural Neighbor interpolációs eljárás ismertetése	32
3.7.4 Spline interpolációs eljárás ismertetése	33

3.7.5	Interpolációk végrehajtása és az eltérések kimutatása	34
3.8	Domborzatmodellek levezetése az egyes adatgyűjtések támpontjaiból	36
3.9	Támpontok megbízhatóságának hatása a domborzatmodellekre	38
3.10	Adatgyűjtési technológiák hatékonyságának összehasonlítása	39
3.11	Adatgyűjtési technológiák költségeinek összehasonlítása	41
3.12	Digitális domborzatmodellek alkalmazási területei	42
4.	Összegzés	44
5.	Irodalomjegyzék	47
6.	Mellékletek	48

1. Bevezetés

Főiskolai tanulmányim során több tantárgy keretein belül is tanultam digitális domborzatmodellek előállításáról, megjelenítési lehetőségeiről, amelyek látványossága és sokszínűsége minden esetben felkeltette érdeklődésemet. A topográfiai mérőgyakorlat során szereztem tudomást arról, hogy az általunk felmért területről rendelkezésre áll légi lézerszkenneléssel előállított digitális domborzatmodell. Már akkor megfogalmazódott bennem a kérdés, hogy vajon elérheti-e korunk legmodernebb domborzatmodell előállítási technológiájának pontosságát és hatékonyságát, az akkor végzett mérőasztalos felmérés, vagy a további tanult mérési technológiák. Valamint, hogy ezen pontossági mérőszámokat miként lehet meghatározni és melyek azok a tényezők, amelyek befolyásolják egy domborzatmodell előállításának pontosságát. Ezen kérdések vizsgálatához olyan informatikai szoftverekre van szükség, amelyek képesek nagy mennyiségű térbeli adat együttes kezelésére. Ilyen és ehhez hasonló problémák megoldására készültek a térinformatikai szoftverek, amelyek közül a térinformatika tantárgy tárgyalása során az ESRI cég által készített, ArcGIS programmal ismerkedtünk meg. Ezen tantárgy gyakorlatai során bemutatott problémák és a megoldásukra használt eljárások rávilágítottak arra, hogy a térbeli adatbázis kezelőkkel olyan végeredményekhez juthatunk rövid idő alatt, amelyeket más szoftverekkel hosszú elemzések után, vagy egyáltalán nem állíthatunk elő. Már akkor felmerült bennem, hogy olyan szakdolgozati témát választok, amely kérdéseinek megválaszolására, térinformatikai szoftver alkalmazása szükséges. Ezen okok miatt választottam a digitális domborzatmodellek összehasonlító vizsgálata tárgyú szakdolgozati témát, amelynek elkészítésekor több mérési technológia gyakorlati alkalmazásairól is szükség van, mint például a digitális légifelvételek térkiértékelése, a műholdas helymeghatározás és a topográfiai mérőgyakorlat mérési eredményeinek digitalizálása. Az elemzés során választ keresek arra, hogy miként befolyásolják a domborzatmodellek előállításának pontosságát a mérési eredmények megbízhatósága, a mért pontok sűrűsége és a terepi adottságok. Valamint arra, hogy az egyes technológiák alkalmazása milyen idő és költségigényekkel jár az adott területre vonatkozó modell előállításánál. Ezek alapján melyek azok a szakterületek, amelyek igényeinek a legjobban megfelelnek az elkészült domborzatmodellek a további felhasználáshoz.

2. A digitális domborzatmodellek kialakításának lehetőségei, tulajdonságai

2.1 A magyar felsőoktatási tananyagban a következő fogalmakkal vezették be a topográfiai adatbázisok témakörét:

DDM: Digitális Domborzat Modell, amely a terep fizikai felszínét meghatározott rendszer szerint elhelyezkedő diszkrét pontokban megadott magasságok segítségével írja le.

DTM: Digitális Terep Modell, amely a terepfelszínt ábrázolja, kiegészítve a síkrajz terepre vonatkozó vetületével.

DFM: Digitális Felület (Felszín) Modell, amely a terep és a tereptárgyak felülről látható felszínét határozza meg, tehát figyelembe veszi a felszínborítottság adatokat és a síkrajzi elemekre vonatkozó magasságokat.

DSZM: Digitális Szintvonal Modell, amely a terep fizikai felszínét szintvonalak segítségével írja le.

A digitális domborzatmodell általános definíciója: a terep domborzati viszonyairól gyűjtött magassági adatok számszerű formában rögzített, célszerűen rendezett halmaza, a szükséges számítási eljárásokkal együtt, melyek segítségével a további magassági adatok és információk egyértelműen, a megfelelő megbízhatósággal levezethetők. [Mélykúti, 2007.]

2.2 Adatgyűjtési technológiák digitális domborzatmodellek kialakításához

A definícióban is olvasható, hogy a modellek előállításának első lépése a magassági adatok gyűjtése a terep domborzati viszonyairól. Ezen mintavételezéseket három fő csoportba soroljuk: kartometriai technológiák, terepi adatgyűjtés, távérzékelési módszerek.

2.2.1 Kartometriai eljárások során egy már elkészült térképmű magassági adatainak digitalizálásával nyerjük a modellezéshez szükséges információkat. Ezek általában a topográfiai térképek kótált pontjait, szintvonalait tartalmazó fóliái. A digitalizálás történhet digitalizáló táblával, vagy szkennelés után a képernyőn manuálisan, fél automatikusan, automatikusan. Az eljárás előnye, hogy költségigénye alacsony és megfelelő alapanyag használata esetén automatizálható. Hátránya, hogy megbízhatósága kisebb, mint a terepi és távérzékelési módszereké, mivel a pontosságot befolyásolja a

feldolgozott térkép megbízhatósága, méretaránya, a szintvonalak alapszintköz távolsága, a digitalizáló eszköz pontossága, vagy a szkennerek felbontása.

2.2.2 Terepi adatgyűjtés a geodéziai és topográfiai mérési technológiák alkalmazását jelenti. A mérőasztalos topográfiai felméréskor a domborzatot jellemző idomvonal pontjainak bemérését végezzük, amelyeket a felmérési alaplapra szerkesztünk. Ekkor szabálytalan szórt ponthalmazt kapunk eredményül, amely alapján már a terepen kirajzolhatjuk a szintvonalakat. Nagyobb megbízhatóságot elérhetünk el, ha geodéziai műszereket és azok adatrögzítőit használjuk. Ezek lehetnek mérőállomások, GPS műszerek, amelyek centiméteres pontosságú helymeghatározást tesznek lehetővé. Az így bemért pontokat csak a műszerből történő adatkiolvasás után jeleníthetjük meg, ezért az esetleges hiányzó pontokat csak újabb terepi munkával lehet begyűjteni. A pontok eloszlása lehet véletlenszerű is, vagy egy adott rácsháló pontjaiban elhelyezkedő. A terepi felmérés hátránya, hogy nagy területek esetén költség és időigényes módszer.

2.2.3 Távérzékelési módszerek alkalmazásával, a nélkül juthatunk mérési eredményekhez, hogy a földfelszínnel közvetlen kapcsolatba kerülnénk. A mérést végezhetjük mérőkamerás légifelvételek térbeli kiértékelésével, vagy radar és lézer alapú mérési eljárással. A térfotogrammetriai kiértékeléssel mérjük a legmélyebb és legmagasabb pontokat, majd azok segítségével a szintvonalakon vezetjük végig a mérőjelet. A méréseket végezhetjük egy adott sűrűségű rácsháló sarokpontjaiban is, vagy alkalmazhatunk automatikus domborzatkiértékelést (automatic matching), amely rendkívül gyorsan szolgáltat eredményeket, viszont megbízhatósága elmarad a manuális kiértékelésétől. A pontosságot a mérést végző személy gyakorlati jártasságán túl a felvételek méretaránya, fotográfiai tulajdonságai, valamint az illesztőpontok megbízhatósága befolyásolja. Előnye, hogy nagy területekről nyerhetünk adatokat rövid idő alatt, valamint a felvételeket felhasználhatjuk a terep valóságához megjelenítéséhez. Hátránya, hogy a kiértékelést nehezítik a növényzettel fedett területek, valamint kis területek esetén nem költséghatékony módszer. A lézeres felmérés (LiDAR – Light Detection and Ranging – Fény Érzékelés és Behatárolás) alapelve, hogy a műszer lézersugarat bocsát ki a földfelszín felé és a szenzor méri a visszaverődés idejét, amelyből meghatározza a műszer és a terepi pont közötti távolság. Ezután a kibocsátáskori szögérték, a meghatározott távolság és a szenzor helyének ismeretében koordinátákat számít. Ezzel a módszerrel rövid idő alatt, nagy sűrűségben, közel geodéziai megbízhatósággal mérhetünk pontokat. Előnye a fotogrammetriai módszerekkel szemben,

hogy az első és utolsó visszaérkezett jelet is rögzítve, elkülöníthető a növényzeti fedettség a fizikai földfelszíntől, mivel az impulzusok egy része a lombkoronán is áthalad, így DDM és DFM is levezethető. [Barsi, Detrekői, Lovas, Tóvári, 2003]

2.3 Interpoláció definíciója és csoportosítási lehetőségei

A térbeli interpoláció segítségével keressük azt a függvényt, amely térbeli diszkrét pontokra egy olyan felszínt fektet, ami a legjobban tükrözi a modellezett felszínt és a nem mért pontokban becsli annak értékeit. Az interpolációra tehát azért van szükség, hogy a rendezetlen és ritka eloszlású támpont halmazból, egy megfelelő sűrűségű, rendezett ponthalmazt állítsunk elő. A pontokon alapuló interpolációs módszereket tulajdonságaik alapján a következő kategóriákba sorolhatjuk: lokális vagy globális, szabatos vagy közelítő, folyamatos vagy szakadós, determinisztikus vagy sztochasztikus módszerek. [Márkus, 2004]

2.3.1 A lokális és globális szó azt fejezi ki, hogy egy interpolációs technika hogyan használja a támpontokban összegyűjtött adatokat, amelyek domborzatmodellezés esetében a magassági értékek. A globális interpolációs technikák egy függvényt használnak minden levezetendő pontra, így olyan felszínt határoznak meg, ahol nincsenek hirtelen változások. A lokális interpolációs technikák ugyanazt a függvényt alkalmazzák minden levezetendő pontra, viszont a számításokba csak a környező támpontok adatait vonják be, így figyelembe veszik a területen belül előforduló hirtelen változásokat is.

2.3.2 A szabatos és közelítő jelző arra vonatkozik, hogy az interpolációs technika miként veszi figyelembe a támpontokat. A szabatos eljárások nagy megbízhatóságúnak tekintik a támpontokat, míg a közelítő interpolátorok bizonytalannak.

2.3.3 A folyamatos és szakadós interpolátorok megkülönböztethetők a létrehozott felszín folytonossága szerint. A folyamatos technikák egyenletes felszínt hoznak létre, mivel a támpontok közötti változásokat egyenletesnek tekintik. A szakadós interpolátorok egy lépcsőzetes felszínt hoznak létre. Ezek akkor lehetnek alkalmasak, ha például egy sziklafalat kell ábrázolni.

2.3.4 A determinisztikus modell azt a feltételt veszi alapul, miszerint elég tudomásunk van az adott jelenségről ahhoz, hogy tulajdonságát matematikai függvényekkel leírassuk. Tehát az ilyen modellt alkalmazó technikák mindig ugyanazt a felszínt fogják elkészíteni az adott pontsorból. A sztochasztikus modellek magukban foglalják a

véletlenszerűség fogalmát utalva arra, hogy az interpolált érték csak egy a számtalan lehetőség közül, amelyek levezethetők az ismert támpontokból, ezáltal nem mindig ugyanazt az eredményt adják eredményül. [Márkus, 2004]

2.4 A digitális domborzatmodellek adatszerkezetei

Különböző adatszerkezetek terjedtek el, amelyek közül a három leggyakrabban alkalmazott, a derékszögű négyzőgrács, a szabálytalan háromszöghálózat és a raszteres adatszerkezet.

2.4.1 A derékszögű négyzőgrács elrendezés (GRID - rácsháló), amelyben a magassági adatokat egy rácsháló sarokpontjaiban tároljuk (1. melléklet, 1. ábra). Előnye, hogy tömören tárolható, gyorsan lehet adatokat keresni benne, a további feldolgozás során egyszerű számítások alkalmazhatók. Hátránya, hogy nem alkalmazkodik a domborzat jellemző formáihoz, figyelembe vételéhez sűrű, vagy változó sűrűségű rácshálót kell alkalmazni. Továbbá az, hogy a domborzat látványos megjelenítésre felülnézetben nem alkalmas, ahogy ez az 1. ábrán is látható. Perspektív megjelenítés esetén viszont a pontok magassági kategóriánkénti színezése jelentősen javítja az ábrázolást.

2.4.2 A szabálytalan háromszöghálózat (TIN – Triangulated Irregular Network), amelyben a magassági adatok a háromszögek csúcspontjaiban kerülnek tárolásra (2. melléklet, 1. ábra). Előnye, hogy a domborzat hirtelen változásait nem simítja el, így jól közelíti és követi a domborzat jellemző formáit. Segítségével kialakítható a domborzat strukturált modellje. Hátránya, hogy összetett adattárolást igényel, így nehezebben kereshetők vissza az adatok is.

2.4.3 A raszteres adatszerkezetben egy raszter elemhez, pixelhez tartozik egy magassági adat, így ezeket intenzitási értékként tárolja (3. melléklet, 1. ábra). Előnye, hogy azok a raszteres számítási eljárások alkalmazhatók, amelyek a digitális képfeldolgozásban ismertek. Megjelenítéskor a folytonos adatszerkezetnek köszönhetően folytonos felületként ábrázolhatjuk a domborzatot. Hátránya, hogy a feldolgozás során nehezen vehetők figyelembe a domborzat jellemző formái. [Mélykúti, 2007.]

A GRID adatszerkezetet könnyedén átalakíthatjuk raszteressé, ha a területet azonos sűrűségű rácsháló fedi le. Mivel a raszteres szerkezet azonos méretű pixelekből áll, így az megfeleltethető a rácshálónak, ha a pixelek középpontja egybeesik a rácsháló

sarokpontjaival és a pixelek mérete egyenlő a háló szomszédos pontjainak távolságával.
Ez a művelet végrehajtható raszteresről GRID adatszerkezetté alakításkor is.

3. A vizsgálat, a feladat végrehajtásának bemutatása

3.1 A Laser Scanner felmérést a TopoSys német és a Telecopter magyar cégek végezték 2008-ban, amelynek során Székesfehérvárról és a Csór – Iszkaszentgyörgy területekről készült digitális domborzat- és felületmodell. Ehhez a TopoSys cég Falcon II-es műszerrendszerét használták, amellyel átlagosan 1200 méteres repülési magasságból rögzítették a kibocsátott lézersugarak első és utolsó visszaverődés alapján mért távolságokat. Ez a fajta adatrögzítés tette lehetővé a felszínt borító növények és épületek eltávolítását a modellekből. A műszer észleléskori helyének meghatározásához GPS (Global Positioning System) műszerekkel végeztek méréseket. A centiméteres megbízhatóság eléréséhez az első terület esetében a székesfehérvári permanens állomáson, a második területen pedig az ISZK ponton mért eredményeket használták fel referenciaként a számításokhoz. Az így kapott WGS84 koordinátákat az EOVS helyi koordináta rendszerbe transzformálták. Ezután előállították a domborzat és felület adatmodelleket, amelyek 1 méteres sűrűségű, vízszintes és magassági értelemben is centiméteres élességű rácshálóba rendeztek. A domborzatmodell létrehozásához az utolsó visszaverődéseket használták fel, amelyekből kiszűrték a vegetációról (növényzet) és az épületekről kapott adatokat. Emiatt ezekről a területekről nem állt rendelkezésre információ, így a környező pontok alapján interpolációval biztosították a modell folytonosságát. A LiDAR méréssel egy időben 4 sávós vonalas letapogató kamerával (Line Scan Camera) légifényképek is készültek a területekről, 50 centiméteres terepi felbontásban. Ezekből az első visszaverődésekből előállított felületmodell alapján valódi ortofotókat (True-Ortho images) állítottak elő. Az elkészült végtermékek megbízhatósági vizsgálatát vízszintes és magassági értelemben ismert térbeli elhelyezkedésű épületek alapján végezték (4. melléklet, 1. és 2. ábra). Eredményül magassági értelemben ± 3 centiméteres átlagos négyzetes középhibát kaptak (4. melléklet, 3. ábra), ami eleget tesz az előzetesen megadott ± 15 cm alatti középhiba kritériumnak. Ellenőrzésként a területen található geodéziai módszerrel meghatározott alappontok magasságaival hasonlítottam össze a domborzatmodellt, amelynek eredményül ± 4 centiméteres középhibát kaptam (4. melléklet, 4. ábra). A vizsgálatához a LiDAR1 rácshálós szerkezetű domborzatmodellt, raszteres adatszerkezetűvé alakítottam az ArcMap program Point to Raster eszközével. Ezután megkerestem az egyes alappontokhoz tartozó legközelebbi képpontot és annak intenzitásértékéből kivontam az alappont magasságát. Mivel ezek általában közel sík

területrészre esnek, így a vizsgált és adott pontok közötti átlagosan 32 centiméteres vízszintes értelmű távolságból adódó magasságkülönbség elhanyagolható.

3.2 Adatgyűjtés kartometriai módszerrel: A topográfiai felmérés alaplapjainak és pontoleátáinak digitalizálása.

3.2.1 A topográfiai felmérés gyakorlatot minden év szeptember első hetében a főiskola hallgatói végezték. A feladat célja, 1:5000-es méretarányú topográfiai térkép készítése szintvonalas domborzatábrázolással, 2 méteres alapszintközt alkalmazva. A terepfelszín jellemző pontjainak méréséhez mérőasztal felszerelés, távcsöves vonalzóval és mérőállomás állt rendelkezésre. A vízszintes iránymérést az egyes alappontok felett központosan felállított, majd tájékozott mérőasztal felszereléssel, a vízszintes távolság és magasságkülönbség meghatározását pedig az alappont közelében központosan felállított mérőállomással végezték. A mért értékeket közvetlenül a mérőasztalra felragasztott alaplapra szerkesztették a távcsöves vonalzó segítségével, megírva a részletpontok abszolút magasságát is. Elegendő számú pont esetén a szintvonalak szerkesztése következett, majd azok ellenőrzése további mérésekkel. Mivel a területre jellemző jelentős mennyiségű mikro domborzati forma ábrázolása 2 méteres alapszintközzel nem volt lehetséges, ezért azokról nem állnak rendelkezésre mérési eredmények sem, ami a későbbi digitális domborzatmodell előállításában jelentős hibákat eredményezhet. A felmérés végeztével az alaplapokra szerkesztett mérési eredményeket pontoleátákra másolták, az örkeresztekkel és szelvényhatárokkal együtt. Ezek alapanyaga pauszpapír volt, amelyek méretei nedvesség hatására jelentősen változnak, ezzel hibákat eredményezve a pontok vízszintes koordinátaiban. Az alaplapokra szerkesztett szintvonalakat piros tussal kihúzták, majd a mérési eredményeket leradírozták, így azokat csak a pontoleáták digitalizálásával lehetett felhasználni. Ezért a digitalizáláshoz elvégeztem a rendelkezésre álló 8 alaplap mellett, a hozzájuk tartozó pontoleáták szkennelését is, a Leica ScanStation C10-es lapáthúzó szkennerral. A típus sajátossága, hogy a letapogatáskor a dokumentumot mozgatja gumigörgők segítségével. Gyakori hiba ezeknél a típusoknál, hogy ez a mozgatás nem egyenletes, ami jelentős hibákat is okozhat a digitális képanyagon. Ezért felhasználásuk előtt szükséges a geometriai vizsgálatuk.

3.2.2 A Leica ScanStation C10 szkennerr geometriai vizsgálatát a 2008 és 2009-ben, jó mérettartású papírra nyomtatott ortofotó alaplapok örkeresztjei alapján végeztem.

Ezek szkennelése egymás után, azonos lapadagolási irányban történt. A letapogatás 200 dpi-s (Dot-Per-Inch – Képpont inchenként) felbontása azt jelenti, hogy 0,127 mm-enként áll rendelkezésre információ az eredeti képről, ami az 1:5000-es méretarány esetén 63,5 centiméteres terepi felbontást jelent. Ez a képi felbontás és a méretarány nevezőjének szorzataként számítható. Ebből adódóan a szomszédos őrkeresztek közötti 500 méteres terepi távolság, a digitális képen 787.4 pixelből áll. A vizsgálathoz az őrkeresztek helyzetét a digitális képi koordináta-rendszerben elfoglalt, a geometriai középpontjukra vonatkozó pixel, sor és oszlopszámaival adtam meg. Ezek sorszáma a meghatározás irányában növekedett az 5. melléklet, 1. ábráján látható módon. A melléklet 2. ábrája egy őrkereszt nagyítása, amelyen jól látható, hogy geometriai középpontját egy pixel fedi le, így annak sor, oszlopszáma megfelelően reprezentálja elhelyezkedését. A képi koordináták kigyűjtése után, azokból számítottam a szomszédos őrkeresztek közötti vízszintes és függőleges értelemben vett távolságokat. Ezek ellenőrzéséül vettem az egy soron vagy oszlopon belüli távolságok összegégét, majd összehasonlítottam az első és utolsó őrkereszt pixelkoordinátái alapján számított távolsággal. Eltérés esetén megismételtem az őrkeresztek középpontjaira vonatkozó információgyűjtést, amelyet követően a hibás értékeket kijavítottam, majd az egyes pixeltávolságok alapján számítottam a terepi távolságokat is. Ezek értéke vízszintes értelemben képenként minden sorban 786 vagy 787 pixel (499,11m vagy 499,75m) volt, viszont a függőleges távolságok általában 1-2 pixeles eltérést mutattak. Ezek tendenciája arra utalt, hogy a szkennelapadagolásának sebessége a beolvasások alatt gyorsult (6. melléklet, 1. ábra). Ezt az eredményt adta az összes 2009-ben készült alaplap alapján végzett számítás, viszont a 2008-ban nyomtatott alaplapok esetében ez a tendencia megfordult, miszerint a lapadagolás sebessége lassult (6. melléklet, 2. ábra). Mivel az összes alaplap szkennelése egy időben és azonos iránnyal történt, arra a következtetésre jutottam, hogy nem a szkennel, hanem az alaplapok nyomtatásához használt plotter lapadagolási sebessége változott. Ezt az is alátámasztja, hogy ezeken a képeken számított 787 pixeles vízszintes távolságok is eltérnek, az egy évvel később nyomtatott alaplapok esetében számított 786 pixeltől, tehát a kimutatott eltéréseket nem a szkennel okozta. Azonban ezek az eltérések a digitalizálás során további hibákat eredményeznek. (A teljes számítási jegyzőkönyvet tartalmazó excel táblázat a digitális adathordozó Szkennervizsgálat könyvtárában, Őrkeresztek távolságvizsgálata néven található.)

3.2.3 Annak vizsgálatához, hogy az alaplapokat és a pontoleátákat terhelő hibák miként befolyásolják a digitalizálás pontosságát, a képek EOVRendszerbe transzformálása után az ArcMap programmal meghatároztam és táblázatba gyűjtöttem az örkeresztek koordinátáit. Ezeket összevetve a valós értékekkel, kimutathatók a digitalizált pontokat terhelő átlagos négyzetes középhibák. A szoftver több típusú transzformációt is kínál a helyi rendszerbe illesztéshez, ezért első lépésben azt vizsgáltam, hogy ezek közül melyik a legmegfelelőbb a feladathoz. Ehhez az affin és a másodfokú polinomos transzformációk elvégzése után, az örkeresztek digitalizálását végeztem. A síkbeli affin transzformációhoz 6 paraméter szükséges, amelyek meghatározásához 3 forrás és cél koordinátarendszerbeli helyzetének ismerete szükséges. Azonban ahhoz hogy ellenőrzésünk is legyen egy negyedik pont koordinátáit is bevonjuk a számításokba. Mivel mindössze 4 illesztőpont szükséges, célszerű ezeket a keretvonalak sarokpontjaiban megadni. Ez azért is előnyös, mert a pontoleáták készítésekor ezeket nagyobb pontossággal másolták, mint az örkereszteket, így a sarokpontok alapján végzett transzformációval egységesebb eredményeket kaphatunk. A másodfokú polinomos transzformációhoz a 4 sarokponton túl, 5 további illesztőpont megadása is szükséges, amelyek lehetnek örkeresztek vagy az alappontokat szimbolizáló háromszögek. Mivel ezek megbízhatósága a pontoleáták esetében kisebb, nem hoz jelentősen jobb eredményt ez a típusú korrekció. Az első alaplappal végeztem el a két számítás eredményeinek összehasonlítását (7. melléklet, 1. és 2. ábra), amely alapján úgy döntöttem, hogy a továbbiakban a ± 0.55 méteres vízszintes értelmű középhibával jellemezhető affin transzformációt alkalmazom, ugyanis nem jelent nagymértékű javulást a ± 0.41 méteres középhibával jellemezhető polinomos transzformációval végzett számítás. Ezután a digitalizáláshoz szükséges alaplapokon és pontoleátákon elvégeztem az affin transzformációkat, majd az örkeresztek digitalizálását. A pontoleáták esetében vizsgáltam az alappontokban is az eltérések, annak megállapítására, hogy azok megbízhatósága nagyobb-e, mint a másolt örkereszteké. A kapott eredmények összesítése alapján megfigyelhető, hogy az alappontok vízszintes értelmű $\pm 1,73$ méteres középhibái meghaladják a másolt örkeresztek $\pm 1,33$ méteres középhibáit (7. melléklet, 3. ábra). A vízszintes középhibák mellett feltüntettem, az azokból levezethető várható magassági eltéréseket is, amelyek az alaplapok örkeresztjei alapján ± 5 cm-es, a pontoleáták örkeresztjei alapján ± 16 cm-es és a pontoleáták alappontjai alapján ± 21 cm-es értéket adtak. Ezeket a területre vonatkozó átlagosan $6,8^\circ$ -os lejtőszög tangense és a vízszintes értelmű középhibák szorzataként számítottam, amely csak közelítő érték és arra utal, hogy

a digitalizálás várhatóan milyen mértékű eltéréseket okoz a magasságokban. (A teljes számítási jegyzőkönyvet tartalmazó excel táblázat a digitális adathordozó Szkennervizsgálat könyvtárában, Digitalizált örkeresztek vizsgálata néven található.) A szakirodalomban található, hogy a digitalizálás pontossága levezethető, a felhasznált térkép méretarányának nevezőjéből [Márkus, 2004.]. Tehát a méretarány nevezőjét 0,3 mm-es értékkel megszorozva, megkapjuk a várható digitalizálási pontosságot mm-ben. Ez az érték az 1:5000-es méretarányú topográfiai alaplapon esetében, 1,5 méteres középhibát jelent. Az örkeresztek alapján végzett vizsgálatok azt mutatják, hogy az alaplapon ennél jobb megbízhatóságú digitalizálás hajtható végre. A pontleáták vizsgálati eredményei pedig megközelítik a méretarányból számított középhibát.

3.2.4 A topográfiai felmérés szkennelt pontleátáinak digitalizálását az ArcMap programmal végeztem. Ehhez első lépésként létrehoztam a pontok koordinátáinak tárolására alkalmas osztályt (point feature class – pont jelleg osztály), amelybe a program a képernyőn történő mérés alapján tárolja a vízszintes koordinátákat, az azokhoz tartozó magasságok pedig a billentyűzetről adhatók meg. Fontos beállítás volt az adattípusok megadása, amely a koordináták tárolásának élességére vonatkozott. Ez vízszintes értelemben mm-es, a magasságok esetében deciméteres érték volt. Következő lépésként elvégeztem a létrehozott adattábla feltöltését ügyelve arra, hogy a különböző pontleátákon tárolt pontok közötti ellentmondásokat kiszűrjem, ugyanis előfordult, hogy egy ponthoz különböző magasságok is tartoztak. Eredményül egy 448 pontból álló térbeli koordinátákkal rendelkező halmazt kaptam. (A digitalizált mérési eredmények a digitális adathordozó Mérések\Topográfia könyvtárában, Digitalizált_Topográfia_Mert_pontok nevű, shp kiterjesztésű fájlban található.) Ezután az alaplapon szintvonalainak digitalizálása következett, amelyhez a mért pontokéval azonos adatszerkezetű osztályt hoztam létre. Mivel a szintvonalakban is ellentmondások jelentkeztek a különböző alaplapon, így igyekeztem azokat kiválasztani, amelyek között az eltérések a legkisebb mértékűek voltak és illeszkedtek az előzőekben létrehozott mérési eredmények ponthalmazába. Ezeken végighaladva, közel azonos hosszúságú szakaszonként pontokat digitalizáltam, amelynek 1859 pontból álló halmaz lett az eredménye. (A digitalizált szintvonalpontok a digitális adathordozó Mérések\Topográfia könyvtárában, Digitalizált_szintvonal_pont nevű, shp kiterjesztésű fájlban található.) Mivel a digitalizáláskor gyakoriak a durva hibák, amelyek jelen esetben a magassági értékek elírásában jelentkezhetett, hibaszűrést végeztem. Egy fotogrammetria tantárgy

gyakorlatán tanult módszert alkalmaztam, amelynek során a digitalizált pontok alapján 1 méteres rácssűrűségű, raszteres domborzatmodellt állítottam elő a kriging szabatos interpolációs eljárással. Megfelelően megjelenítve ezt a modellt látható, hogy mely digitalizált pontokat terheli durva hiba. Ehhez a program domborzatárnyékolás funkciója jelentette a megoldást, majd a modell fölé helyeztem a mért pontokat tartalmazó osztályt (8. melléklet, 1. és 2. ábra). Látható, hogy a hibás pontok nem illeszkednek a modellre, hirtelen kiemelkedés vagy lesüllyedésként jelennek meg. A magasságok javításához ismét megnyitottam a korábban felhasznált pontoleátákat, amelyből kiderült, hogy az esetek többségében a számok félreolvasása okozta a hibát. Ugyanis a 3, 8, 9-es, valamint az 1 és 4-es számok könnyen összetéveszthetők egyes nehezebben olvasható pontoleátákon. Ezek akár 6 méteres magassági értelmű hibákat is okozhatnak az előállítandó domborzatmodellekben, ezért a digitalizálást követően fontos az ilyen jellegű durva hibák kiszűrése. A szintvonalpontok esetében ez a hibalehetőség nem állt fenn, viszont előfordult, hogy egyes pontokhoz nem tartozott magasság, ami könnyen észrevehető volt az azokat tartalmazó táblázat áttekintésekor. A digitalizálás eredményeiről pontvázlatot készítettem, amelyeken a digitalizált pontokat piros nullkörökkel, az alappontokat fekete háromszögekkel jelöltem (9. és 10. mellékletek). A vázlatokon feltüntetett tesztterületekről és az azokon belül sűrűbben felvett szintvonalpontokról a későbbiekben lesz szó. A digitalizált pontokról koordináta jegyzékeket is készítettem, amelyek a digitális adathordozó Mérések\Topográfia könyvtárában, Koordinátajegyzék _szintvonalpontok és a Koordináta jegyzék_mért pontok nevű, excel táblákban találhatók.

3.3 Adatgyűjtés fotogrammetriai térkiértékeléssel

3.3.1 A fotogrammetria definíciója: A fénykép rögzítése, mérése és értelmezése. Alkalmazásával tárgyak alakját, méreteit és fizikai tulajdonságait tudjuk megállapítani. A térfotogrammetria azt a lehetőséget használja fel, hogyha ugyanarról a tárgyról két különböző álláspontból készül fényképfelvétel, akkor a két kép által visszaállított térbeli sugárnyalábok metszéseként létrejön a lefényképezett tárgy térmodellje. Ezáltal két síkbeli alakzat eredményeként előáll az eredetihez hasonló térbeli alakzat. A méréseket ezután ezen a térmodellen tudjuk végrehajtani, ezért nevezzük ezt az eljárást térfotogrammetriának. A térbeli kiértékelést a sztereoszkópikus látás teszi lehetővé, miszerint egy térbeli objektum bal oldalából a bal szemünkkel, míg a jobb oldalából a jobb szemünkkel látunk többet. Ezekből a fordított állású, egyenetlen és görbült képekből

az emberi agy állítja elő az egyenes állású, valós nagyságú, térbeli képet. Ahhoz, hogy a tárgyakról készült felvételeket térben szemlélhessük a következő feltételeket kell betartanunk. Adott bázissal, adott átfedéssel képpárokat kell készíteni, ugyanis sztereo hatás csak az átfedő képrészekből állítható elő, ahol bázisnak nevezzük a két kép vetítési centrumai közötti távolságot. A képeket megfelelő sorrendben szétválasztva kell szemlélni, bal szemmel a bal képet és jobb szemmel a jobb képet, úgy, hogy egy szemmel egyszerre csak egy képet láthassunk. A képek szemléléskori egymáshoz és a bázishoz viszonyított helyzete egyezzen meg a felvételtől helyzettel. A szemlélési bázisviszony egyezzen meg a felvételtől, ahol a bázisviszony a bázis és fényképezési távolság aránya. Valóságghű térmodell előállításához a szemlélési sugárnyalábnak egybevágónak kell lennie, a felvételtől a kamerába érkezővel. Ezeket a sztereoszkópikus látás feltételeinek nevezzük, amelyeket betartva lehetőség van térben szemlélhető modellek előállítására. A magasság- és mélységérzetet a két kép összetartozó pontjaiban fennálló parallaxis miatt érzékeljük, amely a pont bal és jobb képkoordinátái közötti különbséggel írható le. Megkülönböztetjük a bázisirányú, illetve az arra merőleges haránt irányú parallaxist. A harántparallaxist ki kell küszöbölni a modell előállításakor, ugyanis az zavarja vagy lehetetlenné teszi a térhatás kialakulását az agyunkban, mivel az nem jelentkezik a természetes látáskor sem. Ahhoz, hogy ilyen térmodellt előállítsunk, el kell végezni a képek belső és relatív tájékozását. A belső tájékozáshoz a mérőkamerára vonatkozó 3 belső adat ismerete szükséges, amelyek a kalibrált kameraállandó, a vetítési középpont és a képsík távolsága (jele: C_k), valamint a képfőpont (a kameratengely és a képsík dőléspontja, jele: H) képi koordinátái ($\xi_0; \eta_0$). Ezek alapján végezzük a képek belső tájékozását, amelynek célja a felvételtől sugárnyalábbal egybevágó sugárnyaláb visszaállítása. Következő lépésben a térmodell előállításához elvégezzük a relatív tájékozást, ami a két kép egymáshoz viszonyított felvételtől helyzetének visszaállítását jelenti. Célja megszüntetni a képek között fennálló harántparallaxist, amelyhez szükségesek a képek relatív tájékozási adatai. Ezek megadhatók képelforgatási szögértékekkel, amelyek $\varphi_1; \kappa_1; \varphi_2; \kappa_2; \omega_2$. Ahol φ_1 - a bal kép y tengely körüli elforgatása, κ_1 - a bal kép z tengely körüli elforgatása, φ_2 - a jobb kép y tengely körüli elforgatása, κ_2 - a jobb kép z tengely körüli elforgatása, ω_2 - az egyik kép x tengely körüli elforgatása. Ha ezek nem ismertek, akkor mért koordináta-parallaxisok alapján meghatározhatók a beállítási elemek. Az így előálló térmodellen mért bázisparallaxisok alapján már magasságkülönbségeket számíthatunk. Azonban ahhoz, hogy a modellen mért pontok tárgyrendszerbeli koordinátáit meghatározhassuk, kapcsolatot kell teremteni

a modell és a tárgy koordinátarendszer között, amelyet az abszolút tájékozási adatokkal adunk meg. Ezek a modell koordinátarendszer origójának tárgyrendszerbeli koordinátái ($X_0; Y_0; Z_0$), az egyes tengelyek körüli forgatási értékek ($K; \Phi; \Omega$) és a méretarány tényező. Ezen adatok meghatározása közvetett módon történik illesztőpontok alapján, amelyek koordinátái ismertek a képi és tárgy koordinátarendszerben is. Az így tájékozott térmodellen mért pontoknak meghatározhatók a tárgyrendszerbeli koordinátái.

3.3.2 A Csór – Iszkaszentgyörgy területéről 2009-ben készítették a FÖMI légifényképeket, amelyeket rendelkezésemre bocsátottak a térfotogrammetriai kiértékeléshez. Ezen felvételeket egy Vexcel UltraCamXP típusú digitális kamerával készítették, amely 196 megapixeles felbontásban készít képeket. Ez azt jelenti, hogy egy kép 17310×11310 képpontból épül fel. 4 sávban képes felvételeket készíteni egy időben, amelyek a látható fény vörös, zöld, kék tartományai, valamint a nem látható infravörös sáv. A képeket sávonként 4 CCD érzékelő által készített képrészletből állítja össze, ezeket a típusokat mozaik kameráknak nevezzük. A belső adatokat a képekhez mellékelte kalibrációs jegyzőkönyv tartalmazza, miszerint a kalibrált kameraállandó $100,500$ mm, a képfőpont x koordinátája pedig $+0,120$ mm-el tér el a képek geometriai középpontjától, a területéről készült képek esetében. A digitális képek belső tájékozásához még szükséges megadni a pixelméretet is, ami $6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$ -es érték. A repülést kelet-nyugat irányban, tehát az EOVS (Egységes Országos Vetület) y - tengelyével közel párhuzamosan, 2009.08.12-én végezték. A felvételek kiértékeléséhez a Leica Photogrammetry Suite (LPS) szoftvert használtam, amely támogatja 4 sávos légifelvételek feldolgozását is. A program használatakor első lépésben létre kellett hozni egy projektet, amelynek során meg kellett adni a felvételeket készítő érzékelő típusát, annak belső adatait, valamint a használni kívánt vetületi rendszert. A projekt létrehozása után volt lehetőség a felvételek beolvasására, amelyek 1077, 1078, 1079, 1080, 1081, 1082, 1083-as sorszámúak voltak. Azért volt szükség 7 kép használatára, mert a külső adatok nem álltak rendelkezésre megfelelő pontossággal, így azokat számítani kellett, amelyhez a szükséges illesztőpontok ezen képek területére estek. A belső tájékozást a program azonnal végrehajtotta a beolvasást követően, mivel az ehhez szükséges belső adatokat már a projekt létrehozásakor megadtam. Ezután a kapcsolópontok megadása következett, amelyeket a szakirodalom Gruber pontoknak nevez, és ezek alapján történik a képek relatív tájékozása. A program képes generálni ilyen pontokat az automatic tie process (automatikus kapcsolópont számítás) modullal, amelyet használtam is a feldolgozáshoz,

így eredményül 68 kapcsolópont képi koordinátáit kaptam. Mivel az abszolút tájékozáshoz szükség volt illesztőpontok terepi és képi koordinátáira, a fotogrammetria tanszék által korábban GPS-el mért 5 pontját, amelyek sorszámai 201, 202, 203, 204, 208 voltak, valamint a topográfiai felméréshez meghatározott 300-as és 301-es alappontokat használtam fel. A 200, 201-es és a 301-es illesztőpontokról készült fénykép kivágatokat a 11. melléklet 1. és 2. ábrája tartalmazza. Jól látható, hogy a GPS-el bemért pontok egyértelműen megirányozhatók vízszintes és magassági értelemben is, ezért teljes értékű illesztőpontokként használtam fel azokat. A topográfiai felmérés alappontjainak azonosítása viszont már nem végezhető el nagy megbízhatósággal, így azok felhasználása ronthatja a tájékozás pontosságát, ezért a 300-as pont csak vízszintes, a 301-es pedig magassági értelmű illesztőpontként került felhasználásra. Terepi koordinátáik a 11. melléklet 3. ábráján látható táblázatban találhatók. Az illesztőpontok képi koordinátáinak meghatározásához az LPS szoftver, Point measuring tool (pont mérő eszköz) modulját használtam, amelynek során minden képen megirányoztam az azokra eső pontokat. Így már rendelkezésre álltak azok képi és tárgyrendszerbeli koordinátái, amelyek alapján meghatározhatók a képek külső tájékozási adatai. A számítást légiháromszögelési módszerrel végeztem, amelyet abban az esetben, ha rendelkezésre állnak a számításához fölös adatok kiegyenlítéssel hajtható végre. Mivel a számításokba képi és terepi koordinátarendszerbeli mérési eredményeket vontam be, ezt a számítási módszert a szakirodalom sugárnyaláb kiegyenlítésnek nevezi. Azt a matematikai modellt alkalmazza, miszerint minden kép mért képpontjára felírhatók a centrális vetítés alapegyenletei. Ezen egyenletrendszer megoldásával számíthatók a mért kapcsolópontok terepi koordinátái, valamint a képek külső tájékozási paraméterei. Mivel a számításhoz a minimálisan szükségesnél több illesztőpontot használtam fel, megbízhatósági mérőszámokat is kaptam eredményül. A képeket, kapcsolópontokat és illesztőpontokat tartalmazó légiháromszögelési vázlat a 12. mellékleten látható, amelyen a 301-es pont körüli fekete vonallal határolt terület jelöli a tesztterületeket. A teljes számítási jegyzőkönyv a digitális adathordozó Mérések\Légifényképezés könyvtárban, Légiháromszögelés számítási jegyzőkönyv.txt néven található, amely alapján az eredményeket a 13. melléklet táblázataiban foglaltam össze. Az LPS szoftver új azonosítókkal látta el az egyes képeket 1-7-ig, ezek a képsorszámok mellett zárójelben találhatók a táblázatokban. Az illesztőpontok maradék ellentmondásait tartalmazó táblázatban jól látható, hogy a meghatározás magassági értelemben a legkisebb megbízhatóságú, ami átlagosan $\pm 44,1$

cm-es érték lett. A számítás elvégzésével megtörtént a képek abszolút tájékozása is, ami lehetővé teszi a modellterületek térbeli kiértékelését.

3.3.3 Az LPS programba is beépítettek automatizált domborzatmodell mérő funkciót, amelynek segítségével igen rövid idő alatt előállítható a végtermék. A kiértékelés hatékonyságának növelése érdekében ezt a módszert választottam, amely a szoftver DTM Extraction menüpontjában érhető el. Ennek során a program mintaillesztési módszert végez, miszerint kivágot készít a bal kép azon területéről, amelyen a domborzatmodell egy rácspontját meg kívánja határozni, majd a jobb képen megkeresi ennek a párját. Az illesztést több pixelterjedelem alapján végezheti, 3x3; 5x5; 9x9 pixel, vagy ezek kombinációjában. Az egymásnak megfelelő pixelek alapján pedig számítja a hozzájuk tartozó magasságot. Azonban a program hibákat követ el az illesztések során, így az eredmények megbízhatósága csökken. A számítások megkezdése előtt meg kellett adni a domborzatmodell szerkezetére vonatkozó információkat, miszerint 10 méteres rácssűrűségű modellt állítson elő ASCII formátumban (számszerűen kódolva, ami a pontszámokat, a térbeli koordinátákat, valamint azok megbízhatóságát tárolja). Ezen kívül lehetőség van az illesztési stratégia módosítására is, ami keresési pixelterjedelmen kívül, a domborzat típusa is volt. Ezeket nem módosítottam, így azok a 21 x 3 pixeles keresési terjedelem és a Rolling Hills (Dombos hegyvidék) domborzat típus alapbeállítások maradtak. A számítás 83 másodperc alatt futott le és 83184 pont térbeli koordinátáit, valamint az azokhoz tartozó illesztési megbízhatóságokat adta eredményül. Ezek alapján a program a pontok 70%-át kiválónak, 25%-át jó megbízhatóságúnak értékelte. Mindössze a fennmaradó 5%-ot sorolta a suspicious (gyanús) kategóriába. A számítás jelentése a digitális adathordozó Mérések\Légifényképezés könyvtárában, dtm_ascii1081_1080.rpt néven található. Az eredményül kapott pontok térbeli koordináták és a hozzájuk tartozó illesztési minőséget pedig a dtm_ascii1081_1080.asc fájl tartalmazza. Ezen pontok a tesztterületek környezetében a 14. melléklet, 1. ábráján láthatók, amelyen jól megfigyelhető, hogy a program nem tudott minden rácspontban méréseket végezni, így azokat üresen hagyta. Továbbá az is megfigyelhető, hogy nem tudta szabályos rácsháló mentén végrehajtani az illesztéseket, így a továbbiakban interpolációs technika alkalmazása is szükséges a pontok szabályos hálószerkezetbe rendezéséhez.

3.4 Adatgyűjtés terepi módszerrel: GPS mérés

3.4.1 A topográfiai felmérés teljes területének GPS műszerrel történő felmérése igen idő- és költségigényes feladat lett volna, ezért a mérés megkezdése előtt célszerűen kiválasztottam azokat a kisebb területrészeket, amelyek alapján a későbbiekben elvégezhettem az előállított domborzatmodellek összehasonlítását a LiDAR modellel. A kijelölést a terület növényzettel borítottsága, lejtési viszonyai és mikro domborzatossága alapján végeztem. Ehhez az ArcMap program Slope (lejtés) eszközével előállítottam a terület lejtőkategória térképét a LiDAR domborzatmodell alapján, amelyen a kis lejtőszöggel jellemezhető területeket zölddel, a nagy lejtésűeket pedig piros színnel jelöltem, így kiemelve a mikro domborzati formákat. Ezután aláhelyeztem egyet a topográfiai felmérés szkennelt alaplapjai közül, hogy láthatóvá váljanak az erdővel borított részek, majd kiválasztottam a felméréndő teszterületeket (15. melléklet, 1. ábra). Látható, hogy az 1. teszterület közel azonos lejtéssel és közepes mennyiségű mikro domborzattal rendelkezik. A 2. területen közel azonos lejtésviszonyok mellett kevés mikro domborzati forma van. A 3. területet pedig változatos lejtésviszonyok és nagy mennyiségű mikro domborzat jellemzi. A határvonalait úgy választottam meg, hogy azok sarokpontjai kerek 10 méteres EOVS koordinátájú pontokban legyenek. Így kettő darab 100 x 100 méteres és egy 100 x 300 méteres oldalhosszúságú területet jelöltem ki, amelyeknek bal alsó és jobb felső sarokpontjainak koordinátáit a 15. melléklet, 2. ábráján látható táblázatban tüntettem fel.

3.4.2 A műholdas helymeghatározás általános leírása

A műholdas helymeghatározás a műhold-vevő közötti távolságok mérésén alapul. Eszerint a Föld körül keringő mesterséges holdak rádiójeleket sugároznak a vevők felé két különböző frekvencián, amelyek az L1 és az L2 jelűek. Ezeket a vivőhullámokat különböző kódokkal modulálják annak érdekében, hogy információkat továbbíthassanak a vevők felé, amelyek tartalmazzák a műholdak működésére vonatkozó adatokat, azok rendelkezésre állását, durva pályadatait, valamint az órajelet. Ezen kódok alapján elvégezhető a műhold-vevő közötti távolság meghatározása. Ehhez a vevő is előállítja a műholdak által kibocsátott kóddal modulált jelet, amelyet összehasonlít a beérkezővel és számítja a köztük fennálló időeltolódást, ami a beérkező hullámok terjedési idejét jelenti. A jelek terjedési sebessége és ideje alapján már számítható a megtett út, ami a műhold-vevő közötti távolságot jelenti. 4 távolság, valamint a műholdak helyzetének ismeretében már számíthatók a vevő koordinátái, azonban ezeket az értékeket több méteres

nagyságrendű hibák terhelik. Pontosabb eredményeket érhetünk el, ha a kódérés mellett, fázismérést is végzünk a távolságok meghatározásához. Ehhez a vevő előállítja a modulálatlan vivőhullámokat, majd azokat összehasonlítva számítja azok fáziskülönbségét. Ezen érték alapján, valamint a hullámok egész ciklusszáma és a hullámhossz ismeretében számíthatók a távolságok. A kód- és fázismérés alapján meghatározott távolságokat pszeudo távolságoknak (áltávolság) szokás nevezni, ugyanis azokat jelentős hibák terhelnek. Ahhoz, hogy centiméteres pontosságú helymeghatározást végezhessünk két vevő szimultán (egy időben) végzett mérési eredményeire van szükség. Ezek különbségképzésekor a mérést terhelő hibák kiküszöbölhetők, vagy jelentősen csökkenthetők, mivel a mérési eredményeket feltehetően ugyanazok a hibák terhelik. Ezt a módszert relatív helymeghatározásnak nevezzük.

3.4.3 A GPS mérés leírása

A mérést egy Leica 530R típusú kétfrekvenciás vevővel végeztem. Azért esett a választásom erre a műszerre, mert felszerelése olyan tartozékokkal is rendelkezik, amelyekkel az antennát egy hátizsákhoz lehet rögzíteni, így lehetőség van folyamatos, menet közbeni mérésre. Az ily módon összeállított rendszerrel utófeldolgozós, kinematikus mérést végeztem. Ez azt jelenti, hogy a centiméteres pontosságú koordinátákat és az azokra jellemző megbízhatósági mérőszámokat csak az irodai feldolgozás során számíthattam. A kinematikus jelző arra utal, hogy a vevő mozgás közben végezi a méréseket. A relatív helymeghatározási módszer értelmében két vevőre van szükség, azonosan beállított paraméterek mellett, azonban számomra csak egy állt rendelkezésre. Ilyen esetekben nyújthat megoldást a VRS (Virtual Reference Station – Virtuális Referencia Állomás) koncepció, ami azt jelenti, hogy az ország területén működő permanens (állandó) állomáshálózat mérési eredményei alapján, virtuális mérési eredményeket generálnak egy a munkaterület közelében elhelyezkedő pontban. Ezeket úgy használhatjuk fel, mintha egy általunk üzemeltetett referenciavevő működött volna a mérés alatt. A mérési eredmények a GNSS Szolgáltató Központ (GNSSnet.hu) honlapjáról rendelhetők meg 1, 5, vagy 15 másodperces rögzítési gyakoriságban. A relatív helymeghatározás feltétele az volt, hogy az általam használt műszert is ezen értékek egyikére állítsam be. Mivel mozgás közben végeztem a helymeghatározást, az 5 másodperces intervallumot választottam, biztosítva a néhány centiméteres pontosságot. További beállításként megadtam, hogy a műszer az észlelés megkezdése után 10 másodpercenként rögzítsen pontokat, így biztosítva azt, hogy a domborzatmodell

előállításához megfelelő sűrűségben álljanak rendelkezésre támpontok. A méréseket az előre kijelölt teszterületeken folyamatosan gyalogolva végeztem, amelynek eredménye egy véletlenszerű eloszlású ponthalmaz lett. A területen található két alapponton statikus mérést is végeztem, annak érdekében, hogy az utófeldolgozás során ellenőrizni és pontosítani tudjam az előzőleg megadott antennamagasságot.

3.4.4 Az irodai feldolgozást az LGO (Leica Geo Office) programmal végeztem a terepen használt mozgó vevő és a virtuális referenciaállomás mérési eredményei alapján. Első lépésben létrehoztam egy projektet Kinematikus mérés Iszka néven, amelyen a következő beállításokat alkalmaztam. Időzóna (Time Zone) 2 óra, mivel az UTC (Coordinated Universal Time – Egyezményes Koordinált Világidő) időhöz képest ennyi az eltérés Magyarországon, a nyári időszámításkor. Koordináta rendszer a WGS84 lett (World Geodetic System 1984), mert a GPS mérések ebben a rendszerben értelmezendők. A műszer típusnak (Instrument class) pedig a GPS500-at választottam. A projekt megnyitása után beolvastam a nyers mérési eredményeket, valamint a VRS koncepció alapján generáltakat. Ezek a digitális adathordozó Mérések\GPS\VRS és Nyers_meres könyvtáraiban találhatók. A VRS eredményeket a szolgáltató úgynevezett RINEX (Receiver INdependent Exchange – Vevő független adatcsere) fájlban küldte el, amely egy egyezményes, minden vevő számára felhasználható formátum. A beolvasást követően a GPS-Proc (GPS Process – GPS számítás) menüben megadtam, hogy mely eredmények legyenek referenciaként, valamint mozgó vevő mérési eredményeiként figyelembe véve a számítás során. Erről képernyőképet is készítettem (16. melléklet, 1. ábra), amelyen láthatók az észlelési időintervallumok és a felhasznált GNSS (Global Navigation Satellite System – Globális Navigációs Műhold Rendszer) típusa is, ami az Amerikai Egyesült Államok által fenntartott NAVSTAR GPS volt. A Process (számítás) menüpontra kattintva a program elvégezte a vektorok kiértékelését, majd azokat megjelenítette (16. melléklet, 2. ábra). Azokat a mért pontokat, amelyekhez nem állt rendelkezésre VRS mérési eredmény a program négyzettel jelölte. Ezen pontok koordinátáit abszolút meghatározás eredményéül kaptam, így kis megbízhatóságuk miatt a későbbiekben nem használtam fel. Körrel jelölte a program azokat a pontokat, amelyekre különbségeket tudott képezni a háromszöggel jelölt virtuális referenciaállomás alapján. Az így kialakuló vektorokat piros nyíllal jelölte. Ezek között is voltak olyanok, amelyek számításához csak kód mérési eredmények álltak rendelkezésre, így a meghatározás pontosságának romlása miatt ezeket is kihagytam a későbbi feldolgozásból. A maradék, fázismérésből számított

területrészek, mint a LiDAR10-es (10 méteres rácssűrűségű domborzatmodell) esetében. Ennek oka az, ahogyan már korábban is említettem, hogy a LiDAR10-es modellen nem lehetséges a mikro domborzat ábrázolása, amelyeket általában nagy lejtőszög jellemez. Az egyes területek lejtési viszonyainak számszerűen történő leírására a területrészek lejtőszögeinek átlagát, valamint szórását számítottam (23. melléklet, 1. ábra). Látható, hogy a kevesebb mikro domborzati formával rendelkező területeken a szórás kisebb és az értéke csökken a rácssűrűség növelésével, azonban nem olyan mértékben, hogy hatásuk teljesen megszűnjön. Tehát a 10 méteres sűrűségű domborzatmodellek is alkalmasak a mikro domborzati hatások kimutatására.

3.6 A gyűjtött támpontok megbízhatósági vizsgálata

A domborzatmodellek kialakításának pontosságát, többek között a gyűjtött támpontok megbízhatósága is befolyásolja. Ezért a vizsgálat első lépéseként célszerű meghatározni az egyes technológiákkal gyűjtött pontok megbízhatósági mérőszámait. Ehhez azonban egységes adatosztályokba kell szervezni a gyűjtött pontokat, ugyanis az ArcMap program nem tudja kezelni a szöveges fájlokba kiírt koordináta jegyzékeket, azokat át kell alakítani. Erre jelent megoldást a szoftver ASCII3D To Feature Class parancsa, amelynek használatakor meg kell adni a beolvasandó fájl nevét, annak formátumát, az előállítandó osztály nevét és a bemenő adatokra vonatkozó vetületi rendszert. Ezen művelettel az összes gyűjtött adatot egységessé tettem, külön osztályokba rendezve.

3.6.1 A támpontok megbízhatósági vizsgálata hossz-szelvények alapján

A vizsgálathoz a terület egy olyan hossz-szelvényét választottam, amelynek lejtési viszonyai közel azonosak és minden adatgyűjtési technológiából vonatkoznak rá mérési eredmények. Ezen szempontok alapján esett a választásom a 23. melléklet, 2. ábráján látható, fekete vonallal határolt földes út egy darabjára. A kép alapját a 2009-es légifényképezésből készített ortofotó adja, amely alá elhelyeztem a LiDAR1 lejtőkategória térképét is, így vörös árnyalatú területrészek a meredek lejtésűek, a zöldek pedig a kis lejtőszöggel jellemezhetőek. Látható, hogy a hossz-szelvény területe a legtöbb helyen sárga árnyalatú, ami azt jelenti, hogy lejtőszöge átlagosan 5° körüli érték. A metszet ábrázolása a 23. melléklet, 3. ábráján látható, amelyet az ArcMap szoftver automatikusan generált. Első lépésként a nagy mennyiségű pontból álló mérési eredmények közül kellett kiválogatni azokat, amelyek alapján a vizsgálat elvégezhető. Ehhez egy határvonalat készítettem, amely jól lehatárolja az útszakaszt. Ezután az

ArcMap program Clip (kivágás) átlapolási műveletével olyan osztályokat hoztam létre, amelyek már csak a hossz-szelvény határvonalain belüli pontokat tartalmazzák. A támpontok megbízhatósági vizsgálatának lényege az, hogy független mérésből pontosan ismert magasságú pontokat vetünk össze a gyűjtött támpontokkal. Azok különbségeit maradék hibaként értelmezve, számíthatjuk az eltérések átlagát és átlagos négyzetes középhibáit. Minél több pontot vonunk be az ellenőrzésbe, annál jobban a valós helyzetet fogja tükrözni a kapott eredmény. A számításokhoz a LiDAR1 modell pontjait vettem alapul, a nagy pontosságú független mérési eredményekként. Ahhoz, hogy az összehasonlítás elvégezhető legyen, szükség van a gyűjtött támpontokhoz legközelebb elhelyezkedő, LiDAR1 modellbeli pontokra. Az összepárosítás végrehajtásához az ArcMap szoftver Buffer (övezet generálás) átlapolási művelete nyújtott megoldást. Alkalmazása során minden támpont köré egy 30 cm átmérőjű kört generáltam, majd az ezekben elhelyezkedő LiDAR1 pontokat a Clip paranccsal kivágtam. Ezzel olyan pontpárokat kaptam eredményül, amelyek legfeljebb 30 centiméteres távolságban helyezkednek el egymástól, így ez az eltérés maximum $\pm 2,5$ cm-es magassági hibát okozhat, ami a vizsgálat során bebizonyosodott, hogy elhanyagolható érték. Az így kapott pontok vízszintes értelmű koordinátái alapján számítottam a hossz-szelvény egymást követő pontjai közötti távolságokat, amelyek alapján a kezdőponttól vett távolságukat kaptam. Ezek és a Balti magasság értékek alapján már megszerkeszthetőek voltak a hossz-szelvények (24. és 25. mellékletek). Ezeket a magasságkülönbségek kihangsúlyozása érdekében, a vízszintes tengelyhez képest négyszeres magassági torzítással szerkesztettem, ahol vörös színnel írtam meg a LiDAR1 magasságokat és kékkel az azoktól vett eltéréseket az egyes adatgyűjtési technológiák esetében. A hossz-szelvények rajzain kívül, táblázatokban számszerűen is megadtam az eltérésekből számított átlagokat, legkisebb és legnagyobb előjeles eltéréseket, valamint az átlagos négyzetes középhibákat (24. és 25. mellékletek, 3-as számú ábrái). A topográfiai felmérés digitalizált mért pontjaiban végzett vizsgálat azt mutatja, hogy az eltérések átlaga -10 cm, ami ekkora mértékű szabályos hibára utal. Ez adódhat abból, hogy a magasságkülönbségek meghatározásához nem a megfelelő műszer- vagy jelmagasságot vették figyelembe, ezzel szabályos hibát vétve ezen a területen. Szintén szabályos hibát mutat a digitalizált szintvonalpontok eltérései alapján számított átlagérték is, ami -18 cm. Mivel a szintvonalak kirajzolása a mért pontok alapján történt, így azok szabályos hibái a szerkesztést is terhelték. Az eltérések alapján számítottam az átlagos négyzetes középhibákat is, amelyek alapján a mért pontokat ± 20 cm-es, a szintvonalpontokat pedig

± 25 cm-es megbízhatóság jellemzi. A légifényképek térfotogrammetriai kiértékeléséből nyert pontok eltérései alapján is szabályos hiba mutatható ki, mivel az eltérések átlaga -26 cm-es érték lett. Ennek oka a térmodellt terhelő szabályos hibákban keresendő, amelyet a külső tájékozási elemek pontossága befolyásol. Tehát a hibát a légiháromszögeléshez felhasznált illesztőpontok ellentmondásainál kell keresni. A légiháromszögelési jegyzőkönyvben a területhez legközelebb eső magassági illesztőpont a 300-as volt, amelynek maradék ellentmondása $23,5$ cm lett, ami megközelíti a vizsgálat eredményeül kapott 26 cm-es értéket. A légiháromszögelési jegyzőkönyvben továbbá szerepel az illesztőpontok magasságaira vonatkozó átlagos négyzetes középhiba is, ami ± 44 cm, ami megegyezik a LiDAR1-től számított eltérések középhibájával. A GPS mérés eredményeit szintén terheli szabályos hiba, ami annak tudható be, hogy a számításokhoz megadott antennamagasságot egy helyben állva mértem és ugyanígy statikus méréssel ellenőriztem. Viszont gyaloglás közben az antenna magassága csökkent. Ez szabályos hibát eredményezett, ami a vizsgálat szerint megközelítőleg -13 cm. Az így kialakult eltérések alapján a GPS mérés megbízhatósága ± 15 cm-es érték lett. Ezek az értékek azonban a vizsgálatba bevont pontok darabszáma miatt nem tükrözik elég jól a teljes pontthalmazt. Viszont nagyszámú pontból álló minta elemzése sem célszerű, mert ahhoz növelni kellene a pontpárok közötti távolságot, ami az összehasonlítás pontosságát rontaná. A legmegfelelőbb megoldás az volt, hogy a teszterületeken és azok közvetlen környezetében lévő pontokban végeztem el az eltérések kimutatását. Azonban a hosszszelvények alapján kapott eredményekből is levezethetők következtetések, valamint akkor is alkalmazható ez a módszer, ha nem áll rendelkezésre a LiDAR1-hez hasonló pontosságú domborzatmodell. Ugyanis statikus GPS mérésekkel, vagy egyéb nagy pontosságú független mérésekkel is összevethetők, a különböző adatgyűjtések eredményeként kapott támpontok.

3.6.2 A támpontok megbízhatósági vizsgálata véletlenszerűen a teszterületeken

Ezt a vizsgálatot hasonlóan az előzőhöz, a LiDAR1 modell és az adatgyűjtés eredményeül kapott pontok párosításával végeztem. Az egyes teszterületeken és azok 10 méteres környezetében kerestem azon pontpárokat, amelyek között a távolság nem haladta meg a 30 cm-t. Ezen vízszintes távolságok az első teszterületen legfeljebb $\pm 3,2$ cm-es, a másodikon $\pm 1,3$ cm-es, a harmadikon pedig $\pm 3,7$ cm-es eltéréseket okozhatnak a magasságokban. Az 1. számú teszterületre vonatkozó vizsgálati eredmények a 26. és 27. mellékleten láthatók, amelyek pontvázlatain fekete körrel jelöltem a LiDAR1 pontjait és

vörössel a vizsgált támpontokat. A topográfiai felmérés eltéréseinek -46 cm-es átlagértékéből arra következtettem, hogy ezen a területen is szabályos hiba terheli a mérési eredményeket. Ezt az eltérések eloszlás diagramja is alátámasztja. Azonban a hossz-szelvényvizsgálatkor kimutatottnál ez a hiba jóval nagyobb. Tehát a magasságkülönbségek meghatározásán túl más tényező is okozza, ami nagy valószínűséggel a területen található 3-as számú alappont magasságát terhelő hiba lehet. Ugyanis a LiDAR1-el összehasonlítva, a 3-as alappont 19 cm-el a domborzatmodell alatt helyezkedik el. Mivel a támpontok abszolút magasságainak meghatározásához ezen alappont magasságát használták fel, így annak hibája a támpontokat is terheli. Ettől eltekintve még mindig marad -27 cm-es szabályos hiba, ami a korábban már említett műszer-, jelmagasság pontatlan figyelembe vételéből adódhat. Átlagos négyzetes középhibának a ± 66 cm-es értéket kaptam. Ez is lényegesen nagyobb a hossz-szelvény vizsgálat eredményénél, ami annak tudható be, hogy ezen a területen lényegesen több mikro domborzati forma található, a szintvonalak ábrázolásakor azonban ezeket nem vették figyelembe. Olyan digitalizált szintvonalpont is található, amelyik egy lövészárk falán helyezkedik el, így -1,41 méteres magassági hibát okozva. A térfotogrammetriai kiértékelés eredményeit a -60 cm-es átlagos eltérés alapján szintén szabályos hiba terheli. Ez az érték is lényegesen nagyobb a hossz-szelvény vizsgálatkor megállapítotttnál. Ebből az a következtetés vonható le, hogy az előállított térmodell megközelítőleg 60 cm-el alacsonyabban helyezkedik el a LiDAR1 modellhez képest. A legkisebb és legnagyobb előjeles eltérések abszolút értékei alapján vett középérték a hossz-szelvény és a véletlenszerű vizsgálat esetében is -67 cm lett. Ezért annak eldöntésére, hogy melyik szabályos hiba érték a valószínűbb további vizsgálati eredményekre volt szükség. Az átlagos négyzetes középhiba ± 72 cm-es értékéből azt a következtetést vontam le, hogy az automatikus kiértékeléskor az LPS program nagyobb megbízhatósággal tudta egymásra illeszteni a hossz-szelvény vonalas létesítménye mentén készített képkivágatokat, mint az első teszterületre jellemző hasonló pixelértékekkel leképződő felületekről készült kivágatokat. A GPS mérési eredmények összevetése ezen a területen a LiDAR1-el hasonló eredményeket hozott, mint a hossz-szelvény vizsgálatkor. Átlagosan -7 cm szabályos, valamint ± 11 cm-es átlagos négyzetes középhiba mutatható ki. A legkisebb és legnagyobb eltérés közötti terjedelem 34 cm, ami megközelíti a hossz-szelvény esetében kapott 30 cm-es értéket. Tehát a vizsgálat alapján továbbra is kimutatható, hogy a statikus mérés alapján megadott antennamagasság szabályos hibát okoz a mozgás közben mért pontokban. A második számú teszterület, ahogyan az a 10. melléklet szintvonalas rajzán

is látható egy nyereg domborzati forma. Emiatt erre a területre kevés topográfiai felmérési eredmény vonatkozik, így a LiDAR1-el összehasonlítás csak 9 támpont alapján történt (27. melléklet, 2. ábra). Eredményül -10 cm-es átlagos hiba mutatható ki, ami valószínűleg a vizsgált pontok kis darabszáma miatt fordulhatott elő, ugyanis a legkisebb és a legnagyobb eltérés értékei abszolút értékben közel azonosak. Így arra a következtetésre jutottam, hogy a támpontokat nem terheli szabályos hiba. Az átlagos négyzetes középhibára a ± 36 cm-es értéket kaptam, ami javulást jelent az első teszterületéhez képest. Hasonlóan javuló tendenciát mutatott a térfotogrammetriai kiértékelés támpontjainak vizsgálata is, ám ezekben továbbra is kimutatható a szabályos hiba, de csak -50 cm-es nagyságban (28. melléklet, 1. ábra). A középhiba ± 57 cm-es értékre javult. A GPS mérési eredmények ezen területen továbbra is ± 11 cm-es középhibával és -10 cm-es szabályos hibával jellemezhetők. Javulás a legkisebb és legnagyobb előjeles eltérések közötti terjedelemben volt megfigyelhető, mivel ez az érték 20 cm-re csökkent (28. melléklet, 2. ábra). Az első területhez viszonyított javulások alapján arra következtetésre jutottam, hogy a mikro domborzat igen jelentősen befolyásolja a mérési eredmények átlagos négyzetes középhibáit. Ezt a harmadik teszterület támpontjainak vizsgálata is alátámasztotta. Eszerint a topográfiai felmérés eredményeit ± 1.22 méteres átlagos négyzetes középhiba jellemzi (29. melléklet, 1. ábra). Az eltérések eloszlásának diagramján megfigyelhető, hogy a vizsgált 89 pontból, 32-nél ± 1 méteresnél is nagyobb eltérések mutatkoznak. Ezeket a szintvonalak szerkesztésekor elkövetett hibák és a mikro domborzat figyelmen kívül hagyása együttesen okozza. A 29. melléklet, 2. ábráján elhelyezett összesítő táblázatban jól megfigyelhető, hogy a középhibák nagysága összefügg a területek domborzati viszonyaival. Ugyanez látható a légifényképezés kiértékelést eredményei esetében is, bár a jelenség közel sem akkora mértékű, mint a topográfiai felmérés esetében (30. melléklet). A szabályos hiba továbbra is -60 cm-es értéknek adódik, amelyet a térmodell tájékoztatásának hibája okoz. A harmadik teszterületen a középhiba értéke ± 95 cm, tehát az automatizált illesztési eljárás pontosságát is befolyásolja a mikro domborzat mennyisége. A GPS mérés eltéréseiben mutatkozott a mikro domborzat hatása a legkevésbé, így a középhiba értéke ezen a területen ± 18 cm (31. melléklet). Azonban a legkisebb és legnagyobb eltérések terjedelmében nagy változás figyelhető meg. Az előzőekben ennek értéke 20 és 34 cm volt, a harmadik területen már eléri az 1 métert. Az eltérések hisztogramján azonban látható, hogy ilyen értékek csak kis számban fordulnak elő. Az átlagos eltérés -9 cm, ezért elmondható, hogy az összes mozgás közbeni mérést terheli ez a szabályos hiba és

mértékének változása nincs összefüggésben a területek lejtőszögeivel, ezért az összes pontban egységes. Összességében elmondható, hogy mindegyik adatgyűjtési technológiával előállított támpontokban kimutathatók szabályos hibák és véletlen jellegű hibák. Előbbieket elsősorban a mérési módszerek okozzák, míg utóbbiakat a terület domborzati jellege. A topográfiai felmérésből levezetett támpontokban meghatározott szabályos hibák csak területrészenként mutattak egységességeket. Ez annak tudható be, hogy csak egyes alappontok magasságát terheli hiba, valamint a támpontok mérését több csoport végezte különböző hibákat vétve a magasságkülönbség meghatározásakor. Továbbá nem elhanyagolható az a szempont sem, hogy a digitalizáláshoz felhasznált alaplapok és pontoleáták EOVRendszerbe transzformáláskor nem egyenlő mértékű hibák keletkeztek azok egész területére. Tehát az egyes teszterületeken kimutatható szabályos hibák az egész ponthalmazra nézve véletlen jellegű hibákat jelentenek, így azokat egységesen nem lehet figyelembe venni. További véletlen jellegű hibákat jelentenek a kimutatott átlagos négyzetes középhibák, amelyek a területek mikro domborzati formáinak mennyiségétől függően változnak. A térfotogrammetriai kiértékelésből származó támpontokban kimutatott szabályos hiba azonban az egész területre egységesen jelentkezik. Tehát a figyelembe vétele lehetséges a hiba kimutatása után, azonban mértékének pontos meghatározásához nagy mennyiségű pont vizsgálatára volt szükség. Célszerűbb lehet a térmodell előállításakor több illesztőpont bevonása a számításba, vagy a célterületen ellenőrző pontok mérése, amelyek alapján a hiba megszüntethető, vagy figyelembe vehető. Ezt elvégezve az első teszterület esetében az átlagos négyzetes középhiba ± 39 cm-re, a második esetében ± 30 cm-re, a harmadiknál pedig ± 73 cm-re módosul. Eszerint az automatizált mintaillesztési eljárásról kiderült, hogy a meghatározás pontosságát befolyásolják a mikro domborzati formák és az ily módon mért támpontok megbízhatósága jobb a topográfiai felmérés digitalizált pontjainál. A három technológia közül a GPS mérés adta a legmegbízhatóbb támpontokat, azonban a statikus és mozgás közbeni mérések antennamagasságai közötti eltérés szabályos hibát okozott, ami az egész területre átlagosan -9 cm-es érték volt. A hiba figyelembe vétele után az átlagos négyzetes középhiba az első teszterületen ± 0.08 cm-es, a másodikon ± 0.05 cm-es, a harmadikon ± 0.16 cm-es értékre módosult. Ezen mérőszámok változásán szintén látható, hogy miként befolyásolják a mikro domborzati formák és a változó lejtésviszonyok a támpontok megbízhatóságát. Ezen tendenciák bemutatásához diagramot is készítettem, amelyben szereplő középhiba értékek a jobb szemléltetés érdekében, a szabályos hibák kiküszöbölése után számítottak voltak, a mikro domborzatra vonatkozók pedig a

LiDAR1-ből számított lejtőszögek teszterületekre vonatkozó szórásai (32. melléklet, 1. ábra). Ezen látható, hogy a legnagyobb mértékben a topográfiai felmérés támpontjainak a megbízhatóságát befolyásolják a lejtési és domborzati viszonyok, ezt követi az automatikus mintaillesztéses térfotogrammetriai kiértékelés és végül a GPS mérés. Ugyanez a tendencia jelenik meg a legkisebb és legnagyobb eltérések terjedelmének és a lejtőszögek szórásainak függvényeként is (32. melléklet, 2. ábra). Itt megjegyzem, hogy az egyes domborzatmodellek levezetéséhez a szabályos hibákkal terhelt támpontokat használtam fel, annak vizsgálatához, hogy ezek miként befolyásolják a modellek megbízhatóságát.

3.7 Interpoláció vizsgálat

Annak vizsgálatához, hogy miként befolyásolják az egyes interpolációs technikák használata, a területek lejtési viszonyai, a támpontok sűrűsége és eloszlása a levezetett domborzatmodellek megbízhatóságát, összehasonlítottam az ArcMap szoftverbe beépített interpolációs eljárásokat, valamint az alkalmazásukkal létrehozott modelleket a LiDAR10-el. Ahhoz, hogy a vizsgálatból kizárjam az előző fejezetben bemutatott, támpontokat terhelő hibákat ismét pontpárokat kerestem azokhoz a LiDAR1-ben. Ehhez ismét az ArcMap övezet generálását használtam, de nagyobb átmérővel rendelkező körökkel, ami 71 cm volt. Ezzel biztosítottam azt, hogy minden támponthez legalább egy LiDAR1 rácspont tartozzon. Ezután a Clip paranccsal ezeket egy új osztályba helyeztem és töröltem azokat, amelyek többletet jelentettek a támpontokhoz képest, mivel az övezetek 71 cm-es átmérőibe gyakran több rácspont is beletartozott. Ezekkel a műveletekkel létrehoztam az alapul vett egyes adatgyűjtésekből származó támpontokkal azonos sűrűségű és eloszlású, hibátlanak tekinthető magasságokkal rendelkező ponthalmazait (Digitális adathordozó Interpoláció vizsgálat könyvtárban, adatgyűjtési technológiákra osztva – pl.: Interpoláció vizsgálat\Topográfia digitalizált pontjaiban\LIDAR1_Topográfia.shp). Az ArcMap szoftverbe négy domborzatmodellek levezetéséhez gyakran használt interpolációs technikát építettek be. Ezek az Inverse Distance Weighted (Inverz távolsággal súlyozott), a Kriging (Regionalizált változók elmélete), a Natural Neighbor (Természetes Szomszéd) és az Spline (Görbe vonal) interpolációk.

3.7.1 Inverse Distance Weighted interpolációs eljárás ismertetése

Ezen eljárás abból a feltételezésből indul ki, hogy az egymáshoz közelebb elhelyezkedő pontok magasságértéke nagyobb valószínűséggel egyezik meg, mint az egymástól távolabb lévőké. Eszerint a meghatározandó rácspont és a támpontok közötti távolságokat számítja, majd azokat összegzi. Ezen összeg és az egyes távolságok hányadosaként előáll az azokhoz tartozó súlyérték. A rácspont magasságának számításához, a támpontok értékeit ezen súlyok alapján veszi figyelembe. Ha valamely támpont távolsága nullának adódik, akkor a meghatározandó pont magassága a támponté lesz. Az algoritmus eszerint globális interpolátor, mivel minden támpont magasságát figyelembe veszi. Lokálissá tételéhez korlátozható a számításba bevont pontok száma, vagy távolságküszöb adható meg, amelynél távolabb eső pontokat az algoritmus nem vesz figyelembe. Ezen túl egy szabatos eljárás, mivel a támpontokat nagy megbízhatóságúnak tekinti. Lokálissá tétele után szakadásos interpolátor, mivel hirtelen változásokkal jellemezhető eredményeket kapunk azokon a területeken, ahol változik a rácspontok számításához felhasznált támpontok összetétele. Végül pedig a determinisztikus csoportba tartozik, mert egy adott ponthalmazra mindig ugyanazt az eredményt szolgáltatja. Az ArcMap programba beépített interpolátor esetében több paraméter beállítására is van lehetőség (33. melléklet, 1. ábra). Azokat, amelyeket a számításhoz kötelező megadni, a program zöld körrel jelöli. Ezek az Input point features (bemenő pontok halmaza), ami csak pontokat tartalmazó osztály lehet, a Z value field (Z értékeket tartalmazó mező), ami a magassági adatokat tartalmazó oszlop nevére vonatkozik. Ez lehet az osztályok geometriai adatait tartalmazó (Shape) táblában tárolt, vagy egyéb másik oszlop is. Az Output raster (Kimeneti raszter) mezőbe a létrehozandó raszteres adatszerkezetű modell nevét és elérési útját kell beírni. A többi beállítás már a számítások menetére vonatkozik és azokat nem kötelező változtatni, a program alapértelmezett értékein hagyhatók. Ezek az Output cell size (kimeneti cella méret), amit méterben kell megadni és a modell pixelméretére vonatkozik. Alapesetben a program felajánlja a ponthalmaz alapján legmegfelelőbb értéket. A Power (teljesítmény, erő, hatvány) értékével szabályozható, hogy a meghatározandó ponttól távolabb eső pontok mennyire befolyásolják a számítást, ami alapértelmezetten a 2-es. Ha ez az érték nagyobb, akkor a legközelebbi pontok nagyobb súlyt kapnak, így szakadásos felszín jön létre. Kisebb érték esetén simítottabb felszín lesz az eredmény. A Search radius (keresési sugár) lehet variable (változó) vagy fixed (adott) érték. Változó keresési sugár esetén meg kell adni a számításba bevonni

kívánt pontok számát, amely alapértéke 12. Ezen kívül akár a támpontok maximális távolsága is meghatározható, amivel kiküszöbölhetők a távoli pontok hibahatása. Adott távolság esetén pedig annak sugarát kell megadni méterben és a számításba bevont minimális pontok számát. Ezzel biztosítva, hogy minden meghatározandó ponthoz rendelkezésre álljon támpont. Az Input barrier polyline features (Bemenő korlát vonal) mezőben pedig olyan vonalas adathalmaz adható meg, amely megszakítja a támponthalmazban a keresést. Ezek a vonalak tehát lehetnek szirtek, szakadékok határvonalai, így csak azokat a támpontokat veszi figyelembe az interpolátor, amelyek a határvonal számítandó rácpontja felőli oldalán vannak. [ArcGIS Help]

3.7.2 Kriging interpolációs eljárás ismertetése

A módszer eredete annak a felismerésében van, hogy sok földrajzi tulajdonság térbeli változása túl szabálytalan ahhoz, hogy egy egyszerű matematikai függvénnyel modellezni lehetne. Ezért vizsgálja azt, hogy a támpontok értékei hogyan változnak a pontok közötti távolság függvényében [Márkus, 2004]. Tehát a matematikai műveletek helyett, statisztikai számításokon alapul az interpolátor, ezért a sztochasztikus modellt alkalmazó technikák közé soroljuk. Ezen statisztikai számítás a variogram előállítás, ami egy olyan görbe, amely számszerűen megmutatja a távolságok növekedésének függvényében a magassági viszonyok változását. Ezen görbék alapján az algoritmus súlyokat számít az egyes támpontokhoz, majd ezek felhasználásával meghatározza a keresendő rácpontokhoz tartozó értékeket. A kriging egy szabatos interpolációs eljárás, mivel a támpontokat nagy megbízhatóságúnak tekinti és folytonos művelet, mert az eredményül kapott felszín nem jellemzik hirtelen változások. Továbbá a lokális csoportba sorolható, mert a számításokba bevonandó pontok számát vagy az ismeretlen ponttól vett legnagyobb távolságot is meg lehet adni, hasonlóan az inverz távolságok eljárásához. Ezen paramétereken túl a statisztikai számításokra vonatkozó beállítások változtatását is támogatja az ArcMap szoftverbe épített eljárás (33. melléklet, 2. ábra). Megadhatjuk a magassági értékek változásának közelítésére vonatkozó függvényt (Semivariogram properties – Variogram tulajdonságok), ami lehet Circular (kör), Spherical (gömb), Exponential (exponenciális), Gaussian (Gauss), Linear (egyenes) is. Ezek változtatásával a módszer más súlyokat határoz meg a támpontokhoz, ezzel más eredményeket számítva az ismeretlen pontokba. Végül raszteres szerkezetű magasságmodellen kívül kimeneti adatként megadható, egy ellentmondásokat tükröző raszter (Output variance of prediction

raster – Kimenő becslés az ellentmondásokról raszter) is, amelyet az előállított variogram alapján készít az interpolátor. [ArcGIS Help]

3.7.3 Natural Neighbor interpolációs eljárás ismertetése

A módszer lényege, hogy minden támpont köré poligonokat szerkeszt a program. Ezek általában a Thiessen poligonok és azon pontok mértani helyét jelentik, amelyek a kérdéses támponthez közelebb állnak, mint bármelyik másik mintavételi ponthez. Ezt a műveletet az interpolátor elvégzi az ismeretlen pontokra is, amelynek eredményei olyan poligonok lesznek, amelyek pontjai közelebb állnak az ismeretlen ponthez, mint bármely mintavételezési ponthez (34. melléklet, 1. ábra). Az ismeretlen pontok magasságának számításához, a hozzájuk tartozó sokszög által lefedett, támpontokhoz tartozó poligonokat veszi figyelembe. Eszerint akkora súllyal vonja be a számításba a támpontok magasságait, amekkora százalékban fedik le a körjük szerkesztett sokszögek a meghatározandó pont sokszögét. Ezt a módszert emiatt területsúlyozásnak is szokás nevezni. Belátható, hogy lokális technika, mert a számításba csak az ismeretlen ponthez legközelebbi támpontokat veszi alapul. Szabatos eljárás, mert a támpontokat nagy megbízhatóságúnak tekinti. Folyamatos interpolátor, mert eredményül szakadásoktól mentes felszínt hoz létre és determinisztikus, mivel mindig ugyanazt az eredményt szolgáltatja, matematikai feltevések alapján. Mivel a támpontok körüli poligonok szerkesztése mindig ugyanazt az eredményt adja, a program csak a létrehozandó raszter pixelméretének módosítására ad lehetőséget (34. melléklet, 2. ábra). [ArcGIS Help]

3.7.4 Spline interpolációs eljárás ismertetése

A módszer úgy becsüli az ismeretlen pontok értékeit, hogy azokat a támpontokra illesztett matematikai függvényekkel megadott felületek alapján számítja. A felületek meghatározásához két feltételt vesz figyelembe. Az első, hogy a felszínnek pontosan át kell mennie a támpontokon, tehát szabatos technikáról van szó. A második pedig, hogy a felszín görbületének minimálisnak kell lennie. Ezek alapján az interpolátor a globális módszerek csoportjába sorolható. Azonban lokálissá is tehető, ha megadjuk az egyes függvények számításába bevont támpontok számát. Mivel matematikai függvényt alkalmaz, a determinisztikus technikák csoportjába tartozik. Eredményül egy sima felületet ad, tehát folytonos interpolációs művelet. Alkalmazásakor a lokálissá tételéhez szükséges, számításokba bevont pontok számának megadása mellett az ArcMap szoftver további beállítási lehetőségeket kínál (34. melléklet, 3. ábra). Választhatunk Regularized

(rendezett) típust, ami egy sima felületet nyújt a függvények első deriváltjai alapján. Vagy a Tension-t (feszítés) típust, amely eredményül az előzőhöz képest, egy kevésbé sima felületet ad, mert a modellezett jelenség változatosságát is figyelembe veszi. A súlyként (Weight) megadott érték a görbületek minimalizálásának mértékére utal, ami alapesetben 0.1.

3.7.5 Interpolációk végrehajtása és az eltérések kimutatása

Az egyes adatgyűjtések támpontjaival párosított LiDAR1-es pontokból számítottam a 10 méteres rácssűrűségű domborzatmodelleket, az előzőekben bemutatott négy különböző interpolációs művelettel. Ezek alkalmazását mindig a szoftver alapértelmezett paramétereivel végeztem, az egyes teszterületekre külön-külön. Az előállítottakból a program Minus (kivonás) raszter műveletével számítottam a LiDAR10-től vett eltéréseiket. A műveletsorozat egységes végrehajtásának érdekében a Model Builder (Modellépítő) eszközt használtam (35. melléklet, 1. ábra). Az eredmények így egységes könyvtárstruktúrába kerültek, ami javította az átláthatóságukat (Digitális adathordozó Interpoláció vizsgálat könyvtárában az adott adatgyűjtési technológiára, teszterületre és interpolációs műveletre vonatkozóan található – például: Interpoláció vizsgálat\GPS mért pontjaiban\Teszterület 1\Kriging\KRIG-LIDAR.aux). Az így előállított raszterek intenzitásértékei az előjelhelyes eltérések voltak. Ezek statisztikai adatai megtekinthetők a réteg tulajdonságai (Layer Properties) menüpont forrás (Source) mezőjében, amelyeket kigyűjtve táblázatokba foglaltam (36, 37 és 38. mellékletek, 1. ábrái). Ezek alapján jól látható, hogy a természetes szomszédok és a kriging módszerek okozták a legkisebb mértékű hibákat. Ezeket követték az Spline és az IDW (Inverz Távolsággal Súlyozott) interpolációk, amelyek már lényegesen nagyobb eltéréseket okoztak. A GPS felmérés és a légifényképezés mért pontjainak táblázataiban szereplő, átlagos négyzetes középhiba értékein jól látható, hogy azok mértékét befolyásolja az egyes teszterületek mikro domborzatossága. A hatás kimutatásához a légifényképezés eredményei a legalkalmasabbak, ugyanis azok mindegyik területen közel egységes eloszlású és sűrűségű ponthalmaz interpolációjából adódtak. A mikro domborzat mértékét a korábban ismertetett lejtések szórásával jellemeztem, amelyeket összevettem a középhibákkal egy diagramban (37. melléklet, 2. ábra). Eszerint a középhiba mértéke exponenciálisan nő, a mikro domborzati formák mennyiségének növekedésével, azaz a második teszterületen ± 0.144 m, az elsőn ± 0.201 m, míg a harmadikon ± 0.440 m. Természetesen a középhiba értékeket további tényezők hatásai is befolyásolják, így a diagram csak a változások

szemléltetésére készült. A további hatások vizsgálatához kiszámítottam, hogy egy 10x10 méteres területre hány darab pont esik az egyes mérések és teszterületek esetében. Mivel a 38. melléklet, 2. ábrájának táblázatában található darabszámok, az adott teszterületekre és azok 10 méteres környezetébe eső pontokra vonatkoznak, azokat elosztottam az adott teszterületet lefedő 10x10 m-es területrészek számával. A kapott eredmények a pontthalmaz sűrűségére vonatkozó számok. Erre a számításra azért volt szükség, mert a 3-as számú teszterület mérete különbözik a másik kettőtől, így az azokra eső pontok darabszáma alapján nem végezhető el a vizsgálat egységesen. Az így számított sűrűségértékeket összevetettem az átlagos négyzetes középhiba értékekkel egy diagramban, amelynek készítésekor az előzőekben bemutatott mikro domborzati hatás kiküszöbölése érdekében, külön görbéken ábrázoltam az egyes teszterületekre vonatkozó értékeket (39. melléklet, 1. ábra). Mivel a középhibák értékeit a pontok sűrűségén túl eloszlásuk és átlagos távolságaik is befolyásolják, a diagram alapján csak az mutatható ki, hogy mely teszterületeken legnagyobb a pontthalmaz sűrűségének hibahatása. Eszerint azon teszterületek görbéire volt legnagyobb hatással a sűrűség, amelyek közel állandó meredekséggel rajzolódtak ki. Tehát az első és a második teszterület mérési eredményeire igaz, hogy a számításba bevont pontok száma befolyásolta legnagyobb mértékben az interpoláció pontosságát. A harmadik teszterület görbéjén viszont jól megfigyelhető, hogy a topográfiai felmérés nagyszámú pontjaival végzett számítás nem vezetett lényeges pontosságnövekedéshez. Tehát a középhibák mértékét más hatás befolyásolta nagyobb mértékben. A további vizsgálatához elkészítettem a ponttávolságok változásaira vonatkozó diagramot is (39. melléklet, 2. ábra). Ez alapján csak a második számú terület görbéjén figyelhető meg, hogy az átlagos ponttávolság növekedésével összhangban csökken a pontosság. A másik két területre vonatkozó görbék meredekségei viszont igen változatosak, tehát vizsgálni kellett a középhiba értékeit a pontthalmazuk eloszlásának függvényében is. Ehhez azonban az eloszlások számszerű értékekkel leírására volt szükség. Ez az egyes támpontok köré szerkesztett tetszőleges sugarú övezet területének és az egyes teszterületek méretének a hányadosa lett, ami azt mutatja, hogy az övezetek hány százalékban fedik le a vizsgálati területeket. A művelet első lépéseként az ArcMap szoftver övezetgenerálás parancsával előállítottam az egyes támpontoktól vett 10 méteres sugarú övezeteket, amelyek egymást fedő körök lettek (40. melléklet, 1. ábra). Ezek területei még nem voltak alkalmasak a százalékos értékek számításához, ezért a Dissolve (határvonalak feloldása) paranccsal a fedő köröket egy poligonná egyesítettem (40. melléklet, 2. ábra), majd a teszterület határvonalán kívül eső övezetrészeket

eltávolítottam a Clip (levágás) paranccsal (40. melléklet, 3. ábra). Az így kapott övezet területe alapján már számítható volt, hogy hány százalékban fedi le a teszterületet. Az eredményül kapott értékek a 38. melléklet, 2. ábrájának táblázatában találhatók, amelyek alapján elkészítettem az eloszlások és középhibák összefüggéseire vonatkozó diagramot (39. melléklet, 3. ábra). Ezen jól látható, hogy a harmadik teszterület esetében az eloszlásértékek változásával összhangban változnak a középhibák is. Az 1-es és 2-es számú területre vonatkozó görbe esetében azonban ez nem mondható el. A kiugróan kis eloszlással jellemezhető topográfiai felmérés pontjai nem okoznak lényegesen nagy átlagos középhiba eltérést, a többi adatgyűjtéshez képest. Az első terület esetében pedig a kisebb eloszlású topográfiai támpontok alapján kisebb a középhiba értéke, mint a nagyobb eloszlású térfotogrammetriai kiértékelésé. Tehát összegezve elmondható, hogy a mikro domborzati formák mennyisége és a lejtési viszonyok változása befolyásolja azt is, hogy a támpontok sűrűsége, eloszlása vagy átlagos távolságuk hibahatása jelentkezik nagyobb mértékben az interpolációk végzésekor. Ezért a legváltozatosabb domborzati formákkal jellemezhető hármasteszterület interpolációs hibái azzal csökkenthetők legjobban, ha a támpontok egyenletesen elosztva helyezkednek el a területen, amihez persze nagyszámú pont is szükséges. Ezt alátámasztja az is, hogy amíg a GPS mérés és a térfotogrammetriai kiértékelés eredményeül kapott támpontok darabszáma közötti különbség mindössze 30db, ami ± 8 cm-es középhiba eltérést okozott, addig a GPS és a topográfiai felmérés közötti 120 db-os különbség mellett a középhiba csak ± 10 cm-el tér el. Tehát a nagyobb középhibákat a pontok nem megfelelő eloszlása okozta, ami a légifelvételek automatizált kiértékelésekor abból eredt, hogy az LPS szoftver nem tudta elvégezni minden pontban a képrészletek illesztését, így nagy területek maradtak támpont nélkül, ezzel jelentős hibákat okozva az interpoláció során. A szemléltetés érdekében képernyőképet készítettem az eltérésekről, ahol fekete körök szimbolizálják a térfotogrammetriai kiértékelésből kapott támpontokat és piros szín a legnagyobb eltéréseket (41. melléklet, 1. ábra). Az első és második teszterületeken nem a támpontok eloszlása, hanem támpontok darabszáma, azaz sűrűsége befolyásolja nagyobb mértékben az interpolációkból adódó középhibákat. Ez abból következik, hogy ezeknek a területeknek a lejtési irányai és lejtőszögei közel azonosak, így azokon a területrészeken is számíthatók kis hibával a magasságértékek, ahol nem áll rendelkezésre támpont. Ez megfigyelhető a 2. teszterületre vonatkozó, GPS mérés támpontjai alapján végzett interpolációból adódó középhibák ábrázolásán is, ahol a vörös színnel jelölt nagymértékű hibák általában csak a mikro domborzati formáknál fordulnak elő (41. melléklet, 2. ábra).

3.8 Domborzatmodellek levezetése az egyes adatgyűjtések támpontjaiból

Az interpoláció vizsgálatához készített modell (35. melléklet) segítségével elvégeztem a 10 méteres rácsűrűségű domborzatmodellek levezetését, az egyes adatgyűjtési technológiák támpontjait felhasználva. Annak igazolására, hogy az interpoláció vizsgálat során kiválasztott Natural Neighbor technika nyújtja a legpontosabb eredményeket, elvégeztem a további három interpolátorral is a modellek levezetését. Az eredményül kapott domborzatmodelleket az interpoláció vizsgálatkor használttal azonos könyvtárstruktúrába helyeztem (Digitális adathordozó DDM10_Tesztterületek könyvtárában az adott adatgyűjtési technológiára, tesztterületre és interpolációs műveletre vonatkozóan található –például: DDM10_Tesztterületek\GPS\Tesztterület 1\Kriging\KRIG-DDM10.aux). A LiDAR10-től való eltéréseik kimutatására ismét a Minus raszter műveletet használtam, amelynek eredményeit a megfelelő domborzatmodellek könyvtárában helyeztem el (például: DDM10_Tesztterületek\GPS\Tesztterület 1\Kriging\KRIG-LIDAR.aux). Az így előállított raszterek intenzitásértékei az előjelhelyes eltérések voltak. Ezek statisztikai adatai megtekinthetők a réteg tulajdonságai (Layer Properties) menüpont forrás (Source) mezőjében, amelyeket kigyűjtve táblázatokba foglaltam (42 melléklet, 1. és 2. ábrái, 43 melléklet, 1. ábra). Ezek alapján látható, hogy a természetes szomszédok interpolációs módszerrel levezetett modelleket terhelik a legkisebb mértékű hibaterjedelmek és átlagos négyzetes középhibák. Tehát ez az interpolátor szolgáltatja az eredeti támpontok alapján is a legpontosabb eredményeket. A GPS mérés támpontjai alapján levezetett domborzatmodell eltéréseinek táblázatán az is látható, hogy az eltérésekből továbbra is lehet következtetni a támpontok szabályos hibáira a Natural Neighbor technika esetében. Tehát a szabályos hibák kimutatására lehetőség van a támpontok és domborzatmodell rácsponthoz tartozó ellenőrző mérések során is. A megbízhatóság pedig növelhető a hibahatás kiküszöbölésével. Ugyanez mondható el a térfotogrammetriai kiértékelés támpontjai alapján levezetett domborzatmodellekről is, de ezek esetében átlagos eltérés mutatható ki az interpolációk vizsgálatakor is (37. melléklet), ami főként a harmadik tesztterületen befolyásolja a szabályos hibák kimutathatóságát. Tehát a hibahatás kiküszöbölhető a domborzatmodell levezetése után is, de jobb megbízhatóság érhető el, ha az ellenőrző méréseket a támpontokban végezzük. Annak szemléltetésére, hogy mely adatgyűjtési technológiai támpontjaiból interpolált domborzatmodellek nyújtják a legmegbízhatóbb eredményeket, diagramokat készítettem tesztterületenként (43. melléklet, 2. és 3. ábrái és 44. melléklet, 1. ábra). Ezek alapján jól látható, hogy

minden esetben a GPS mérésből készített domborzatmodellek voltak a legpontosabbak, amelyek középhibái az első teszterületen $\pm 0,162$ m, a másodikon $\pm 0,103$ m, a harmadikon pedig $\pm 0,375$ m voltak. Ezeket követték a térfotogrammetriai kiértékelés modelljei $\pm 0,387$ m, $\pm 0,284$ m és $\pm 0,673$ m-es értékei. A legkisebb megbízhatóságúnak pedig a topográfiai felmérés domborzatmodelljei bizonyultak $\pm 0,533$ m, $\pm 0,768$ m és $\pm 1,105$ m-es értékekkel.

3.9 Támpontok megbízhatóságának hatása a domborzatmodellekre

Abból a feltevésből kiindulva, hogy a domborzatmodellek LiDAR10-től vett különbségei, a támpontok magassági eltérései és az interpoláció okozta hibák összegeként áll elő, az utóbbi ismeretében számítható a támpontok megbízhatóságának hatása a modellekben. Eszerint a DDM10 eltérésekből kivonva a hozzá tartozó interpolációból adódó eltéréseket, a támpontok magassági hibái miatti eltéréseket kaptam eredményül. A gyakorlati megoldást ismét a Minus raszter művelet szolgáltatta, amellyel a DDM10 LiDAR-től vett eltéréseiből kivontam az interpoláció vizsgálatkor előállított eltérésmodelleket. Eredményül olyan raszteres modelleket kaptam, amelyek intenzitás értékei a támpontok hibáiból adódó eltéréseket tartalmazták (Digitális adathordozó, Támpontok_hatása_a_DDM10-ekre könyvtárában az adott adatgyűjtési technológiára és teszterületre vonatkozóan található – például: Támpontok_hatása_a_DDM10-ekre\GPS\Teszterület 1\nnb.aux). Itt már csak a Natural Neighbor interpolációval készült modelleket vizsgáltam, mivel bizonyossá vált, hogy ez nyújtja a legmegbízhatóbb eredményeket. Az intenzitásértékek alapján számított statisztikai értékeket ismét egy táblázatba gyűjtöttem (44. melléklet, 2. ábra). Ezt összehasonlítva a 45. melléklet, 1. ábrájának táblázatával, látható, hogy a kimutatott átlagos eltérések jól közelítik a támpontok megbízhatósági vizsgálatokor számított értékeket. Tehát a támpontokat terhelő szabályos hibák a rácspontokban is hasonló mértékben jelentkeznek. Az átlagos négyzetes középhibákról az mondható el, hogy az értékük az interpoláció után általában csökken. Az egyetlen eset, amikor növekvő tendenciát mutat, az a topográfiai felmérés 2. teszterületre vonatkozó vizsgálatánál figyelhető meg. A legnagyobb előjeles eltérés mezőkön látható, hogy a rácspontokban végzett vizsgálat lényegesen nagyobb eltérési eredményt hozott ($-0,898$ m és $+2,534$ m), mint a támpontok megbízhatósági vizsgálata ($-0,66$ m és $+0,600$ m). Ennek oka az lehet, hogy egy durva hibával terhelt pont nem szerepelt a megbízhatósági vizsgálatban. A támpontok DDM10-re gyakorolt hatását

tartalmazó raszter megfelelő megjelenítésekor ez a pont jól látható (45. melléklet, 2. ábra). A terület délkeleti részén kirajzolódó rész vörös színe a 1,5-2,6 méterig terjedő pozitív előjelű hibákat jelöli. Tehát a legnagyobb előjeles eltérést okozó vörös körrel szimbolizált támpont annak a közepén helyezkedik el, amelyhez a legközelebb található LiDAR1 rácspont abszolút magassági értéke 264,65 méter. Ezzel szemben a mért pont magassága 267,7 méter, ami 3 méteres magasságkülönbséget jelent. Ezt a durva hibát az okozhatta, hogy a felméréskor a mérőállomást kezelő személy számította az abszolút magasságokat, majd azokat bediktálta a mérőasztal felszereléssel dolgozónak. A négyes és hetes szám gyakran félrehallható, így az utóbbi személy a hibás értéket írta mért ponthoz, ezzel 3 méteres eltérést okozva. Az interpoláció számításakor ez a hiba nagy mennyiségű rácspontra hatott, mivel a teszterületnek ezen részén kis számú támpont található. Ez pedig azt eredményezte, hogy az átlagos négyzetes középhiba értéke lényegesen emelkedett. A támponti hibahatásokról teszterületenként diagramokat készítettem (46. melléklet). Ezeken jól látható, hogy a GPS mérés pontjaiból levezetett DDM-eket terhelik legkisebb mértékben az elsődleges adatok hibái. Ezt követik az automatizált térfotogrammetriai kiértékelés támpontjaiból előállított DDM-ek, majd a legkisebb megbízhatóságú topográfiai felmérés digitalizált pontjaiból készített modellek.

3.10 Adatgyűjtési technológiák hatékonyságának összehasonlítása

Az egyes adatgyűjtési technológiák hatékonyságának sorrendjét kétféle megközelítésben állítottam fel. Elsőként az általam levezetett domborzatmodellekhez felhasznált támpontok mennyiségét vettem alapul, amelyeket egységnyi idő alatt gyűjtöttem. Az egységnyi időt 2 munkanapban állapítottam meg, mivel minden technológia esetében ennyi időre volt szükség a vizsgált területre vonatkozó támpontok előállításához. Ekkor nem vettem figyelembe a légifelvételek elkészítéséhez szükséges időt és a topográfiai felmérés terepi munkálatainak időtartamát. Az első helyen természetesen a légi lézerszkennelés áll, mivel ezzel a technológiával olyan mennyiségű támpont előállítása oldható meg rövid idő alatt, amelyek lehetővé teszik 1 méteres rácssűrűségű digitális domborzat és felszínmodell előállítását is egyszerre, ami a többi vizsgált technológiával nem lehetséges. A második helyre a légifelvételek automatizált térkiértékelése került, mivel a térmodell előállítása után, rövid idő alatt szolgáltatott nagy mennyiségű támpontot az egész térmodell területéről. Elmaradása a légi lézerszkenneléstől csupán abból adódik, hogy az automatizált képrészlet illesztéseket nem minden esetben tudja

végrehajtani a szoftver, így támpontok nélküli területek keletkeznek. Emiatt nem lehet a támpontok rácshálójának sűrűségét olyan értékre növelni, hogy az megközelítse a lézerszkennelését. Továbbá a térfotogrammetriai kiértékeléssel erdős területek esetén közvetlenül csak digitális felszínmodell állítható elő, amíg a lézerszkenneléskor az utolsó visszaverődések rögzítésével a domborzatmodell levezetéséhez alkalmas támpontok is rendelkezésre állnak. A harmadik helyre a topográfiai felmérés digitalizálása, azaz a kartometriai eljárás került, ugyanis ezzel a technológiával, olyan erdővel borított területekről is gyűjthetők támpontok, amelyek esetében a műholdas helymeghatározás már tud adatokat szolgáltatni. Továbbá a topográfiai felmérések domborzati fedvényeinek megfelelő szkennelése lehetővé teszi, hogy a digitalizálás félig automatizálható is legyen, ezzel tovább növelve az előállítható támpontok mennyiségét. A negyedik helyre a műholdas helymeghatározással történő terepi adatgyűjtés került, azonban ennek hatékonysága megközelítheti a digitalizálását. Ezt a pontrögzítés időintervallumának a lehető legrövidebbre csökkentésével lehet elérni, ami 1 másodperc. Ezen kívül a GPS műszer emberi hordozása helyett, gépjárművet célszerű alkalmazni, ami nagyobb sebességű haladást tesz lehetővé, így egy adott terület bejárása rövidebb idő alatt elvégezhető. Második megközelítésben azt vizsgáltam, hogy a ma, 2010-ben rendelkezésre álló országos alapadatok alapján mely technológiával állítható elő legrövidebb idő alatt domborzatmodell. Eszerint az első helyre a kartometriai technológia került. Ugyanis a FÖMI-től (Földmérési és Távérzékelési Intézet) megvásárolható az országos topográfiai felmérés, domborzatot ábrázoló fedvényei alapján készült digitális domborzatmodell, amely legfeljebb 5 méteres rácssűrűségben áll rendelkezésre. Tehát ehhez a domborzatmodellhez lehet a legrövidebb idő alatt hozzájutni. Ezt követi az automatizált térfotogrammetriai kiértékelés, mivel a MADOP (Magyarország Digitális Ortofotó Programja) keretein belül elkészült az ország teljes területének légifényképezése, amelynek felvételeit a FÖMI-től lehet megrendelni digitális formában is. Ezek belső és külső tájékozási elemeinek ismeretében nem szükséges a hosszas légiháromszögelési eljárás elvégzése, így rövid időn belül megtörténhet a támpontok automatizált mérése, majd azok interpolációja, amelynek eredménye a megfelelő sűrűségű digitális domborzat, vagy felszínmodell. A megoldás hátránya, hogy a rendelkezésre álló felvételek jelentős része a fák lombos időszakában készült, így a domborzatmodellek előállításakor a fás területekre interpolációt kell végezni. Jelenleg légi lézerszkennelési adatok csak kevés területről állnak rendelkezésre, ezért ilyen jellegű méréseket csak külön megrendeléssel lehet végeztetni, az arra szakosodott cégekkel.

Mivel a GPS és LiDAR méréseket is egyénileg kell elvégezni, a harmadik és negyedik helyre csak a felméri terület mérete alapján lehet besorolni ezen technológiákat. Nagyobb területre kiterjedő felmérés esetén a légi lézerszkennelés lehet a hatékonyabb, míg kisebb területeknél a terepi GPS mérés. Nem elhanyagolható szempont a területek felszíni borítottsága sem, mivel a műholdas helymeghatározás nem használható megfelelő pontossággal az erdővel borított területeken, amíg a légi lézerszkennelés igen.

3.11 Adatgyűjtési technológiák költségeinek összehasonlítása

A költségek számításához a ma, 2010-ben aktuális árakat használtam fel, továbbá figyelmen kívül hagytam a mérésekhez szükséges hardver és szoftverelemek árait. Tehát a felsorolt költségek csak az iszkai teszterületek támpontjainak előállításához szükséges alapadatokra vonatkoznak. A legolcsóbb forrást az országos topográfiai felmérés alapján készült domborzatmodell nyújtja, amelyet 1200Ft/km²-es áron lehet beszerezni. Ez azt jelenti, hogy a 0,05km²-es teszterületről előállított domborzatmodell 60Ft-ba kerül. Tehát nagyobb költségekkel járna megvásárolni a területeket tartalmazó szkennelt topográfiai szelvényt, amelynek darabja 3600Ft-ba kerül és még a digitalizálást is el kell rajtuk végezni. Második helyre a GPS felmérés sorolható, amelynek költségét a virtuális referencia állomás mérési eredményeinek megvásárlása jelentette. Természetesen további kiadások is jelentkeznek terepi mérések esetén, mint például üzemanyag és műszerbérlet költség, de ezeket figyelmen kívül hagytam. Így az összesen 4 és fél órás méréshez megvásárolt virtuális RINEX adatok 5130Ft-ba kerültek, ugyanis az 5 másodperces rögzítési gyakoriságú eredmények ára 19Ft/perc. Ugyanilyen időtartamú méréshez a leggyakoribb, 1 másodperces rögzítésű referenciaadat 6750Ft-ba kerül, ami nem nagy különbség ahhoz képest, hogy ez akár tízszer több támpont mérését is lehetővé teszi. Ehhez hozzáadva a műszerbérlet és üzemanyagköltség díját, még mindig jóval olcsóbb megoldást jelent, mint a harmadik helyre sorolt térfotogrammetriai kiértékelés. Ugyanis a 2009-ben készült légifelvételek ára 58000Ft/kép, amelyekből minimum kettő szükséges térmodell előállításához, így ez összesen 116000Ft-ba kerül. Ha azonban nagyobb terület mérésére van szükség, minden bizonnyal a térfotogrammetriai technológia az olcsóbb. Ez abból következik, hogy a megközelítőleg 15km²-es modellterület kiértékeléséhez is elegendő két kép megvásárlása. Azonban ekkora terület felmérése műholdas helymeghatározással az általam végzett mérés költsége alapján, már 1539000Ft-ba kerülne. Tehát kis kiterjedésű DDM-ek előállításakor a GPS felmérés a gazdaságosabb,

míg nagyobb terület esetén térfotogrammetriai kiértékelés. A légi lézerszkennelés költségeire sajnos pontos számok nem állnak a rendelkezésemre, de abból kiindulva, hogy külön repülést kell végezni egy olyan műszerrel, ami külföldi cég birtokában van, minden bizonnyal meghaladja az előzőekben felsorolt technológiák költségeit.

3.12 Digitális domborzatmodellek alkalmazási területei

A domborzatmodellek későbbi alkalmazási területeinek más és más elvárásai vannak a domborzatmodellek pontosságát, rácsponst sűrűségét és kiterjedését illetően. Ezért minden alkalmazási területnek más adatgyűjtési technológiával előállított modell felhasználása a legmegfelelőbb. Sok esetben digitális felszínmodellek szükségesek a feladat megoldásához, amelyeket főként a távérzékelési módszerekkel lehet előállítani.

Az ortofotók előállításához használatosak leggyakrabban a DDM-ek, amelynek során a légifelvételeket terhelő magassági torzulások megszüntetése a cél. Az ortofotók pontosságát tehát a DDM-ek megbízhatósága is meghatározza. Azonban mivel nagy területekről készült modellekre van szükség, a terepi felmérés nem nyújt gazdaságos megoldást. Tehát a FÖMI által készített országos topográfiai felmérések alapján levezetett domborzatmodell felhasználása lehet a legmegfelelőbb. Abban az esetben, ha úgynevezett true ortofotó (valódi ortofotó – a kép valamennyi pixelét a megfelelő helyen ábrázolja) készítése a cél, a DDM-ek már nem alkalmasak a feldolgozásra, mivel azok nem tartalmaznak magassági adatokat a mesterséges létesítményekre és a felszínborítottságra. Ezen termék esetén már DFM felhasználására van szükség, amelyek légi lézerszkenneléssel, vagy térfotogrammetriai kiértékeléssel készülhetnek.

A domborzatmodellek mezőgazdasági alkalmazásakor, az azokból levezethető lejtőkategória és kitettség értékekre van szükség. A felhasználáskor nem a nagy pontosság, hanem a nagy területi kiterjedés a lényeges szempont, így a FÖMI-től rendelhető DDM lehet a legmegfelelőbb megoldás. Ugyanez igaz a vízügyi célú felhasználáskor is, amelyeknek célja az egyes területek elöntési előrejelzésének elkészítése, víztározók tervezése, vízgyűjtő területek lehatárolása. Hasonló a helyzet az eróziós térképek és hatásvizsgálatok készítésekor is, amelyekhez a DDM-en túl többek között szükséges a felszínborítottság figyelembe vétele is, amelyek légifelvételek interpretációjával vagy már meglévő adatbázisok felhasználásával nyerhetők. Tehát célszerű lehet a légifelvételek magassági kiértékelése is, ha azok más cél miatt már rendelkezésre állnak.

Nagy megbízhatóságú és rácspontról sűrűségű DDM-et igényelnek a régészeti alkalmazások, amelyekkel az egyes régészeti lelőhelyek elhelyezkedését lehet kutatni. Erre a célra a nagy területi kiterjedés miatt a legjobb megoldás a légi lézerszkennelés lehet, mivel ez a technológia nyújtja a megfelelő pontosságot is. Jó megoldás lehet továbbá a légifelvétel térfotogrammetriai kiértékelése is, de ehhez olyan felvételek szükségesek, amelyek a fák lombtalan időszakában készültek. Azonban az örökzöld erdőkkel borított területeken még így sem végezhető megfelelő adatgyűjtés.

Egyes városklíma kutatásokhoz szükségesek az épületek magassági adatai, amelyek csak DFM-ek alapján határozhatók meg. Ilyen célú felhasználáshoz a térfotogrammetriai és a légi lézerszkenneléses adatgyűjtés nyújthat megoldást.

Igen fontos eleme a turisztikai térképeknek is a domborzatábrázolás, amelyhez nem szükséges nagy pontosságú DDM, így a FÖMI topográfiai felmérésből készített modellje a legmegfelelőbb, az egyes domborzatárnyékolás és szintvonal kirajzolás elvégzésére.

Nagy pontosságú modellek előállítása szükséges egyes mérnöki létesítmények tervezéséhez, mint például az útépítéshez és az építészethez. Ezek területi kiterjedése igen változó lehet, így ennek függvényében a légi lézerszkennelésből vagy GPS felmérésből levezetett domborzatmodellek nyújthatnak megoldást.

További DFM alkalmazás lehet a híradástechnikai és egyéb mesterséges objektum összehasonlító vizsgálatát elvégző alkalmazás, ugyanis ezek során jelentős szerepet játszhatnak az egyes erdők, fasorok, magas épületek. Ezen DFM-ek alkalmasak erdőgazdálkodási feladatok megoldására is, ugyanis megfelelő időközönként készített modellekből következtetni lehet, az erdővel borított területek méretének változására és a faállomány fejlődésére.

DFM és DDM modellek együttes felhasználása szükséges az egyes katonai alkalmazásokkor, amelyek lehetnek összehasonlító vizsgálatok, stratégiai elemzések, hadgyakorlat modellezések, útvonaltervezések, pilóta nélküli repülőgépek biztonságos vezérlése. Ezen feladatoknál egyaránt fontos tényezők a domborzati viszonyok és az egyes terepakadályok ismerete is.

4. Összegzés

Az egyes adatgyűjtési technológiákkal előállított támpontok alapján levezetett digitális domborzatmodellek megbízhatóságát, a légi lézerszeknnelés modelljétől vett magasságkülönbségek alapján határoztam meg. A vizsgálatkor azt vettem alapul, hogy a domborzatmodellek pontosságát, a felhasznált támpontok megbízhatósága, eloszlása, sűrűsége és a modellezett terep mikro domborzati formáinak mennyisége együttesen befolyásolják. Eszerint a hibahatások két csoportba oszthatók, a támpontok megbízhatóságának hatására és az interpoláció okozta hibákra. Az utóbbihoz tartoznak a támpontok elhelyezkedéséből és a mikro domborzati formák mennyiségéből adódó hibahatások, amelyek csökkentésére több interpolációs technikát is összehasonlítottam és minden esetben a Natural Neighbor interpolátor biztosította a legjobb megoldást. A támpontok és interpolációs hibák hatásait százalékos arányban felosztott kördiagramokon ábrázoltam tesztterületenként, feltüntetve a domborzatmodellt terhelő mindkét hatásból eredő átlagos négyzetes középhibákat is (47. melléklet). Eszerint a GPS mérés támpontjaiból levezetett domborzatmodellek közelítik meg a legjobban a LiDAR10 megbízhatóságát. A két modell közötti eltérésekből számított átlagos négyzetes középhiba a legváltozatosabb domborzati formákkal rendelkező 3-as számú tesztterületen is ± 40 cm-es érték alatt marad. A hibahatások százalékos eloszlásán az is látható, hogy a támpontokat terhelő magassági eltérések átlagosan csak 28%-át teszik ki, a modellek teljes hibáinak (47. melléklet, 1. ábra). Tehát lényegesen nagyobb, átlagosan 72% az interpolációs hatások csoportjába tartozó hibák befolyása. Eszerint lényeges pontossági javulás a támpontok darabszámának növelésével érhető el, ami az adatrögzítés időintervallumának rövidítésével oldható meg. További megbízhatósági javulást eredményezhet a támpontokat terhelő szabályos hibák kiküszöbölése is, azonban ennek mértéke kisebbre tehető, mint az előbb említett pontszám növelés hatása. Ellenkező hibaeloszlás figyelhető meg a topográfiai felmérés alapján végzett domborzatmodellek előállításakor (47. melléklet, 3. ábra). Ezeknél a teljes hibák 24%-át teszik ki átlagosan az interpolációs hatások. Tehát a domborzat szint- és idomvonalain elhelyezkedő támpontok alapján nagy megbízhatóságú modelleket lehet előállítani. A 3. tesztterületen az interpoláció pontossága jobb a GPS mérés alapján végzettnél is. A levezetett domborzatmodellek eltéréseinek maradék 76%-át, a támpontok magasságainak meghatározási hibái okozták. Ezek általában a mért pontok durva hibáiból adódtak, amelyek részben kiküszöbölhetők a bemutatott durva hiba vizsgálattal (3.2.4. fejezet).

Azonban a terepen történő szintvonalak kirajzolása a hibás pontok alapján történt, így hatásuk a digitalizált szintvonalpontokban továbbra is jelentkezett. Az 1. tesztterületen még ezeken túl szabályos hibai is terhelte a támpontokat, ami a méréskor felhasznált alappont kerethibájából adódott és hatása a teljes digitalizált támponthalmazra véletlen jellegű hibaként jelentkezett. Tehát a főiskola topográfiai felmérései alapján levezetett domborzatmodellek átlagos megbízhatósága ± 0.80 méter lett, ami megközelíti a FÖMI 1:10000 méretarányú digitális topográfiai alaptérképek adatbázisából, 2006-ban levezetett az ország teljes területét lefedő 5x5 méteres rácssűrűségű digitális domborzatmodell megbízhatóságát, amely átlagosan ± 0.70 méter (Winkler, 2006). Ennél jobb eredményeket hozott a 2009-ben készült légifelvételek automatizált térfotogrammetriai kiértékeléséből levezetett modellek pontossága, amelyek átlagos megbízhatósága ± 0.45 m-es középphibával jellemezhető. Ezt átlagosan 57%-ban befolyásolta a támpontok megbízhatóságának a hatása és 43%-ban az interpolációs hatás. Javulást eredményezhet a mért pontok darabszámának növelése és az azokat terhelő szabályos hibák kiküszöbölése, valamint az automatizált illesztésből adódó véletlen hibák csökkentése. Az utóbbi megoldása jelenti a leghosszadalmasabb műveletet, mivel csak manuális térfotogrammetriai kiértékeléssel lehet a támpontok magassági hibáit javítani, ami nagy gyakorlati jártasságot is igényel, ezért célszerűbb az előbbi javításokat alkalmazni.

Az egyes adatgyűjtési technológiákat összehasonlítottam hatékonysági szempontból is kétféle megközelítésben. Elsőként az általam végzett támpontok előállításának időigényeit vettem figyelembe a sorrend felállításához. Eszerint a térfotogrammetriai automatizált kiértékelés hatékonysága közelíti meg legjobban a légi lézerszkennelését. Azonban az előállítható támpontok sűrűsége lényegesen elmarad a LiDAR-os megoldásától. A következő helyre a kartometriai eljárás került, ami elsősorban a részben automatizálható digitalizálási lehetősége miatt előzte meg a GPS felmérést. Második megközelítésben a domborzatmodellek mai rendelkezésre állása szerint állítottam fel a sorrendet. Legrövidebb időn belül a FÖMI által, kartometriai eljárással levezetett domborzatmodellhez lehet hozzájutni, amelyet a légifelvételek beszerezhetősége követ. A harmadik és negyedik helyre a GPS mérés és a légi lézerszkennelés került. Ezek között a sorrendet csak a felmérendő terület mérete és jellege függvényében lehet eldönteni. Ugyanis kis méretű terület esetén a GPS felmérés, míg nagyobb területeknél a lézerszkennelés nyújthat jobb megoldást.

Az adatgyűjtés költségigényének szempontjából a legolcsóbb megoldást FÖMI-től megvásárolható digitális domborzatmodell nyújtja. A további sorrend felállításában nagy

szerepet játszik a felméréndő terület mérete. Ugyanis nagy területeknél a rendelkezésre álló légifelvételek megvásárlása és automatizált kiértékelése kisebb költségeket von maga után, mint a terepi adatgyűjtés. Kis terület esetében viszont a GPS felmérés kerül a második helyre. Az viszont egyértelmű, hogy a légi lézerszkennelés a legdrágább adatgyűjtési technológia, mivel végrehajtásához egy külföldi tulajdonú műszerrel új repülést kell végezni.

Végül felsoroltam néhány alkalmazási területét a digitális domborzat- és felszínmodelleknek, annak bemutatására, hogy felhasználásuk mennyire sokoldalú lehet. Ezek alapján látható, hogy milyen meghatározó szerepet töltenek be az árvízvédelemben, a mezőgazdaságban, a régészetben, a híradástechnikában, a mérnöki létesítmények tervezésében és a katonai tevékenységekben.

A dolgozat alapján további vizsgálatok végezhetők más adatgyűjtési technológiákból származó támpontok és az azokból levezethető domborzatmodellek bevonásával. Ezek lehetnek műholdfelvételek térkiértékeléséből, radar letapogatásból, vagy földi lézerszkennelésből származó adatok is. Továbbá más szoftverekbe épített interpolációs technikák alkalmazásával az interpoláció vizsgálat fejezet kiegészíthető. Ezeken túl vizsgálható, hogy a támpontok magasságainak felsorolt javításaival, milyen mértékben nő a domborzatmodelleket jellemző megbízhatóság. Valamint az egyes hatékonyságot növelő javaslatok alkalmazása milyen hatást gyakorol a modellek megbízhatóságára.

Köszönetnyilvánítás:

A dolgozatom témájának kidolgozásában a konzulensem Dr. Mélykúti Gábor, valamint Dr. Engler Péter, Dr. Jancsó Tamás, Dr. Busics György, Tarsoly Péter, Farkas Róbert, Nagy Gábor, Korik Péter tanárain tanácsaira és segítségére számíhattam, amit ezúton is köszönök nekik.

5. Irodalomjegyzék

1. Barsi Árpád, Detrekői Ákos, Lovas Tamás, Tóvári Dániel 2003.: Adatgyűjtés légi lézerletapogatással. GEODÉZIA ÉS KARTOGRÁFIA LV:(7) pp. 10-17.
2. Bódis Katalin 2008.: Digitális domborzatmodellek és alkalmazási lehetőségeik az árvízi kockázatkezelésben. Doktori (Ph.D.) értekezés
3. Dr. Engler Péter, Jancsó Tamás 2006.: Digitális domborzatmodellek ellenőrzési módszerei.
4. Hidvégi Máté 2008.: Valódi 3D-s alapszoftver fejlesztése. Diplomamunka.
5. John P. Wilson, John C. Gallant 2000.: Digital Terrain Analysis.
6. Juha Oksanen 2006.: Digital Elevation Model Error in Terrain Analysis.
7. K. Kraus, C. Briese, M. Attwenger, N. Pfeifer 2006.: Quality Measures for Digital Terrain Models.
8. Koós Tamás 2008.: A harcvezetési rendszerekben alkalmazható digitális magasságmodellek és azok jellemzői. Hadmérnök III. évfolyam 4. szám, 129-138.
9. Dr. Márkus Béla 2004.: Térinformatika jegyzet.
10. Dr. Mélykúti Gábor 2007.: Fotogrammetria jegyzet.
11. Dr. Mélykúti Gábor 2007.: Topográfiai jegyzet.
12. Michael F. Hutchinson 1998.: Interpolation of Rainfall Data with Thin Plate Smoothing Splines – Part II: Analysis of Topographic Dependence.
13. Siristye Ferenc, Zboray Zoltán 2004.: Digitális domborzatmodellek készítése katonai térképészeti célokra.
14. Siristye Ferenc, Zboray Zoltán 2004.: Nagy méretarányú légifelvételekből előállított digitális domborzatmodellek alkalmazása néhány hazai példán.
15. Winkler Péter 2006.: Nagyfelbontású digitális domborzatmodell az ország teljes területére. http://fish.fomi.hu/termekkhonlap/adathaz/termek/domborzat/DDM_5_reszletek.pdf.
16. W. Karel, N. Pfeifer, C. Briese 2007.: DTM Quality Assessment.
17. W. Karel, K. Kraus 2006.: Quality Parameters of Digital Terrain Models.

6. Mellékletek

Mellékletek jegyzéke:

1. GRID adatszerkezet ábrázolása
2. TIN adatszerkezet ábrázolása
3. Raszter adatszerkezet ábrázolása
4. LiDAR felmérés mellékletei
5. Szkennervizsgálathoz felhasznált örkeresztek számozása
6. Örkeresztek alapján végzett szkennervizsgálat eredményei
7. Alaplapok transzformációs vizsgálata
8. Topográfiai felmérés digitalizált pontjainak durva hiba vizsgálata
9. Digitalizált mért pontok vázlata
10. Digitalizált szintvonalpontok vázlata
11. Légiháromszögeléshez felhasznált illesztőpontok képkivágatai és koordinátái
12. Légiháromszögelési vázlat
13. A légiháromszögelés eredményei
14. Automatizált térfotogrammetriai kiértékelés pontjainak vázlata
15. Tesztterületek vázlata
16. GPS mérés meghatározási vázlata
17. GPS mérés pontvázlata
18. Tesztterületekre eső támpontok száma és az átlagos távolságaik
19. Tesztterület 1 ábrázolása 1 és 10 méteres rács sűrűség esetén
20. Tesztterület 2 ábrázolása 1 és 10 méteres rács sűrűség esetén
21. Tesztterület 3 ábrázolása 1 és 10 méteres rács sűrűség esetén
22. Tesztterületek lejtési hisztogramjai 1 és 10 méteres rács sűrűség esetén
23. A tesztterületek lejtésére vonatkozó értékek és a támpontok megbízhatósági vizsgálatához használt hossz-szelvény ábrázolása
24. Hossz-szelvény alapján végzett megbízhatósági vizsgálat eredményei
25. Hossz-szelvény alapján végzett megbízhatósági vizsgálat eredményei
26. Tesztterületekre eső támpontok megbízhatósági vizsgálata
27. Tesztterületekre eső támpontok megbízhatósági vizsgálata
28. Tesztterületekre eső támpontok megbízhatósági vizsgálata
29. Tesztterületekre eső támpontok megbízhatósági vizsgálata
30. Tesztterületekre eső támpontok megbízhatósági vizsgálata
31. Tesztterületekre eső támpontok megbízhatósági vizsgálata
32. Támpontokat terhelő hibák ábrázolása diagramokon
33. Interpolációs technikák párbeszédpaneljainak képernyőképei

34. Interpolációs technikák párbeszédpaneljainak képernyőképei
35. Interpoláció vizsgálatához használt modell képernyőképe
36. Interpoláció vizsgálat eredményei a GPS mérés támpontjainak sűrűségében
37. Interpoláció vizsgálat eredményei a térfotogrammetriai kiértékelés támpontjainak sűrűségében
38. Interpoláció vizsgálat eredményei a topográfiai felmérés digitalizált támpontjainak sűrűségében
39. Interpolációból adódó hibák összefüggései az egyes hibahatásokkal
40. Támpontok eloszlásértékeinek meghatározása
41. Interpolációból adódó hibák ábrázolása
42. A levezetett domborzatmodellek eltérései a LiDAR10-től
43. A levezetett domborzatmodellek eltérései a LiDAR10-től
44. Támpontok hibáinak hatása a levezetett domborzatmodellek megbízhatóságára
45. Támpontok hibáinak hatása a levezetett domborzatmodellek megbízhatóságára
46. Támpontok hibáinak hatása a levezetett domborzatmodellek megbízhatóságára
47. DDM10 eltéréseit okozó hibahatások eloszlásainak ábrázolása diagramokon

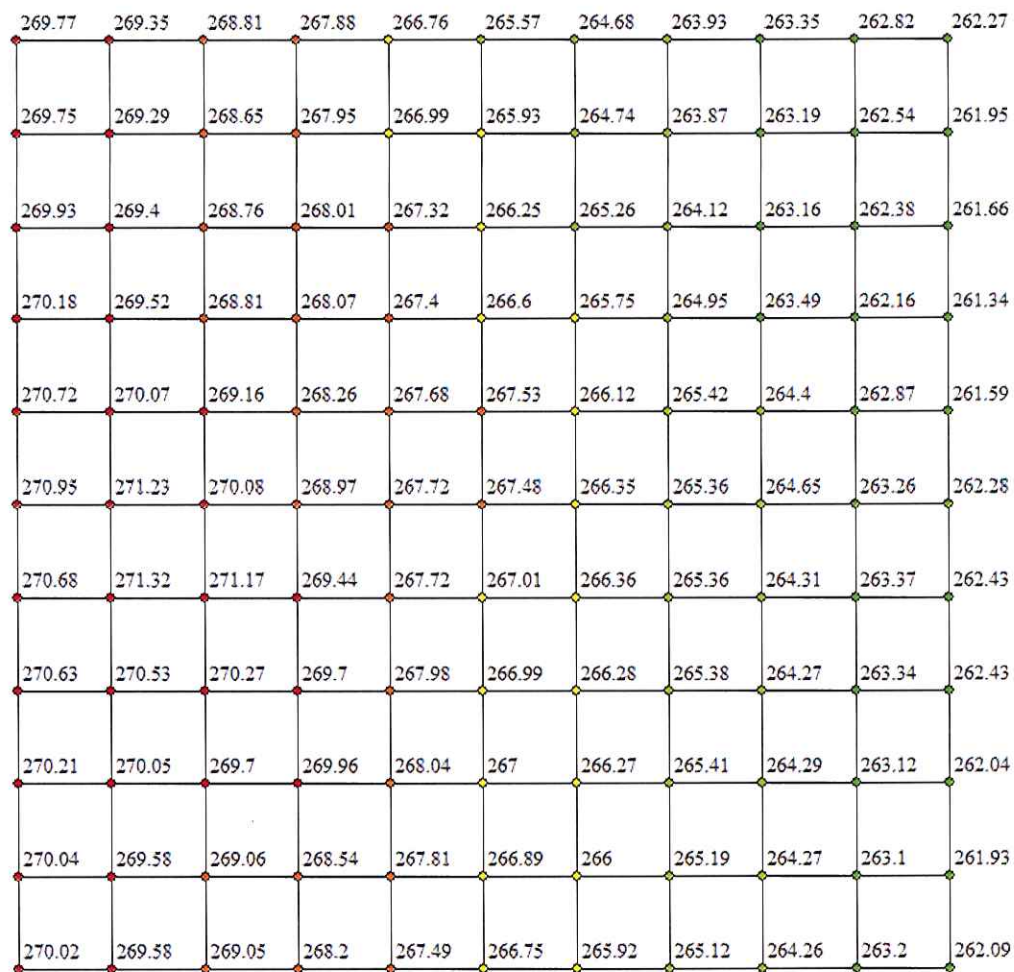
Digitális mellékletek:

1. Légi lézerszkennelés eredményéül kapott 1 méteres rácssűrűségű DDM - *\Mérések\LiDAR\LiDAR1.asc*: megnyitása jegyzetömb programmal lehetséges.
2. LiDAR1 shape formátumban - *\Mérések\LiDAR\SHp\LiDAR1.shp*: megnyitása ArcMap 9.3-as verziójával lehetséges.
3. LiDAR1 tesztterületekre vonatkozó kivágata, raszteres adatformátumban - *\Mérések\LiDAR\RaszterDDM\LiDAR1teszt.aux*: megnyitása ArcMap 9.3-as verziójával lehetséges.
4. Légi lézerszkennelés DDM10 - *\Mérések\LiDAR\LiDAR10.asc*: megnyitása jegyzetömb programmal lehetséges.
5. LiDAR10 shape formátumban - *\Mérések\LiDAR\SHp\LiDAR10.shp*: megnyitása ArcMap 9.3-as verziójával lehetséges.
6. LiDAR10 tesztterületekre vonatkozó kivágata, raszteres adatformátumban - *\Mérések\LiDAR\RaszterDDM\LiDAR10teszt.aux*: megnyitása ArcMap 9.3-as verziójával lehetséges.
7. Légi lézerszkennelés projekt leírása - *\Mérések\LiDAR\Projekt leírás.pdf*: megnyitása Acrobat Reader programmal lehetséges. Angol nyelvű TopoSys által készített leírás.
8. Topográfiai felmérés szkennelt alaplapjai - *\Mérések\Topográfia\Alaplapok\Alaplap "sorszám".tif*: megnyitásuk Windows képmegjelenítővel is lehetséges.
9. Topográfiai felmérés szkennelt pontleátaí - *\Mérések\Topográfia\Pontleátaí\pausz "sorszám".tif*: megnyitásuk Windows képmegjelenítővel is lehetséges.

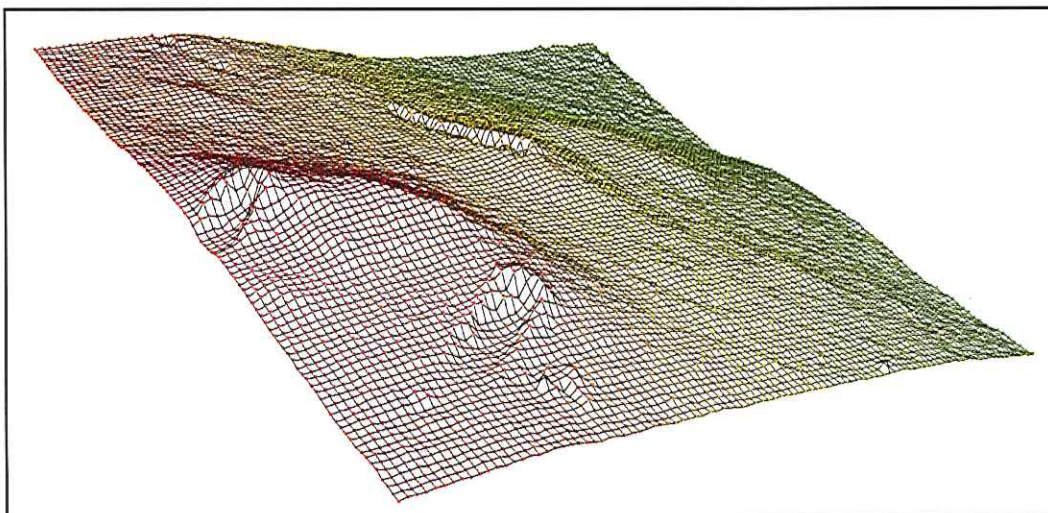
10. Topográfiai felmérés digitalizált szintvonalpontjai shape formátumban - *\\Mérések\Topográfia\Digitalizált_szintvonal_pont.shp*: megnyitása ArcMap 9.3-as verziójával lehetséges.
11. Topográfiai felmérés digitalizált mért pontjai shape formátumban - *\\Mérések\Topográfia\Digitalizált_Topográfia_Mert_pontok.shp*: megnyitása ArcMap 9.3-as verziójával lehetséges.
12. Topográfiai felmérés digitalizált szintvonalpontjainak koordináta jegyzéke - *\\Mérések\Topográfia\Koordináta_jegyzék_szintvonalpontok.xls*: megnyitása Microsoft Excel 97-es verziójától lehetséges.
13. Topográfiai felmérés mért pontjainak koordináta jegyzéke - *\\Mérések\Topográfia\Koordináta_jegyzék_mért_pontok.xls*: megnyitása Microsoft Excel 97-es verziójától lehetséges.
14. Iszkai mérőgyakorlat területéről készült 2009-es légifelvételek - *\\Mérések\Légifényképezés\Légifelvételek\"sorszám\"_If_2009.tif*: megnyitásuk LPS programmal lehetséges.
15. Légiháromszögelés illesztőpontjainak koordináta jegyzéke - *\\Mérések\Légifényképezés\Légiháromszögelési_alapadatok\illp.txt*: megnyitása jegyzetomb programmal lehetséges.
16. Légiháromszögelés illesztőpontjainak képkivágatai - *\\Mérések\Légifényképezés\Légiháromszögelési_alapadatok\ Iszka és környéke_ill_pontok_2010.doc*: megnyitása Microsoft Excel 97-es verziójától lehetséges.
17. Légiháromszögelés számítási jegyzőkönyve - *\\Mérések\Légifényképezés\Légiháromszögelés számítási jegyzőkönyv.txt*: megnyitása jegyzetomb programmal lehetséges.
18. Térfotogrammetriai automatizált kiértékelés eredményei - *\\Mérések\Légifényképezés\dtm_ascii1081_1080.asc*: megnyitása jegyzetomb programmal lehetséges.
19. Térfotogrammetriai automatizált kiértékelés eredményének jelentése - *\\Mérések\Légifényképezés\dtm_ascii1081_1080.rpt*: megnyitása jegyzetomb programmal lehetséges.
20. Térfotogrammetriai automatizált kiértékelés eredményeinek koordináta jegyzéke - *\\Mérések\Légifényképezés\Koordináta_jegyzék (Meghatározott pontok).xlsx*: megnyitása Microsoft Excel 2007-es verziójával lehetséges.
21. Térfotogrammetriai automatizált kiértékelés eredményei shape formátumban - *\\Mérések\Légifényképezés\SHp\dtm_1081_1080_2009.shp*: megnyitása ArcMap 9.3-as verziójával lehetséges.
22. Az iszkai mérőgyakorlat területére vonatkozó True Ortofotó, a 2009 felvételek alapján - *\\Mérések\Légifényképezés\Ortofotó\ortho2009.tif*: megnyitása ArcMap 9.3-as verziójával lehetséges.
23. GPS felmérés nyers mérési eredményei - *\\Mérések\GPS\Nyers_meres\04542440.**: Leica műszer adatformátuma, megnyitása LGO projektbe beolvasva lehetséges.
24. GPS felmérés VirtuálisRINEX adatai - *\\Mérések\GPS\VRS\far244i.**: RINEX adatformátum, megnyitása LGO projektbe beolvasva lehetséges.

25. GPS felmérés pontjainak WGS84 rendszerbeli koordinátái - \Mérések\GPS\Koordináta jegyzékek\WGS84_XYZ.txt: megnyitása jegyzetömb programmal lehetséges.
26. GPS felmérés pontjainak WGS84 rendszerbeli koordinátái és a meghatározásuk középpontjai - \Mérések\GPS\Koordináta jegyzékek\WGS84_XYZ_std.txt: megnyitása jegyzetömb programmal lehetséges.
27. EHT transzformáció részletes jegyzőkönyve - \Mérések\GPS\Koordináta jegyzékek\Részletes EHT transzformáció.txt: megnyitása jegyzetömb programmal.
28. GPS felmérés pontjainak EOVS rendszerbeli koordinátái - \Mérések\GPS\Koordináta jegyzékek\EOV_XYZ.txt: megnyitása jegyzetömb programmal.
29. GPS felmérés pontjainak egyesített koordináta jegyzéke - \Mérések\GPS\Koordináta jegyzékek\Koordináta jegyzék.xls: megnyitása Microsoft Excel 97-es verziójától lehetséges.
30. GPS felmérés pontjai shape formátumban - \Mérések\GPS\SHP\GPS_Mért_pontok.shp: megnyitása az ArcMap 9.3-as verziójával lehetséges.
31. Leica ScanStation C10 szkennelés vizsgálata örkészletek távolságai alapján - \Szkennelésvizsgálat\Örkészletek távolságvizsgálata.xls: megnyitása Microsoft Excel 97-es verziójától lehetséges.
32. Leica ScanStation C10 szkennelés vizsgálata digitalizált örkészletek alapján - \Szkennelésvizsgálat\Digitalizált örkészletek vizsgálata.xls: megnyitása Microsoft Excel 97-es verziójától lehetséges.
33. Interpolációvizsgálathoz felhasznált LiDAR1 pontok az adott adatgyűjtési technológia támpontjainak sűrűségében - pl.: \Interpoláció vizsgálat\GPS mért pontjaiban\LIDAR1_GPS.shp: megnyitása ArcMap 9.3-as verziójával lehetséges.
34. Interpolációvizsgálathoz felhasznált LiDAR1 pontok alapján, különböző interpolációs technikával, teszterületenként levezetett 10 méteres rácssűrűségű domborzatmodellek - pl.: \Interpoláció vizsgálat\GPS mért pontjaiban\Teszterület 1\Kriging\KRIG_DDM10.aux: megnyitása ArcMap 9.3-as verziójával.
35. A LiDAR1 pontjai alapján levezetett modellek és a LiDAR10 közötti eltérések - pl.: \Interpoláció vizsgálat\GPS mért pontjaiban\Teszterület 1\Kriging\KRIG-LIDAR.aux: megnyitása ArcMap 9.3-as verziójával lehetséges.
36. Az egyes adatgyűjtési technológiák támpontjai alapján levezetett DDM10-ek, az egyes teszterületekre vonatkozóan - pl.: \DDM10_Teszterületek\GPS\Teszterület 1\Kriging\KRIG_DDM10.aux: megnyitása ArcMap 9.3-as verziójával.
37. Az egyes adatgyűjtési technológiák támpontjai alapján levezetett DDM10-ek LiDAR10-től vett eltérései, az egyes teszterületekre vonatkozóan - pl.: \DDM10_Teszterületek\GPS\Teszterület 1\Kriging\KRIG-LIDAR.aux: megnyitása ArcMap 9.3-as verziójával lehetséges.
38. Támpontok hibáinak hatása a levezetett DDM10-ekre, amelyek a DDM10 LiDAR10-től vett eltérései és az interpolációs hatások különbségeként jöttek létre, az egyes teszterületekre vonatkozóan - pl.: \Támpontok_hibahatása_a_DDM10-ekre\GPS\Teszterület 1\nnb.aux: megnyitása ArcMap 9.3-as verziójával.

1. melléklet:



1. ábra: GRID (felülnézet)

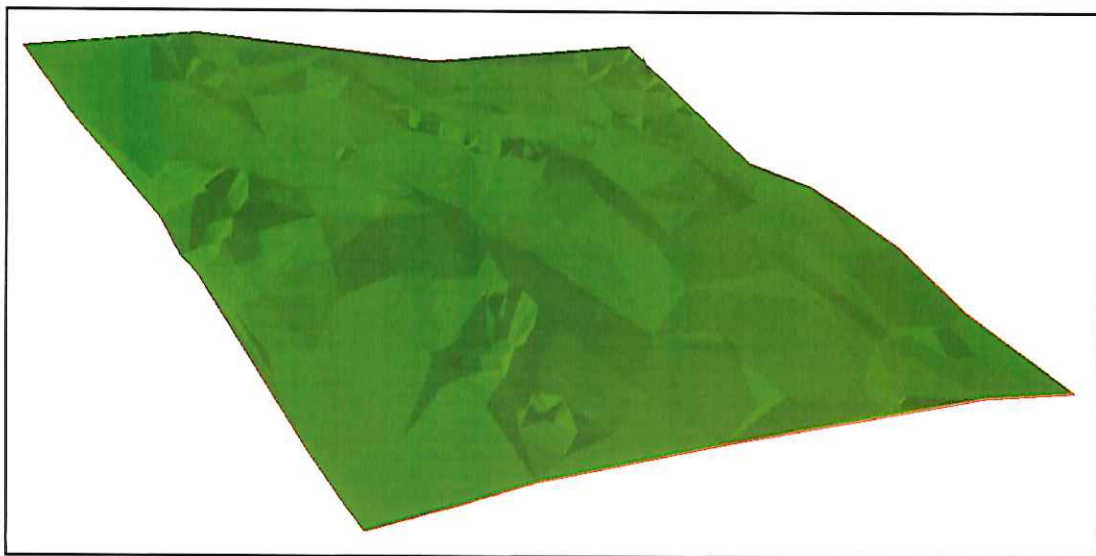


2. ábra: GRID (perspektív megjelenítés)

2. melléklet:

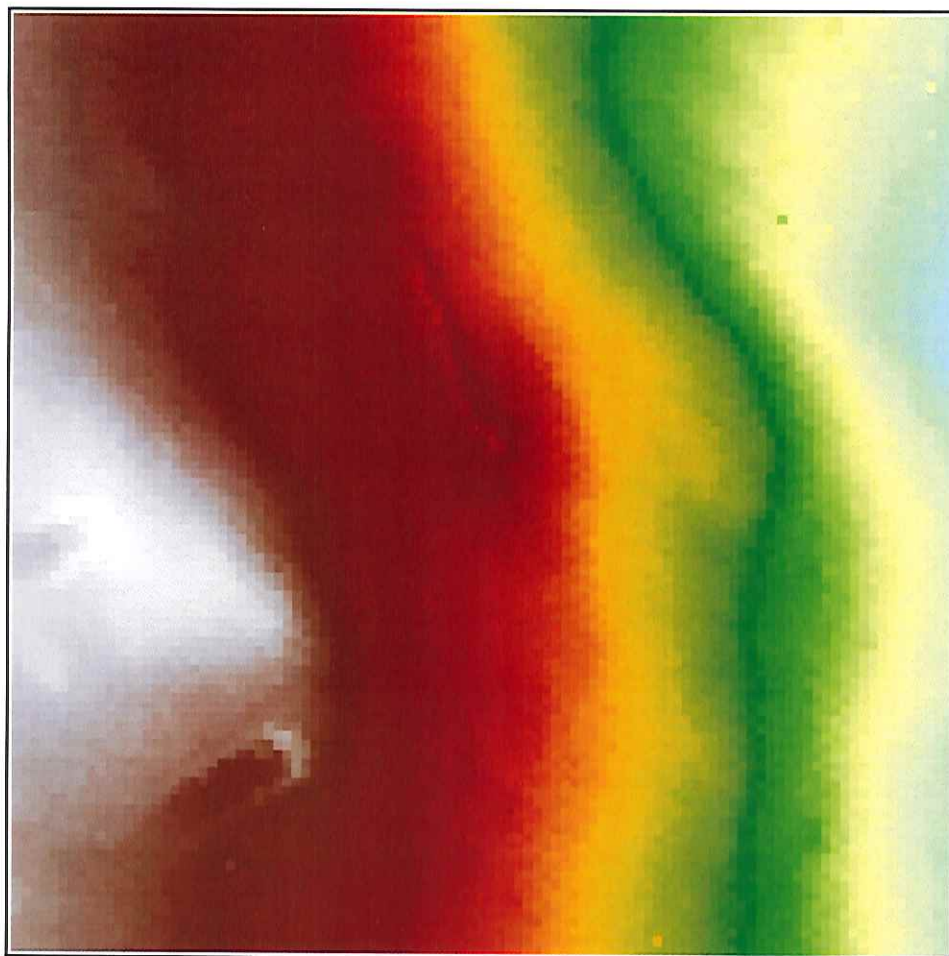


1. ábra: TIN (felülnézet)



2. ábra: TIN (perspektív megjelenítés)

3. melléklet:

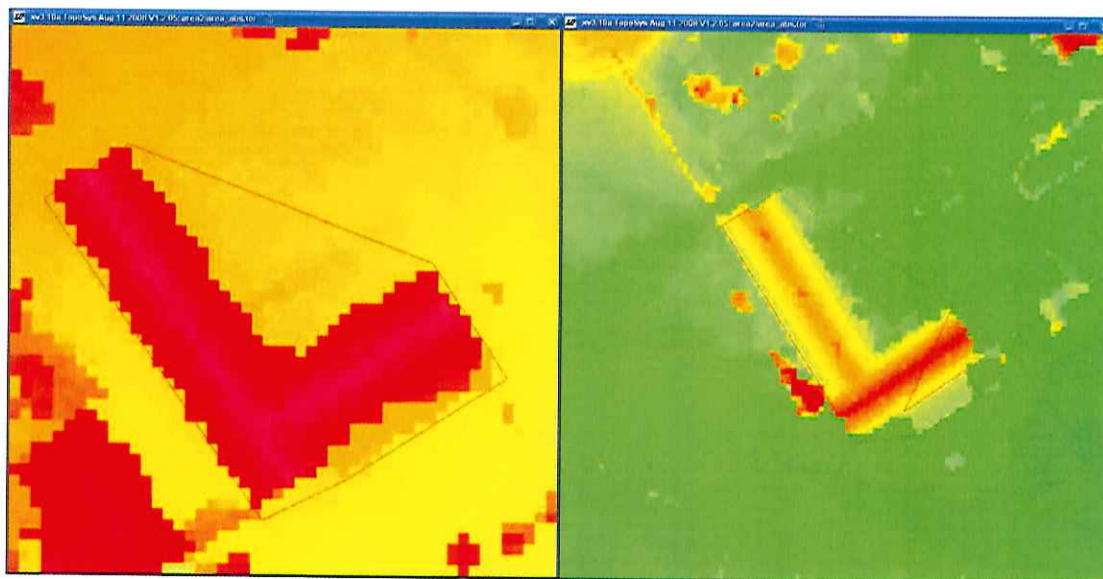


1. ábra: Raszter (felülnézet)



2. ábra: Raszter (perspektív megjelenítés)

4. melléklet:



1. ábra: Csór – Iszkaszentgyörgy terület,
1. épület

2. ábra: Csór – Iszkaszentgyörgy terület,
2. épület

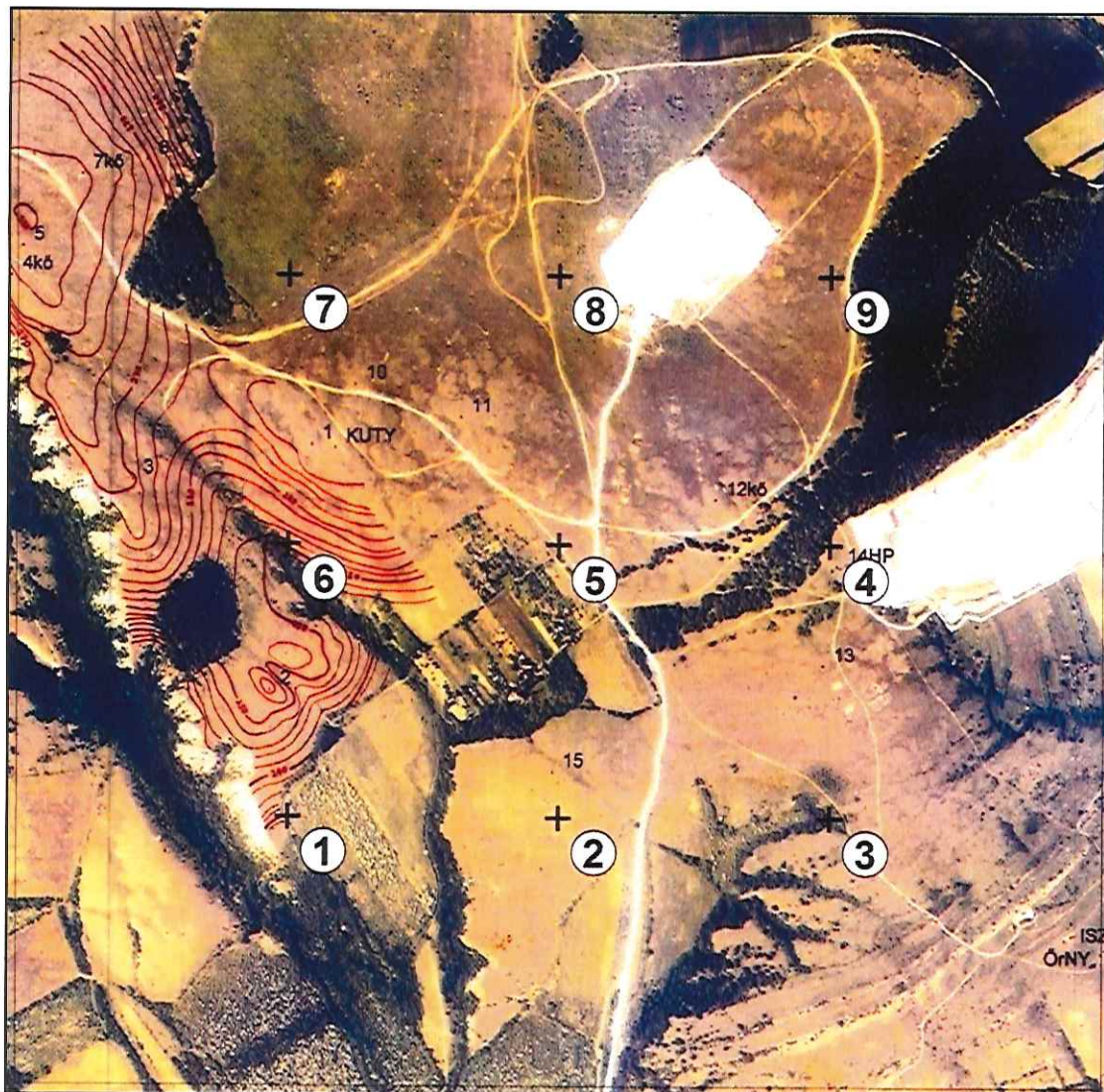
Referencia pontok				LiDAR1 eredmények			Eltérések	
Pont száma	Y	X	M	Y	X	M	ΔM	ΔM^2
1	588576.5	210491.6	285.99	588576.5	210491.6	286.04	0.05	0.0025
2	589162.5	210638.8	275.67	589162.5	210638.8	275.72	0.05	0.0025
3	591008.5	209489.8	241.40	591008.5	209489.8	241.36	-0.04	0.0016
4	592696.6	209701.8	143.35	592696.6	209701.8	143.33	-0.02	0.0004
Átlag=							0.01	
Átlagos négyzetes középhiba=							± 0.03	

3. ábra: TopoSys minőségvizsgálat

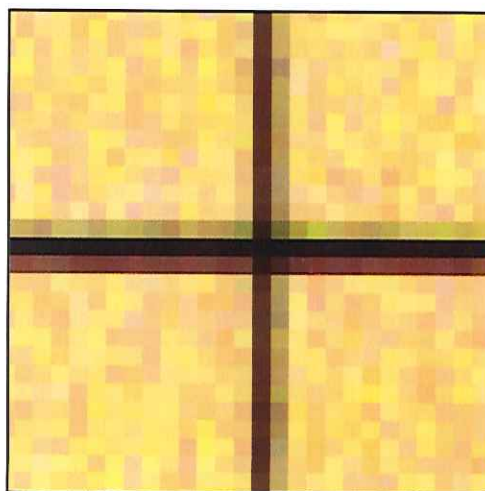
Adott pontok				LiDAR1 eredmény			Eltérések	
Pont száma	Y	X	M	Y	X	M	ΔM	ΔM^2
5	590010.2	210052.8	280.10	590010	210053	280.12	0.02	0.0004
10	590623.1	209798.9	264.10	590623	209799	264.13	0.03	0.0009
11	590818.2	209738.1	258.90	590818	209738	258.89	-0.01	0.0001
104	590845.2	209681.3	256.93	590845	209681	256.95	0.02	0.0004
106	590588.4	209681.2	273.48	590588	209681	273.51	0.03	0.0010
108	590099.2	210032.6	278.05	590099	210033	278.16	0.11	0.0121
Átlag=							0.03	
Átlagos négyzetes középhiba=							± 0.04	

4. ábra: Általam végzett minőségvizsgálat

5. melléklet:



1. ábra: Őrkeresztek sorszámozása



2. ábra: Őrkereszt nagyítás

6. melléklet:

Alaplap 1										
Képkordináták			Távolságok							
Őrkereszt sorszáma	X	Y	Vízszintes				Függőleges			
				Pixel	Ellenőrzés	Terepi		Pixel	Ellenőrzés	Terepi
1	1267	2883	1-2	786.00		499.11	1-6	788.00		500.38
2	2053	2882	2-3	786.00		499.11	2-5	788.00		500.38
3	2839	2880	4-5	786.00		499.11	3-4	788.00		500.38
4	2837	2092	5-6	786.00		499.11	4-9	787.00		499.75
5	2051	2094	7-8	786.00		499.11	5-8	787.00		499.75
6	1265	2095	8-9	786.00		499.11	6-7	787.00		499.75
7	1263	1308	1-3	1572.00	1572.00	998.22	1-7	1575.01	1575.01	1000.13
8	2049	1307	6-4	1572.00	1572.00	998.22	2-8	1575.01	1575.01	1000.13
9	2835	1305	7-9	1572.00	1572.00	998.22	3-9	1575.01	1575.01	1000.13

1. ábra: 2009. évi alaplap őrkeresztjei alapján számított távolságok

Alaplap 7										
Képkordináták			Távolságok							
Őrkereszt sorszáma	X	Y	Vízszintes				Függőleges			
				Pixel	Ellenőrzés	Terepi		Pixel	Ellenőrzés	Terepi
1	2235	2800	1-2	787.00		499.75	1-6	787.00		499.75
2	3022	2802	2-3	787.00		499.75	2-5	787.00		499.75
3	3809	2803	4-5	787.00		499.75	3-4	787.00		499.75
4	3810	2016	5-6	787.00		499.75	4-9	788.00		500.38
5	3023	2015	7-8	787.00		499.75	5-8	788.00		500.38
6	2236	2013	8-9	787.00		499.75	6-7	788.00		500.38
7	2237	1225	1-3	1574.00	1574.00	999.49	1-7	1575.00	1575.00	1000.13
8	3024	1227	6-4	1574.00	1574.00	999.49	2-8	1575.00	1575.00	1000.13
9	3811	1228	7-9	1574.00	1574.00	999.49	3-9	1575.00	1575.00	1000.13

2. ábra: 2008. évi alaplap őrkeresztjei alapján számított távolságok

7. melléklet:

Affin transzformáció utáni vizsgálat							
Alaplap 1							
Őrkereszt sorszama	Mért		Adott		Eltérés		
	Y	X	Y	X	ΔY	ΔX	ΔYX
1	590500.000	209000.368	590500	209000	0.000	-0.368	0.368
2	590999.857	208999.623	591000	209000	0.143	0.377	0.403
3	591500.050	209000.211	591500	209000	-0.050	-0.211	0.217
4	591499.565	209500.648	591500	209500	0.435	-0.648	0.780
5	591000.287	209500.194	591000	209500	-0.287	-0.194	0.346
6	590500.058	209500.704	590500	209500	-0.058	-0.704	0.706
7	590500.073	210000.671	590500	210000	-0.073	-0.671	0.675
8	590999.514	209999.556	591000	210000	0.486	0.444	0.658
9	591499.715	210000.396	591500	210000	0.285	-0.396	0.488
Átlagos négyzetes középhiba:					± 0.26	± 0.48	± 0.55

1. ábra: Affin transzformáció

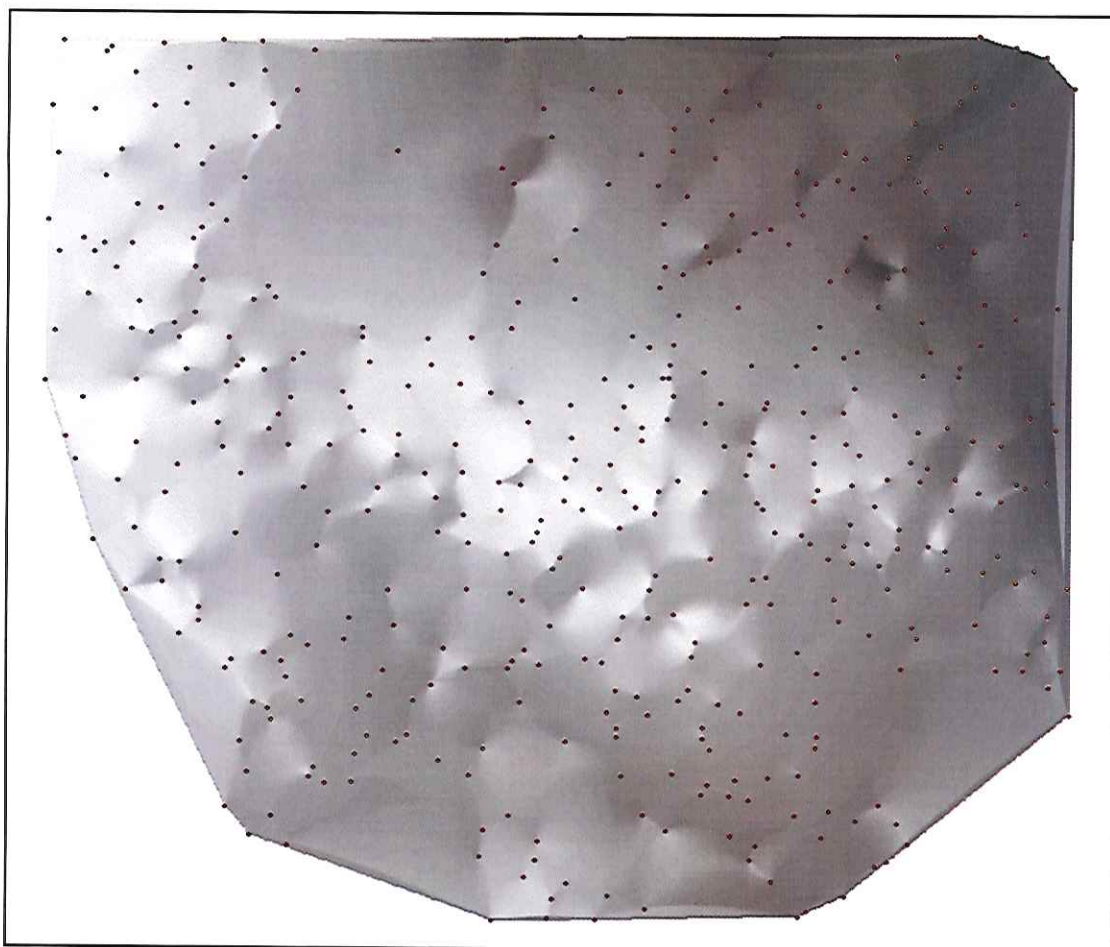
Másodfokú polinomos transzformáció utáni vizsgálat							
Alaplap 1							
Őrkereszt sorszama	Mért		Adott		Eltérés		
	Y	X	Y	X	ΔY	ΔX	ΔYX
2	590999.686	209000.476	591000	209000	0.314	-0.476	0.570
4	591500.152	209499.674	591500	209500	-0.152	0.292	0.329
6	590500.191	209499.708	590500	209500	-0.191	0.326	0.378
8	590999.735	210000.121	591000	210000	0.265	-0.121	0.291
Átlagos négyzetes középhiba:					± 0.24	± 0.33	± 0.41

2. ábra: Másodfokú polinomos transzformáció

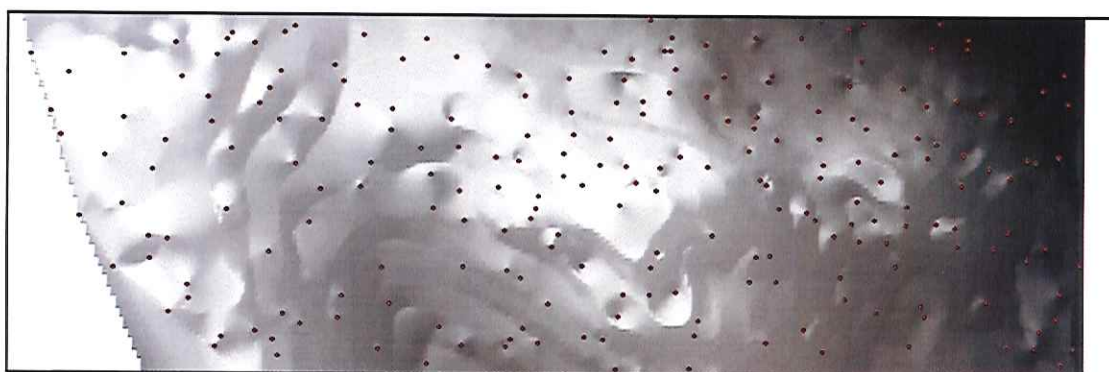
Alaplapok				Pontoleáták							
Őrkereszt								Alappontok			
ΔY	ΔX	ΔYX	ΔM	ΔY	ΔX	ΔYX	ΔM	ΔY	ΔX	ΔYX	ΔM
± 0.23	± 0.32	± 0.40	± 0.05	± 1.01	± 0.85	± 1.33	± 0.16	± 1.20	± 1.25	± 1.73	± 0.21

3. ábra: Affin transzformáció utáni digitalizálás eredményeinek, összesített eltérései

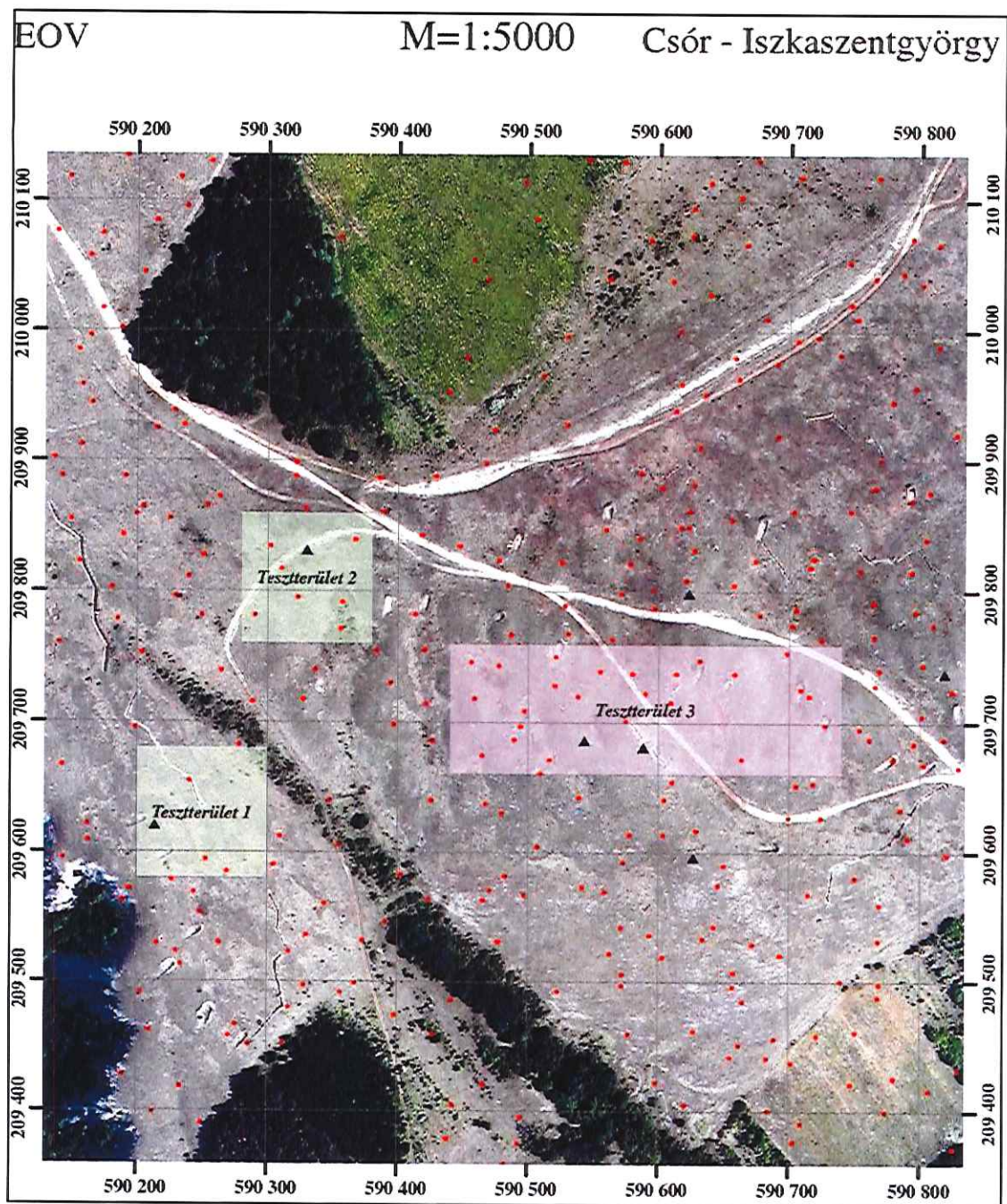
8. melléklet:



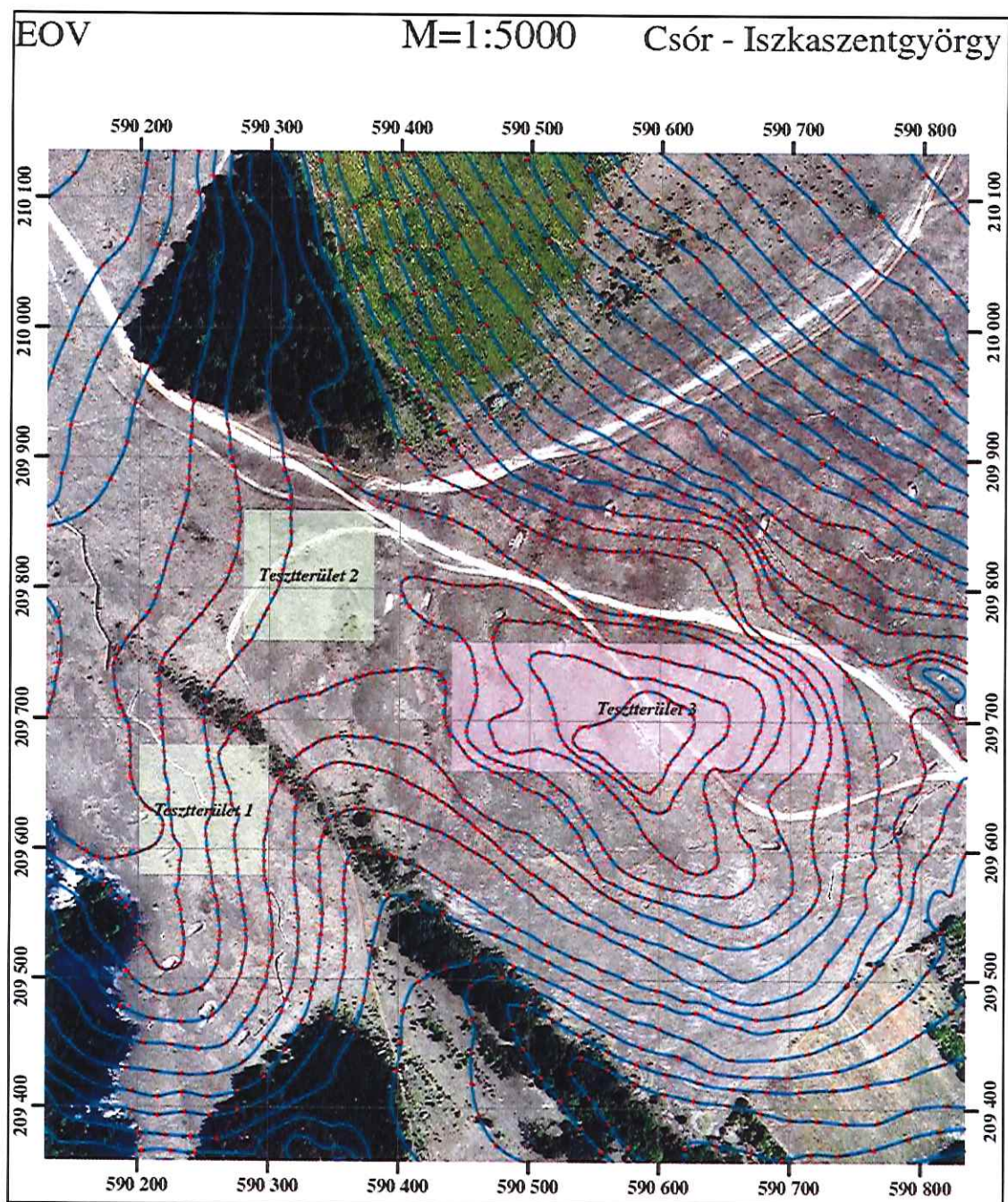
1. ábra: Digitalizált topográfiai mért pontok durva hiba vizsgálata
(Mért pontokból előállított domborzatmodell alapján)



2. ábra: Digitalizált topográfiai mért pontok durva hiba vizsgálata
(Szintvonal és mért pontokból előállított domborzatmodell alapján)



1. ábra: Pontvázlat a pontoleáták digitalizált pontjairól



1. ábra: Pontvázlat az alaplapok digitalizált szintvonalpontjairól

11. melléklet:



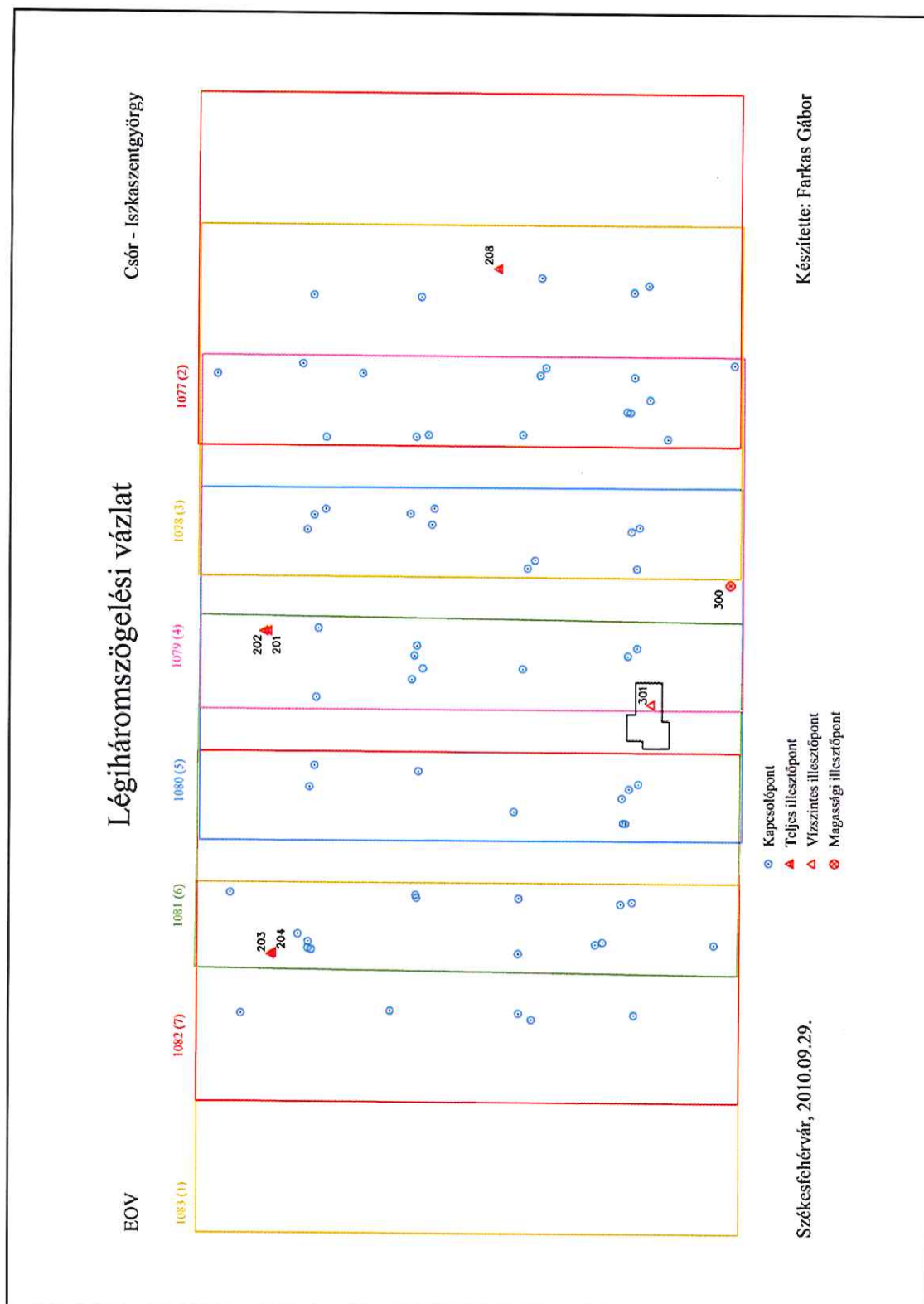
1. ábra: 201-es és 202-es illesztőpontok kivágata



2. ábra: 301-es illesztőpont kivágata

Pont száma	Y	X	M
201	591412.716	214062.886	140.427
202	591411.655	214107.506	135.755
203	587710.709	214025.377	228.698
204	587727.877	214002.905	227.190
208	595566.697	211441.288	122.713
300	591943.400	208782.500	261.700
301	590585.900	209680.600	273.500

3. ábra: Illesztőpontok koordináta jegyzéke



13. melléklet:

Külső tájékozási adatok						
Kép sorszáma	Y [m]	X [m]	M [m]	Ω [gon]	Φ [gon]	K [gon]
1083 (1)	586509.571	211773.622	6106.697	-0.8154	-0.2546	-0.0382
1082 (7)	588021.732	211775.462	6116.492	-0.5633	-0.0227	-0.107
1081 (6)	589529.866	211771.600	6094.105	-0.4844	-0.0328	-0.0651
1080 (5)	591034.618	211746.424	6109.509	-0.4737	-0.1076	-0.0137
1079 (4)	592543.468	211738.242	6077.384	-0.4299	-0.0222	-0.0771
1078 (3)	594049.983	211761.308	6081.795	-0.5322	-0.2059	-0.1257
1077 (2)	595559.739	211778.625	6091.843	-0.2936	-0.0529	-0.08

1. ábra: Meghatározott külső tájékozási paraméterek

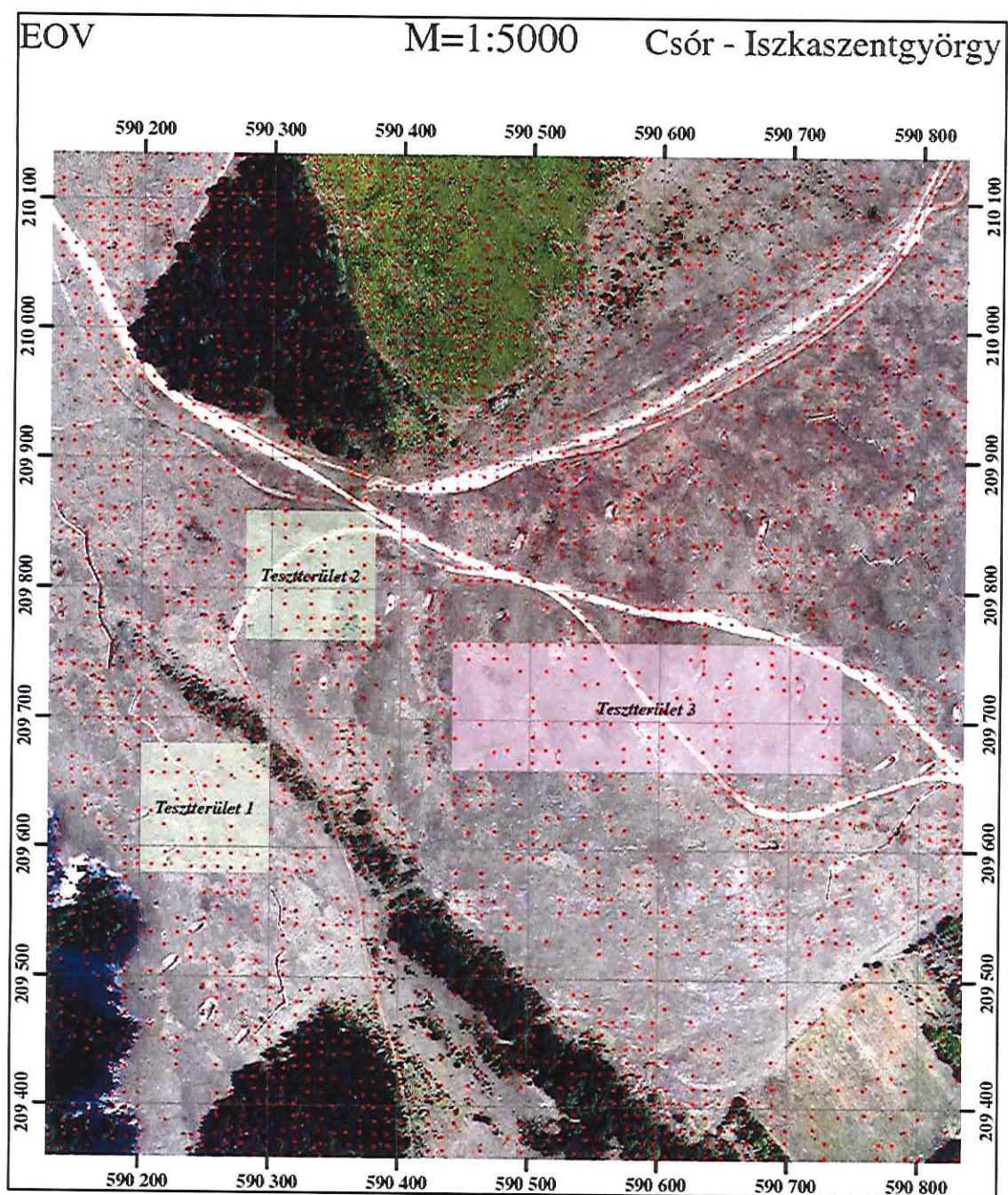
Illesztőpontok koordinátái				Maradék ellentmondások a légiháromszögelés után		
Pont száma	Y [m]	X [m]	M [m]	ΔY [m]	ΔX [m]	ΔM [m]
201	591412.716	214062.886	140.427	-0.222	-0.092	0.258
202	591411.655	214107.506	135.755	0.289	-0.165	0.399
203	587710.709	214025.377	228.698	0.004	-0.101	0.157
204	587727.877	214002.905	227.190	-0.120	-0.416	0.907
208	595566.697	211441.288	122.713	0.010	-0.023	0.201
301	591943.400	208782.500	261.700	-0.070	0.229	
300	590585.900	209680.600	273.500			0.235
Eltérések átlaga:				-0.018	-0.0226	0.1543
Átlagos négyzetes középhiba:				± 0.159	± 0.213	± 0.441

2. ábra: Az illesztőpontokban számított maradék ellentmondások

Illesztőpontok maradék ellentmondásai a légiháromszögelés után, képenként					
Kép sorszáma	Pont száma	V _x	V _y	Átlagos négyzetes középhiba	
				m _x	m _y
1083 (1)	203	0.081	0.279	± 0.150	± 0.532
	204	-0.196	-0.699		
1082 (7)	203	-0.035	-0.041	± 0.335	± 0.201
	204	0.472	0.281		
1081 (6)	201	0.859	0.259	± 0.831	± 0.550
	202	-1.138	-0.807		
	301	0.204	0.437		
1080 (5)	201	0.661	-0.073	± 0.581	± 0.476
	202	-0.929	0.082		
	301	0.196	0.875		
	300	-0.105	-0.358		
1079 (4)	201	0.497	-0.26	± 0.447	± 0.453
	202	-0.589	0.666		
	300	0.068	-0.323		
1078 (3)	208	0.115	0.189	± 0.115	± 0.189
1077 (2)	208	-0.029	0.001	± 0.029	± 0.001

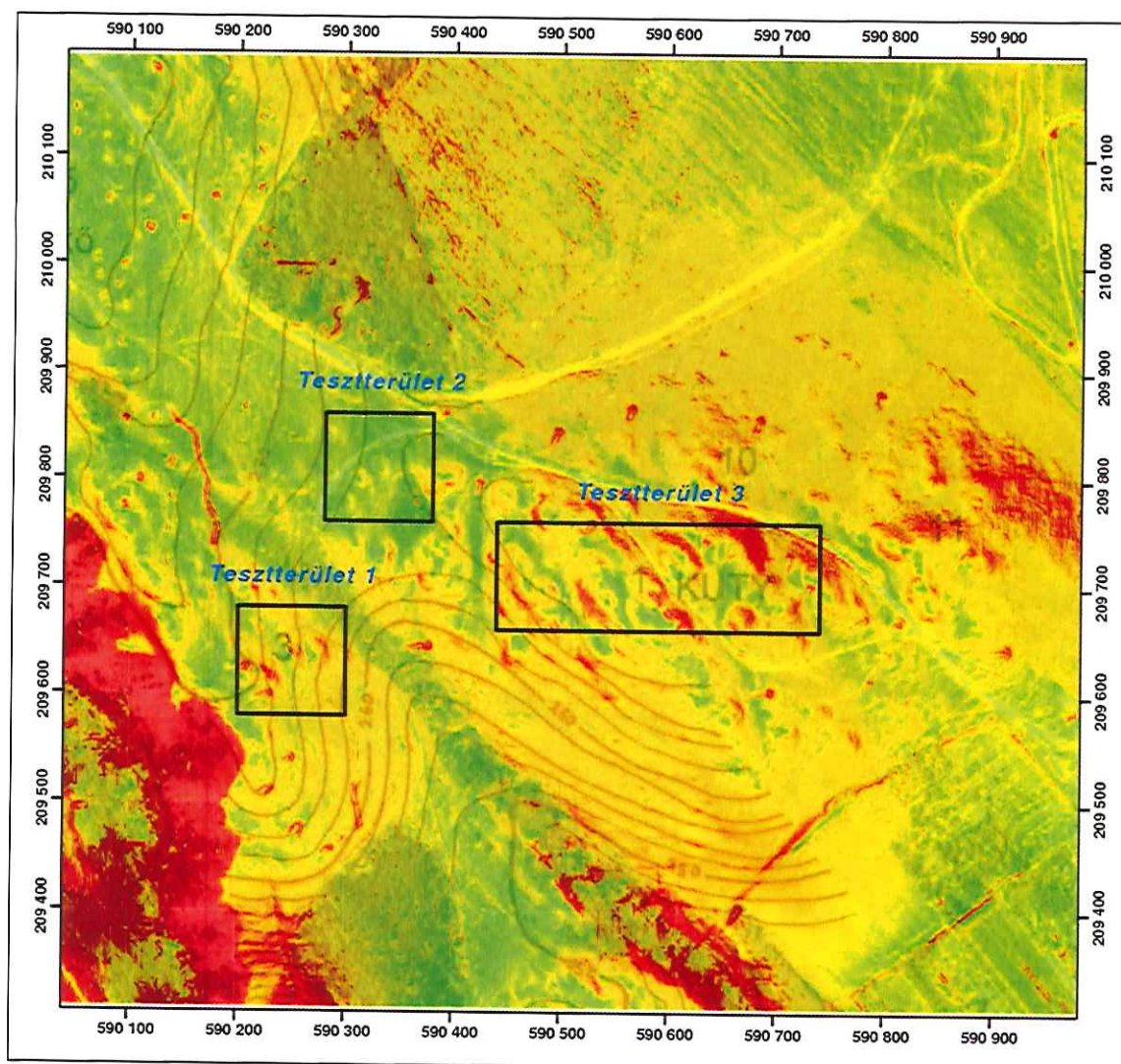
3. ábra: Képenkénti maradék ellentmondások az illesztőpontokban

14. melléklet:



1. ábra: Pontvázlat az automatikus DDM mérés eredményeiről

15. melléklet:

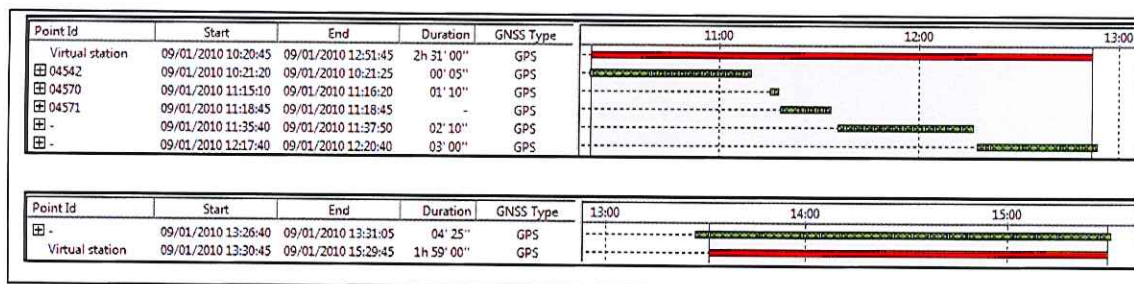


1. ábra: Lejtőkategória térkép LiDAR1 domborzatmodell alapján a topográfiai felmérés alaplapja felett

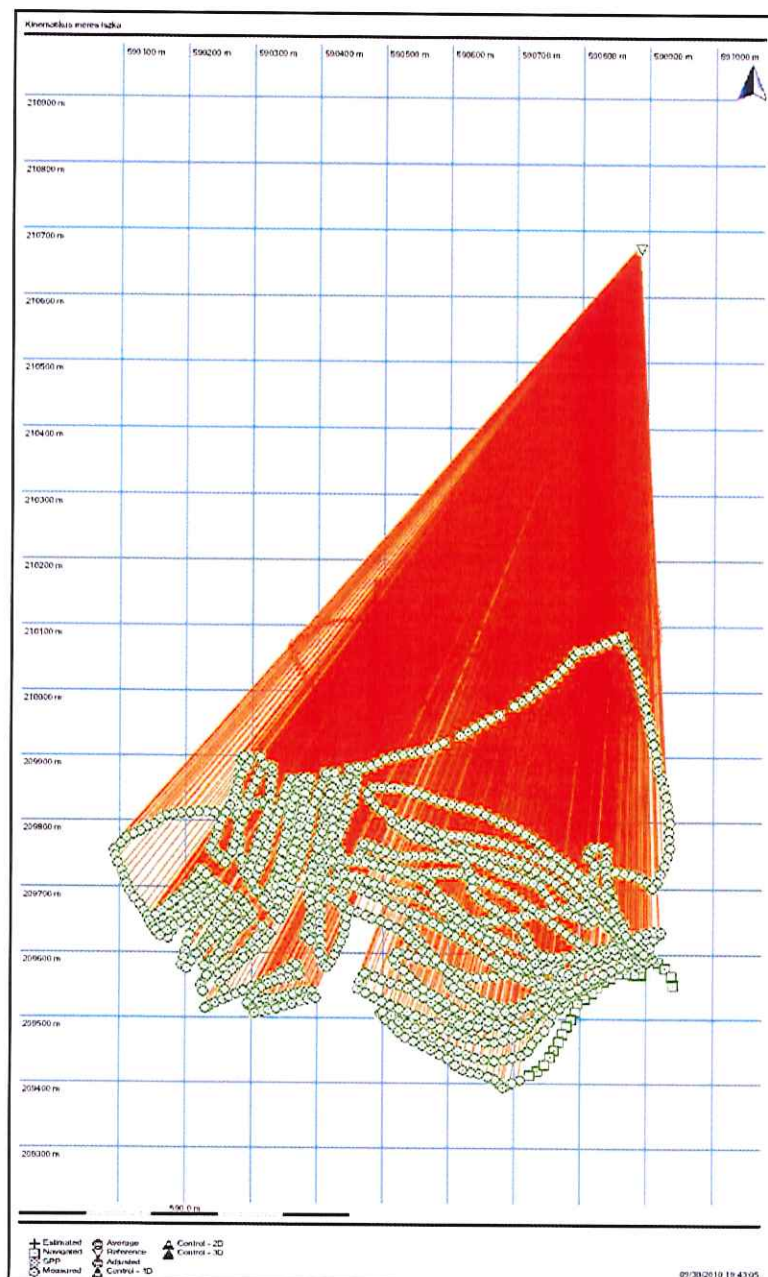
Teszterület sorszáma	Bal alsó sarokpont EOV koordinátái		Jobb felső sarokpont EOV koordinátái	
	Y	X	Y	X
1	590200	209580	590300	209680
2	590280	209760	590380	209860
3	590440	209660	590740	209760

2. ábra: Teszterületek sarokpontjainak koordinátái

16. melléklet:

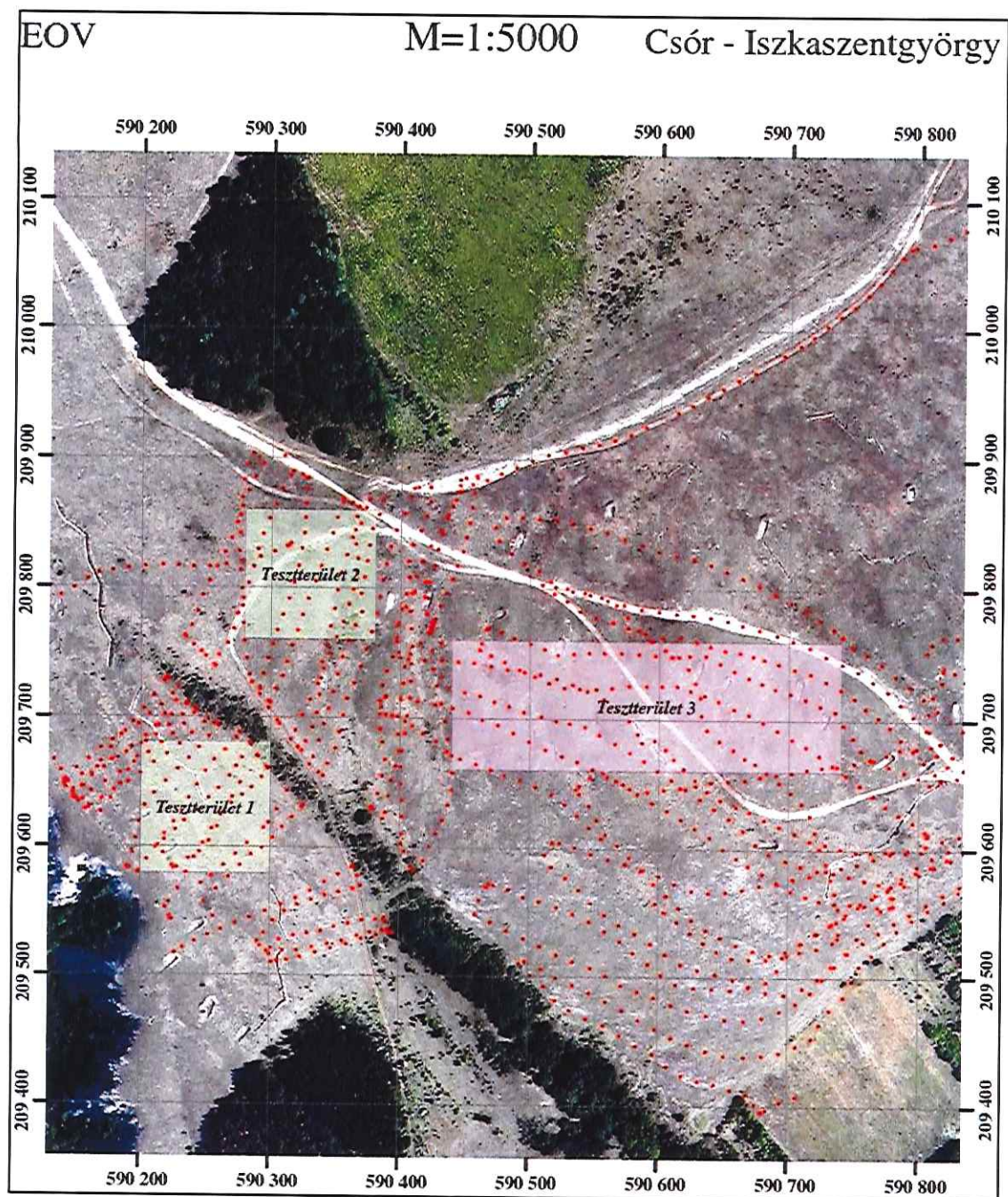


1. ábra: GPS mérések időintervallumainak diagramjai



2. ábra: Meghatározási vázlat a GPS mérésről

17. melléklet:



1. ábra: Pontvázlat, a GPS mérés eredményeiről

18. melléklet:

Tesztterület 1		
Mérési technológia	Pontok száma	Átlagos ponttávolság
Topográfia	76 db	7.71 m
Légifényképezés	60 db	10.71 m
GPS	97 db	6.91 m

1. ábra: Az 1. tesztterületre eső támpontok száma és átlagos távolságuk

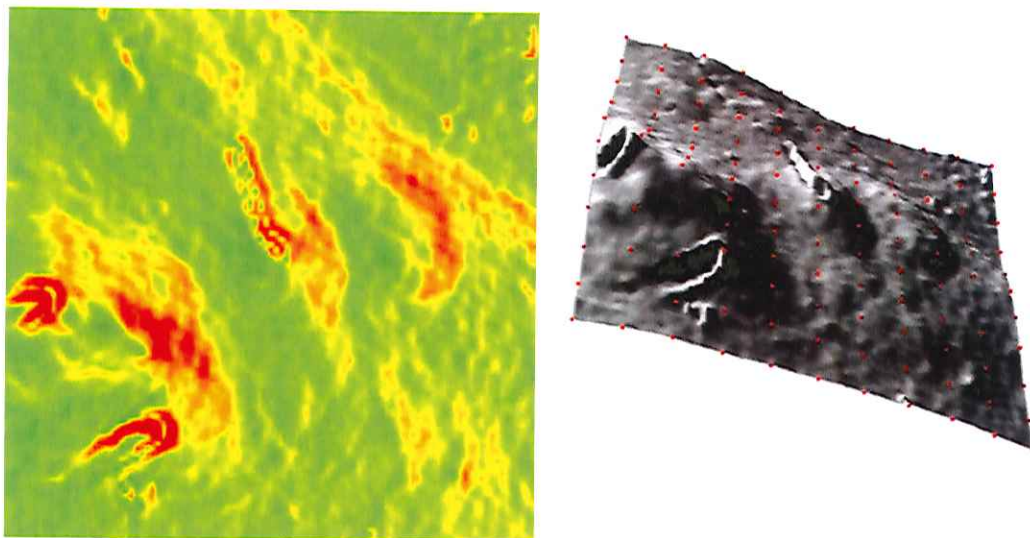
Tesztterület 2		
Mérési technológia	Pontok száma	Átlagos ponttávolság
Topográfia	31 db	11.47 m
Légifényképezés	70 db	10.25 m
GPS	85 db	8.7 m

2. ábra: A 2. tesztterületre eső támpontok száma és átlagos távolságuk

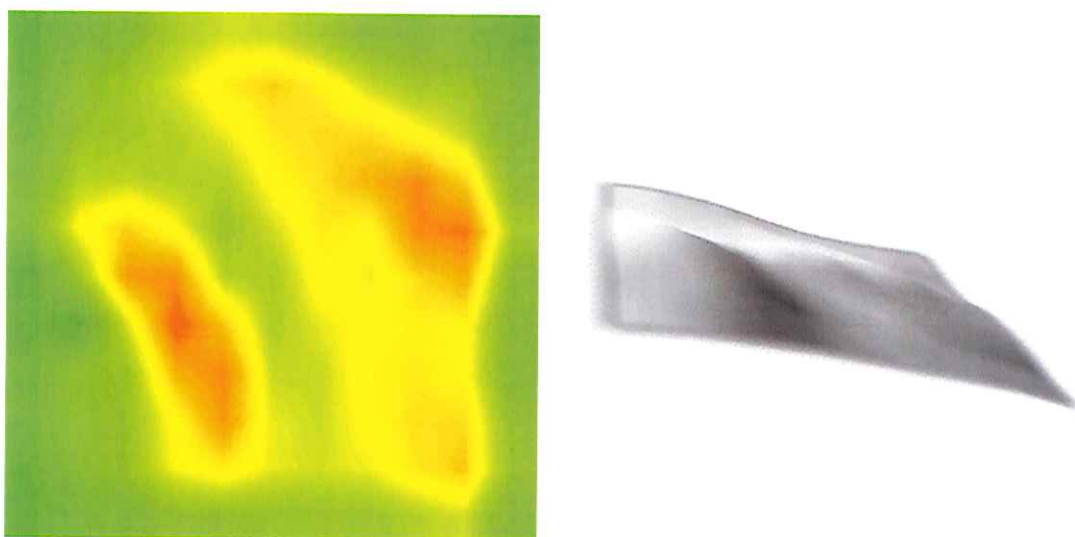
Tesztterület 3		
Mérési technológia	Pontok száma	Átlagos ponttávolság
Topográfia	286 db	7 m
Légifényképezés	130 db	10.52 m
GPS	166 db	9.61 m

3. ábra: A 3. tesztterületre eső támpontok száma és átlagos távolságuk

19. melléklet:

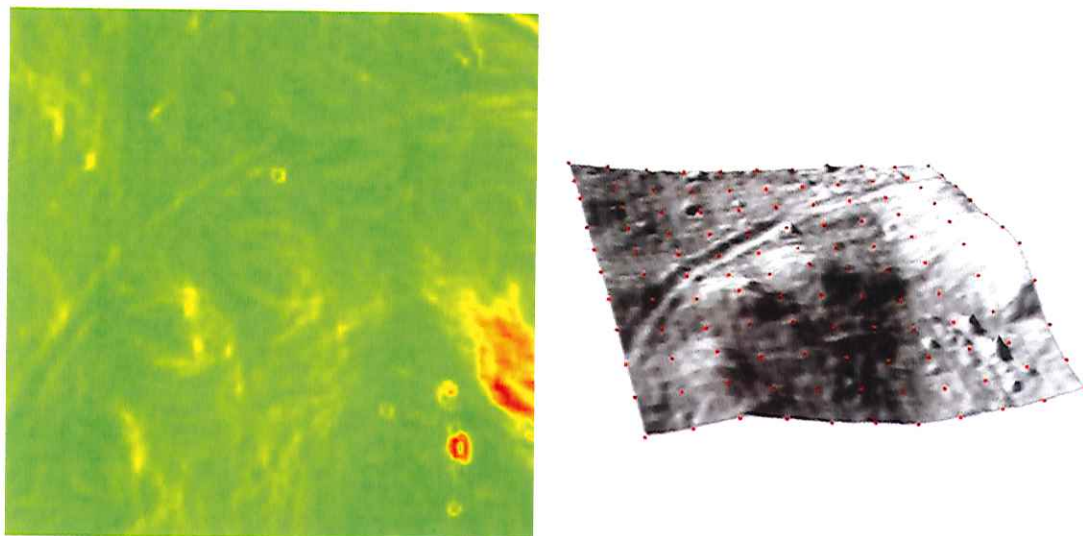


1. ábra: Tesztterület 1 lejtőkategória térkép kivágata és perspektív ábrázolása
1 méteres rácssűrűségű LiDAR domborzatmodell alapján

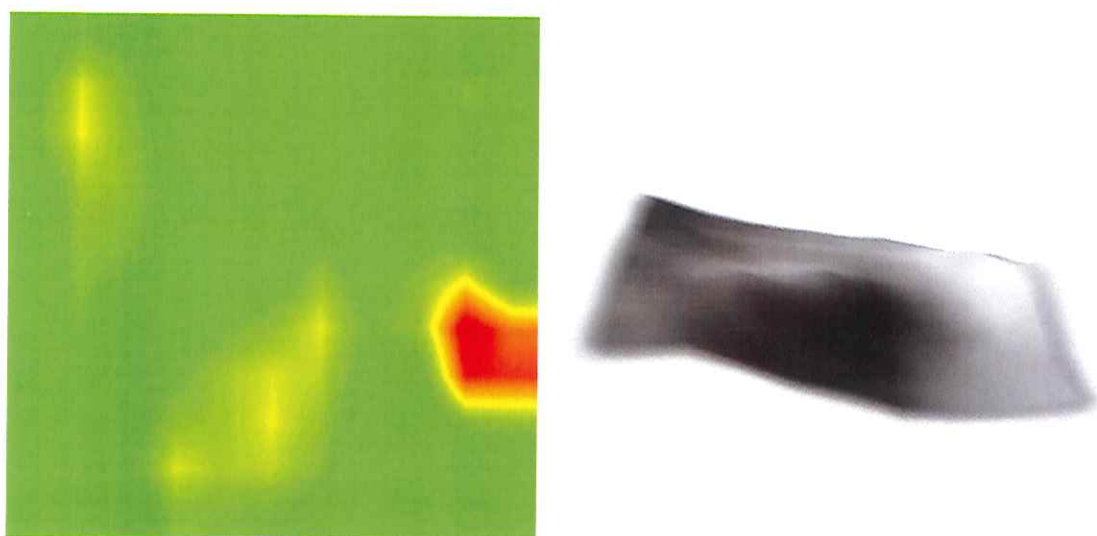


2. ábra: Tesztterület 1 lejtőkategória térkép kivágata és perspektív ábrázolása
10 méteres rácssűrűségű LiDAR domborzatmodell alapján

20. melléklet:

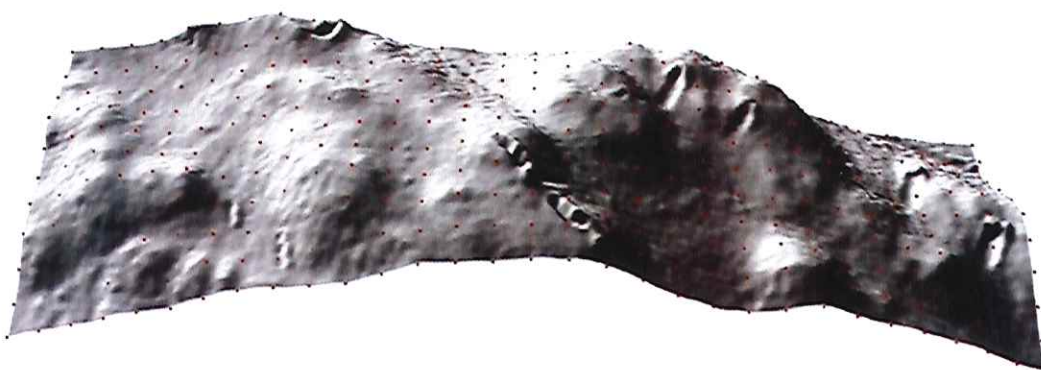
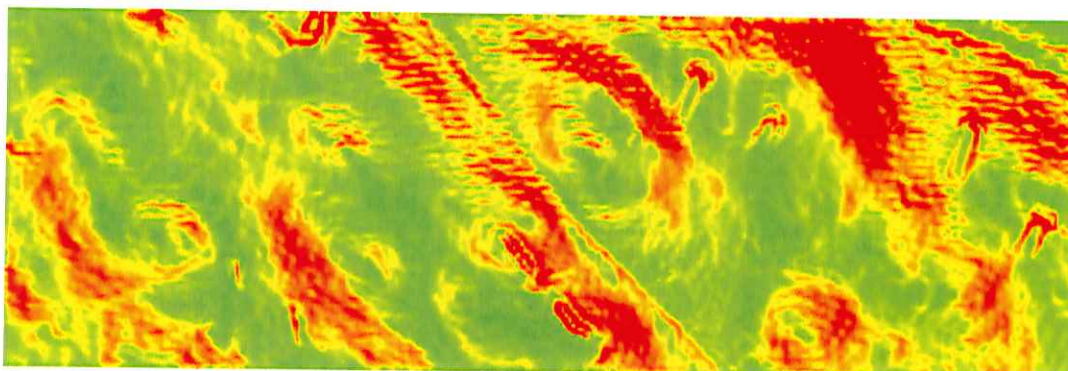


1. ábra: Teszterület 2 lejtőkategória térkép kivágata és perspektív ábrázolása
1 méteres rácssűrűségű LiDAR domborzatmodell alapján

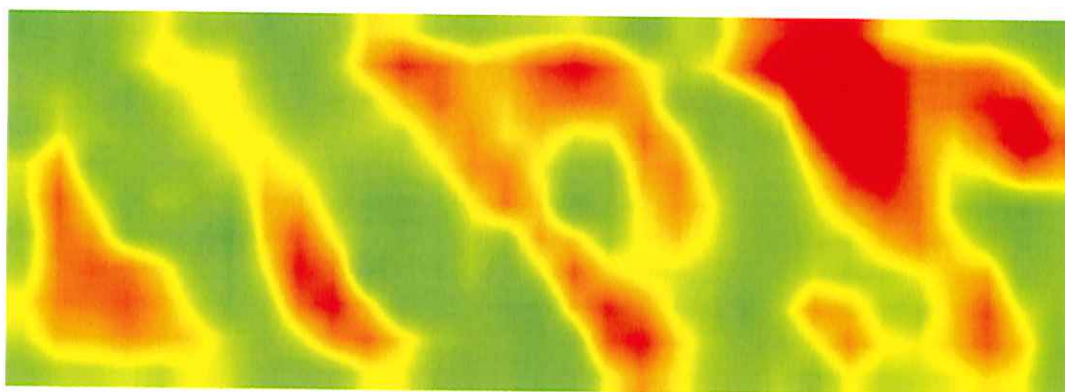


2. ábra: Teszterület 2 lejtőkategória térkép kivágata és perspektív ábrázolása
10 méteres rácssűrűségű LiDAR domborzatmodell alapján

21. melléklet:

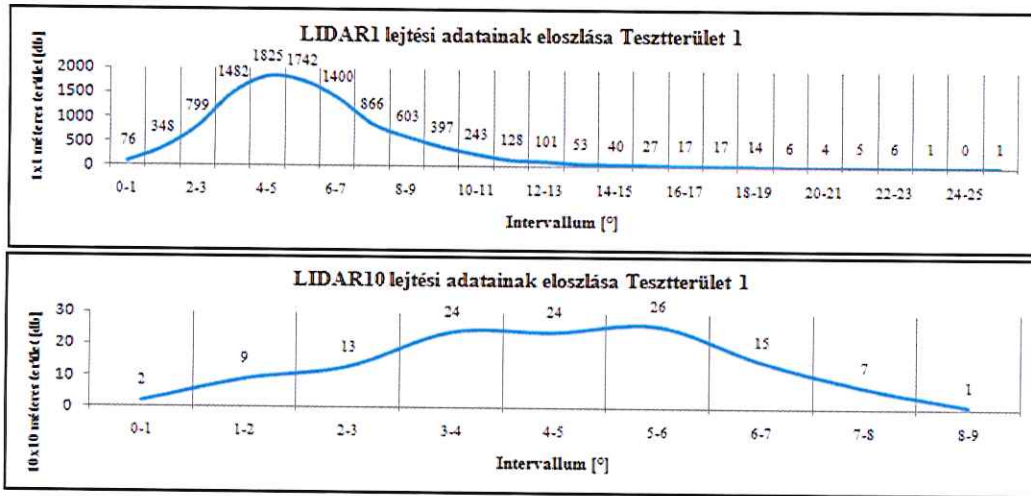


1. ábra: Teszterület 3 lejtőkategória térkép kivágata és perspektív ábrázolása
1 méteres rácssűrűségű LiDAR domborzatmodell alapján

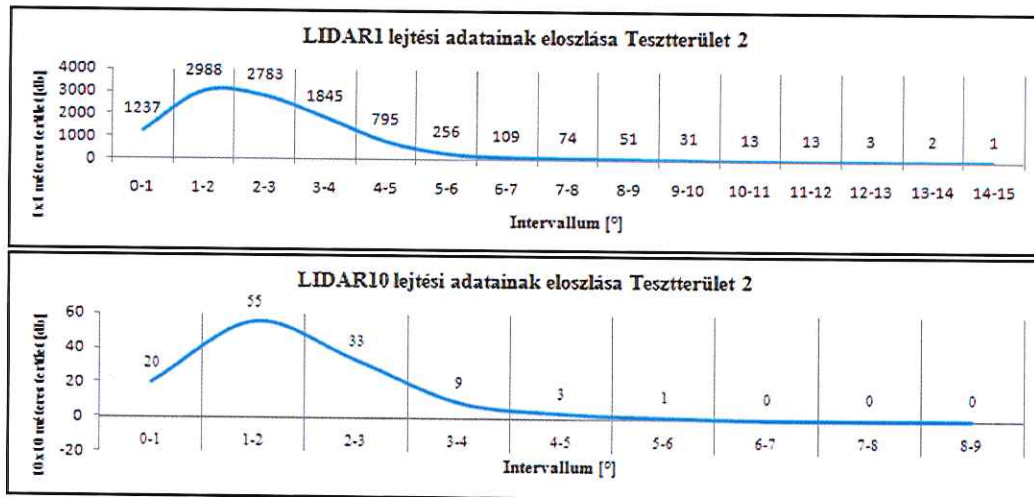


2. ábra: Teszterület 3 lejtőkategória térkép kivágata és perspektív ábrázolása
10 méteres rácssűrűségű LiDAR domborzatmodell alapján

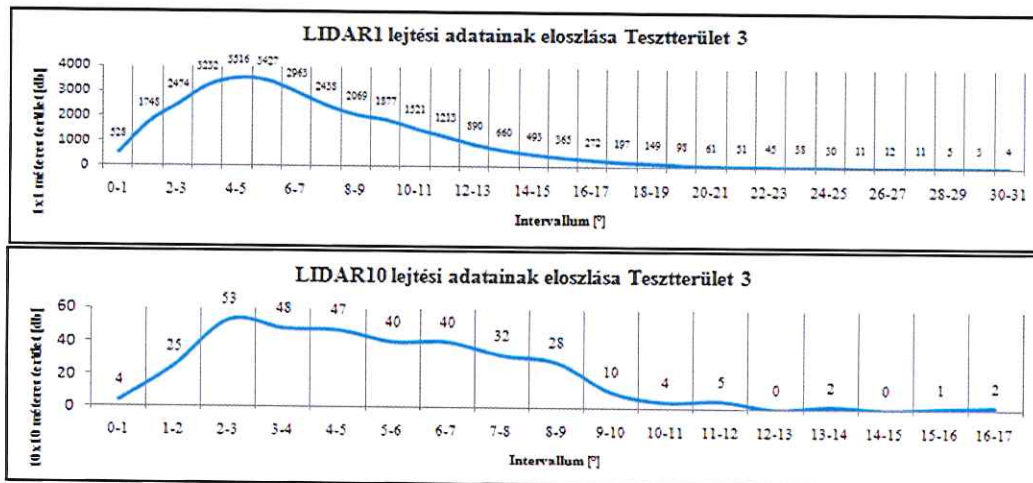
22. melléklet:



1. ábra: Teszterület 1 lejtési hisztogramjai 1 és 10 méteres rácssűrűség esetén



2. ábra: Teszterület 2 lejtési hisztogramjai 1 és 10 méteres rácssűrűség esetén

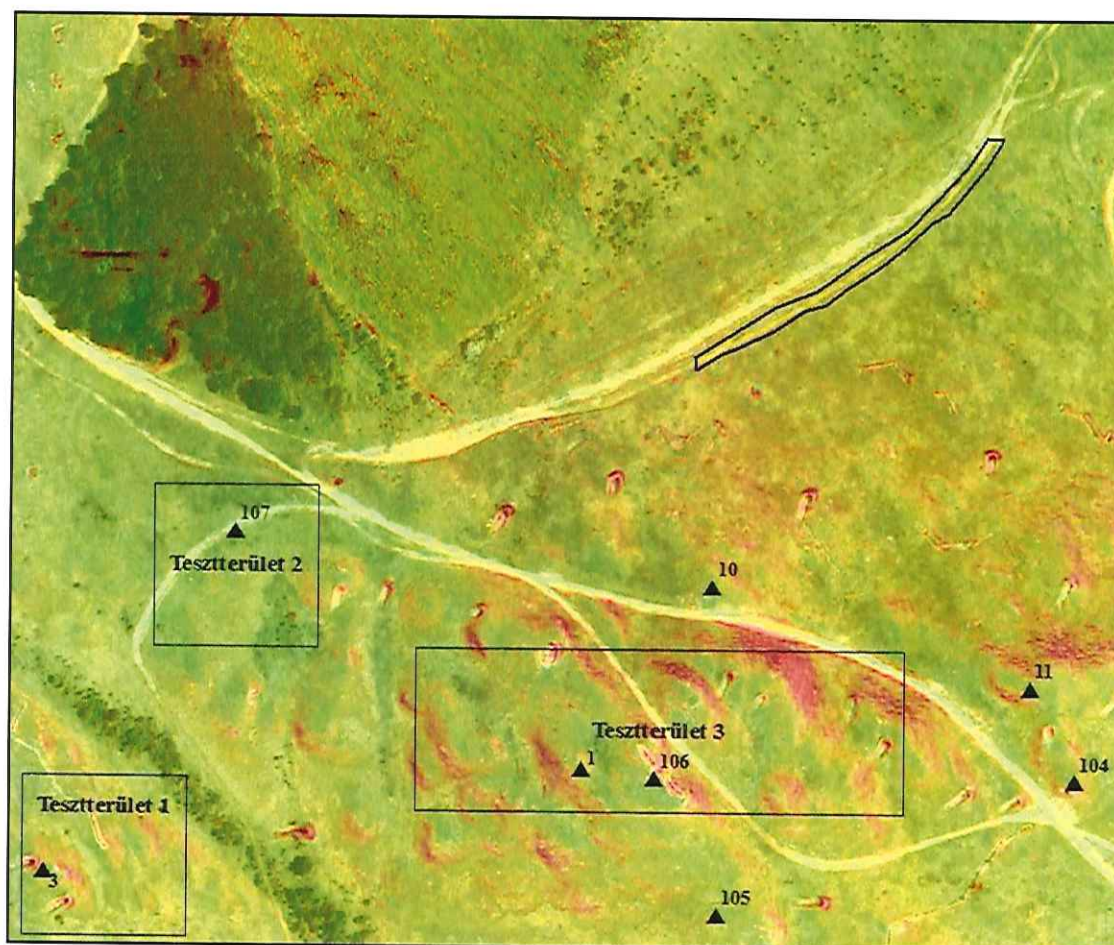


3. ábra: Teszterület 3 lejtési hisztogramjai 1 és 10 méteres rácssűrűség esetén

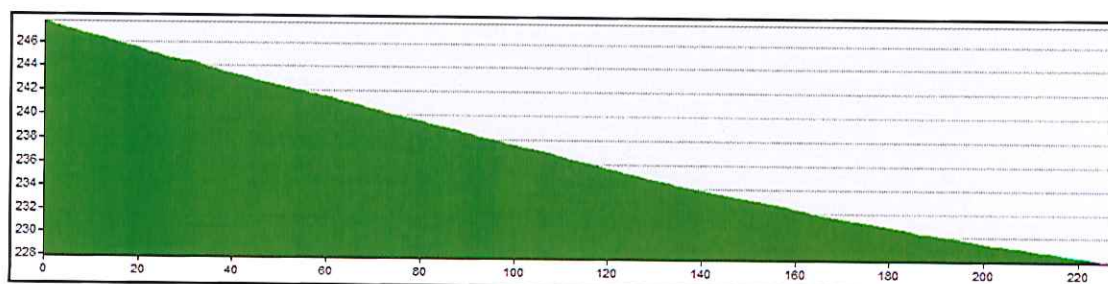
23. melléklet:

Rács-sűrűség	Tesztterület 1		Tesztterület 2		Tesztterület 3	
	Átlag	Szórás	Átlag	Szórás	Átlag	Szórás
LiDAR1	5.72 °	±2.72 °	2.53 °	±1.54 °	6.90 °	±4.11 °
LiDAR10	4.45 °	±1.76 °	1.82 °	±0.92 °	5.21 °	±2.69 °

1. ábra: Tesztterületek lejtőszögeinek átlaga és szórása
1 és 10 méteres rácssűrűség alapján

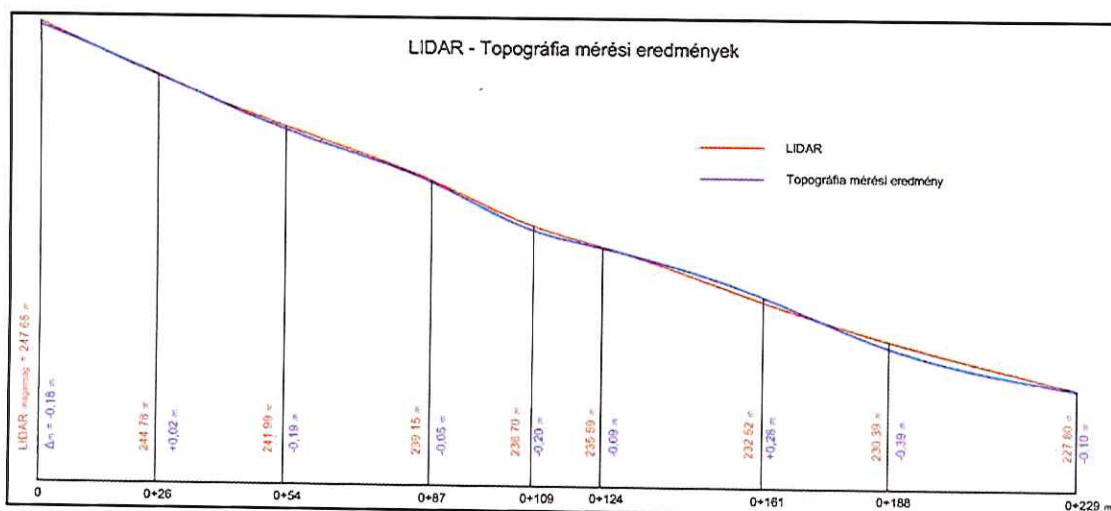


2. ábra: Hossz-szelvény a támpontok megbízhatósági vizsgálatához

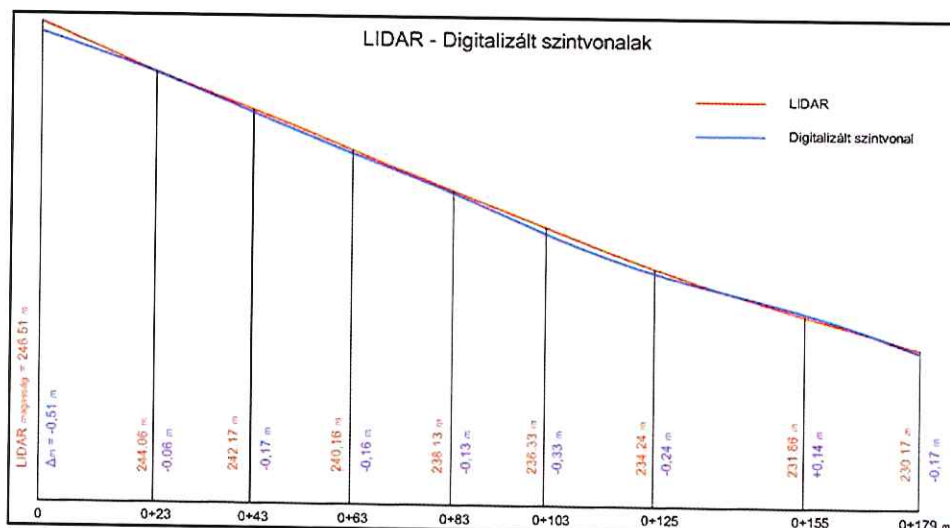


3. ábra: Hossz-szelvény metszetének ábrázolása

24. melléklet:



1. ábra: Topográfiai felmérés mért támpontjainak megbízhatósági vizsgálata (hossz-szelvény alapján)

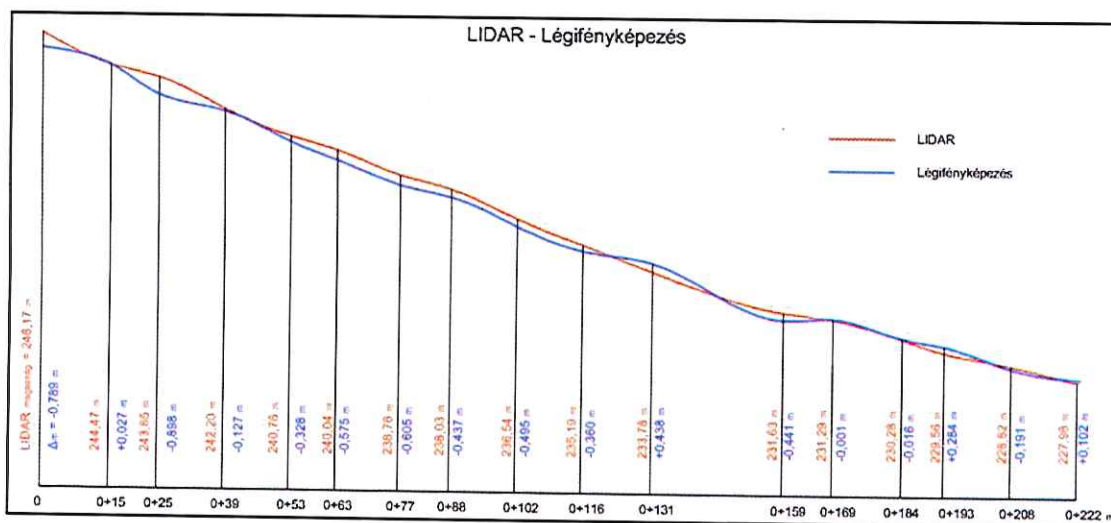


2. ábra: Topográfiai felmérés digitalizált szintvonalpontjainak megbízhatósági vizsgálata (hossz-szelvény alapján)

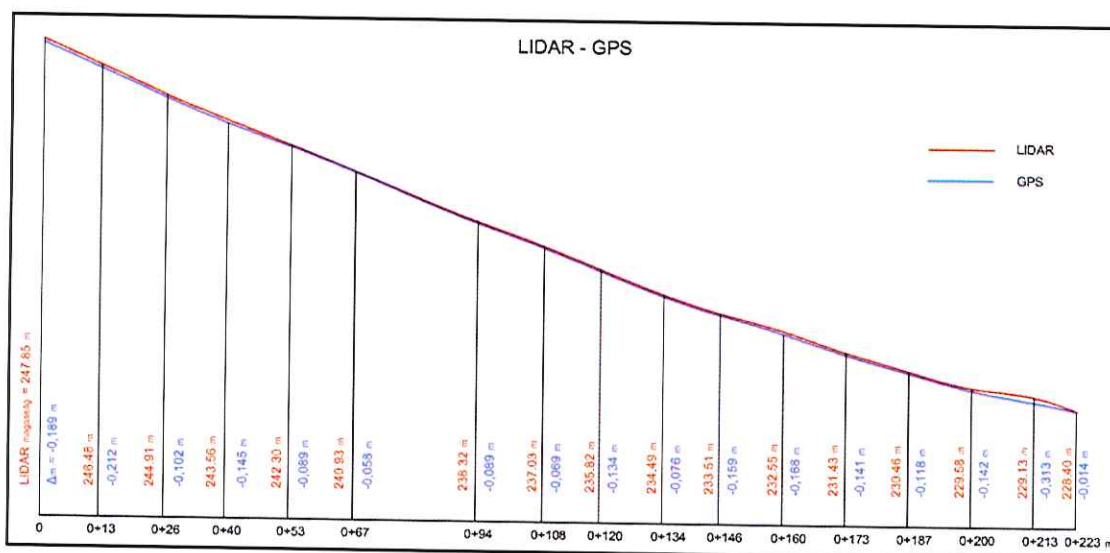
Topográfiai felmérés					
	Pontok száma	Eltérések átlaga	Legkisebb előjeles eltérés	Legnagyobb előjeles eltérés	Átlagos négyzetes középhiba
Mért pontok	9 db	-0.10 m	-0.39 m	0.28 m	± 0.20 m
Digitalizált szintvonalpontok	9 db	-0.18 m	-0.51 m	0.14 m	± 0.25 m

3. ábra: Topográfiai felmérés megbízhatósági vizsgálatának eredményei (hossz-szelvények alapján)

25. melléklet:



1. ábra: Légifényképezés mért támpontjainak megbízhatósági vizsgálata (hossz-szelvény alapján)

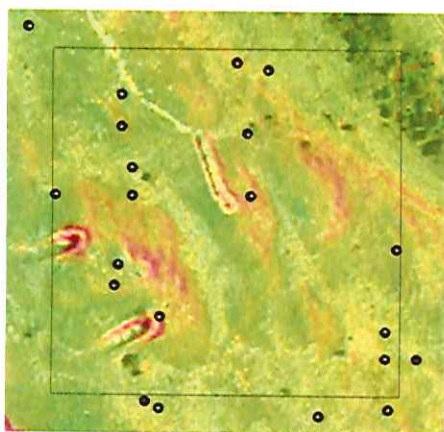


2. ábra: GPS felmérés támpontjainak megbízhatósági vizsgálata (hossz-szelvény alapján)

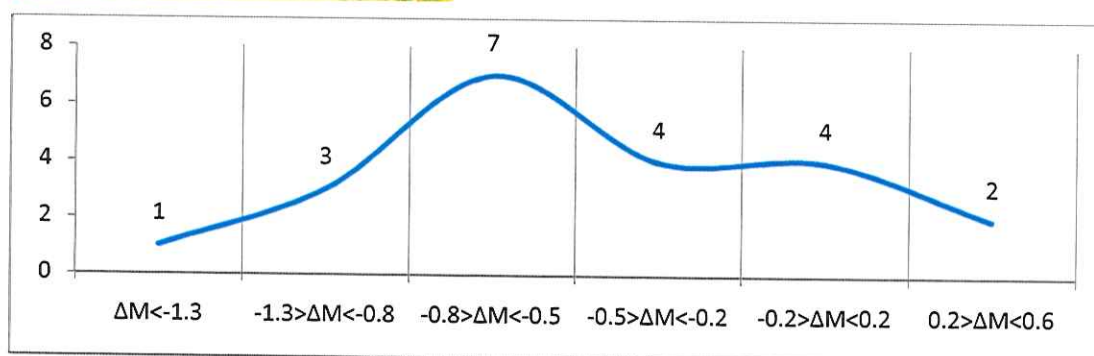
	Pontok száma	Eltérések átlaga	Legkisebb előjeles eltérés	Legnagyobb előjeles eltérés	Átlagos négyzetes középhiba
Légifényképezés	17 db	-0.26 m	-0.90 m	0.44 m	$\pm 0.44 \text{ m}$
GPS felmérés	17 db	-0.13 m	-0.31 m	-0.01 m	$\pm 0.15 \text{ m}$

3. ábra: Légifényképezés és GPS felmérés támpontjainak megbízhatósági vizsgálata (hossz-szelvények alapján)

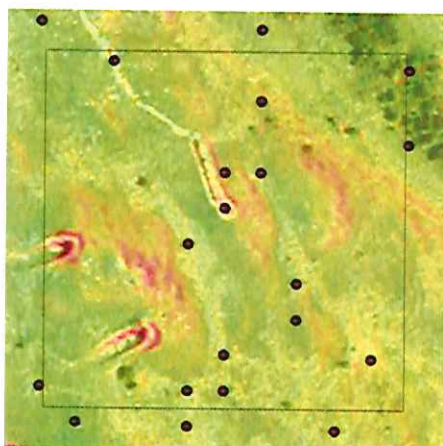
26. melléklet:



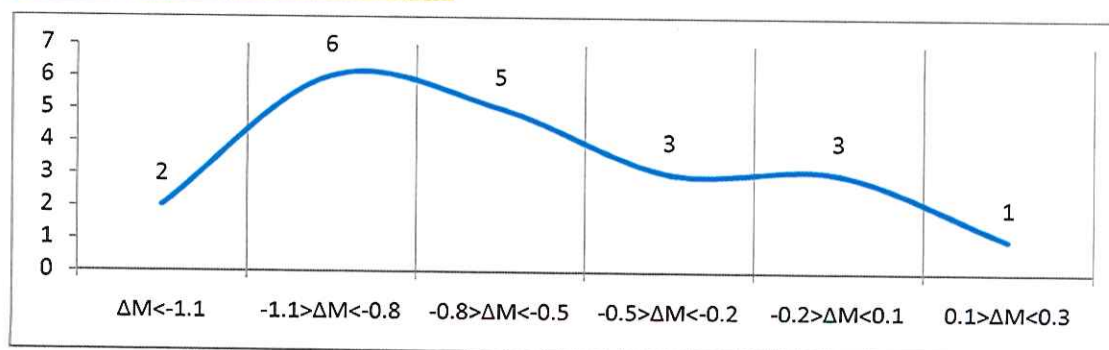
Vizsgált pontok száma:	21 db
Eltérések átlaga:	-0.46 m
Legnagyobb előjeles eltérés:	0.52 m
Legkisebb előjeles eltérés:	-1.15 m
Átlagos négyzetes középhiba:	± 0.59 m



1. ábra: Topográfiai felmérés digitalizált pontjainak vizsgálata, az 1. tesztterületen

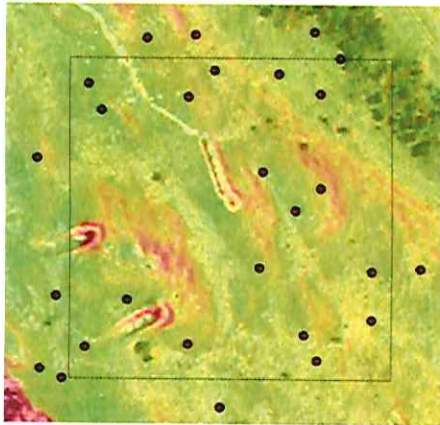


Vizsgált pontok száma:	20 db
Eltérések átlaga:	-0.60 m
Legnagyobb előjeles eltérés:	0.15 m
Legkisebb előjeles eltérés:	-1.19 m
Átlagos négyzetes középhiba:	± 0.72 m

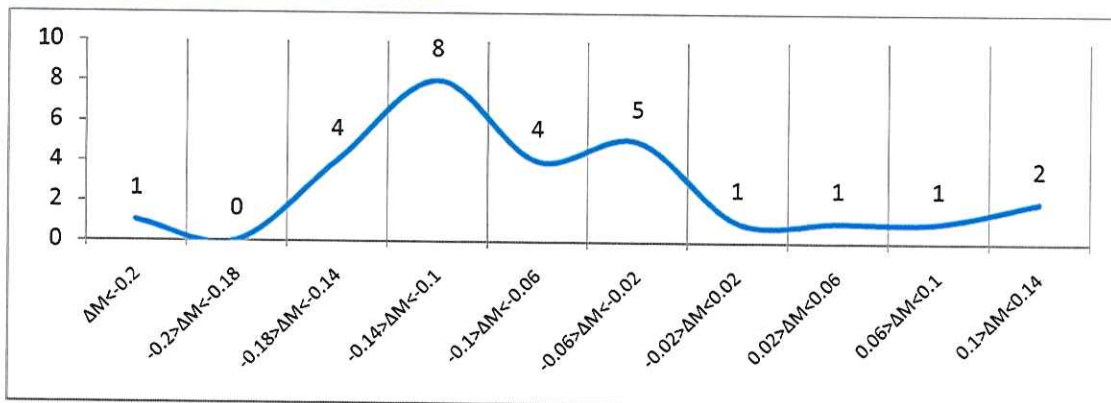


2. ábra: Légifényképezés mért pontjainak vizsgálata, az 1. tesztterületen

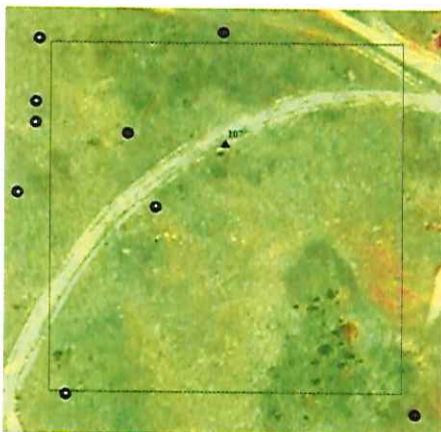
27. melléklet:



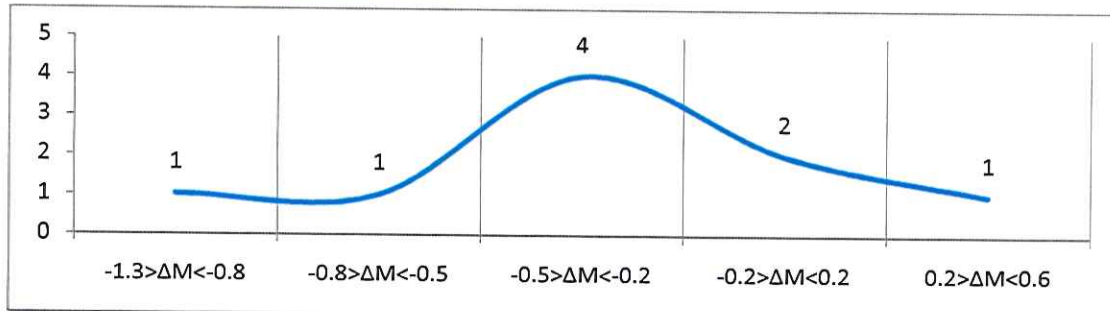
Vizsgált pontok száma:	27 db
Eltérések átlaga:	-0.07 m
Legnagyobb előjeles eltérés:	0.13 m
Legkisebb előjeles eltérés:	-0.21 m
Átlagos négyzetes középhiba:	± 0.11 m



1. ábra: GPS mérés pontjainak vizsgálata, az 1. tesztterületen

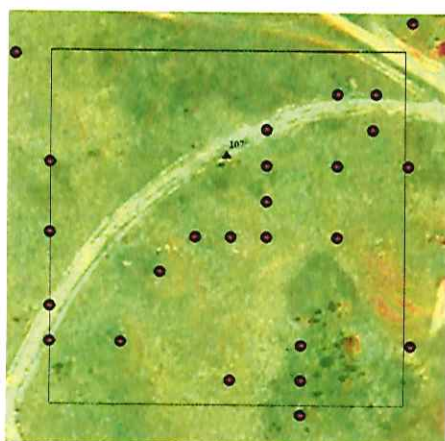


Vizsgált pontok száma:	9 db
Eltérések átlaga:	-0.10 m
Legnagyobb előjeles eltérés:	0.60 m
Legkisebb előjeles eltérés:	-0.66 m
Átlagos négyzetes középhiba:	± 0.36 m

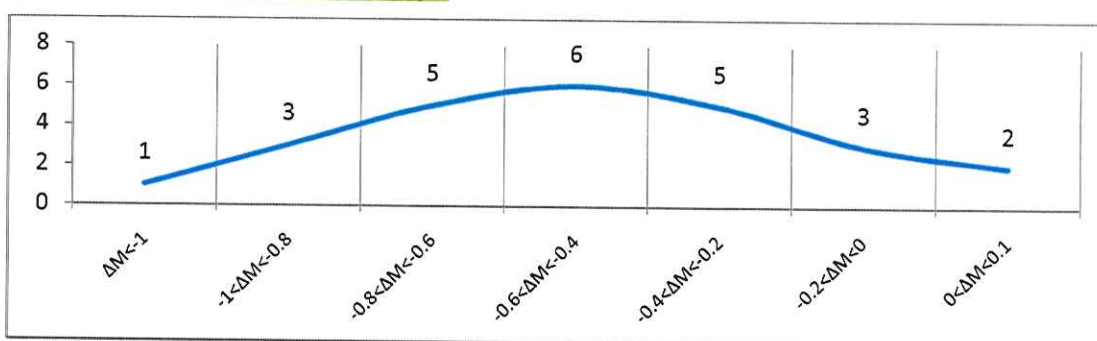


2. ábra: Topográfiai felmérés digitalizált pontjainak vizsgálata, a 2. tesztterületen

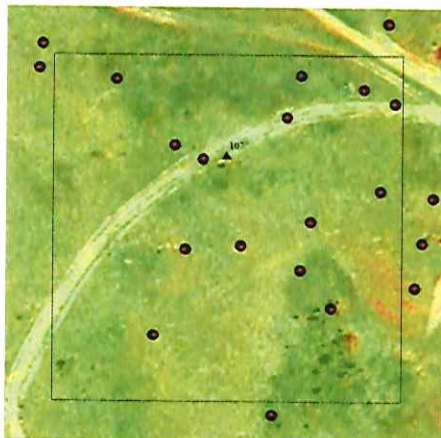
28. melléklet:



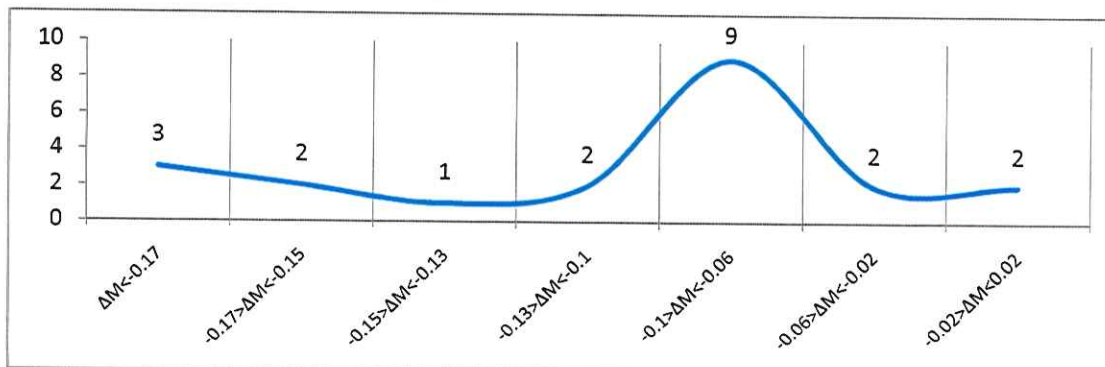
Vizsgált pontok száma:	25 db
Eltérések átlaga:	-0.50 m
Legnagyobb előjeles eltérés:	0.04 m
Legkisebb előjeles eltérés:	-1.03 m
Átlagos négyzetes középhiba:	± 0.57 m



1. ábra: Légifényképezés mért pontjainak vizsgálata, a 2. teszterületen

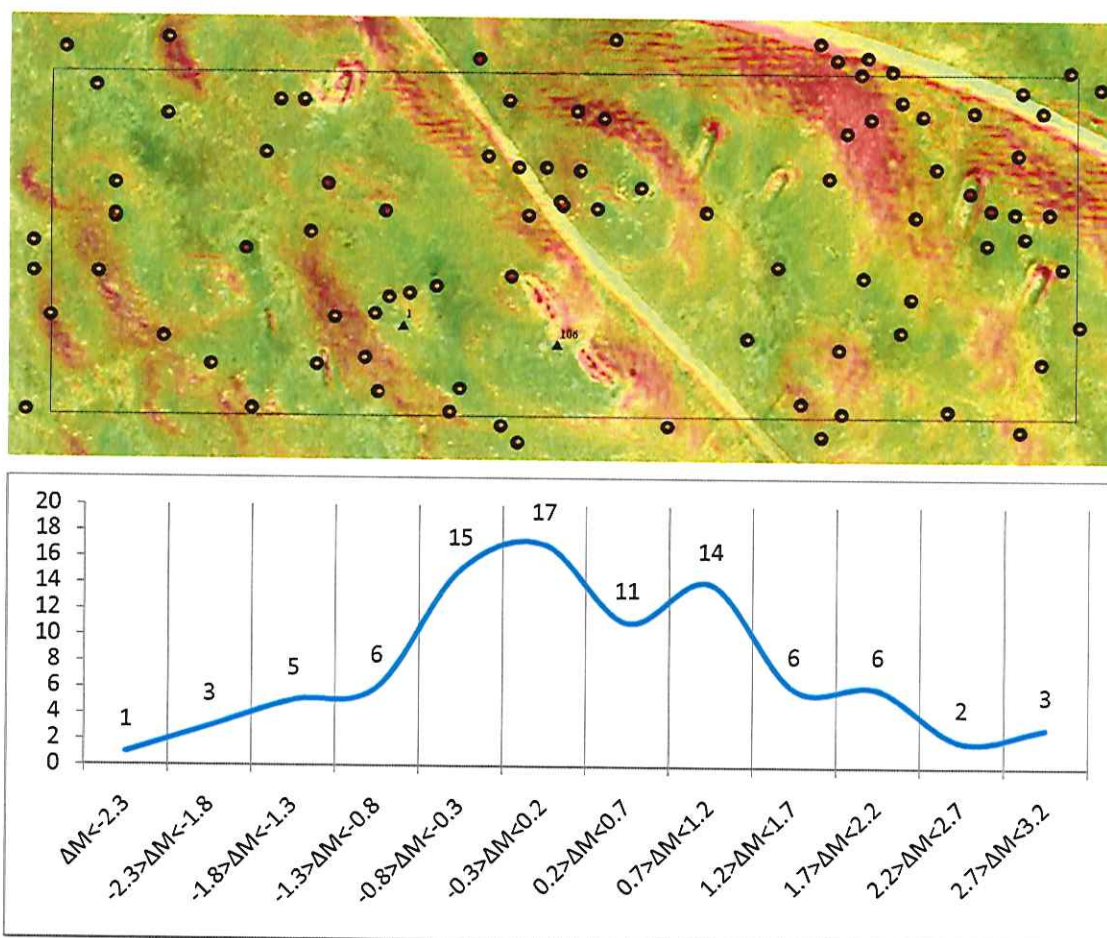


Vizsgált pontok száma:	21 db
Eltérések átlaga:	-0.10 m
Legnagyobb előjeles eltérés:	0.02 m
Legkisebb előjeles eltérés:	-0.18 m
Átlagos négyzetes középhiba:	± 0.11 m



2. ábra: GPS mérés pontjainak vizsgálata, a 2. teszterületen

29. melléklet:



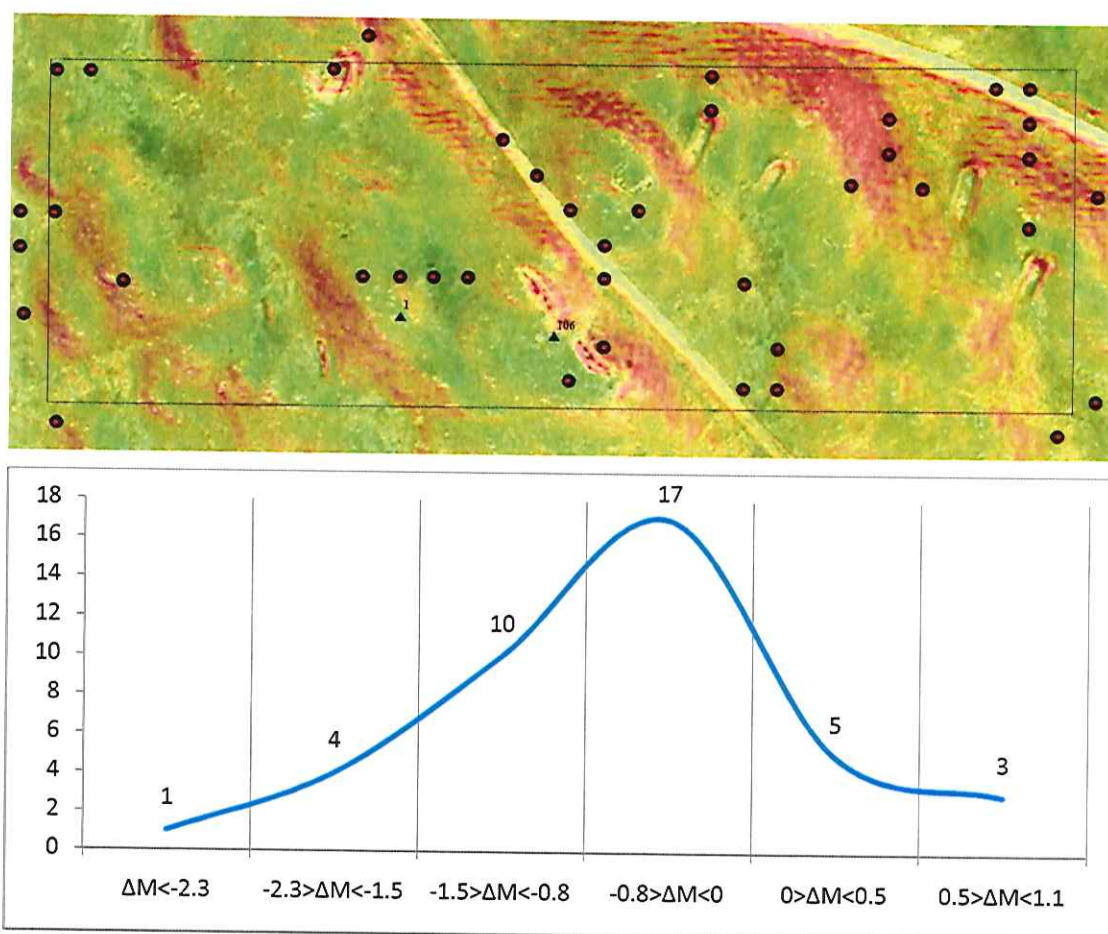
Vizsgált pontok száma:	89 db
Eltérések átlaga:	0.26 m
Legnagyobb előjeles eltérés:	3.16 m
Legkisebb előjeles eltérés:	-2.37 m
Átlagos négyzetes középhiba:	± 1.22 m

1. ábra: Topográfiai felmérés digitalizált pontjainak vizsgálata, a 3. teszterületen

Vizsgált teszterület:	1	2	3
Vizsgált pontok száma:	21 db	9 db	89 db
Eltérések átlaga:	-0.46 m	-0.10 m	0.26 m
Legnagyobb előjeles eltérés:	0.52 m	0.60 m	3.16 m
Legkisebb előjeles eltérés:	-1.15 m	-0.66 m	-2.37 m
Átlagos négyzetes középhiba:	± 0.59 m	± 0.36 m	± 1.22 m

2. ábra: Topográfiai felmérés digitalizált pontjainak vizsgálati eredményei az egyes teszterületeken

30. melléklet:



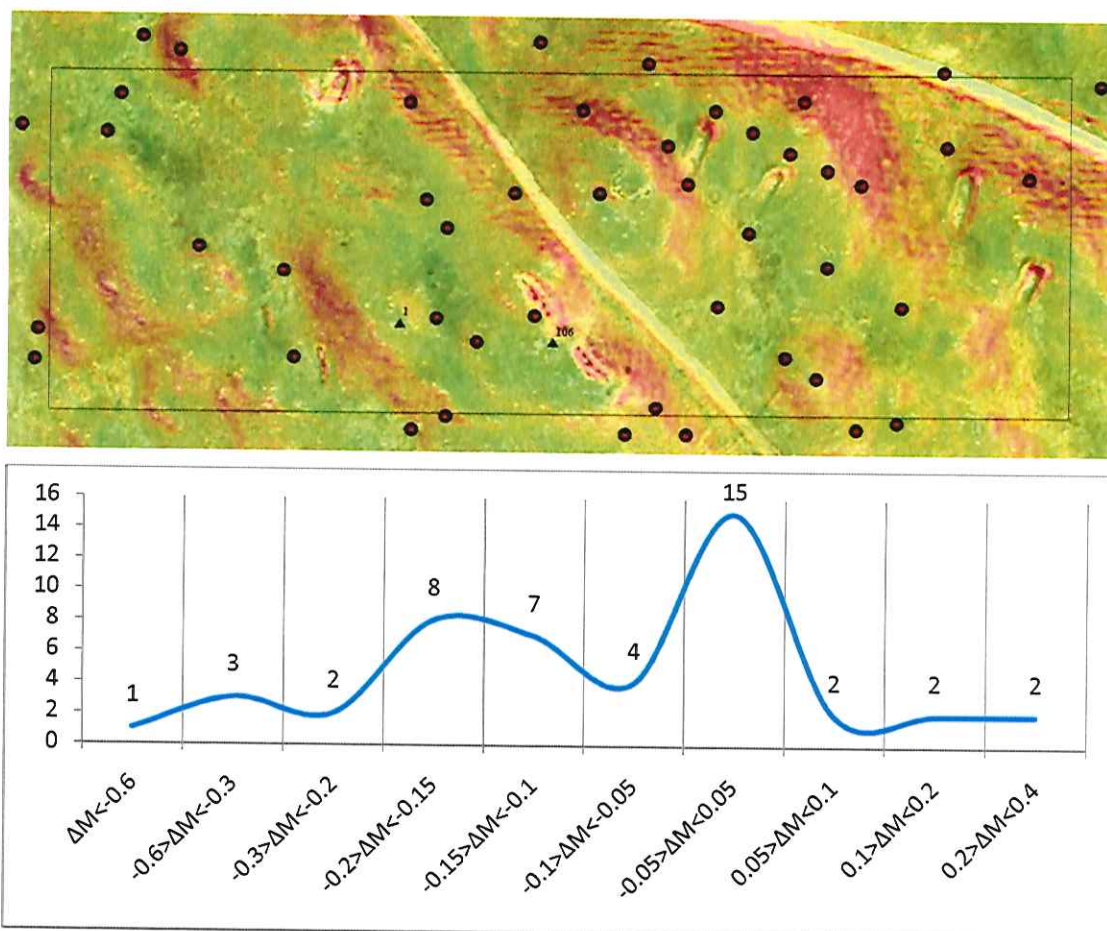
Vizsgált pontok száma:	40 db
Eltérések átlaga:	-0.60 m
Legnagyobb előjeles eltérés:	1.07 m
Legkisebb előjeles eltérés:	-2.35 m
Átlagos négyzetes középhiba:	± 0.95 m

1. ábra: Légifényképezés mért pontjainak vizsgálata, a 3. teszterületen

Vizsgált teszterület:	1	2	3
Vizsgált pontok száma:	20 db	25 db	40 db
Eltérések átlaga:	-0.60 m	-0.50 m	-0.60 m
Legnagyobb előjeles eltérés:	0.15 m	0.04 m	1.07 m
Legkisebb előjeles eltérés:	-1.19 m	-1.03 m	-2.35 m
Átlagos négyzetes középhiba:	± 0.72 m	± 0.57 m	± 0.95 m

2. ábra: Légifényképezés mért pontjainak vizsgálati eredményei az egyes teszterületeken

31. melléklet:



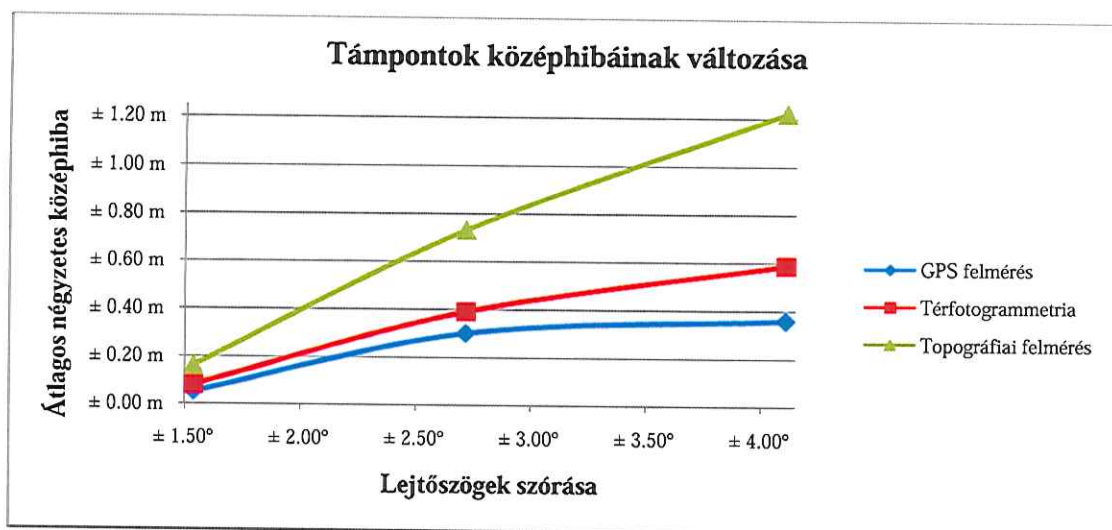
Vizsgált pontok száma:	46 db
Eltérések átlaga:	-0.09 m
Legnagyobb előjeles eltérés:	0.39 m
Legkisebb előjeles eltérés:	-0.61 m
Átlagos négyzetes középhiba:	±0.18 m

1. ábra: GPS mérés pontjainak vizsgálata, a 3. teszterületen

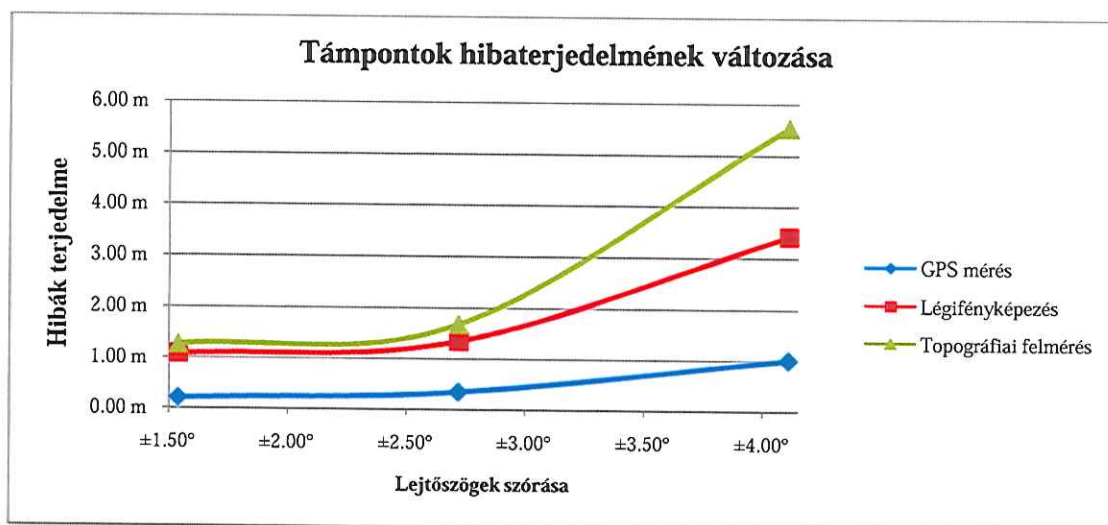
Vizsgált teszterület:	1	2	3
Vizsgált pontok száma:	27 db	21 db	46 db
Eltérések átlaga:	-0.07 m	-0.10 m	-0.09 m
Legnagyobb előjeles eltérés:	0.13 m	0.02 m	0.39 m
Legkisebb előjeles eltérés:	-0.21 m	-0.18 m	-0.61 m
Átlagos négyzetes középhiba:	±0.11 m	±0.11 m	±0.18 m

2. ábra: GPS mérés pontjainak vizsgálati eredményei az egyes teszterületeken

32. melléklet:



1. ábra: Átlagos négyzetes középhibák változása a tesztterületekre vonatkozó mikro domborzat mennyiségének függvényében



2. ábra: A legkisebb és legnagyobb hibák terjedelmének változása a tesztterületekre vonatkozó mikro domborzat mennyiségének függvényében

33. melléklet:

This screenshot shows the 'Inverse Distance Weighted' interpolation dialog box. It contains several input fields and optional settings:

- Input point features:** A text box with a dropdown arrow and a file selection icon.
- Z value field:** A text box with a dropdown arrow.
- Output raster:** A text box with a dropdown arrow and a file selection icon.
- Output cell size (optional):** A text box with a file selection icon.
- Power (optional):** A text box with the value '2' entered.
- Search radius (optional):** A dropdown menu set to 'Variable'.
- Search Radius Settings:** A sub-dialog box containing:
 - Number of points:** A text box with the value '12'.
 - Maximum distance:** An empty text box.
- Input barrier polyline features (optional):** A text box with a file selection icon.

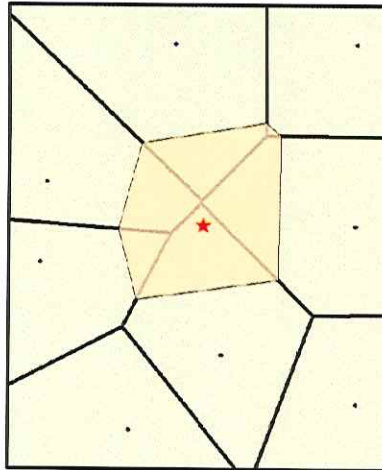
1. ábra: Inverse Distance Weighted interpoláció párbeszéd panelje

This screenshot shows the 'Kriging' interpolation dialog box. It includes the following fields and options:

- Input point features:** A text box with a dropdown arrow and a file selection icon.
- Z value field:** A text box with a dropdown arrow.
- Output surface raster:** A text box with a dropdown arrow and a file selection icon.
- Semivariogram properties:** A sub-dialog box containing:
 - Kriging method:** Radio buttons for 'Ordinary' (selected) and 'Universal'.
 - Semivariogram model:** A dropdown menu set to 'Spherical'.
 - Advanced Parameters...** A button.
- Output cell size (optional):** A text box with a file selection icon.
- Search radius (optional):** A dropdown menu set to 'Variable'.
- Search Radius Settings:** A sub-dialog box containing:
 - Number of points:** A text box with the value '12'.
 - Maximum distance:** An empty text box.
- Output variance of prediction raster (optional):** A text box with a file selection icon.

2. ábra: Kriging interpoláció párbeszéd panelje

34. melléklet:



1. ábra: Thiessen poligonok a támpontok és az ismeretlen pontok körül
(Zöld szín: támpontok és a hozzájuk szerkesztett poligonok; vörös szín: ismeretlen rácsháló pont és a hozzá szerkesztett Thiessen poligon)

Input point features

Z value field

Output raster

Output cell size (optional)

2. ábra: Natural Neighbor interpoláció párbeszéd panele

Input point features

Z value field

Output raster

Output cell size (optional)

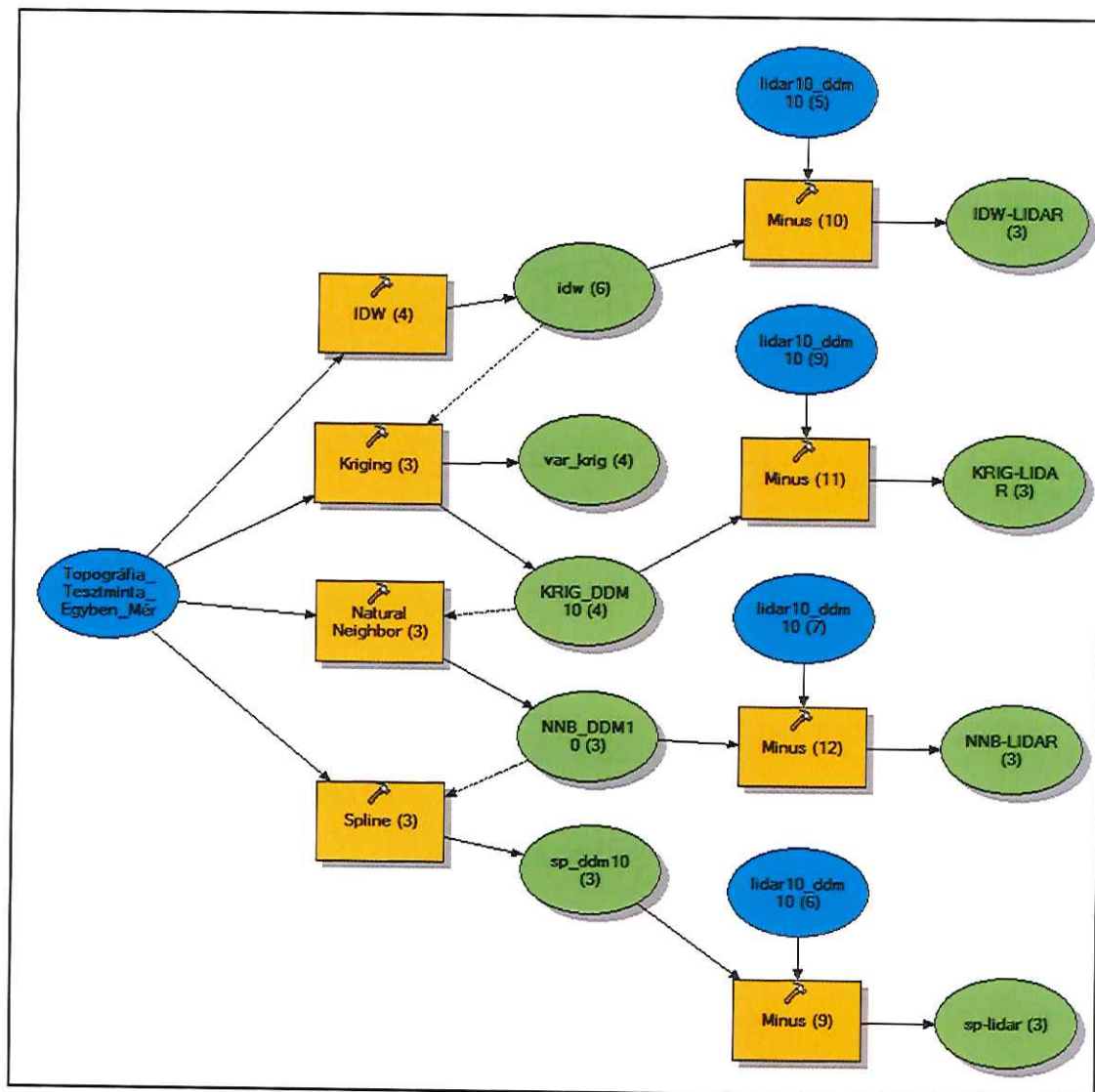
Spline type (optional)
REGULARIZED

Weight (optional)
0.1

Number of points (optional)
12

3. ábra: Spline interpoláció párbeszéd panele

35. melléklet:



1. ábra: Model Builder használata az interpolációk végrehajtására

36. melléklet:

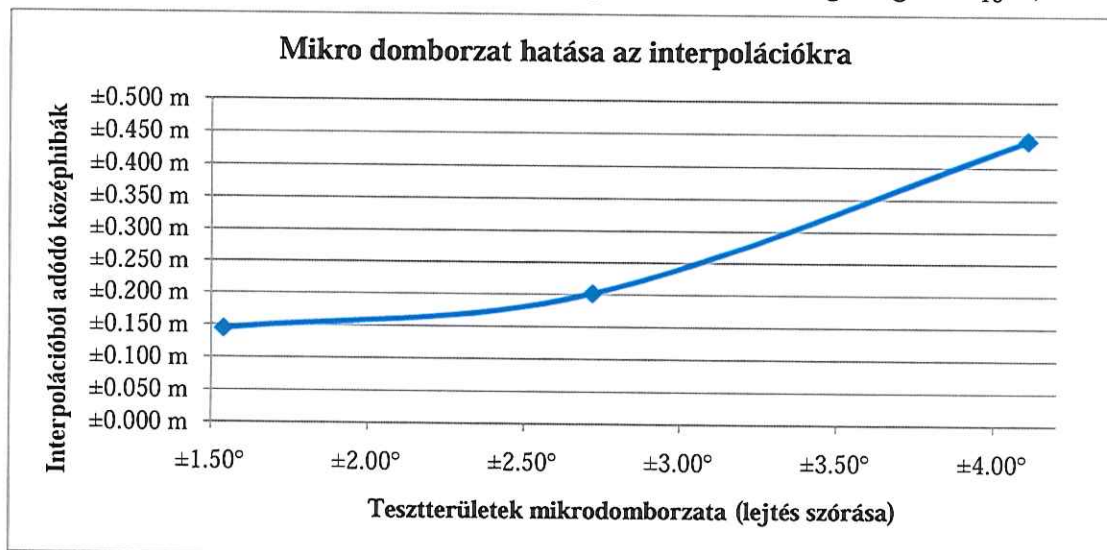
GPS mért pontjainak sűrűségében					
Tesztterület 1					
Interpoláció neve	Eltérések átlaga	Min előjeles eltérés	Max előjeles eltérés	Hiba terjedelme	Átlagos négyzetes középhiba
IDW	0.046 m	-0.971 m	1.174 m	2.145 m	±0.299 m
Kriging	0.030 m	-0.959 m	1.051 m	2.009 m	±0.201 m
Natural Neighbor	-0.010 m	-0.962 m	0.336 m	1.298 m	±0.143 m
Spline	-0.042 m	-0.899 m	1.088 m	1.987 m	±0.280 m
Tesztterület 2					
Interpoláció neve	Eltérések átlaga	Min előjeles eltérés	Max előjeles eltérés	Hiba terjedelme	Átlagos négyzetes középhiba
IDW	-0.004 m	-0.746 m	0.274 m	1.020 m	±0.150 m
Kriging	-0.003 m	-0.539 m	0.174 m	0.713 m	±0.096 m
Natural Neighbor	-0.001 m	-0.462 m	0.173 m	0.634 m	±0.099 m
Spline	0.003 m	-0.775 m	0.667 m	1.442 m	±0.166 m
Tesztterület 3					
Interpoláció neve	Eltérések átlaga	Min előjeles eltérés	Max előjeles eltérés	Hiba terjedelme	Átlagos négyzetes középhiba
IDW	-0.031 m	-1.566 m	1.778 m	3.344 m	±0.475 m
Kriging	0.084 m	-0.954 m	1.990 m	2.945 m	±0.419 m
Natural Neighbor	0.003 m	-1.076 m	1.131 m	2.207 m	±0.358 m
Spline	0.078 m	-2.034 m	2.266 m	4.299 m	±0.453 m

1. ábra: Interpolációkból adódó hibák
(GPS mérés pontjainak sűrűségében, LiDAR1 magasságok alapján)

37. melléklet:

Légifényképezés mért pontjainak sűrűségében					
Tesztterület 1					
Interpoláció neve	Eltérések átlaga	Min előjeles eltérés	Max előjeles eltérés	Hiba terjedelme	Átlagos négyzetes középhiba
IDW	-0.018 m	-1.195 m	0.508 m	1.703 m	±0.295 m
Kriging	-0.004 m	-1.015 m	0.494 m	1.509 m	±0.211 m
Natural Neighbor	-0.004 m	-1.021 m	0.430 m	1.450 m	±0.201 m
Spline	-0.027 m	-1.264 m	0.953 m	2.218 m	±0.270 m
Tesztterület 2					
Interpoláció neve	Eltérések átlaga	Min előjeles eltérés	Max előjeles eltérés	Hiba terjedelme	Átlagos négyzetes középhiba
IDW	-0.026 m	-1.111 m	0.393 m	1.504 m	±0.180 m
Kriging	-0.007 m	-1.130 m	0.236 m	1.367 m	±0.163 m
Natural Neighbor	-0.020 m	-0.880 m	0.253 m	1.133 m	±0.144 m
Spline	-0.015 m	-0.757 m	0.293 m	1.050 m	±0.159 m
Tesztterület 3					
Interpoláció neve	Eltérések átlaga	Min előjeles eltérés	Max előjeles eltérés	Hiba terjedelme	Átlagos négyzetes középhiba
IDW	-0.304 m	-2.396 m	1.058 m	3.454 m	±0.635 m
Kriging	-0.096 m	-2.191 m	1.882 m	4.073 m	±0.496 m
Natural Neighbor	-0.202 m	-1.840 m	0.828 m	2.668 m	±0.440 m
Spline	-0.063 m	-1.734 m	1.394 m	3.129 m	±0.395 m

1. ábra: Interpolációkból adódó hibák
(Légifényképezés mért pontjainak sűrűségében, LiDAR1 magasságok alapján)



2. ábra: Mikro domborzat hibahatása az interpolációkra
(légifényképezés interpolációvizsgálata alapján)

38. melléklet:

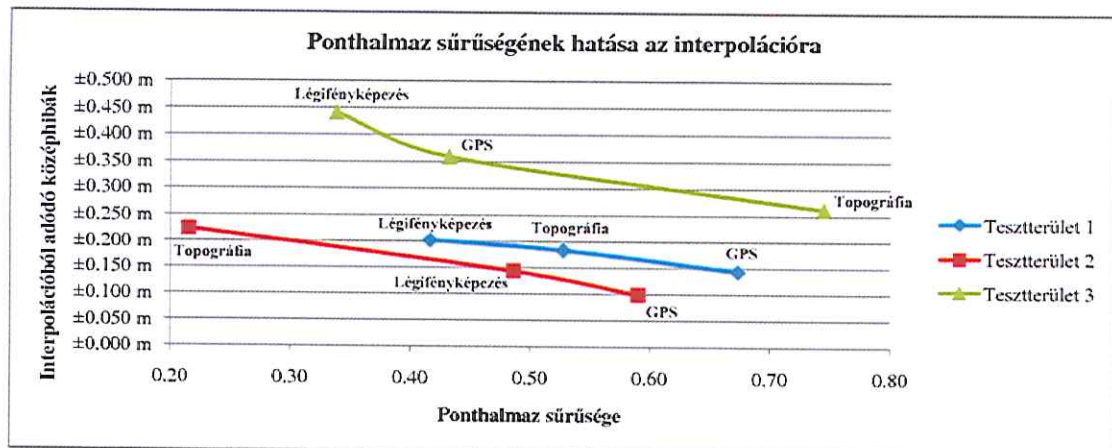
Topográfiai felmérés digitalizált pontjainak sűrűségében					
Tesztterület 1					
Interpoláció neve	Eltérések átlaga	Min előjeles eltérés	Max előjeles eltérés	Hiba terjedelme	Átlagos négyzetes középhiba
IDW	0.081 m	-1.195 m	1.597 m	2.792 m	±0.419 m
Kriging	0.079 m	-0.741 m	1.090 m	1.831 m	±0.281 m
Natural Neighbor	0.039 m	-0.754 m	0.665 m	1.419 m	±0.183 m
Spline	0.093 m	-0.792 m	1.687 m	2.479 m	±0.327 m
Tesztterület 2					
Interpoláció neve	Eltérések átlaga	Min előjeles eltérés	Max előjeles eltérés	Hiba terjedelme	Átlagos négyzetes középhiba
IDW	0.068 m	-1.054 m	0.715 m	1.769 m	±0.291 m
Kriging	-0.055 m	-2.011 m	1.087 m	3.098 m	±0.390 m
Natural Neighbor	0.005 m	-1.028 m	0.568 m	1.595 m	±0.224 m
Spline	0.076 m	-1.938 m	1.924 m	3.862 m	±0.536 m
Tesztterület 3					
Interpoláció neve	Eltérések átlaga	Min előjeles eltérés	Max előjeles eltérés	Hiba terjedelme	Átlagos négyzetes középhiba
IDW	-0.080 m	-1.226 m	0.880 m	2.105 m	±0.383 m
Kriging	0.047 m	-0.981 m	1.626 m	2.607 m	±0.311 m
Natural Neighbor	-0.005 m	-1.005 m	0.964 m	1.969 m	±0.262 m
Spline	0.044 m	-1.170 m	1.464 m	2.634 m	±0.311 m

1. ábra: Interpolációkból adódó hibák
(Topográfiai felmérés pontjainak sűrűségében, LiDAR1 magasságok alapján)

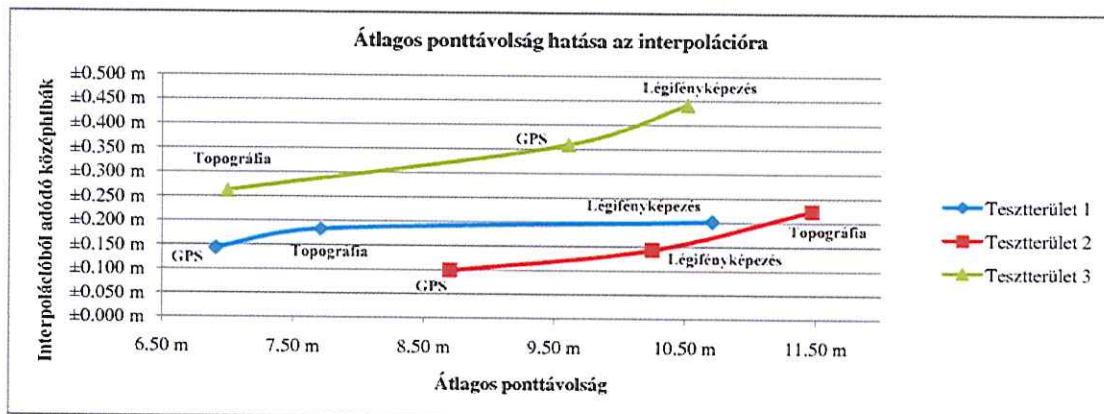
Tesztterület 1				
	Pontok száma	Átlagos ponttávolság	Ponthalmaz sűrűsége (pont/100m ²)	Eloszlás
Topográfiai	76 db	7.71 m	0.53	0.74
Légifényképezés	60 db	10.71 m	0.42	0.79
GPS	97 db	6.91 m	0.67	0.85
Tesztterület 2				
	Pontok száma	Átlagos ponttávolság	Ponthalmaz sűrűsége (pont/100m ²)	Eloszlás
Topográfiai	31 db	11.47 m	0.22	0.39
Légifényképezés	70 db	10.25 m	0.49	0.82
GPS	85 db	8.70 m	0.59	0.88
Tesztterület 3				
	Pontok száma	Átlagos ponttávolság	Ponthalmaz sűrűsége (pont/100m ²)	Eloszlás
Topográfiai	286 db	7.00 m	0.74	0.87
Légifényképezés	130 db	10.52 m	0.34	0.64
GPS	166 db	9.61 m	0.43	0.77

2. ábra: Interpolációhoz felhasznált pontok száma, átlagos távolsága és sűrűsége

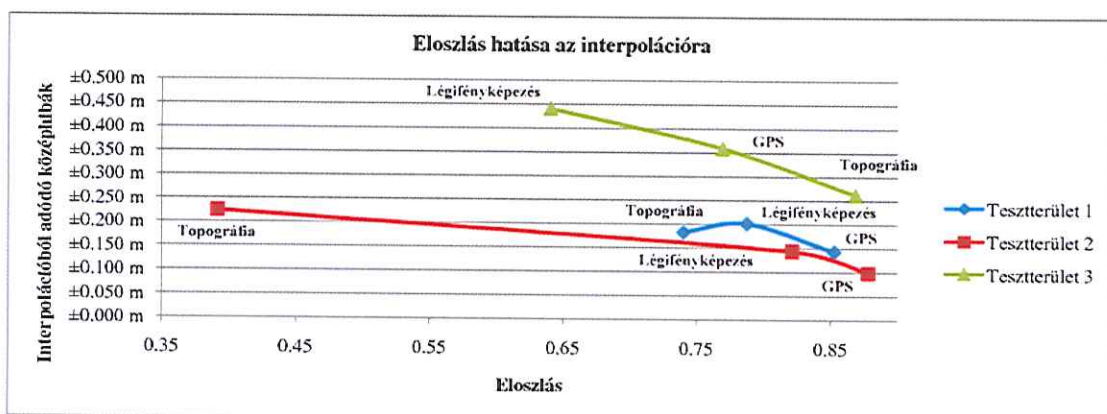
39. melléklet:



1. ábra: Az egyes teszterületekre vonatkozó középhibák, az interpolációhoz használt ponthalmaz sűrűségének függvényében

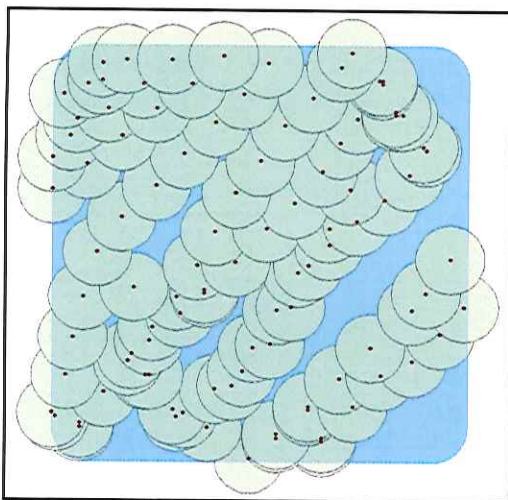


2. ábra: Az egyes teszterületekre vonatkozó középhibák, az interpolációhoz használt pontok átlagos távolságainak függvényében

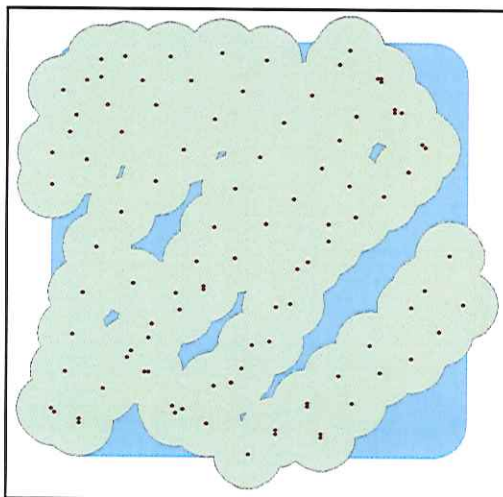


3. ábra: Az egyes teszterületekre vonatkozó középhibák, az interpolációhoz használt pontok eloszlásainak függvényében

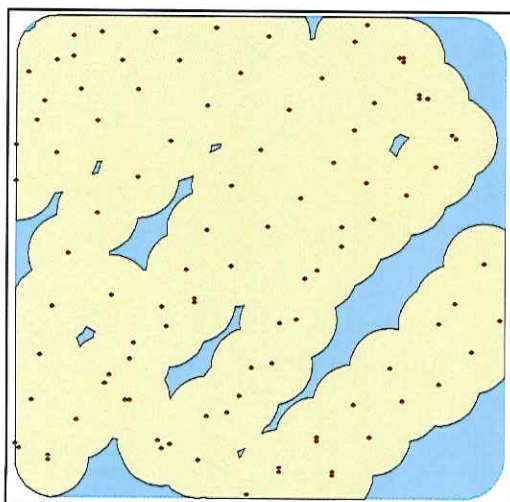
40. melléklet:



1. ábra: Támponthoz előállított 10 méteres sugarú övezetek

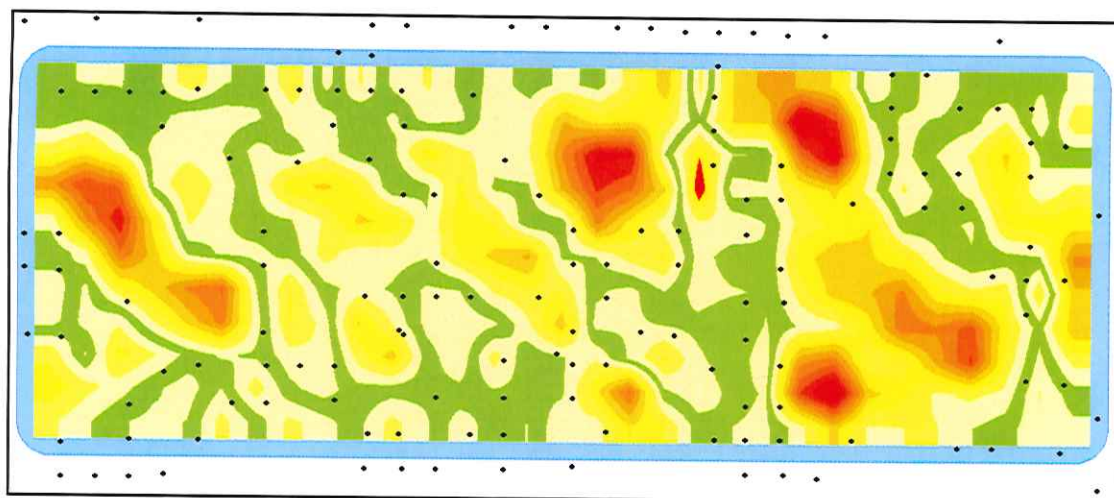


2. ábra: Támponthoz előállított 10 méteres sugarú egyesített övezet

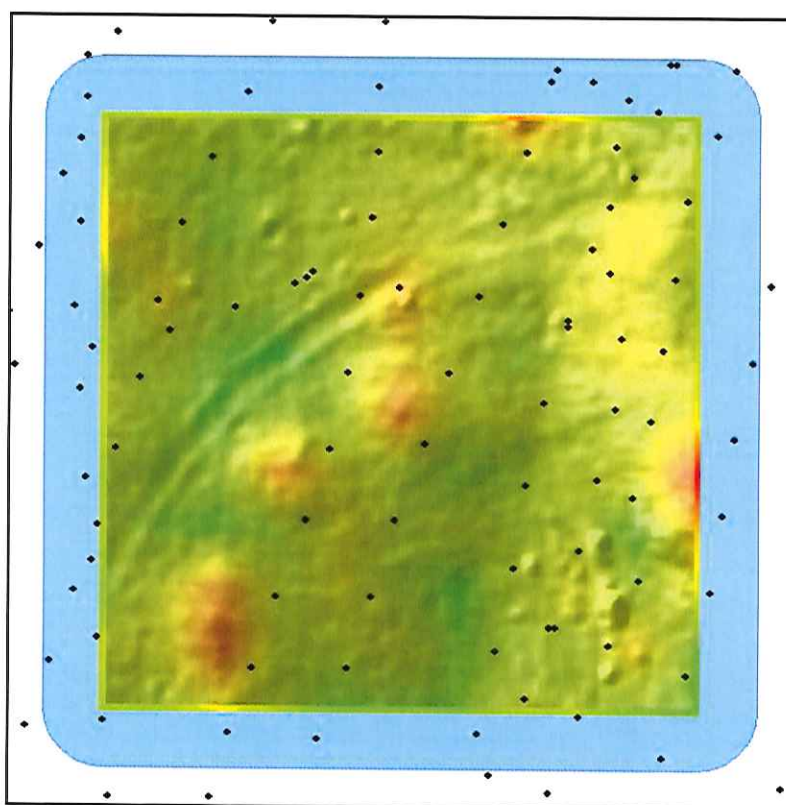


3. ábra: A teszterület határvonalain belülre eső 10 méteres sugarú egyesített övezet

41. melléklet:



1. ábra: Térfotogrammetriai kiértékelés támpontjai alapján végzett interpolációból eredő középhibák mértékei a 3. teszterületen



2. ábra: GPS mérés támpontjai alapján végzett interpolációból eredő középhibák mértékei a 2. teszterületen

42. melléklet

GPS mérés támpontjaiból levezetett DDM10 eltérései					
Tesztterület 1					
Interpoláció neve	Eltérések átlaga	Min előjeles eltérés	Max előjeles eltérés	Hiba terjedelme	Átlagos négyzetes középhiba
IDW	-0.020	-1.075	0.959	2.034	±0.277
Kriging	-0.039	-1.103	0.909	2.012	±0.212
Natural Neighbor	-0.074	-1.090	0.302	1.392	±0.162
Spline	-0.056	-0.998	1.181	2.179	±0.304
Tesztterület 2					
Interpoláció neve	Eltérések átlaga	Min előjeles eltérés	Max előjeles eltérés	Hiba terjedelme	Átlagos négyzetes középhiba
IDW	-0.081	-0.848	0.223	1.071	±0.157
Kriging	-0.078	-0.611	0.133	0.744	±0.099
Natural Neighbor	-0.079	-0.564	0.119	0.684	±0.103
Spline	-0.095	-0.673	0.315	0.988	±0.157
Tesztterület 3					
Interpoláció neve	Eltérések átlaga	Min előjeles eltérés	Max előjeles eltérés	Hiba terjedelme	Átlagos négyzetes középhiba
IDW	-0.122	-1.617	1.655	3.271	±0.496
Kriging	-0.006	-1.156	1.878	3.034	±0.446
Natural Neighbor	-0.087	-1.121	1.214	2.335	±0.375
Spline	-0.012	-2.148	1.978	4.127	±0.469

1. ábra: GPS mérés támpontjaiból levezett DDM10-et terhelő hibák
(A támpontok magassági eltéréseiből és az interpolációból adódó hibák együttesen)

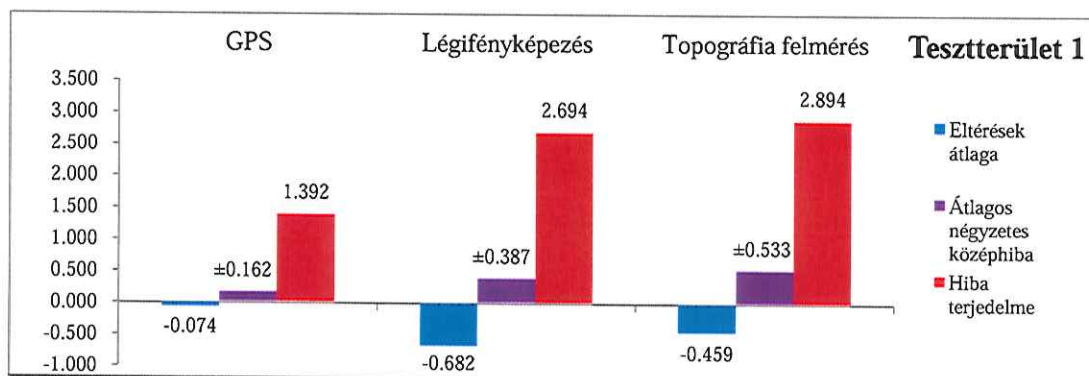
Légifényképezés mért támpontjaiból levezetett DDM10 eltérései					
Tesztterület 1					
Interpoláció neve	Eltérések átlaga	Min előjeles eltérés	Max előjeles eltérés	Hiba terjedelme	Átlagos négyzetes középhiba
IDW	-0.672	-2.467	0.364	2.831	±0.429
Kriging	-0.679	-2.399	0.346	2.744	±0.396
Natural Neighbor	-0.682	-2.365	0.329	2.694	±0.387
Spline	-0.671	-2.444	0.497	2.942	±0.494
Tesztterület 2					
Interpoláció neve	Eltérések átlaga	Min előjeles eltérés	Max előjeles eltérés	Hiba terjedelme	Átlagos négyzetes középhiba
IDW	-0.539	-1.711	0.050	1.761	±0.288
Kriging	-0.524	-1.637	0.029	1.666	±0.274
Natural Neighbor	-0.548	-1.598	0.019	1.617	±0.284
Spline	-0.526	-1.394	0.107	1.502	±0.301
Tesztterület 3					
Interpoláció neve	Eltérések átlaga	Min előjeles eltérés	Max előjeles eltérés	Hiba terjedelme	Átlagos négyzetes középhiba
IDW	-0.904	-3.369	1.123	4.492	±0.833
Kriging	-0.749	-2.865	1.285	4.150	±0.720
Natural Neighbor	-0.853	-2.567	0.961	3.528	±0.673
Spline	-0.694	-4.354	4.617	8.971	±0.993

2. ábra: Légifényképezés mért támpontjaiból levezett DDM10-et terhelő hibák
(A támpontok magassági eltéréseiből és az interpolációból adódó hibák együttesen)

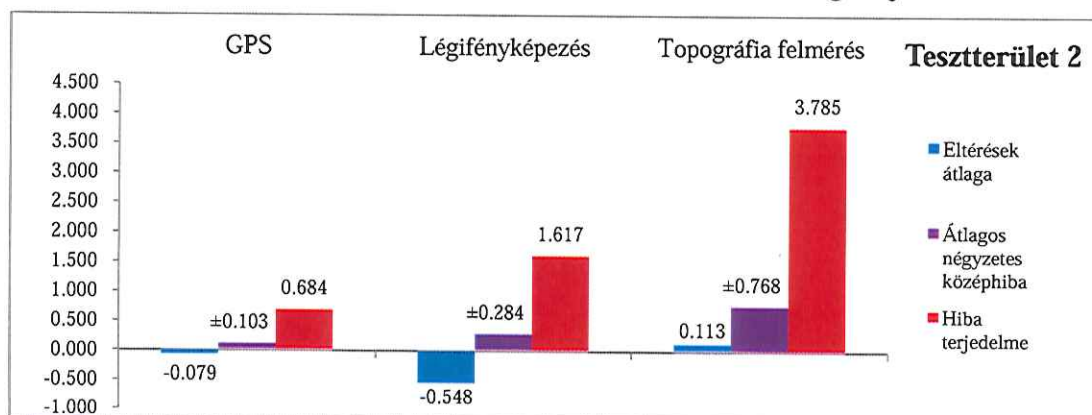
43. melléklet:

Topográfiai felmérés digitalizált támpontjaiból levezetett DDM10 eltérései					
Tesztterület 1					
Interpoláció neve	Eltérések átlaga	Min előjeles eltérés	Max előjeles eltérés	Hiba terjedelme	Átlagos négyzetes középhiba
IDW	-0.438	-1.849	1.072	2.921	±0.523
Kriging	-0.501	-2.038	1.016	3.055	±0.550
Natural Neighbor	-0.459	-1.907	0.986	2.894	±0.533
Spline	-0.496	-2.687	3.938	6.625	±0.858
Tesztterület 2					
Interpoláció neve	Eltérések átlaga	Min előjeles eltérés	Max előjeles eltérés	Hiba terjedelme	Átlagos négyzetes középhiba
IDW	0.034	-1.043	2.689	3.732	±0.701
Kriging	0.215	-1.320	3.037	4.357	±0.934
Natural Neighbor	0.113	-1.124	2.661	3.785	±0.768
Spline	-0.149	-3.807	4.283	8.089	±1.236
Tesztterület 3					
Interpoláció neve	Eltérések átlaga	Min előjeles eltérés	Max előjeles eltérés	Hiba terjedelme	Átlagos négyzetes középhiba
IDW	0.238	-2.336	3.621	5.957	±1.082
Kriging	0.342	-3.082	3.838	6.920	±1.115
Natural Neighbor	0.322	-3.006	3.793	6.799	±1.105
Spline	0.246	-9.190	12.113	21.303	±2.058

1. ábra: Topográfiai felmérés digitalizált támpontjaiból levezett DDM10-et terhelő hibák (A támpontok magassági eltéréseiből és az interpolációból adódó hibák együttesen)

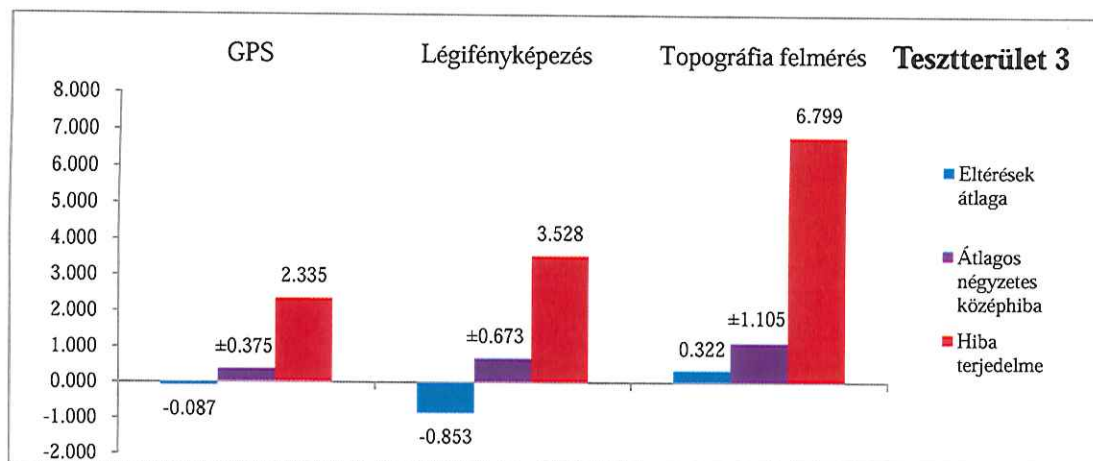


2. ábra: Az 1. tesztterület DDM10-einek eltérés diagramjai



3. ábra: A 2. tesztterület DDM10-einek eltérés diagramjai

44. melléklet:



1. ábra: A 3. tesztterület DDM10-einek eltérés diagramjai

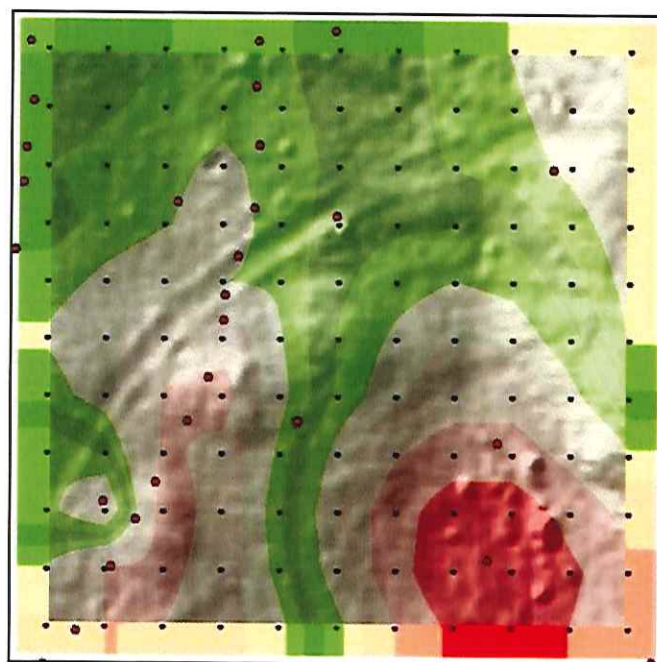
GPS mérés támpontjainak hibahatása					
	Eltérések átlaga	Min előjeles eltérés	Max előjeles eltérés	Hiba terjedelme	Átlagos négyzetes középhiba
Tesztterület 1	-0.064	-0.167	0.170	0.336	±0.068
Tesztterület 2	-0.078	-0.171	0.020	0.191	±0.038
Tesztterület 3	-0.090	-0.462	0.297	0.758	±0.108
Légifényképezés mért támpontjainak hibahatása					
	Eltérések átlaga	Min előjeles eltérés	Max előjeles eltérés	Hiba terjedelme	Átlagos négyzetes középhiba
Tesztterület 1	-0.677	-1.437	0.072	1.509	±0.293
Tesztterület 2	-0.528	-0.983	-0.036	0.947	±0.218
Tesztterület 3	-0.651	-1.925	0.746	2.671	±0.450
Topográfiai felmérés digitalizált támpontjainak hibahatása					
	Eltérések átlaga	Min előjeles eltérés	Max előjeles eltérés	Hiba terjedelme	Átlagos négyzetes középhiba
Tesztterület 1	-0.498	-2.019	0.663	2.682	±0.505
Tesztterület 2	0.108	-0.898	2.534	3.432	±0.653
Tesztterület 3	0.327	-2.216	3.640	5.856	±1.046

2. ábra: Támpontok hibáinak hatása a levezetett domborzatmodellek megbízhatóságára

45. melléklet:

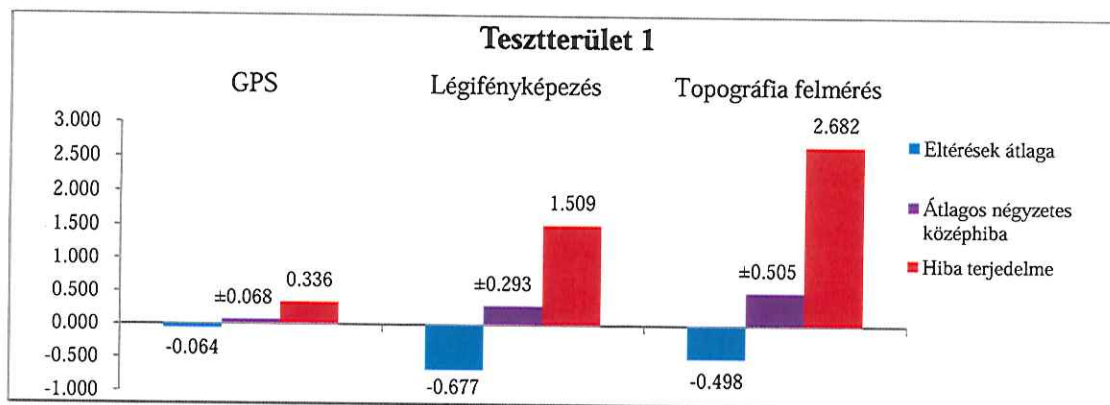
GPS mérés támpontjainak hibái					
	Eltérések átlaga	Min előjeles eltérés	Max előjeles eltérés	Hiba terjedelme	Átlagos négyzetes középhiba
Tesztterület 1	-0.070	-0.210	0.130	0.340	±0.110
Tesztterület 2	-0.100	-0.180	0.020	0.200	±0.110
Tesztterület 3	-0.090	-0.610	0.390	1.000	±0.182
Légifényképezés mért támpontjainak hibái					
	Eltérések átlaga	Min előjeles eltérés	Max előjeles eltérés	Hiba terjedelme	Átlagos négyzetes középhiba
Tesztterület 1	-0.600	-1.190	0.150	1.340	±0.715
Tesztterület 2	-0.500	-1.030	0.040	1.070	±0.575
Tesztterület 3	-0.600	-2.350	1.070	3.420	±0.945
Topográfiai felmérés digitalizált támpontjainak hibái					
	Eltérések átlaga	Min előjeles eltérés	Max előjeles eltérés	Hiba terjedelme	Átlagos négyzetes középhiba
Tesztterület 1	-0.460	-1.150	0.520	1.670	±0.589
Tesztterület 2	-0.100	-0.660	0.600	1.260	±0.361
Tesztterület 3	0.260	-2.370	3.160	5.530	±1.218

1. ábra: Támpontok megbízhatósága LiDAR1-től való eltérések alapján

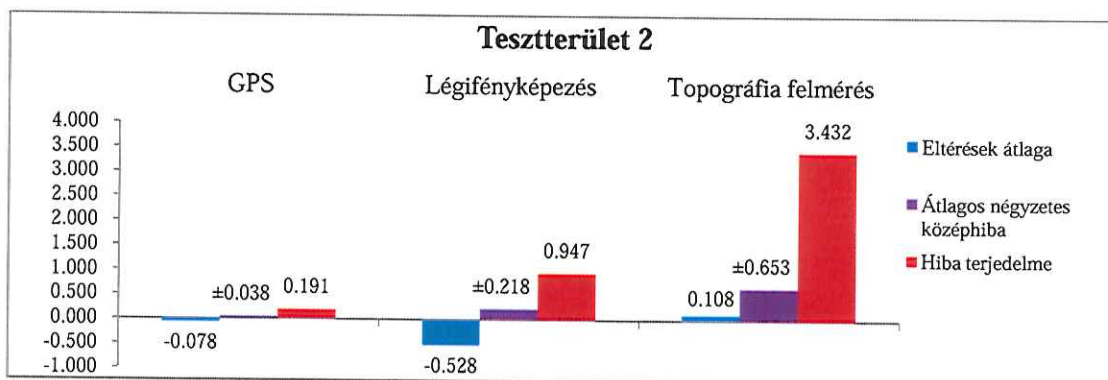


2. ábra: Topográfiai felmérés támponthibáinak hatása az interpoláció elvégzése után

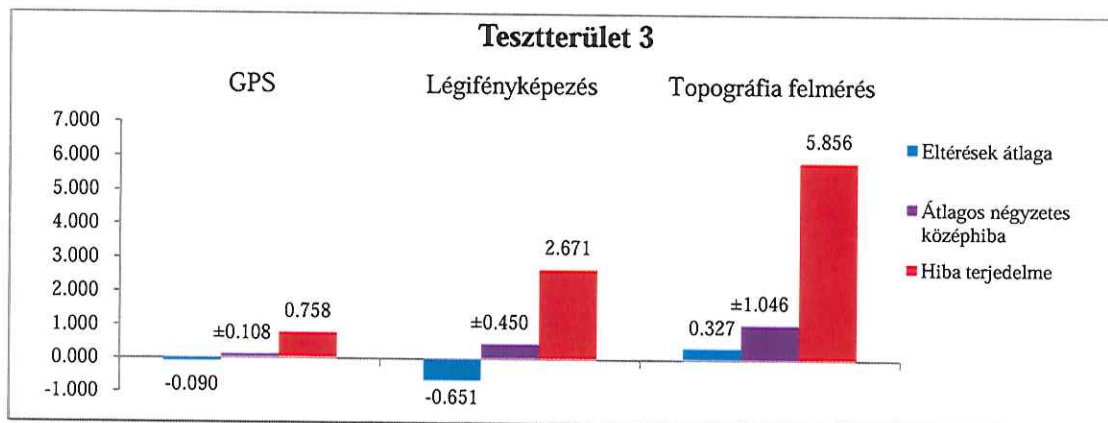
46. melléklet:



1. ábra: Támpontok hibáinak hatása a levezetett domborzatmodellek megbízhatóságára az 1. tesztterületen

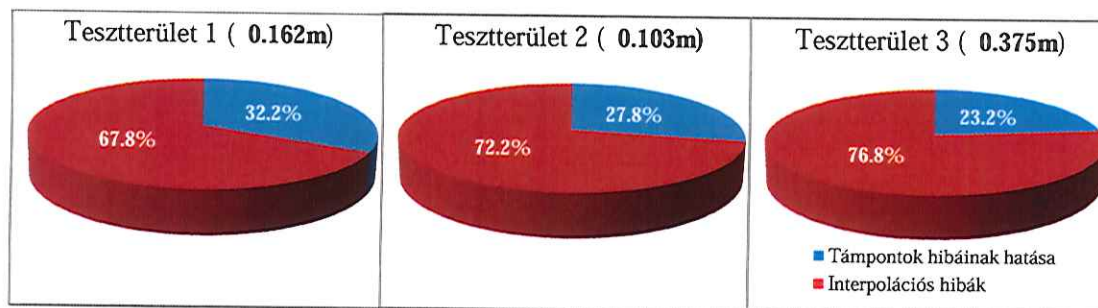


2. ábra: Támpontok hibáinak hatása a levezetett domborzatmodellek megbízhatóságára a 2. tesztterületen

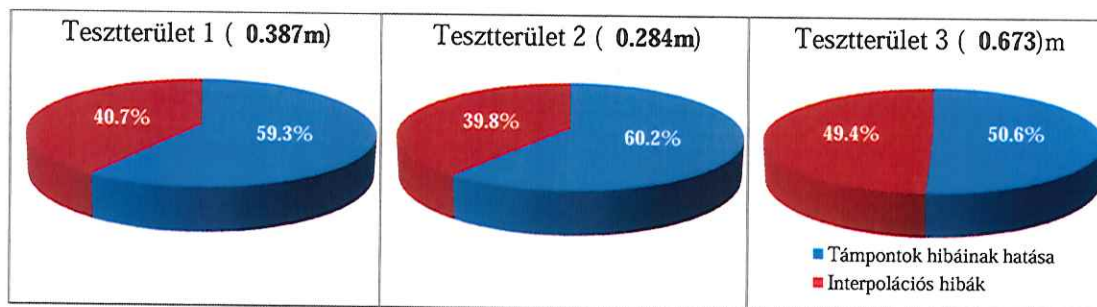


3. ábra: Támpontok hibáinak hatása a levezetett domborzatmodellek megbízhatóságára a 3. tesztterületen

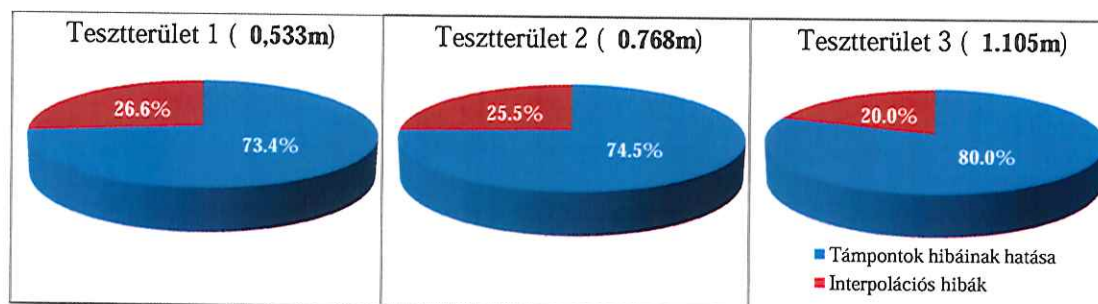
47. melléklet:



1. ábra: GPS mérés támpontjaiból levezetett DDM10 eltéréseit okozó hibák eloszlása



2. ábra: Térfotogrammetriai automatizált kiértékelés támpontjaiból levezetett DDM10 eltéréseit okozó hibák eloszlása



3. ábra: Topográfiai felmérés digitalizált támpontjaiból levezetett DDM10 eltéréseit okozó hibák eloszlása