

Doktori (PhD) értekezés
Soproni Egyetem
Roth Gyula Erdészeti és Vadgazdálkodási Tudományok Doktori Iskola
Geoinformatika Program

**LÉGI TÁVÉRZÉKELÉSI ADATOKBÓL SZÁRMAZÓ PONTFELHŐK ÉS
FELSZÍNMODELLEK ERDÉSZETI FELHASZNÁLÁSÁNAK VIZSGÁLATA**

Készítette: Szász Botond
Témavezető: Dr. Király Géza

Sopron
2026

**LÉGI TÁVÉRZÉKELÉSI ADATOKBÓL SZÁRMAZÓ PONTFELHŐK ÉS
FELSZÍNMODELLEK ERDÉSZETI FELHASZNÁLÁSÁNAK VIZSGÁLATA**

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében

Írta:
Szász Botond

Készült a Soproni Egyetem Erdészeti és Vadgazdálkodási Tudományok Doktori Iskola
Geoinformatika programja keretében.

Témavezető: Dr. Király Géza

Az értekezést témavezetőként elfogadásra javasolt: igen / nem

témavezető

Az értekezést bírálóként elfogadásra javasolt (igen /nem)

1. bíráló (Dr. _____) igen /nem

bíráló

2. bíráló (Dr. _____) igen /nem

bíráló

Az értekezés nyilvános védésének eredménye: _____ %

Kelt Sopron, 20 év hónap nap

a Bírálóbizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése: _____

az EDHT elnöke

NYILATKOZAT

Alulírott Szász Botond, jelen nyilatkozat aláírásával kijelentem, hogy a *Légi távérzékelési adatokból származó pontfelhők és felszínmodellek erdészeti felhasználásának vizsgálata* című PhD értekezésem önálló munkám, az értekezés készítése során betartottam a szerzői jogról szóló 1999. évi LXXVI. törvény szabályait, valamint a Soproni Egyetem Roth Gyula Erdészeti és Vadgazdálkodási Tudományok Doktori Iskola által előírt, a doktori értekezés készítésére vonatkozó szabályokat, különösen a hivatkozások és idézések tekintetében.¹

Kijelentem továbbá, hogy az értekezés készítése során az önálló kutatómunka kitétel tekintetében témavezetőmet, illetve a programvezetőt nem tévesztettem meg.

Jelen nyilatkozat aláírásával tudomásul veszem, hogy amennyiben bizonyítható, hogy az értekezést nem magam készítettem, vagy az értekezéssel kapcsolatban szerzői jogsértés ténye merül fel, a Soproni Egyetem megtagadja az értekezés befogadását.

Az értekezés befogadásának megtagadása nem érinti a szerzői jogsértés miatti egyéb (polgári jogi, szabálysértési jogi, büntetőjogi) jogkövetkezményeket.

Sopron, 2026.05.05.

doktorjelölt

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.

Kivonat

LÉGI TÁVÉRZÉKELÉSI ADATOKBÓL SZÁRMAZÓ PONTFELHŐK ÉS FELSZÍNMODELLEK ERDÉSZETI FELHASZNÁLÁSÁNAK VIZSGÁLATA

Doktori kutatásomban elsősorban a látható fény tartományában készített légifelvételek alkalmazási lehetőségeit vizsgáltam domborzatmodellezés és faállomány-felmérés terén, valamint légi lézerszkennelésből származó domborzatmodellek segítségével termőhelyi jelentőségű elemzést is végeztem.

Az UAV-alapú légifényképezést lombtalan és lombos időszakban, különböző repülési paraméterekkel végeztem el, az elkészült légifelvételekből fotogrammetriai feldolgozással pontfelhőket állítottam elő. A lombtalan állapotú pontfelhőkből domborzatmodelleket vezettem le, valamint törzspoziókat azonosítottam, míg a lombos állapotúak esetén lombkoronamodelleket állítottam elő, amelyeken koronákat határoltam le. Mindegyik esetben vizsgáltam a repülési és feldolgozási lépések, illetve paraméterek a végeredmény pontosságára gyakorolt hatását. A domborzatmodell-előállítás munkafolyamat tartalmazott egy saját fejlesztésű, célzott simítási eljárást is, amely képes a pontfelhőzaj okozta modellhibákat korrigálni. A kutatás második fázisában két nagyobb, összesen mintegy 3000 hektáros területen vizsgáltam a domborzati jellemzőket kisrepülő légi lézerszkennelésből származó domborzatmodellek segítségével. Az adatokat az Országos Erdőállomány Adattár lejtés, kitettség, illetve domborzatforma értékeivel vetettem össze, majd megpróbáltam számszerűen meghatározni a változó kategóriába sorolás szabályait.

Az optikai felvételek alapján előállított domborzatmodellek pontosságát elsősorban a repülési paraméterek és a talajpontok osztályozási léptéke befolyásolta, míg a célzott simítás hatékonyan csökkentette a kiugró hibákat. A lombkorona-modelleken végzett, lokális maximum-meghatározáson alapuló koronacsúcs-azonosítás az inverz vízgyűjtő eljárásan alapuló koronavetület-lehatárolással jelentősen javítható. A lombtalan állapotban végzett törzsdetektálás pontossága kedvező körülmények között a 95%-ot is meghaladhatja. A nagyterületű domborzatvizsgálat rávilágított az Adattárban szereplő adatok hiányosságaira, ezért több javaslatot is tettem annak korszerűsítésére, valamint elemeztem azok megvalósíthatóságát és korlátait.

Abstract

INVESTIGATION OF THE FORESTRY APPLICATIONS OF POINT CLOUDS AND SURFACE MODELS DERIVED FROM AERIAL REMOTE SENSING DATA

In my doctoral research, I primarily investigated the applicability of aerial imagery acquired in the visible spectrum for terrain modelling and forest inventory purposes. In addition, I conducted site-related analyses using terrain models derived from airborne laser scanning data.

UAV-based aerial surveys were carried out in both leaf-off and leaf-on conditions using different flight parameters. From the acquired imagery, point clouds were generated through photogrammetric processing. In the leaf-off datasets, digital terrain models were derived and tree stem positions were identified, while in the leaf-on datasets, canopy height models were produced and individual tree crowns were delineated. In all cases, the effects of flight parameters as well as processing steps and their settings on the accuracy of the results were systematically evaluated. The terrain modelling workflow also included a custom-developed, targeted smoothing algorithm capable of correcting model errors caused by point cloud noise.

In the second phase of the research, terrain characteristics were analysed over two larger study areas with a total extent of approximately 3,000 hectares using terrain models derived from airborne laser scanning. The results were compared with slope-, aspect- and landform-related records of the National Forestry Database, and an attempt was made to quantitatively define the criteria for classification into the “variable” category.

The accuracy of terrain models derived from optical imagery was primarily influenced by flight parameters and the scale of ground point classification, while the targeted smoothing procedure proved effective in reducing outliers. Crown apex detection based on local maxima was significantly improved when combined with crown delineation using an inverse watershed algorithm. Under favourable conditions, stem detection in leaf-off datasets achieved accuracies exceeding 95%. The large-scale terrain analysis highlighted inconsistencies in the database records, leading to several proposals for their modernization, along with an evaluation of their feasibility and limitations.

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS	1
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	2
2.1. A TÁVÉRZÉKELÉS FOGALMA, JELLEMZŐI.....	2
2.2. ADATGYŰJTÉSI ELJÁRÁSOK	3
2.2.1. UAV-alapú légi fotogrammetria.....	3
2.2.2. Lézerszkennelés	5
2.3. FELSZÍNMODELLEZÉS	7
2.4. DOMBORZATMODELLEK ELEMZÉSI LEHETŐSÉGEI.....	11
2.4.1. Topográfiai, orográfiai elemzés	11
2.5. TERMŐHELYTÉRKÉPEZÉS.....	13
2.5.1. Topográfiai jellemzők és faállományparaméterek közötti összefüggések.....	15
2.6. TÁVÉRZÉKELÉSI ELJÁRÁSOK DENDROMETRIAI ALKALMAZÁSAI	15
2.6.1. UAV-alapú fotogrammetria.....	16
2.6.2. Földi lézerszkennelés.....	17
2.6.3. Légi lézerszkennelés	18
3. ANYAG ÉS MÓDSZER	19
3.1. UAV-ALAPÚ FOTOGRAMMETRIAI ÚTON ELŐÁLLÍTOTT PONTFELHŐK ÉS FELSZÍNMODELLEK VIZSGÁLATA	19
3.1.1. Vizsgálati mintaterületek kijelölése.....	19
3.1.2. Referenciaadatok gyűjtése.....	21
3.1.3. Repülések megtervezése és kivitelezése	22
3.1.4. Terepi illesztőpontok elhelyezése	25
3.1.5. Képfeldolgozás, pontfelhők előállítása.....	26
3.1.6. Pontfelhők szűrése, modellalkotás.....	28
3.1.7. Domborzatmodellek pontosságának elemzése.....	31
3.1.8. Koronacsúcsok azonosítása, koronavetületek lehatárolása	32
3.1.9. Törzspozíciók detektálása.....	34
3.2. KISREPÜLŐS LÉZERSZKENNELÉSSSEL ELŐÁLLÍTOTT DOMBORZATMODELLEK ELEMZÉSE	35
3.2.1. A mintaterületek bemutatása	35
3.2.2. Légi lézeres adatok feldolgozása, domborzatmodellek előállítása.....	36
3.2.3. Tematikák levezetése	37
3.2.4. Levezetett tematikák elemzése, adattári adatokkal való összehasonlítása	39
4. EREDMÉNYEK	41
4.1. UAV-ALAPÚ FOTOGRAMMETRIA SEGÍTSÉGÉVEL ELŐÁLLÍTOTT FELSZÍNMODELLEK ÉS PONTFELHŐK FELDOLGOZÁSA	41
4.1.1. Képegyeztetések eredményei	41
4.1.2. Domborzatmodellek pontossága	42
4.1.3. Koronák azonosítása	48

4.1.4. Törzspozíciók detektálása.....	51
4.2. DOMBORZATMODELLEK ELEMZÉSE, ÖSSZEHAONLÍTÁS AZ ADATTÁRI ADATOKKAL	54
4.2.1. TPI-sugarak megválasztása	54
4.2.2. Levezetett tematikák területi megoszlása.....	55
4.2.3. Összehasonlítás adattári adatokkal.....	58
5. EREDMÉNYEK MEGVITATÁSA, KÖVETKEZTETÉSEK	59
5.1. UAV-ALAPÚ FOTOGRAMMETRIA SORÁN ELŐÁLLÍTOTT PONTFELHŐK ÉS FELSZÍNMODELLEK FELHASZNÁLHATÓSÁGA	59
5.1.1. Képegyeztetések sikeressége.....	59
5.1.2. Domborzatmodellek pontossága	60
5.1.3. Koronák azonosítása.....	61
5.1.4. Törzspozíciók detektálása.....	62
5.2. DOMBORZATI VISZONYOKRA VONATKOZÓ ADATTÁRI ADATOKKAL VALÓ ÖSSZEHAONLÍTÁS	63
6. ÖSSZEFOGLALÁS	66
7. TÉZISEK.....	67
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	68
ÁBRAJEGYZÉK	69
TÁBLÁZATJEGYZÉK.....	71
IRODALOMJEGYZÉK.....	72
MELLÉKLETEK.....	81
1. Melléklet – Domborzatmodellek eltérési statisztikáira vonatkozó hatások	81
2. Melléklet – Koronacsúcs-azonosítás és koronavetület-lehatárolás eredményeire vonatkozó paraméterhatások	85
3. Melléklet – Lejtés, kitettség és domborzatformák kategorizálása után kapott hibamátrixok	89

1. Bevezetés

A különböző távérzékelési eljárások az elmúlt évtizedekben az erdészeti kutatásokban, nem sokkal ezután pedig az erdőgazdálkodási gyakorlatban is egyre inkább teret kezdtek hódítani, köszönhetően azok egyre rohamosabb fejlődésének. Mára már számos, vagy még csak kísérleti stádiumban lévő, vagy pedig már gyakorlati téren is bevetett módszer alakult ki, amelyek a faállományok dendrometriai paramétereit, illetve domborzati viszonyait hivatottak meghatározni légi vagy földi távérzékelési eljárásokkal. Ezen módszerek fejlődése a klímaváltozás fényében igencsak hasznos, ugyanis az ennek köszönhető gyors változások a klasszikus módszerekkel nem követhetők le megfelelő mértékben. A faállomány-paraméterek a föld feletti szénkészlet-meghatározásban, a domborzati jellemzők pedig a termőhelyi viszonyok megértésében, ezen keresztül pedig a megfelelő faállomány-típusok megválasztásában játszanak kulcsszerepet, ezért ezek pontos meghatározása, folyamatos nyomon követése elengedhetetlen az erdők klímaváltozás-mérséklő hatásainak megismerésében és kihasználásában.

Jómagam 2018-ban, egy nyári gyakorlat keretein belül találkoztam először drónokkal, majd egy, az UAV-alapú erdőfelmérés tematikájában készült szekciónyertes TDK, valamint egy sikeresen megvédett diplomamunka után kezdtem bele doktori kutatásaimba az imént említett két műben felvázolt módszerek továbbfejlesztésének reményében. Később az Agrárminisztérium által finanszírozott SoilSense projektben való részvételemnek köszönhetően újabb lehetőségek adódtak a kutatási téma kiszélesítésére, így az erdőállomány-felmérésen túl domborzatmodell-elemzési irányban is végezhettem vizsgálatokat.

Mindezeket összesítve tehát a doktori kutatásom két részből tevődik össze. Első körben UAV-alapú légi fotogrammetriai felmérések eredményeként létrehozott pontfelhők és felszínmodellek előállíthatóságát, osztályozási és feldolgozási lehetőségeit vizsgáltam, ezt követően pedig kisrepülő légi lézerszkennelés útján előállított nagy kiterjedésű és nagy felbontású domborzatmodellek elemzését végeztem erdészeti termőhelyi szempontok figyelembevételével.

A kutatás elsődleges célja különböző módszerek, eljárások fejlesztése, amelyek légi távérzékeléssel gyűjtött adatok feldolgozásában vesznek részt mind dendrometriai, mind pedig domborzatmodellezési- és elemzési tekintetben. A részletes kutatási célkitűzések a következők:

1. Lombtalan állapotban készített légifényképek fotogrammetriai feldolgozásán alapuló domborzatmodell-előállítási folyamatsor kidolgozása, valamint az adatgyűjtési és feldolgozási paraméterek pontosságra gyakorolt hatásának vizsgálata és az optimális beállításokra vonatkozó javaslatétel.
2. Egy olyan módszer kifejlesztése, amely célzottan képes a domborzatmodellen esetlegesen fellépő durva hibákat felismerni és elsimítani.
3. Lombos állapotban készült légifényképek fotogrammetriai feldolgozásán alapuló lombkorona-modellezési és feldolgozási folyamatsor kidolgozása (melynek célja a lehető legpontosabb faegyed-azonosítás), valamint a folyamatsor optimális paramétereinek meghatározása azok pontosságra gyakorolt hatásának vizsgálatával.
4. A lomtalan repülésekből származó fotogrammetriai pontfelhők felhasználásával végzett törzspozió-azonosítás lehetőségeinek és korlátainak vizsgálata.
5. A kétlépcsős topográfiai pozíció index (TPI) vizsgálat segítségével történő domborzatforma-osztályozás lehetőségeinek elemzése, illetve az ehhez szükséges vizsgálati paraméterek objektív megválasztásához egy modell megalkotása.
6. Légi lézerszkennelt pontfelhőkből előállított nagyterületű domborzatmodellek segítségével lejtés, kitettség, illetve domborzati tematikák levezetése, majd ezek erdőrézlet-szintű összevetése az Országos Erdőállomány Adattár vonatkozó adataival.

2. Irodalmi áttekintés

2.1. A távérzékelés fogalma, jellemzői

A távérzékelés egy olyan adatgyűjtési eljárás, melynek során az információ gyűjtése a megfigyelt objektummal való közvetlen fizikai érintkezés nélkül történik, ezzel pedig lehetővé válik a vizsgált objektumok, jelenségek olyan szemszögből történő megfigyelése, amely közvetlen megközelítéssel nem, vagy csak jelentős nehézségek árán lenne megvalósítható. A távérzékelés folyamata nem csak az információ gyűjtésére, hanem annak feldolgozására és értelmezésére is kiterjed (BALÁZSIK, 2010).

BELÉNYESI ÉS MTSAI (2013) szerint a távérzékelési eljárásoknak kilenc alapvető jellemzőjük van, melyek a következők:

1. Roncsolásmentesség: mivel az adatgyűjtés során nincs közvetlen fizikai kontaktus, az eljárás non-destruktív, azaz nem károsítja a megfigyelt objektumot;
2. Valós fizikai alap: a mért adatok valós fizikai mennyiségekből indulnak ki, melyekből mennyiségi (kvantitatív) és minőségi (kvalitatív) információk nyerhetők ki;
3. Módszertani sokszínűség: technológiák és feldolgozási eljárások széles választéka teszi lehetővé az adott kutatási célhoz leginkább megfelelő módszer alkalmazását;
4. Spektrális rugalmasság: a vizsgálatok a látható fény hullámhossz-tartományán túl, infravörös és rádióhullámok szintjén is végezhetők;
5. Időbeli dinamikusság: a gyűjtött információk bármikor kiértékelhetők, továbbá alkalmasak időbeli összehasonlításokra, trendek vizsgálatára;
6. Magas fajlagos munkavégzés: nagy kiterjedésű területek is gyorsan és hatékonyan felmérhetők, jelentős mennyiségű információ gyűjtésével;
7. Hozzáférhetetlen területek vizsgálhatósága: olyan térségek, objektumok is megfigyelhetők, amelyeket más eljárásokkal nem lennének elérhetők;
8. Tér- és időbeli mintavételezés: nagy felbontású, rendszeres időközönként ismétlődő adatgyűjtés révén pontos térbeli és időbeli követés valósítható meg;
9. Költséghatékonyság: a fajlagos költségek alacsonyak, különösen nagy területek esetén, így alternatívát jelenthet más adatgyűjtési módszerekkel szemben.

A távérzékelési adatgyűjtési folyamat rendszere négy alkotóelemből tevődik össze (KIRÁLY, 2007):

- sugárforrás,
- vizsgált objektum,
- hordozóeszköz (platform),
- érzékelő (szenzor).

A sugárforrás biztosítja az elektromágneses sugárzást, amelyet visszaver a vizsgált objektum. A visszavert sugarakat a hordozóeszközön elhelyezett érzékelő rögzíti és a szükséges információvá alakítja át. Annak függvényében, hogy ezek a sugarak honnan származnak, beszélhetünk aktív és passzív távérzékelésről: előbbi esetén mesterségesen kibocsátott elektromágneses sugarakkal történik a vizsgálat (tehát szükség van egy adóegységre), míg utóbbi a napsugárzás visszaverődésének érzékelésén alapszik (BALÁZSIK, 2010). Aktív távérzékelési eljárás például a lézeres letapogatás, míg passzív a fényképezés.

Annak függvényében, hogy milyen eljárást alkalmazunk, változó közvetlen eredmény-adathalmazokat kapunk. Az aktív távérzékelési módszerek egy része, mint például lézerszkennelés egy 3D pontfelhőt eredményez, amely egy szabálytalan adatmodell, minden egyes pontját koordináták határozzák meg. Passzív távérzékelés során jellemzően szabályos

adatmodelleket, azaz rasztereket kapunk, amelyek egyenlő nagyságú egységterületekre (pixelekre) osztják a vizsgált felületet, és erről tárolnak információkat.

A szabályos adatmodellű felvételek minőségét, élességét és időbeliségét jellemzik azok felbontásai, melyek a következők (KIRÁLY, 2007):

- Geometriai felbontás: egy pixel oldalhosszának a valóságban értelmezett méretét jelenti, mértékegysége: méter/pixel;
- Spektrális felbontás: az érzékelő hány különböző hullámhossztartományban képes adatokat rögzíteni, mértékegysége: sáv;
- Radiometriai felbontás: az egyes sávokon belül hány különböző intenzitásérték vehető fel, mértékegysége: bit;
- Időbeni felbontás: dinamikus, rendszeres időközönként készített felvételek esetén a két felvételezés között eltelt idő, mértékegysége: nap (vagy óra).

2.2. Adatgyűjtési eljárások

A távérzékelés alkalmazásának egyik nagy előnye BALÁZSIK (2010) szerint a módszertani sokszínűség (lásd 2.1. fejezet). A lehetőségek tárháza mind információgyűjtési, mind pedig feldolgozási tekintetben igencsak széleskörű. Az alábbiakban doktori kutatásom során alkalmazott adatgyűjtési eljárásokat mutatom be.

2.2.1. UAV-alapú légi fotogrammetria

Légifényképezésnek nevezzük azt az eljárást, amikor a hordozóeszköz valamilyen légi jármű, a szenzor pedig egy kamera. Kezdetben hőlégballonokról végezték a légifényképezést (az első ilyen felvétel 1858-ban készült (BALOGH, 2013)), később ez áttelődött a repülőgépek és helikopterek szintjére.

Az egyszerű, polgári felhasználású UAV-k (*Unmanned Aerial Vehicle* – pilóta nélküli légi jármű) elterjedésével a légi fotogrammetria egy új fejezete kezdődött. A polgári lakosság számára is megfizethető árú UAV-k már szinte bárki számára lehetővé teszik légifényképek készítését, amelyek akár felmérési célokra is felhasználhatók. Ezek megjelenése a 2010 körüli évekre datálható, amely után rövid időn belül a térképészetben, erdészetben, mezőgazdaságban, és egyéb földfelszín-alapú kutatásokban is megjelentek. Az első zászlóshajók között említendő a *SenseFly eBee* (merevszárnyú), valamint a *DJI Phantom* (quadrokopter) típusú UAV-k. A további fejlődést a fotogrammetriai szoftverek megjelenése (*Pix4Dmapper*, *Agisoft Photoscan/Metashape*) segítette elő (COLOMINA – MOLINA, 2014).

Az UAV-alapú légi fotogrammetria munkafolyamatának lépései a következők (NEX – REMONDINO, 2014):

1. Repüléstervezés: repülési paraméterek meghatározása (repülési magasság, kamera dőlésszöge, bázisirányú és sorok közötti átfedés), melyek alapján az UAV autonóm módon repüli végig a kiszámított útvonalat;
2. Földi illesztőpontok (GCP – Ground Control Point) mérése: a modell pontos vetületbe illesztése érdekében; ez a lépés elhanyagolható, ha a képek rendelkeznek precíz helyadatokkal;
3. Képalkotás: a repülés autonóm végrehajtása során megadott időközönként a szenzor képeket készít;
4. Képegyeztesítés: az egymással átfedő képeken objektumok azonosítása, amellyel meghatározható a képek egymáshoz viszonyított pozíciója;
5. Pontfelhő, modellek előállítása: a tájékozott képekből először 3D pontfelhő, majd felszínmodellek állíthatók elő;

6. Adatelemzés: az elkészült termékeken különböző térbeli elemzések végezhető (pl. lejtésvizsgálat, térfogatszámítás, vegetációs index), amelyek integrálhatók a térinformatikai rendszerekbe.

A repülési paraméterek befolyásolják a készített felvételek, ezen keresztül pedig az előállított modellek geometriai felbontását és pontosságát. A kameraszpecifikációk (szenzor mérete, pixelméret, fókusztávolság) meghatározzák, hogy a repülési magasság függvényében egy pixel mekkora területet fed le a valóságban. Az átfedések a repülés idejére, illetve a képegyeztetésre vannak leginkább hatással. DHARVA ÉS MTSAI (2024) egy 22,5 m átlagmagasságú *Pinus radiata* állomány példáján arra a megállapításra jutottak, hogy a 120 m-es repülési magasság, valamint a 90%-os bázisirányú és 85%-os sorok közötti átfedés optimális erdészeti szempontú vizsgálatokhoz; a magasságot 80 m-re csökkentve ugyan jobb geometriai felbontás érhető el, azonban az előállított modellek hajlamosabbak a hibákra. PESSACG ÉS MTSAI (2022) még ennél is nagyobb, 95%-os bázisirányú átfedést, ugyanakkor a 100 m, vagy az alatti repülési magasságokat tartják a legoptimálisabb paramétereknek.

Tekintve a kameradőlést, térképezési feladatokhoz alapvetően nadír (tehát függőlegesen lefele néző) képek készítése a jellemző, azonban SADEQ (2019) vizsgálatában kimutatta, hogy ha ehhez döntött képek is társulnak, az előállított fotogrammetriai termékek geometriai pontossága megbízhatóbb lesz. Hasonló megállapításra jutottak AHMED ÉS MTSAI (2022) is, akik a nadír (90°) képeket 70°-os dőlésszögű felvételekkel kombinálták, annyi kiegészítéssel, hogy a jelentős megbízhatósági növekedést abban az esetben érték el, amikor a döntött és nadír képek készítésére irányuló tervek repülési vonalai egymásra merőlegesek voltak.

Képalkotás tekintetében beszélhetünk egyszerű, a látható fénytartományban érzékelő RGB-kamerákról, valamint multispektrális szenzorokról is. Előbbiek három sávban, egy szenzorral, utóbbiak pedig több sávban, sávonként egy-egy szenzorral végzik a képalkotást. A multispektrális kamerarendszerek a látható sávokon túl jellemzően a vörös él és a közeli infravörös sávokban érzékelnek, melyek növényegészségügyi szempontokból jelentősek (VERŐNÉ ÉS MTSAI, 2020). Fontos továbbá a megemlíteni a termális infravörös sávot is, amely köré jellemzően külön kamerarendszer épül, feladata pedig a hőmérsékleti viszonyok vizsgálata.

A földi illesztőpontok célja a létrehozandó termékek pontosságának növelése, precíz vetületbe illesztése. Használatuk szükségességét a modellekkel szemben állított követelmények határozzák meg. HUGENHOLTZ ÉS MTSAI (2016) megállapítása szerint, ha a modell átlagos magassági hibáját 12 centiméter alatt szeretnénk tudni, úgy nem elég a direkt georeferálás (a kamerapozíciók alapján), hanem már szükség van földi illesztőpontokra. Az illesztőpontok száma alapvetően befolyásolja az előállított háromdimenziós modellek pontosságát. TAHAR (2013) 6 különböző GCP-konfigurációt (4-től 9-ig terjedő számban) (1. ábra) vizsgált egy 1,5 km² nagyságú területen, melynek során megállapította, hogy mindegyik esetben magas fokú, 97% feletti lineáris egyezéstről (illeszkedési jóságról) beszélhetünk, a 8 és 9 illesztőpont által hozott eredmény pedig egyértelműen kiemelkedik a többi közül. SANZ-ABLANEDO ÉS MTSAI (2018) vizsgálatai szerint kevesebb illesztőpont alkalmazásával az előállított modell három dimenzióban értelmezett négyzetes hibája várhatóan $\pm$ ötszöröse lesz a modell geometriai felbontásának, viszont ha 100 képenként legalább 2 illesztőpontot helyezünk el, úgy ez a hiba a felbontás mértékének kétszeresére csökkenhet.



1. ábra: TAHAR (2013) által vizsgált illesztőpont-kiosztások

A képegyeztetés (*image matching*) egy olyan automatikus eljárás, amely átfedő képek közötti azonos pontok, jellemzők, struktúrák megfeleltetésére szolgál (VERYKOKOU – IOANNIDIS, 2025). A képegyeztetési eljárásokat alapvetően három csoportba sorolhatjuk (KIRÁLY – SZÁSZ, 2025):

1. Területalapú: meghatározott helyzetű és méretű alakzatnak megfelelő egyező képrészlet keresése az átfedő képeken;
2. Objektumalapú: jellegzetes objektumok, élek, szélsőérték-pontok detektálása, majd térbeli összepárosítása;
3. Kapcsolatalapú: elsősorban a relatív tájékozás automatizálását szolgálják.

Az elmúlt évek során számos képegyeztetési eljárás, algoritmus született, ilyen például a SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*), SURF (*Speeded-Up Robust Features*), ORB (*Oriented FAST and Rotated BRIEF*) (KARAMI ÉS MTSAI, 2015), SGM (*Semi-Global Matching*) (HIRSCHMULLER, 2005), MVS (*Multi-View Stereo*) (FURUKAWA – HERNANDEZ, 2015), és az SfM (*Structure-from-Motion*) (WESTOBY ÉS MTSAI, 2012).

A könnyen kezelhető UAV-technológia fejlődésének és széles körű elérhetőségének köszönhetően az SfM algoritmus lett az egyik legelterjedtebb sok szakterületen, köztük erdészeti berkeken belül is, mivel egyszerűsége és viszonylag alacsony fajlagos költsége különösen előnyössé teszi az alkalmazását (IGLHAUT ÉS MTSAI, 2019). Az algoritmus egy időben képes meghatározni a külső (képsík helyzete a tárgy-koordinátarendszerben) és belső (fókusz-távolság, képfőpont-eltolódás, illetve a radiális és tangenciális torzulás együtthatói) tájékozás paramétereit (JANCSÓ, 2010), miközben egy kezdeti, úgynevezett ritka pontfelhőt (*sparse cloud*) hoz létre a kapcsolópontokból. Legnagyobb előnye, hogy nem igényel előzetesen kalibrált kamerát, így nem professzionális eszközökkel (tehát egyszerű, nem mérőkamera pontosságú kamerarendszerekkel) rögzített képek feldolgozására is alkalmas (VERHOEVEN ÉS MTSAI, 2012). HARWIN ÉS MTSAI (2015) arra a következtetésre jutottak, hogy azon kamerák esetén is pontosabb eredményt hozott az SfM-alapú automatikus kalibráció, ahol rendelkezésre állnak bizonyos előzetes kalibrációs adatok; ez a megállapítás különösen igaz abban az esetben, ahol a nadír képek mellett döntött felvételek is készültek.

A képek végleges tájékozási adatainak ismeretében előállítható a fotogrammetriai pontfelhő, ennek feldolgozásával pedig a különböző felszínmodellek. Ezek előállításával és elemzési lehetőségeivel az 1.3. és 1.4. fejezet foglalkozik.

2.2.2. Lézerszkennelés

A lézerszkennelés, nemzetközi elnevezés szerint LiDAR (*Light Detection and Ranging*) egy aktív távérzékelési módszer, amely lézer alapú távolságmérést végez térbeli adatok rögzítésére. A kibocsátott lézernyaláb legalapvetőbb tulajdonságai a következők: nagy kibocsátási teljesítmény, kis sugárnyaláb-szélesség és jól meghatározott frekvencia. Ennek köszönhetően kiemelkedő pontosságot, emellett pedig nagy mérési frekvenciát képesek elérni. A méréshez használt hullámhossz jellemzően a látható fény és a közeli infravörös elektromágneses sugárzási tartományba esik. A lézernyaláb a vizsgált objektumot elliptikus alakú foltnban (*footprint*) világítja meg, a távolság pedig a visszavert jel kétirányú futási idejéből

számítható ki. A kibocsátás vízszintes és magassági irányának, illetve szögeinek mérésével pedig a visszaverődés helyének 3D koordinátái is meghatározhatók a szenzor saját koordinátarendszerében (BROLLY, 2013).

A lézerszkennerek egyik legfontosabb tulajdonsága a frekvencia, azaz hány pontot tud rögzíteni a rendszer másodpercenként. Ez a szám jellemzően több százezer, fejlettebb szkennerek esetén pedig már a kétmilliót is elérheti.

2.2.2.1. Földi lézerszkennelés

A földi lézerszkennelés (*Terrestrial Laser Scanning* – TLS) egy földfelszínen alkalmazott, aktív távérzékelési eljárás, amely lézeres távmérést alkalmazva gyorsan és nagy pontossággal rögzíti a vizsgált objektumok felszíni pontjainak pozícióit. Jellemzően a katonai és úripari alkalmazásokból fejlődött ki, fejlesztésének legfőbb finanszírozója az Amerikai Egyesült Államok DAPRA (*Defense Advanced Research Project Agency*) szervezete volt az 1960-as évektől egészen az 1990-es évekig, mígnem 1987 és 1998 között szélesebb körök is felismerték ipari felhasználhatóságát (SPRING, 2020).

A TLS megnevezés alapvetően minden olyan eszközre vonatkozik, amely platformja által közvetlen fizikai kapcsolatban áll a földfelszínnel. Legjellemzőbb a statikus szkennelés, amely során a szenzor nem változtatja helyét, azonban az utóbbi években a mozgó, úgynevezett mobil szkennerek térhódításának köszönhetően az ilyen típusú szkennereket sok tudományos munkában már külön, a TLS-sel egyenrangú kategóriaként kezelik, MLS (*Mobile Laser Scanning*) néven említve (ZHONG ÉS MTSAL, 2016; CHEN ÉS MTSAL, 2024; SZÁSZ ÉS MTSAL, 2025), azonban helyenként PLS-ként (*Personal Laser Scanning*) is megjelenik (LIANG ÉS MTSAL, 2014; PAVELKA ÉS MTSAL, 2023). Mindkét módszernek megvannak a maga előnyei. Mivel a mobil szkennelés során az adatgyűjtés folyamatos mozgás közben történik, az előállított pontfelhők általában kis sűrűségűek és pontosságúak, ezért a finom részletek és apró objektumok rögzítésére a statikus szkennelési módszerek alkalmasabbak (COOPS ÉS MTSAL, 2025). Tekintve azonban az időbeli hatékonyságot, a mobil szkennelés, abból adódóan, hogy nem igényel rögzített fix és pontos pozíciókat, jobb eredményeket mutat ezen a téren (CONTI ÉS MTSAL, 2024). Erdészeti szempontból a mobil szkennelés egyik vitathatatlan előnye a statikussal szemben, hogy a mozgás közbeni adatgyűjtés csökkenti a fák okozta takarásból adódó esetleges információhiányt.

2.2.2.2. Légi lézerszkennelés

A légi lézerszkennelés (*Aerial Laser Scanning* – ALS) jellegét tekintve ugyan hasonlít a mobil lézerszkenneléshez (DI STEFANO ÉS MTSAL (2021) egy lapon is említik a többi mobil lézerszkennelési platformmal), mivel a szenzor folyamatos mozgásban van adatgyűjtés közben, azonban a platform jellegéből adódóan (amely valamilyen légi jármű) mégis teljesen különálló kategóriaként kezelendő.

Az első, repülőgépről végzett lézerszkennelések az 1970-es években történtek, többek között erdőborítás és terepprofilok térképezése céljából (NELSON, 2012). A következő két évtizedben az ALS elterjedését jelentősen elősegítette a GPS és IMU rendszerek fejlődése, mígnem a 2010-es évekre már alapvető eszközzé vált a topográfiai felmérésekben.

Az ALS folyamata során a LiDAR-érzékelőket hagyományosan kis méretű, merevszárnyú repülőgépekre vagy helikopterekre szerelik. A technológia legnagyobb előnye, hogy viszonylag rövid idő alatt képes nagy kiterjedésű területekről háromdimenziós pontfelhőt előállítani. Az utóbbi években a pilóta nélküli légi járművek elterjedése, és velük párhuzamosan az azokkal kompatibilis, kisméretű LiDAR-szenzorok rohamos fejlődése egy új alcsoport létrejöttéhez vezetett, amit UAV-alapú lézerszkennelésnek nevezünk (*UAV-borne Laser Scanning* – ULS). Ez a szétválasztás hasonló logikán alapul, mint a TLS-MLS esetén, miszerint

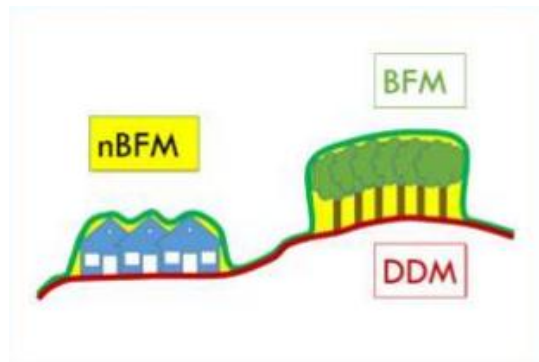
bár a mérési elv azonos, a platform jellegéből adódóan az alkalmazási terület, a műszaki paraméterek és a gazdasági szempontok merőben eltérhetnek. Számos tudományos publikációban is megfigyelhető ez a szétválasztást, összehasonlítva azok lehetőségeit és képességeit (LI ÉS MTSAI, 2024; SZÁSZ ÉS MTSAI, 2025). BRUGGISER ÉS MTSAI (2019) szerint az ALS és ULS közötti két legfontosabb különbség az elérhető pontsűrűségben és a fajlagos költségekben mutatkozik meg: míg előbbinél az ULS nevezhető hatékonyabbnak, mivel jellemzően jóval nagyobb pontsűrűség érhető el vele az UAV-k alacsonyabb repülési magassága és rugalmasabb mozgása miatt, addig utóbbi esetén egyértelműen az ALS hatékonysága emelkedik ki, mivel jelentősen nagyobb területek repülhetők le nagyobb magasságból és nagyobb repülési sebességgel.

2.3. Felszínmodellezés

Az általánosságban vett modellek olyan objektumok vagy fogalmak, amelyeket egy más objektum vagy fogalom reprezentálására használunk. Más megközelítésben, a valóság kicsinyített, számunkra felfogható formára redukált hasonmása (MEYER, 2004). Ennek egyik konkrét formája lehet a felszínmodell, amely a vizsgált felszín folytonos felületének statisztikai reprezentációját jelenti nagy számú, ismert X, Y, Z koordinátájú pontok által egy tetszőleges koordináta-rendszerben (LI ÉS MTSAI, 2004).

KIRÁLY ÉS MTSAI (2017) szerint a felszínmodelleknek három típusát különböztetjük meg (2. ábra):

1. Borított felszínmodell (BFM): magába foglalja a terepet és a rajta elhelyezkedő összes objektumot (növényzet, épületek stb.);
2. Digitális domborzatmodell (DDM): a talajfelszín tengerszint feletti magasságát írja le, a tereptárgyak figyelmen kívül hagyásával;
3. Normalizált borított felszínmodell (nBFM): az előző kettő különbségéből jön létre, így a tereptárgyak talajfelszíntől számított relatív magasságát tartalmazza; egyik típusa az erdészeti gyakorlatban is alkalmazott famagasságmodell.

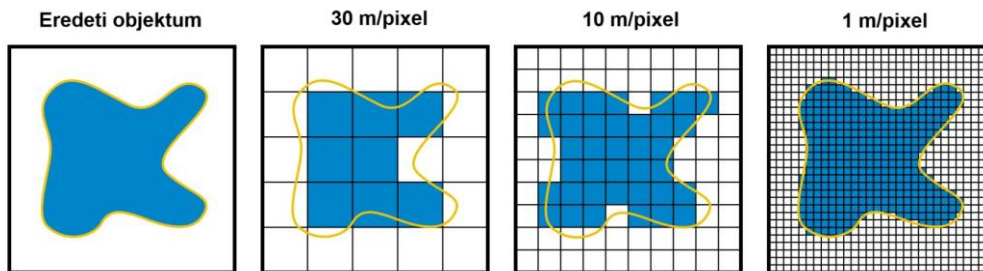


2. ábra: A három felszínmodell-típus (KIRÁLY ÉS MTSAI, 2017)

Ezek a térbeli modellek jellemzően raszteres formátumúak, azaz szabályos, rácsszerűen elhelyezkedő pixelek alkotják őket, melyek mindegyike egy magasságértéket tárol. A felszínmodelleket vektoros formában is tárolhatjuk, szabálytalan háromszöghálózattal (*Triangulated Irregular Network – TIN*). Ugyan ennek a tárhelyigénye jóval alacsonyabb, mint egy raszteres adatállományé, mégis mivel a különböző matematikai műveletek a raszteres formátum esetén egyszerűbben és hatékonyabban elvégezhetők, így ennek használata jóval célszerűbb és praktikusabb az alkalmazott feldolgozási feladatokhoz.

A felszínmodellek két legfontosabb jellemző tulajdonsága a geometriai felbontás és a pontosság. A felbontás azt határozza meg, hogy a modell egy pixelének oldala milyen távolságot reprezentál a valóságban (3. ábra). Ez az érték általánosságban méter/pixel

egységben kerül megadásra, azonban nagyobb felbontás esetén előfordulhat centiméter/pixel mértékegység is. A pontosság ezzel szemben arra vonatkozik, hogy a pixelekhez rendelt magassági értékek mennyire közelítik meg a valós domborzati viszonyokat. Mértékegysége jellemzően centiméter, nagy pontosságú felmérések esetén akár milliméter is lehet (SZIJÁRTÓ, 2007). Jelleget tekintve kétféle pontosságról is beszélhetünk: abszolút, amely azt mutatja meg, hogy a modell milyen mértékben tér el a valóságtól, illetve relatív, ami a modell belső geometriai konzisztenciáját hasonlítja össze a valós térszerkezettel (FRANÇA ÉS MTSAI, 2019).



3. ábra: A felbontás változásának szemléltetése (forrás: wikimedia.org)

A felszínmodellek alapja lehet geodéziai felmérés során gyűjtött ponthalmaz, vagy különböző forrásból származó pontfelhők, ahol minden egyes pont X, Y, Z térbeli koordinátákkal van leírva. A pontfelhők jellemzően lézerszkennelésből vagy fotogrammetriai képfeldolgozásból származnak. POLAT ÉS UYSAL (2018) szerint mind az ALS-alapú, mind pedig a légi fotogrammetriai pontfelhők alkalmasak megfelelő pontosságú modellek előállítására, azonban felhívják arra a figyelmet, hogy az utóbbi eredményei különösen érzékenyek a kamera jellemzőire, a repülési magasságra, az alkalmazott fotogrammetriai szoftverre, valamint a fényviszonyokra.

A modellezés során a vizsgált terület egy előre meghatározott méretű, szabályos négyzethálóra (azaz pixelekre) kerül felosztásra, majd mindegyik cella magassági értéke a bele eső pontok magassága alapján kerül kiszámításra, jellemzően átlagolással, mediánnal, vagy egyéb statisztikai módszerekkel. Azoknak a pixeleknek a magasságértékét, amelyeknek a területére egyetlen pont sem esik, interpolációs eljárással kell meghatározni, figyelembe véve a szomszédos pixelek értékeit. Ennek célja a folytonos és értelmezhető felszínmodell létrehozása még hiányos adatlefedettség esetén is. LI ÉS HEAP (2014) összesen 38 különböző interpolációs módszert vizsgált és hasonlított össze, az eredmények alapján pedig kidolgozott egy döntési fát, amely az adatok elérhetősége és jellege alapján határozza meg, hogy melyik módszer a legalkalmasabb az adott helyzetben. Az általuk vizsgált interpolációs eljárások három nagyobb csoportba sorolhatók, melyek a következők:

- Nem geostatistikai: legközelebbi szomszéd (NN), szabálytalan háromszögháló (TIN), súlyozás a távolság inverzével (IDW), természetes szomszéd (NaN), regressziós fa (RT) stb.;
- Geostatistikai (krigelés):
 - Egyváltozós: egyszerű krigelés (SK), modell alapú krigelés (MBK), faktoriális krigelés (FK), duális krigelés (DuK) stb.;
 - Többváltozós: univerzális krigelés (UK), egyszerű kokrigelés, többváltozós faktoriális krigelés (MFK), valószínűségi krigelés (PK) stb.;
- Kombinált módszerek: osztályozás egyéb interpolációs módszerekkel, trendfelszín-elemzés krigeléssel, regressziós fa krigeléssel, lineáris vegyes modell (LMM) stb.

A BFM-ek előállítása a pontfelhők alapján viszonylag egyszerű feladat, mivel a modellezés célja a felszín borító összes objektum (növényzet, tereptárgyak, épületek stb.) geometriájának leképezése, így a rendelkezésre álló pontfelhő valamennyi pontja felhasználásra kerül. Ezzel szemben a DDM előállítása bonyolultabb, mivel kizárólag a talajfelszín hivatott ábrázolni a borítottság kizárásával. Ennek előállításához első körben a talajpontok elkülönítésére, azaz osztályozására van szükség a pontfelhőn belül. LIU (2008) szerint ez a domborzatmodellezés egyik legkritikusabb mozzanata. Vizsgálatai alapján megállapította, hogy a feldolgozás első lépéseként szükséges a pontfelhő ritkítása, melynek során az adatsűrűség csökkentése mellett biztosítani kell, hogy a terep jellemző geometriáját leíró kulcselemek (tereptárgyak törésvonalai, árkok, kiemelkedések stb.) megmaradjanak, míg a kevésbé releváns, már-már zavaró pontok eltávolításra kerüljenek. Az így osztályozott talajpontokból már generálható egy megbízható és részletes domborzatmodell.

SITHOLE ÉS VOSSSELMANN (2004) szerint minden talajpont-osztályozó feltételezést tesz a talajpontok elhelyezkedéséről egy lokális környezetben, melyeknek illeszkedniük kell egy parametrikusan meghatározott felülethez. Ez alapján négy különböző koncepció figyelhető meg:

1. Lejtésalapú: két pont közötti lejtést vagy magasságkülönbséget vizsgálnak, amennyiben ez meghalad egy előre meghatározott küszöbértéket, a magasabban elhelyezkedő pontot objektumhoz tartozónak tekintik (VOSSSELMANN, 2000; SITHOLE, 2001);
2. Blokk-minimum: a diszkrimináns függvény egy vízszintes sík, amelyhez tartozik egy felette elhelyezkedő, meghatározott magasságú pufferezóna, amit a sík pozicionál, és meghatározza azt a háromdimenziós térrészt, ahol a feltételezett tereppontok találhatók (MURPHY ÉS MTSAI, 2008; GLENN ÉS MTSAI, 2011);
3. Felszínalapú: a megközelítés a blokk-minimum módszerekhez hasonló, azonban itt a diszkrimináns függvény nem egy síkban, hanem egy parametrikus felszínben nyilvánul meg (KRAUS – PFEIFER, 1998; HU ÉS MTSAI, 2014);
4. Klaszterezés/szegmentálás: abból a feltételezésből indulnak ki, hogy bármely pontcsoport, amely a környezeténél magasabban helyezkedik el, egy objektumot reprezentál; fontos azonban megjegyezni, hogy ezek a módszerek akkor működnek megfelelően, ha a pontcsoportok/szegmensek teljes objektumokat határolnak le, nem pedig csak azok egyes részleteit (LOHMANN, 2002; YAN ÉS MTSAI, 2012).

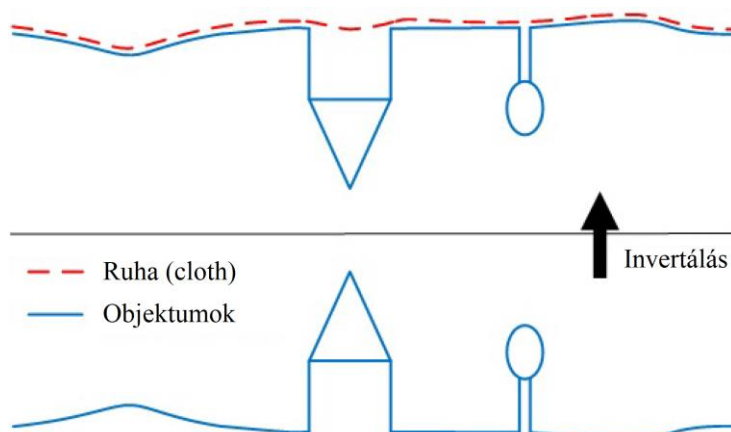
MENG ÉS MTSAI (2010) összefoglalója átfogó képet mutat az egyes talajpont-osztályozó algoritmusokról, amelyben a fentitől eltérő módon osztályozták azokat módszereik szerint: szegmentálás/klaszterezés-alapú, irányított pásztázó, kontúr-alapú, TIN-alapú, interpoláció alapú, valamint morfológiai szűrők. A továbbiakban néhány konkrét módszert sorolok fel, amelyeket erre a feladatra fejlesztettek ki.

AXELSSON (2000) egy adaptív TIN-háló illesztésén alapuló módszert mutatott be. Az eljárás első, inicializációs lépésében meghatározza a terep jellegét a felületi normálszögek hisztogramjának felhasználásával, majd ebből előzetes, a maximális lejtésre irányuló paraméterküszöbököt számít. Ezután egy, paraméterként megadható oldalhosszúságú rácsháló segítségével magpontokat jelöl ki, amelyre TIN-hálót illeszt, majd ezt iteratívan sűríti további pontok bevonásával, miközben az osztályozási paraméter is finomodik, egészen addig, amíg olyan iterációra nem kerül sor, ahol nem adódik hozzá több pont a talajpontok halmazához. Az ilyen jellegű megközelítéseket PTD-algoritmusoknak (*Progressive TIN Densification*) is nevezzük, alapvető (első típusú) hibájuk pedig a nagy sűrűségű és standard varianciájú pontfelhők esetén ütközik ki, miszerint az iteratív sűrítési paraméterek a szűrés teljes folyamata során egyre kisebbek lesznek. Erre nyújt megoldást a DONG ÉS MTSAI (2018) által

továbbfejlesztett módszer, amely két szakaszra osztja a szűrést: az első a normál PTD-algoritmusokra jellemző iteratív sűrítési eljárás, amely akkor lép a második szakaszba, amikor a TIN-hez tartozó pontok sűrűsége nagyobb lesz egy megadott értéknél; ebben a szakaszban egy többskálás iteratív sűrítési stratégia kerül bevezetésre, melynek köszönhetően a szögküszöb nagyobb lesz, így az első típusú és összes hibák 7,53% illetve 4,09%-kal csökkentek.

Szintén alkalmasak a talajpont-osztályozási feladatra a morfológiai szűrők (minimum és maximum szűrők kombinálásával). Az egyszerű morfológiai szűrő (SMRF) lineárisan növekvő ablakot és egyszerű lejtésküszöböt alkalmaz. A PINGEL ÉS MTSAI (2013) által bemutatott algoritmus a következő lépésekből áll: először egy minimum-felszínmodellt hoz létre a legalacsonyabban fekvő pontok alapján, majd fokozatosan növekvő sugarú morfológiai nyitást végezve elkülöníti a talaj- és objektumcellákat egy osztályozási korlát alapján. Ezt követően a talajpontokból ideiglenes DDM-et állít elő, amelyet interpolációval kiegészít, végül a pontokat a DDM-hez viszonyított magassági eltérés alapján osztályozza talaj- vagy objektumhoz tartozó pontként, figyelembe véve a lejtésfüggő küszöbértéket is. A módszer célja egy olyan robosztus, paramétereizhető kiindulási eljárás biztosítása, amelyre építve összetettebb, iteratív vagy több lépésben finomított (progresszív) szűrési megközelítések fejleszthetők; ez a megközelítés különösen hatékony a fentebb is említett első típusú hibaarányok minimalizálásában, miközben elfogadható második típusú hibaarányokat tart fent, melynek eredményeképpen megőrizhetők a finom felületi elemek.

Egy másik megközelítésként ZHANG ÉS MTSAI (2016) ruha szimulációs szűrőt (*Cloth Simulation Filter* – CSF) mutattak be, melynek első lépéseként a pontfelhő invertálásra kerül, majd ezt a felületet egy merev szövet fedi le. A szövet csomópontjai és a lézerszkennelt pontfelhő pontjai közötti kölcsönhatások elemzésével szimulálták a talajfelszín közelítését, ezzel pedig osztályozták a talajpontokat, az így kapott felszínmodell pedig 4,58%-os hibát eredményezett a valósághoz viszonyítva (4. ábra). LI ÉS MTSAI (2021) ezt a módszert kiegészítette egy további paraméterrel, a részterületek domborzati amplitúdójával, még inkább adaptívvá téve ezzel az eljárást, amely így a komplex domborzati formák esetén is jobb eredményt tud felmutatni. CAI ÉS MTSAI (2019) szintén egy kombinációt, a CSF és PTD algoritmusok együttes alkalmazását mutatta be, illetve fejlesztette tovább, amellyel mindkét módszer eredményét felülmúlta.



4. ábra: Ruha szimulációs (CSF) szűrő (ZHANG ÉS MTSAI, 2016)

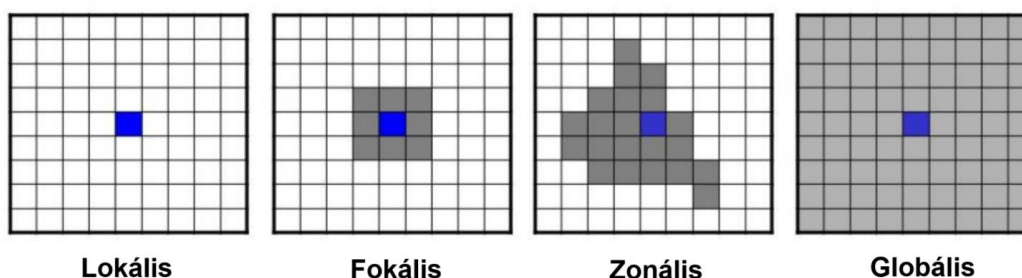
EVANS ÉS HUDAK (2007) többszintű görbület vizsgálatot (*Multline Curvature Classification* – MCC) alkalmazott, amely a HAUGERUD ÉS HARDING (2001) által bemutatott görbületszűrés továbbfejlesztéseként több léptékben elemzi a LiDAR-pontfelhő felszíni viszonyait. Az algoritmus iteratív módon, változó skálán és adaptív görbületi küszöbök alkalmazásával különíti el a talaj- és nem talajpontokat, ezáltal hatékonyan kezeli a vegetáció vertikális tagoltságából adódó torzításokat. A többskálás megközelítés lehetővé teszi az

aljnövényzetből származó zavaró jelek csökkentését, miközben nagy pontossággal megőrzi a felszínmodellhez szükséges talajpontokat. A módszer különösen előnyös összetett, erősen tagolt vegetációjú területeken, ahol az egyléptékű szűrési eljárások gyakran nem képesek megfelelően elkülöníteni a talaj- és növényzeti elemeket.

2.4. Domborzatmodellek elemzési lehetőségei

A raszteres formátumú domborzatmodelleken számos térbeli elemzés végezhető el. Ezeket a térbeli hatáskörük, azaz az elemzés során figyelembe vett cellák elhelyezkedése szerint négy fő kategóriába sorolhatjuk (5. ábra) (TOMLIN, 1990; CZIMBER, 2001):

1. **Lokális:** kizárólag az adott raszter egyes celláira vonatkoznak, vagyis minden pixel értékét önmagában, a szomszédos értékek figyelembevétele nélkül vizsgálják (például több állomány összehasonlítása, műveletek elvégzése közöttük);
2. **Fokális:** a vizsgált cella közvetlen környezetét veszi figyelembe egy előre meghatározott szomszédsági mátrix, vizsgálati ablak segítségével (például egyszerű filterek vagy inkrementális függvények, ahol a szomszédos cellák alapján illesztett felület parciális deriváltjaiból meghatározható a lejtés, kitettség vagy megvilágítási indexek);
3. **Zonális:** előre definiált térbeli egységek (például különböző felszínborítású felületek, közigazgatási határok) területén belül vizsgálja a domborzati viszonyokat;
4. **Globális:** a teljes raszteres állományra kiterjed; ide tartoznak a különböző statisztikai eljárások (pl. átlag, szórás, eloszlás), transzformációk (pl. normalizálás) vagy a térbeli folyamatmodellezések (pl. lefolyásmodellek előállítása, vízgyűjtő-területek lehatárolása).



5. ábra: Raszteres műveletek hatáskörei (TOMLIN, 1990)

2.4.1. Topográfiai, orográfiai elemzés

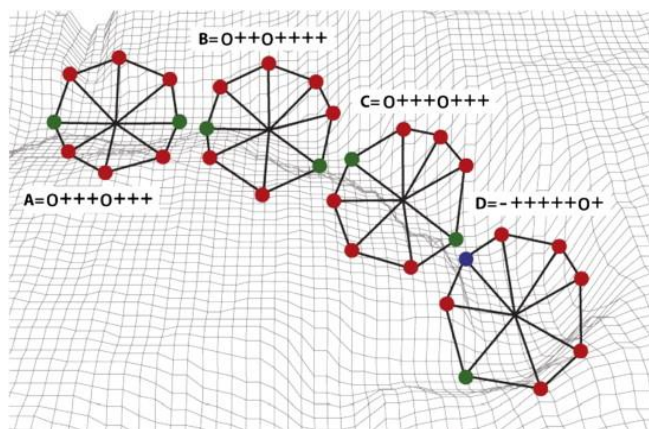
A topográfia a földtudomány egyik alapvető szakterülete, amely a Föld felszínének részletes, méretarányos ábrázolására, valamint a felszíni elemek elhelyezkedésének leírására összpontosít. Vizsgálja a természetes felszínformákat (hegységek, dombok, völgyek stb.), valamint az ember által létrehozott mesterséges elemeket. Az orográfia ezzel szemben, mintegy szűkebb témakörként, kifejezetten a felszíni kiemelkedések (hegységek, dombságok), illetve a köztük elterülő völgyek, síkságok leíró jellegű osztályozásával, elhelyezkedésével és külső megjelenésével foglalkozik.

A különböző megközelítések különböző felszínformákat, domborzatformákat határoznak meg, tekintettel az adott tudományterületre, szakterületre, illetve a vizsgált terület domborzati jellegzetességeire. A szakirodalomban többféle osztályozás is megjelent. Például MILNE ÉS MTSAI (1995) 77 felszínformát határoztak meg különböző léptékekben, míg SPEIGHT (1990) összesen 70-et különített el lejtő, térbeli dimenziók, morfológiai típus és geomorfológiai aktivitás alapján. Ezek az osztályozási eljárások a domborzatmodellek egyes pixeleit, illetve azok közvetlen környezetét vizsgálják, azaz fokális elemzési műveletnek tekinthetők.

MOKARRAM ÉS SATHYAMOORTHY (2018) összefoglalójában áttekinti a kategorizálásra vonatkozó megközelítéseket, valamint az osztályozási módszereket. Az egyszerű morfológiai elemek azonosítására többféle klasszikus osztályozási módszer létezik, azonban ezek kimenetei sem egységesek, ugyanis jellemző, hogy mindegyik módszer különböző kategóriákat különít el. PEUCKER ÉS DOUGLAS (1975) egy 6 kategóriás rendszert mutatott be (gerinc, árok, sík, csúcs, nyereg, gödör), amely 3x3 pixel nagyságú ablakban vizsgálja a középső pixel magasságát az azt körülvevő cellák fekvéséhez képest. DIKAU (1989) a lejtés és a görbület mértékének különböző kombinációi alapján állított fel egy 15 osztályos rendszert, míg a SHARY ÉS MTSAI (2005) által bemutatott kategorizálási megközelítés alapja a tangenciális-, átlagos-, profil-, és teljes Gauss-görbület, valamint a görbületkülönbség kombinációja. Egy másik megközelítés a lejtőpozíció szerinti kategorizálás, azaz a domborzati helyzet figyelembevétele alapján történő osztályozás, ami azért is hasznos, mivel az azonos morfológiai jellemzőjű területekhez más lejtőpozíció-értékek tartozhatnak. De ide sorolható DALRYMPLE ÉS MTSAI (1968) 9 elemes lejtőmodellje, WOOD (1942) 4-, valamint RUHE ÉS WALKER (1968) 5-egységes osztályrendszerei is.

MOKARRAM ÉS SATHYAMOORTHY (2018) kiemeli az elemzés léptékének fontosságát, miszerint az egyes osztályozási rendszerek csak bizonyos léptéktartományok esetén alkalmazhatóak megfelelő biztonsággal. A vizsgálat léptéke mellett a domborzatmodellek felbontása is kulcsfontosságú. KRAMM ÉS MTSAI (2017) vizsgálataiban megállapították, hogy a nagyobb felbontású domborzatmodellek pontosabb felszínforma-osztályozást eredményeznek; KIENZLE (2004) szerint jellemzően az 5 és 20 méter/pixel közötti felbontású domborzatmodellek a legalkalmasabbak erre a célra.

A konkrét kategóriákba sorolásra is számos módszer született az elmúlt években. Egy ilyen megközelítés a STEPINSKI ÉS JASIEWICZ (2011) által bevezetett geomorphonok alkalmazása. A módszer az aktuálisan vizsgált pixel (fókuszpixel) és a nyolc főirányban fekvő pixelek viszonyát rögzíti (magasabb, alacsonyabb, egyenlő) (6. ábra), azonban nem csak a közvetlen szintkülönbségeket, hanem a látóvonal-elvet alkalmazva a zenit- és nadírszögeket is figyelembe veszi, melynek köszönhetően a felszín lokális struktúrája pontosabban jellemezhető. A mintázatok maximális száma 3^8 (három lehetséges viszony a nyolc főirányban), viszont a forgási és tükrözési szimmetriák szerinti egyszerűsítéssel ez a szám 498 elemre redukálódik.



6. ábra: Geomorphonok osztályozása a nyolc térképi irány alapján (JASIEWICZ – STEPINSKI, 2013)

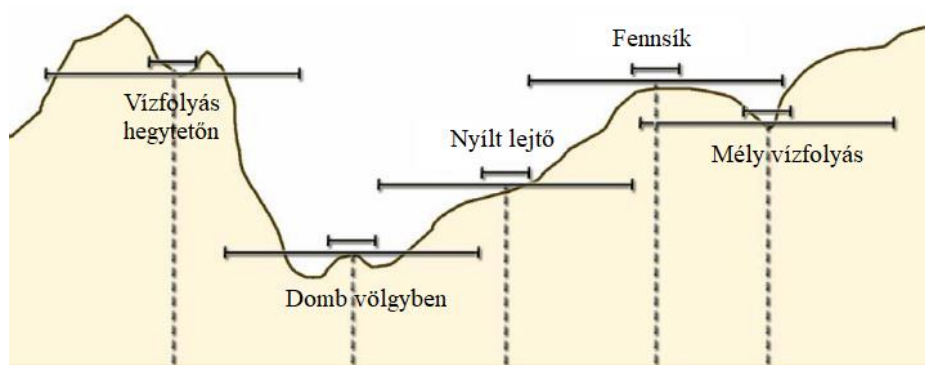
DRĂGUT ÉS BLASCHKE (2006) egy objektum-alapú képelemzést (*Object-based Image Analysis* – OBIA) alkalmazó módszert mutatott be, amely első lépésben tematikákat vezet le a DDM-ekből, majd több szinten homogén objektumokat azonosít képszegmentálási eljárással. Ezeket az objektumokat a felszín alakja és tengerszint feletti helyzete alapján osztályozza rugalmas fuzzy tagsági függvény segítségével összesen kilenc különböző kategóriába.

WEISS (2001) alkotta meg az egyes pixelek magasságát a környező pixelek átlagmagasságával összehasonlító topográfiai pozíció indexet (TPI), valamint mutatta be ezen módszer domborzatforma-osztályozási lehetőségeit két különböző sugárral végzett vizsgálaton keresztül. A TPI értékek a következő képlettel számíthatók:

$$TPI = H_{pixel} - H_{\text{átlag}}$$

ahol H_{pixel} a vizsgált pixel magassága, míg $H_{\text{átlag}}$ a megadott méretű ablakon belül (ami lehet kör vagy négyzet alakú) elhelyezkedő pixelek magasságának átlaga.

Ebből kiindulva JENNESS (2006) bemutatott egy konkrét osztályozási módszert, amely két különböző (kisebb és nagyobb) léptéken belül határozza meg a TPI-t, ezzel megállapítva az adott pixel közvetlen környezetét, valamint a nagyobb léptékben vett domborzati viszonyait is, így kiküszöbölve a kizárólag kis léptékű elemzésből adódó részleteltúlzást, vagy a kizárólag nagy léptékű vizsgálatból adódó részletelhanyagolást (7. ábra). Mivel az egyenletes (nyílt) lejtő és a sík kategória hasonló TPI-értékeket produkálna, azok elkülönítésének érdekében az eljárás figyelembe veszi a lejtőfokot is (lásd 3.2.3.1. fejezet).



7. ábra: Két léptékben végzett domborzatosztályozás (JENNESS, 2006)

2.5. Termőhelytérképezés

A termőhelyfeltárás és termőhelytérképezés a hatékony és fenntartható erdőgazdálkodás egyik legfontosabb mozzanata. Egy századbeli megfogalmazás szerint célja az olyan termőhely-típusok azonosítása, térbeli lehatárolása és nyilvántartása, amelyek azonos, vagy közel azonos termőképességgel rendelkeznek, ezáltal pedig gazdasági potenciáljuk a társadalmi-gazdasági igények figyelembevételével a lehető leghatékonyabban hasznosítható legyen (DANSZKY – ROTT, 1964). A 21. század beköszöntével ezt a megközelítést jórészt módosítja a klímaváltozás felgyorsulása, illetve az ennek köszönhetően egyre gyakoribb időjárási szélsőségek okozta problémák, így a gazdasági szempontok mellett az erdők éghajlatváltozás-mérséklő szerepe jelentősen felértékelődött. A rohamos változásokat a jelenleg is alkalmazott termőhely-feltérési módszerek már nem tudják megfelelő ütemben lekövetni, továbbá egyre inkább válnak elavulttá az erre vonatkozó adattári adatok, ugyanis hazánk erdeinek mindössze 12%-áról rendelkezünk naprakész, közvetlen termőhelyfeltérésből származó adatokkal. Ezen okok miatt szükséges egy olyan felmérési, becslési, valamint döntéstámogatási módszer kidolgozása, amely képes lekövetni és megfelelően reagálni ezekre a változásokra (SZÁSZ ÉS MTSAI, 2024; CZIMBER ÉS MTSAI, 2025).

Mivel az erdőszeti termőhely fogalma igencsak összetett, több elemet is tartalmaz, ezért az Országos Erdőállomány Adattár erdőrészlet-szintű nyilvántartásában számos termőhellyel kapcsolatos információ megtalálható. Ezen rendszernek részét képezi a termőtalaj típusa és jellemzői, a klimatikus és hidrológiai tulajdonságok, valamint az érintett terület domborzati viszonyai (ERDŐRENDEZÉSI ÚTMUTATÓ, 2004). Disszertációmban a domborzattal kapcsolatos

jellemzőkkel, egészen pontosan a lejtéssel, kitettséggel, illetve a domborzatformákkal foglalkoznak.

Mindhárom jellemző kihat az erdőállomány fejlődésére, szerkezetének és produktivitásának alakulására. A lejtés elsősorban a vízháztartásra, a talajerózió mértékére, ezáltal pedig a termőréteg-vastagságra van hatással. A kitettség a besugárzás mennyiségén keresztül befolyásolja a hőmérsékletet és a talajnedvességet, azaz a mikroklimát, míg ehhez hasonlóan a domborzatformák is jelentős hatással vannak elsősorban a vízgyűjtésre és lefolyásra, valamint mikroklimatikus foltok kialakulására.

Az 1955-ben megjelent Erdőrendezési Utasítás szerint a domborzati viszonyokat fekvéssel és hajlásszöggel jellemezték. Ezek megállapítása bányászkompasszal vagy egyéb egyszerű eszközzel történt. A fekvést az erdőrészlet általános esésvonala mentén mérték, és a 4 fő- és 4 mellékégtáj szerint 8 kategóriába sorolták. A hajlásszög nem egyenletes lejtésű erdőrészletek esetén határértékekkel volt megadva (pl. 15-20°), ellenkező esetben egyetlen számértékkel. Sík területen mindkét adat a SÍK kategóriába lett sorolva (ERDŐRENDEZÉSI UTASÍTÁS, 1955).

A jelenleg naprakész Erdőrendezési Útmutatóban a fekvés leírása alapvetően nem változott, viszont ki lett egészítve az ártér kategóriacsoporttal, ahol az ártéri erdők fekvési viszonyai a várható közepes vízállás szintjéhez képest vannak meghatározva. Lejtés esetén az 5°-os élességű kategorizálás alkalmazandó, meghatározása egyszerű lejtőmérővel vagy megbízható szintvonalas térképpel történik. Megjelent továbbá a domborzat rovat is, ahol a jellemző domborzati alakulatra vonatkozó információ szerepel. Ezeket a domborzatformákat az 1. táblázat mutatja be. Amennyiben ezen jellemzők tekintetében nagy változatosságú erdőrészletről beszélünk, úgy az besorolható a VÁLT (változó) kategóriába, viszont ennek kritériumairól az útmutató nem rendelkezik, így annak megválasztása szubjektív hibákkal terhelt (ERDŐRENDEZÉSI ÚTMUTATÓ, 2004). Ez a három jellemző (lejtés, fekvés/kitettség, domborzat) együttesen befolyásolja a faállomány összetételét és termelési hatékonyságát, mivel szoros összefüggésben állnak a talajok jellemzőivel, mint például a termőréteg-vastagsággal, talajszerkezettel és a textúrával (FLORIS – DI COSMO, 2022 IDÉZI SPURR – BARNES, 1980), valamint a hidrológiai és mikroklimatikus viszonyokkal, azaz együttesen tekintve a termőhelytípus-változáttal is, épp ezért figyelembevételük nélkülözhetetlen a fatermési modellek megalkotásában (DI COSMO ÉS MTSAI, 2020).

1. táblázat: Az Erdőrendezési Útmutató szerinti domborzatformák (ERDŐRENDEZÉSI ÚTMUTATÓ KÓDJEGYZÉKE ÉS MELLÉKLETEI, 2004)

Kód	Megnevezés
SÍK	Sík (lapály)
ÁVM	Árok, vízmosás, szurdok, vápa
MÉT	Mélyedés, teknő, töbör
VHL	Völgy, hegyláb, buckaköz
OLD	Hegy-, domb-, buckaoldal
TETŐ	Hegy-, domb-, buckatető, hegyhát, gerinc
FEN	Fennsík
LEPI	Lejtőpihenő

Kitekintve néhány európai ország nyilvántartási alapelveire láthatjuk, hogy azokat a területi és domborzati adottságok jelentősen befolyásolják. Olaszországban például a lejtést 20%-os (vagyis kb. 10°-os) élességgel kategorizálják (FLORIS – DI COSMO, 2022), ami magyarázható azzal, hogy országos szinten jóval nagyobb a meredekebb lejtők aránya, mint

hazánkban, így a lankásabb területek kevésbé hangsúlyosak. Romániában a kitettség a 8 égtáj szerint kategorizálva jelenik meg a nyilvántartásokban, viszont itt nem beszélünk SÍK kategóriáról; a lejtést nem intervallumok szerint kategorizálva, hanem egy átlagos fok értékkel írják le, míg a domborzati formák tekintetében jóval többet, összesen 32 kategóriát különböztetnek meg, továbbá külön rovatban tárolják a terep konfigurációját (sík, hullámzó, tagolt) (GUVERNUL ROMÂNIEI, 2022). Németországban a lejtéskategóriák felső és alsó határa progresszívan növekszik (pl. 0–10 fok között négy kategória is van, míg a 20–30 fokok közötti intervallum egyetlen kategóriának számít), kitettség tekintetében a nyolc térképi irányt alkalmazzák, sík kategória azonban itt sincs. Domborzat tekintetében jóval részletesebb rendszerről beszélhetünk, ugyanis az egyszerű- és összetett domborzatformák mellett a görbületet is külön rögzítik (ECKELMANN ÉS MTSAI, 2005).

2.5.1. Topográfiai jellemzők és faállományparaméterek közötti összefüggések

A különböző domborzati jellemzők, mint például a lejtés és a fekvés kisebb-nagyobb mértékű befolyásoló hatással lehetnek a faegyedek különböző dendrometriai paramétereire. A nagyfelbontású és megfelelő pontosságú domborzatmodellek elterjedésével párhuzamosan az elmúlt évtizedekben egyre több kutatás irányult a topográfiai tényezők és az erdőállományparaméterek közötti kapcsolatok feltárására, különösen a famagasság vonatkozásában. Számos tanulmány igazolta, hogy a domborzati viszonyok, például a lejtők meredeksége, kitettsége vagy a felszín konvex-konkáv jellege jelentős hatással lehetnek a fák növekedésére és az állomány szerkezetére. McNAB (1989) például a domborzati alakzat index (*Terrain Shape Index* – TSI) alkalmazásával 0,45 és 0,74 közötti korrelációt mutatott ki a felszín geometriai formája és a faállományrészek átlagmagassága között három tulipánfa-állományban. TATENO ÉS TAKEDA (2003) vizsgálatai szerint a lejtők alján a maximális famagasság általában nagyobb, míg a lejtők teteje felé haladva a lombkorona záródása fokozatosan csökken, ami eltérő növekedési feltételeket eredményez. FARHADUR RAHMAN ÉS MTSAI (2022) kimutatták egy Japán középső részén található mintaterületen, hogy a konkáv formájú völgyekben található egyesfák akár 5–10 méterrel magasabbak is lehetnek, mint a konvex lejtőkön vagy a gerinceken álló társaik. Érdekes módon ezzel némileg ellentmondó eredményt kapott MOKARRAM ÉS SATHYAMOORTHY (2016), akik egy Irán területén végzett kísérletben arra jutottak, hogy pont a gerinceken és a magasabban fekvő területeken várható nagyobb magassági növedék. A domborzat magassági növedékre gyakorolt hatását vizsgálták BALAZY ÉS MTSAI (2019) is, akik rámutattak, hogy a faállományok növekedési dinamikája szoros kapcsolatban áll a lokális topográfiai adottságokkal, ugyanakkor a TPI-nek viszonylag kis jelentőséget tulajdonítottak.

A nemzetközi vizsgálatokhoz hasonlóan a hazai erdészeti szakirodalom is hangsúlyozza, hogy a topográfiai tényezők és az erdőállomány-jellemzők közötti kapcsolat alapvetően a domborzati formák által meghatározott mikroklimatikus és hidrológiai viszonyokon keresztül érvényesül, de fontos összekötő elem a termőréteg vastagsága is. Példaként említhető egy lejtő, ahol az alsóbb régiókban hűvösebb, párásabb, szélvédettebb, míg feljebb haladva melegebb, szárazabb, szelesebb klíma tapasztalható, továbbá az erózióknak köszönhetően a lejtő alján vastagabb termőréteg alakulhat ki. De az is megfigyelhető, hogy két, azonos lejtésű oldalra más klíma jellemző, ha az a hegy szélén, vagy a hegység belsejében helyezkedik el (BABOS ÉS MTSAI, 1966).

2.6. Távérzékelési eljárások dendrometriai alkalmazásai

Az 2.2. fejezetben bemutatott adatgyűjtési eljárások alkalmazása a dendrometriában mára már széles körben elterjedté vált, számos tanulmány foglalkozik azok lehetőségeivel, korlátaival és hatékonyságával. Az alábbi alfejezetekben röviden áttekintem az UAV-alapú fotogrammetria, valamint a földi és légi lézerszkennelés alkalmazását ebben a tudományágban.

2.6.1. UAV-alapú fotogrammetria

A klasszikus dendrometriai paraméterek közül leggyakrabban vizsgált jellemzők a famagasság és a lombkorona átmérője, amelyek közvetlenül meghatározhatók légi fotogrammetriai módszerekkel. Ezen paraméterek összefüggenek a fatérfogattal, a biomassza-mennyiséggel és a fatermési potenciállal. A fatérfogat, valamint a mellmagassági átmérő ugyanakkor többnyire nem közvetlen méréssel, hanem statisztikai összefüggésekre, regressziós modellekre és empirikus kapcsolatokra épülő becslések révén határozható meg.

Famagasság tekintetében a két legfontosabb tényező a pontos domborzatmodell, amiből előállítható a famagasságmodell, valamint a facsúcsok pontos detektálása az utóbbin. Az ily módon meghatározható famagasság tekintetében KRAUSE ÉS MTSAI (2019) egy erdeifenyő monokultúrát vizsgálva figyelt meg közel fél méteres alábecslő tendenciát, míg PANAGIOTIDIS ÉS MTSAI (2017) két különböző, túlnyomórészt lucfenyőből és erdeifenyőből álló kísérleti területen 1-2 méteres alá- és fölébecslést, a referencia és a mért magasságok között pedig $R^2=0,7$ mértékű korrelációt tapasztaltak.

Szintén fontos kérdés az egyesfák detektálásának pontossága. KWONG ÉS FUNG (2020) lokális maximum és régió-növesztéses (*region growing*) módszert alkalmazott, kiemelve, hogy annak végeredményét és pontosságát jelentősen befolyásolja a keresési ablakméret, annak megválasztása pedig függ a faállomány korától, szerkezetétől és heterogenitásától. Abban az esetben, ha az állomány többszintes, az alsóbb szintek lombkorona-csúcsainak detektálása nem lehetséges a lokális maximum módszerrel.

A fent már említett vizsgálatokban PANAGIOTIDIS ÉS MTSAI (2017) lomborovetület-lehatárolást is végeztek. Ehhez inverz vízgyűjtő eljárást alkalmaztak, melyből kinyerték az egyesfák átlagos koronaátmérőjét. Ezt hasonlítva a referenciaadatokhoz, átlagosan 0,6 méternyi túlbecslést tapasztaltak. Hasonló módszert alkalmaztak POURREZA ÉS MTSAI (2022) is, megállapítva, hogy az általuk tapasztalt enyhe, mindössze 0,27 cm-es átlagos túlbecslés mellett az arizoniai ciprus becsült koronaátmérője korrelálnak ($R^2 \geq 0,94$) a referenciaértékekkel különböző repülési magasságok alkalmazásával is. BOHLIN ÉS MTSAI (2012) körlapösszeget és térfogatot határozott meg több mintaterületen egy dél-svédországi fenyvesben, melyek R^2 -értékei rendre 0,7-0,8 között mozogtak, a hibák négyzetes középértéke pedig az előbbi esetén 14,9%, míg az utóbbinál 13,1%-a az átlagértékeknek.

A mellmagassági átmérő meghatározása jellemzően közvetett módon, egy (vagy több) másik egyesfa-paraméterből levezetve történik. IIZUKA ÉS MTSAI (2018) vizsgálatai szerint a mellmagassági átmérő összefüggésben van a koronavetülettel (japán ciprus esetén, $R^2=0,79$). Ennél jobb korrelációt tapasztaltak SHARMA ÉS MTSAI (2017) erdeifenyő esetén ($R^2=0,83$). MAO ÉS MTSAI (2023) vizsgálataiban az egyedi fák mellmagassági átmérőjének becslését 2D képi (spektrális és texturális) valamint 3D pontfelhő-alapú szerkezeti jellemzők kombinálásával végezték. Eredményeik rámutatnak, hogy a lombkorona-alapú szegmentálásból származtatott jellemzők statisztikai kapcsolatban állnak az átmérővel, és alkalmasak annak modellezésére.

Egy igencsak érdekes kérdést vet fel az, hogy mennyire lehetséges a törzspozíciók, ezen keresztül pedig azok mellmagassági átmérőjének közvetlen meghatározása UAV-alapú fotogrammetriai eljárással, jellemzően lombtalan állapotban készített felvételeken. Ezen módszerek előnye a fentiekkel szemben az, hogy független a koronaszerkezettől (ami gyakran fajspecifikus), így még robusztusabb becsléseket tehetnek lehetővé. Azonban KUANG ÉS MTSAI (2024) összefoglalója rámutat arra, hogy a direkt törzsdetektálás és a mellmagassági átmérő meghatározása elsősorban lézerszkennelési adatokon alapul, az UAV-alapú fotogrammetriai úton készített képek és pontfelhők ezirányú lehetőségei pedig lényegesen kevésbé feltártak, csak néhány erre vonatkozó tanulmány lelhető fel a szakirodalomban. Ilyen például DIETENBERGER ÉS MTSAI (2023) vizsgálata, akik lombtalan és lombos állapotban is vizsgáltak egy 32 cm átlagátmérőjű, bükk által dominált faállományt 110 m magasságból készített felvételekkel. A lombtalan állapotban előállított pontfelhőt normalizálás után 3–15 méter

közötti sávra redukálták, majd klaszterezéssel határozták meg az egyesfák törzseit, 70%-os találati arányt elérve.

A törzsdetektálás mellett a mellmagassági átmérő meghatározására is irányult FRITZ ÉS MTSAI (2013) kísérlete, amit egy kocsányos tölgyesben végeztek 55 m repülési magasságból, 45 fokos döntött kameranézettel. A cél ezúttal a törzsek teljes rekonstrukciója volt, ez indokolja a relatív alacsony repülési magasságot. A törzsdetektálás hasonló eredményt, 71%-os arányt hozott, a detektálási minimum 5000 pontban volt meghatározva. Az átmérőket RANSAC hengerillesztéssel határozták meg, ami enyhe, a tanulmányban konkrétan nem közölt mértékű túlbecslést eredményezett.

A mellmagassági átmérő mérése közvetlen fotogrammetriai úton is lehetséges például úgy, hogy a pontfelhő alapján detektált törzspozíciókat levetítjük az 1,3 méterrel megemelt DDM segítségével ortorektifikált fényképekre, ezzel láthatóvá válik a mellmagasság pozíciója, ahol manuálisan mérhető az átmérő. Ezen módszer várható pontossága a képek terepi felbontásának függvénye. Ezt a módszert azonban jelentősen korlátozhatja a koronák szerkezete, az ágak sűrűsége és az aljnövényzet jelenléte, amelyek torzíthatják a képalapú törzsdetektálást, valamint részben vagy egészben takarhatják a törzseket (SZÁSZ ÉS MTSAI, 2025).

Egy másik megközelítés szerint, ismerve a nap besugárzási szögét, az egyesfák árnyékai is felhasználhatók azok mellmagassági átmérőinek meghatározásához. Ezt vizsgálták KATTENBORN ÉS MTSAI (2018), azonban az eredményül kapott 7 cm mértékű középhiba alapján a módszer további fejlesztésre szorul. Érdemes továbbá megemlíteni a KOREŇ ÉS MTSAI (2024) által bemutatott alternatív módszert, akik véghasználat után készítettek nagyfelbontású légifényképeket egy bükkösről, amikről aztán a tuskók méretét határozták meg, ezzel következtetve a mellmagassági átmérőre, valamint a famagasságra.

2.6.2. Földi lézerszkennelés

Mind a statikus TLS, mind pedig az MLS egyre szélesebb körű elterjedésével párhuzamosan az erdészeti ágazatban is egyre több tanulmány jelent meg, melyek azok alkalmazhatóságát, előnyeit és korlátait mutatják be (LIANG ÉS MTSAI, 2018).

WARDIUS ÉS HEIN (2024) vizsgálatai szerint a statikus TLS-alapú pontfelhőkből származtatott egyesfa-paraméterek bizonyos torzításokat mutatnak: a famagasság rendszerint alábecsült értékeket ad, különösen a 30 méternél magasabb fák esetében, ahol a különbség meghaladja a 4 métert is a referenciamérésekhez képest, míg a mellmagassági átmérő tekintetében enyhe, körülbelül 1 cm-es nagyságrendű, pozitív irányú eltérés volt tapasztalható. Hasonló mintázatot figyeltek meg BROLLY ÉS MTSAI (2021) az általuk fejlesztett, voxelalapú automatikus egyesfa-detektálási algoritmus alkalmazásakor.

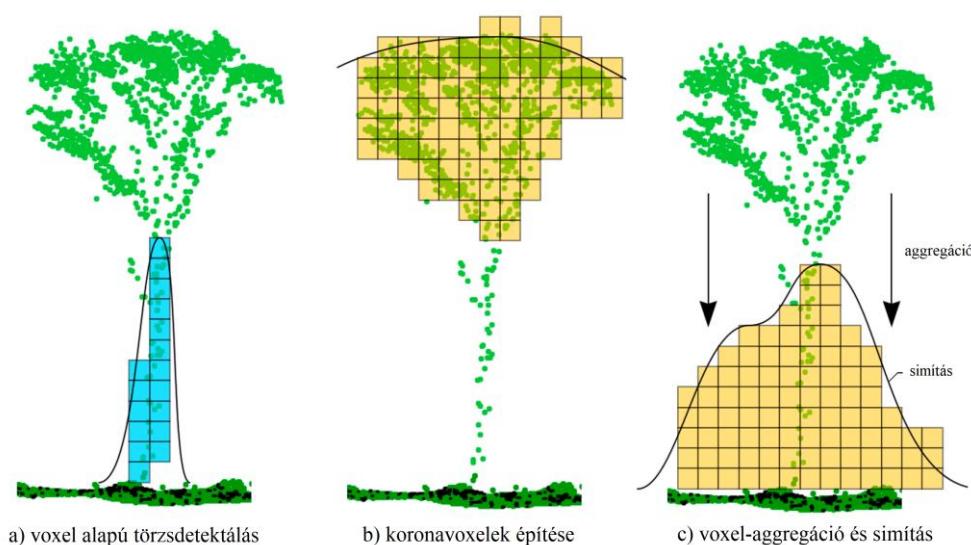
A mellmagassági átmérő becslésének pontosságát vizsgálva COMPEÁN-AGUIRRE ÉS MTSAI (2024) öt különböző algoritmust hasonlítottak össze (Nelder–Mead, legkisebb négyzetek módszere, Hough-transzformáció, RANSAC és konvex burok). Eredményeik szerint a Nelder–Mead és a legkisebb négyzetek módszere szolgáltatja a legmegbízhatóbb értékeket, ugyanakkor a kimeneteket jelentősen befolyásolta a pontfelhő sűrűsége, az okklúzió, a vegetációborítás, valamint a fák szerkezeti sajátosságai. A pontsűrűség tekintetében KHAN ÉS MTSAI (2025) megállapításai szerint a mellmagassági átmérő 1 cm alatti hibájú meghatározásához legalább 600-700 pont/m², míg magasság esetén az 1 m-en belüli négyzetes hiba eléréséhez 300 pont/m² értékre van szükség.

Mivel a földi lézerszkennelés, a fenti megállapítások alapján igencsak pontos, sok tanulmányban alkalmazzák referenciaadatként, mert gyors és megbízható adatokat biztosít (WIESER ÉS MTSAI, 2017; KRŮČEK ÉS MTSAI, 2020).

2.6.3. Légi lézerszkennelés

A légi lézerszkennelés esetén még inkább előkerül az a kérdés, hogy milyen pontsűrűség érhető el, mert ez befolyásolja a pontfelhőből kinyerhető dendrometriai paramétereket, illetve azok meghatározhatóságát. Leginkább a mellmagassági átmérő meghatározása kérdéses, például nagy pontsűrűség (100 pont/m²) és 1-2 cm nagyságrendű relatív pontosság esetén már közvetlenül becsülhető a földi lézerszkennelt pontfelhőkön is alkalmazott alakillesztési (pl. kör) eljárásokkal. Kifejezetten alacsony (jellemzően kisebb, mint 20 pont/m²) pontsűrűség esetén viszont, hasonlóan a fotogrammetriai úton előállított faágasságmodellekhez, közvetett módon, regressziós megoldásokkal számítható (WHITE ÉS MTSAL, 2014; OEHMCKE ÉS MTSAL, 2022).

Az alacsonyabb pontsűrűségű ALS-adatok feldolgozásában kezdetben a raszteres lombkoronamodelleken végzett módszerek domináltak, amelyek lokális maximumkereséssel (HYYPÄ ÉS MTSAL, 2001) és inverz vízgyűjtő eljárással végzett szegmentálással határozták meg az egyesfák helyzetét (CHEN ÉS MTSAL, 2006). A későbbiekben egyre inkább előtérbe kerültek a közvetlenül a 3D pontfelhőn működő eljárások, mint például a klaszterezésen (LEE ÉS MTSAL, 2010), régió-növesztésen (LI ÉS MTSAL, 2012), vagy többretegű szegmentáción alapuló módszerek (DUNCANSON ÉS MTSAL, 2014), amelyek különösen összetett, többszintes állományok esetén bizonyultak hatékonyak. AYREY ÉS MTSAL (2017) egy *layer stacking* alapú eljárást dolgoztak ki, ahol először vertikálisan, 1 méterenként tagolják a pontfelhőt, majd mindegyik rétegben külön szegmentálják az egyesfákat. CZIMBER ÉS MTSAL (2019) voxel aggregációs eljárást alkalmaztak (8. ábra), amely hasonló a *layer stacking* módszerhez, használata pedig különösen előnyös olyan lombhullató faállományok esetén, ahol a lombkoronafelszín magasságkülönbsége viszonylag csekély.



8. ábra: Voxel aggregációs eljárás szemléltetése (CZIMBER ÉS MTSAL, 2025)

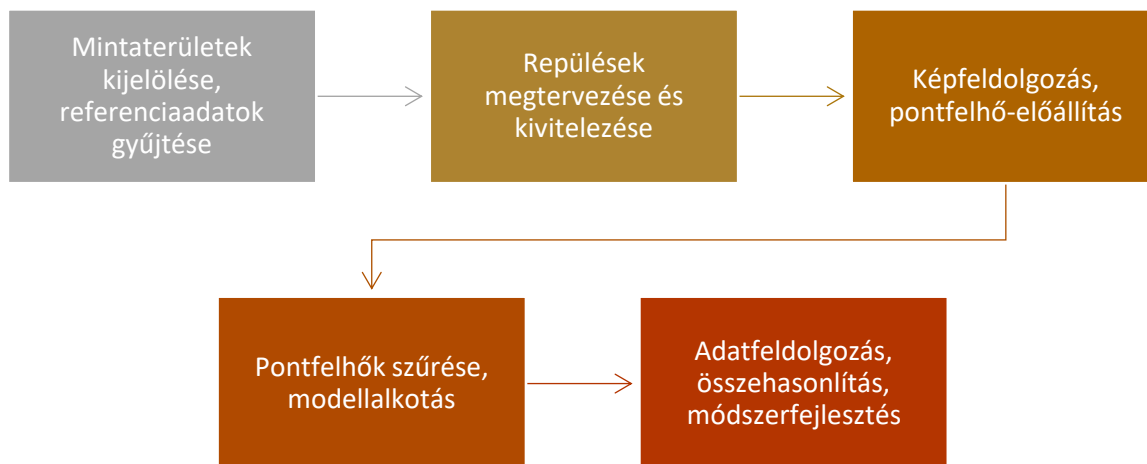
Ugyanakkor számos tanulmány rámutatott arra, hogy a lombkorona-alapú szegmentálási eljárások pontosságát jelentősen befolyásolja az aljnövényzet jelenléte és a koronák geometriai változatossága, ami gyakran túlbecsült koronahatárokat eredményez (JIA ÉS MTSAL, 2025). A modern megközelítések ezért egyre inkább kombinálják a geometriai és statisztikai módszereket, illetve gépi tanulási eljárásokat alkalmaznak a pontsűrűségből adódó korlátok kompenzálására.

A fenti módszerek korlátai különösen indokolják a nagy pontsűrűségű, UAV-alapú adatgyűjtések vizsgálatát, amelyek potenciálisan áthidalhatják a hagyományos ALS és a földi módszerek közötti felbontásbeli különbségeket.

3. Anyag és módszer

3.1. UAV-alapú fotogrammetriai úton előállított pontfelhők és felszínmodellek vizsgálata

Kutatásom első szakaszában a faállomány alatti domborzat fotogrammetriai térképezési lehetőségeinek és korlátjainak vizsgálata, valamint a törzsszám (törzspozíciókkal) meghatározására és a koronák azonosítására irányuló módszerek kidolgozása volt a kitűzött cél. A vizsgálat menetét a 9. ábra szemlélteti, az egyes lépéseket az alábbi alfejezetekben fejtem ki részletesen.



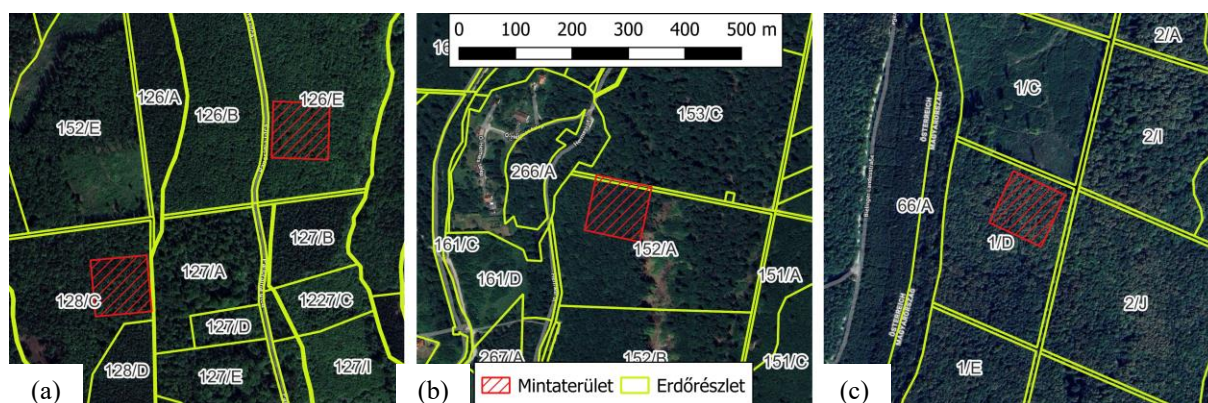
9. ábra: A módszerek kidolgozásának fő lépései

3.1.1. Vizsgálati mintaterületek kijelölése

A mintaterületeknek helyt adó erdőrészletek kiválasztása abból a feltételezésből indult ki, hogy a fent felsorolt eljárások olyan faállományokban alkalmazhatók várható sikerességgel, amelyek már a növedékfokozó gyérítések fázisában van, ennek köszönhetően az átlagátmérő 20 feletti (így a törzsek jól láthatók, illetve elkülöníthetők), valamint a koronák is felismerhető, egymástól elkülöníthető méretűvé fejlődtek már.

Ennek megfelelően olyan erdőrészletekben lettek kijelölve a vizsgálati mintaterületek, amelyek faállománya kor tekintetében idősebbek, vegyes fafajszerkezetűek (lombhullató és örökzöld fajok, hogy a fenyőelegy hatása is vizsgálható legyen a talaj- és törzspontok sűrűségén keresztül a modellek, illetve a törzsfelismerés pontosságára). Hogy a vizsgálat ténylegesen a kitűzött célokra koncentrálódjon, a kijelölt erdőrészletek legfeljebb minimális mértékű cserjeszinttel rendelkezhetnek, így az nem befolyásolja a talaj- és törzspontok számát. Mindezek mellett a változatos domborzat is szempont volt. A mintaterületek mérete a rendelkezésre álló eszközök és technológia (lásd 3.1.3. fejezet) figyelembevételével 100x100 méter kiterjedésben lett meghatározva, és célszerűen úgy lettek kijelölve, hogy ne metssze őket erdőrészlethatár, legfeljebb nyiladék.

A fenti kritériumok figyelembevételével összesen négy mintaterület jelöltem ki, hármat a markáns domborzattal rendelkező Soproni-hegységben, Sopron községhatáron belül (10a. és 10b. ábra), egyet pedig a Felső-Őrségben található, lankásabb terepi adottságokkal rendelkező Csákánydoroszló külterületén (10c. ábra). A négy mintaterület négy különböző erdőrészletben helyezkedik el, melyek faállományának legfontosabb erdészeti jellemzőit fajtájsorokra lebontva a 2. táblázat szemlélteti.



10. ábra: Mintaterületek elhelyezkedése az erdőrészteken belül

2. táblázat: A mintaterületeket tartalmazó erdőrésztelek jellemzői

Erdőrészlet	Faállomány-típus	Kor [év]	Záródás [%]	Fafaj	Elegy-arány [%]	Törzsszám [db/ha]	Átmérő [cm]	Magasság [m]
Sopron 126/E	egyéb lomb elegyes-kocsánytalan tölgyes	64	77	KTT	49	277	25	20
				B	35	216	25	22
				GY	5	39	18	18
				VT	9	39	28	21
				LF	2	10	25	22
Sopron 128/C	tölgyes-erdeifenyves	95	75	KTT	29	138	28	22
				EF	51	269	28	23
				B	12	47	33	24
				GY	5	26	22	18
				LF	3	22	27	25
Sopron 152/A	kocsánytalan tölgyes-bükkös	119	54	B	52	99	45	29
				KTT	19	38	41	26
				VF	16	58	37	29
				LF	8	31	36	31
				EF	2	8	34	25
				FF	3	9	38	25
Csákánydoroszló 1/D	erdeifenyves-kocsánytalan tölgyes	85	73	KTT	51	166	34	24
				B	13	44	35	26
				EF	25	101	31	24
				GY	7	32	22	18
				LF	4	25	29	27

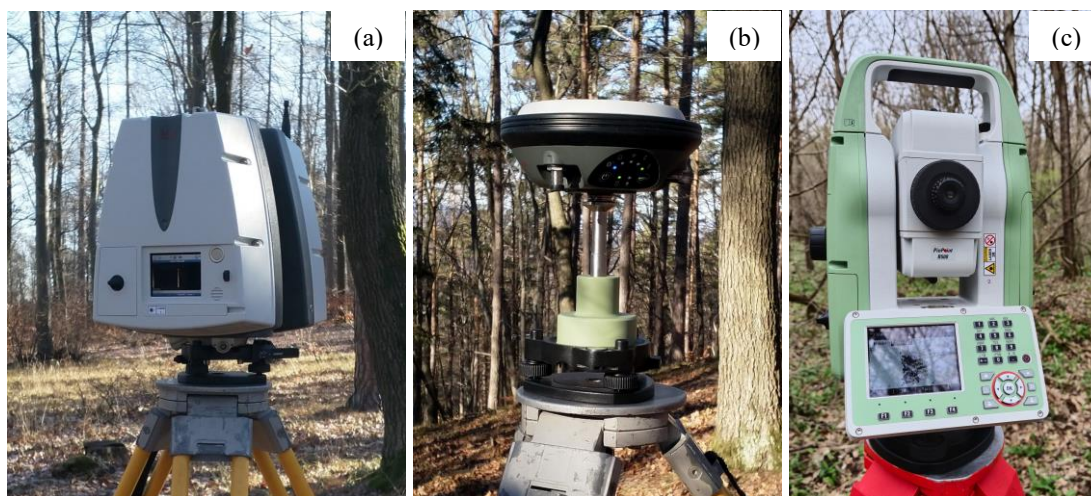
A Sopron 152/A erdőrésztet alacsony záródása és törzsszáma annak tulajdonítható, hogy területén már elkezdődött a fokozatos felújítógágás, azonban a kijelölt mintaterület ezt az állományrészt nem érinti.

3.1.2. Referenciaadatok gyűjtése

A módszerek kidolgozásához, lépéseinek és összetevőinek meghatározásához, illetve pontosságának vizsgálatához terepi referenciaadatokra volt szükség, mind a domborzatról, mind pedig a törzspozíciókról és átmérőkről.

Ehhez az adatgyűjtés földi lézerszkenneléssel (TLS) történt. A pontfelhő egy *Leica ScanStation P40* lézerszkennelőrrel (11a. ábra), illetve *Leica Cyclone* szoftver segítségével lett előállítva. Ez a szkennelőr akár 270 méter távolságban is képes pontokat felvenni, maximális rögzítési sebessége 1 millió pont/másodperc, háromdimenziós pontossága 50 m távolság esetén 3 mm, 100 m esetén pedig 6 mm.

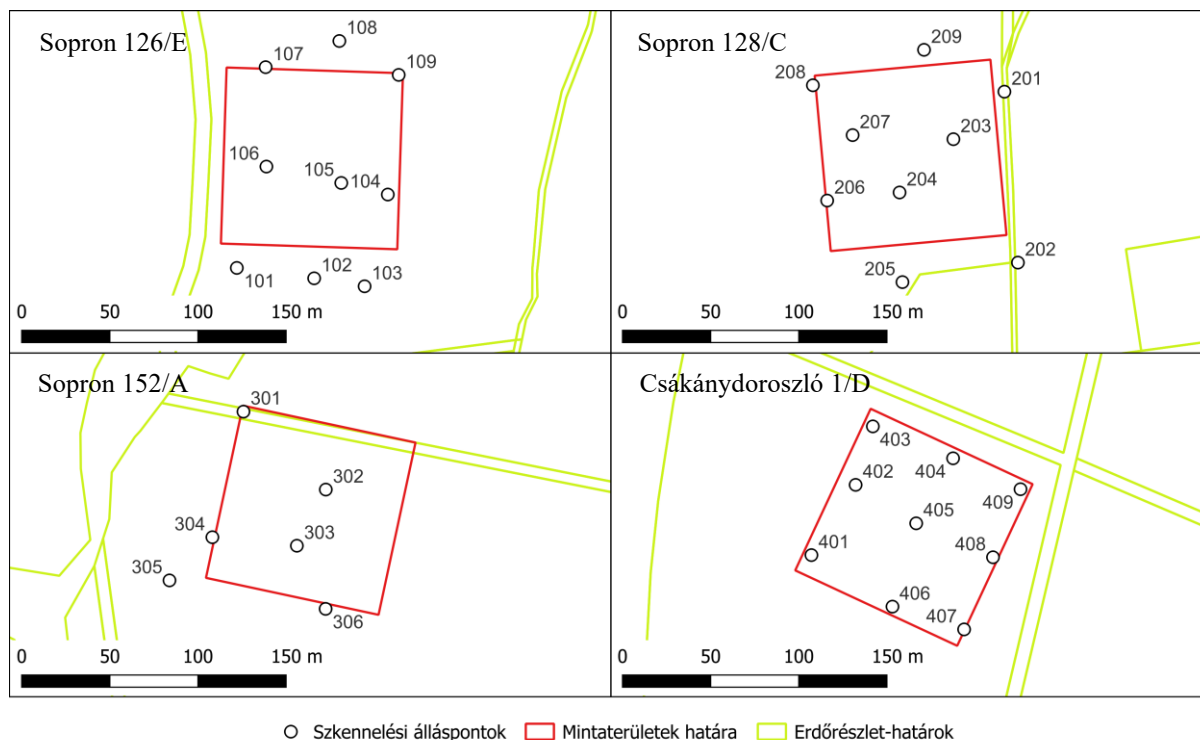
A szkennelési álláspontok koordinátái a környéken függően (műholdak észlelhetősége, mobil térérő megléte/erőssége, beláthatóság mértéke a megjelölt pontokról) valós idejű kinematikus (RTK) helymeghatározással, sokszögeléssel, poláris méréssel, illetve szabad állásponttal lettek meghatározva. A sokszögvonalaikat beillesztett vonalként számoltam, a kezdő- és végpontok koordinátáit valós idejű kinematikus, megfelelő térérő hiányában gyorsstatikus utófeldolgozós (PP) módszerrel határoztam meg. A műholdas helymeghatározáshoz egy *Leica GS16* GNSS-vevőt (11b. ábra), a sokszögeléshez, poláris mérésekhez, illetve a szabad álláspontokhoz a lézerszkennelőr mellett egy *Leica TS03* mérőállomást használtam (11c. ábra). A gyorsstatikus GNSS-mérés utófeldolgozását a *Leica GeoOffice* szoftverrel végeztem. A szkennelési álláspontok mintaterületenkénti elhelyezkedését a 12. ábra szemlélteti. Az álláspontok száma, illetve elrendezése az adott terület domborzati, illetve faállomány-sűrűségi adottságainak megfelelően került meghatározásra.



11. ábra: *Leica ScanStation P40* (a), *Leica GS16* (b), *Leica TS03* (c)

A lézerszkennelés eredményeként kapott pontfelhőkből nyertem ki a referenciának számító domborzatmodelleket, illetve a törzspozíciókat és a mellmagassági átmérőket. Előbbiekhez a talajpontok osztályozását a *LAStools lasground* (amely az AXELSSON (2000) által bemutatott adaptív TIN-háló illesztéshez hasonló módszert alkalmaz), míg a tényleges domborzatmodell előállítását a *las2dem* modullal végeztem, amely lineáris interpolációt alkalmaz a TIN-háló háromszögein belül. Utóbbiakhoz először a talajszint fölötti 1,15 és 1,45 méter között (tehát az általánosan alkalmazott 1,3 méter mellmagasságtól 15-15 cm-re mindkét irányban) metszetet készítettem a pontfelhőkből, majd a pontcsoportosulásokra manuálisan köröket illesztettem AutoCAD szoftverkörnyezetben. A körök átmérője adta a mellmagassági átmérőt, míg a középpontjuk a törzspozíciókat. Az így elkészített törzstérképet a terepen ellenőriztem. Az ellenőrzés során felülvizsgáltam az összes törzs pozícióját (és az esetlegesen

kihagyott faegyedeket), majd a láthatóan eltérő átmérőket átlalóval pontosítottam, így kaptam egy teljeskörű referencia-adathalmazt a mintaterületekről.



12. ábra: Szkenelési álláspontok mintaterületenként

3.1.3. Repülések megtervezése és kivitelezése

A 100x100 méter kiterjedésű mintaterületekről egy *DJI Mavic 2 Pro* UAV-val (13. ábra) készítettem fevételeket, így a repülési terveket az eszközre, illetve a szenzorra vonatkozó, a repülési útvonal számításához szükséges paraméterek ismeretében készítettem el, melyek a következők:

- | | |
|---|-------------------|
| • szenzor felbontása | 20 megapixel |
| • képméret | 5472 x 3648 pixel |
| • átlós látószög | 77° |
| • ekvivalens fókusztávolság | 28 mm |
| • maximális repülési idő | 31 perc |
| • két fénykép készítése között eltelt idő | 2 másodperc |



13. ábra: *DJI Mavic 2 Pro*

A fent felsorolt jellemzők segítségével kiszámítható a repülési magasság (h_0) függvényében a terepi képméret ($S_{x,y}$), illetve a képek terepi felbontása (res).

$$S_{x,y} = h_0 * \frac{s'_{35(x,y)}}{f_{35}} [m]$$

$$res = \frac{S_{x,y}}{s'_{x,y}} [m/pixel]$$

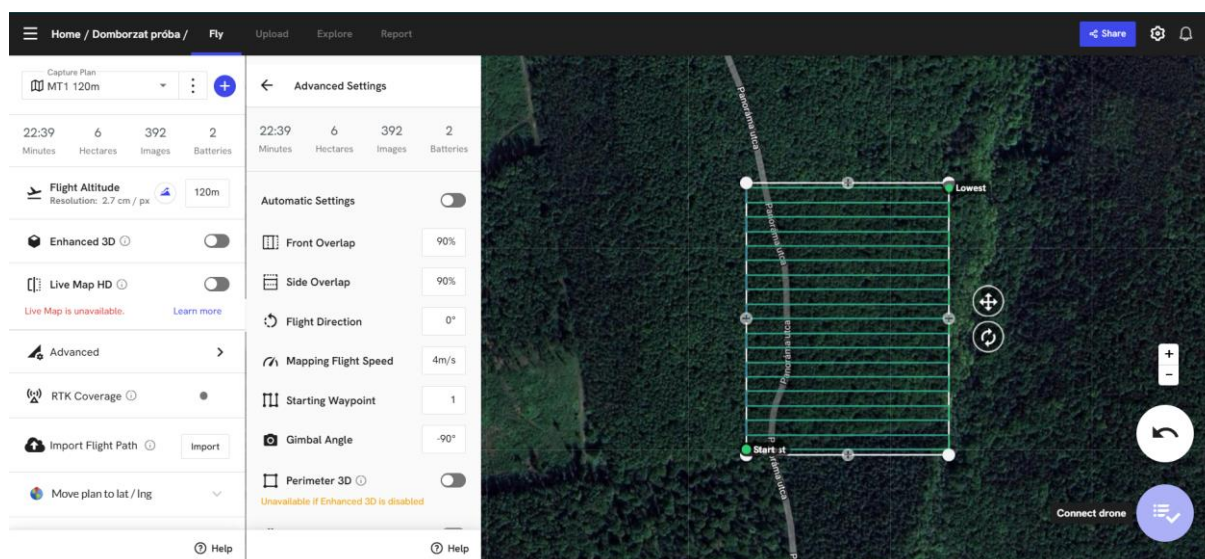
A repüléssel érintett terület kijelölésekor a legfontosabb szempont az volt, hogy a mintaterület minden pontja a lehető legtöbb szemszögből legyen lefényképezve, ezzel elkerülve azt, hogy a vizsgálati terület közepétől a határai felé haladva a kevesebb felvételezési szemszögből adódóan kisebb lesz a megbízhatóság. Ennek köszönhetően a repülési terület határai jóval túlnyúlnak a mintaterületek határán. A túlnyúlás mértéke a terepi képméret megfelelő oldali értékének a fele.

A repüléseket összesen három különböző magassággal (80, 100, illetve 120 méter) terveztem meg, 90%-os bázisirányú, és szintén 90%-os sorok közötti átfedéssel. A három különböző repülési magassághoz (h_0) tartozó terepi képméretet ($S_{x,y}$), a képek terepi felbontását (res), a túlnyúlások mértékét ($\Delta S_{x,y}$), az ebből kapott repüléssel érintett terület nagyságát (T), valamint a készített képek számát ($n_{kép}$) a 3. táblázat mutatja be.

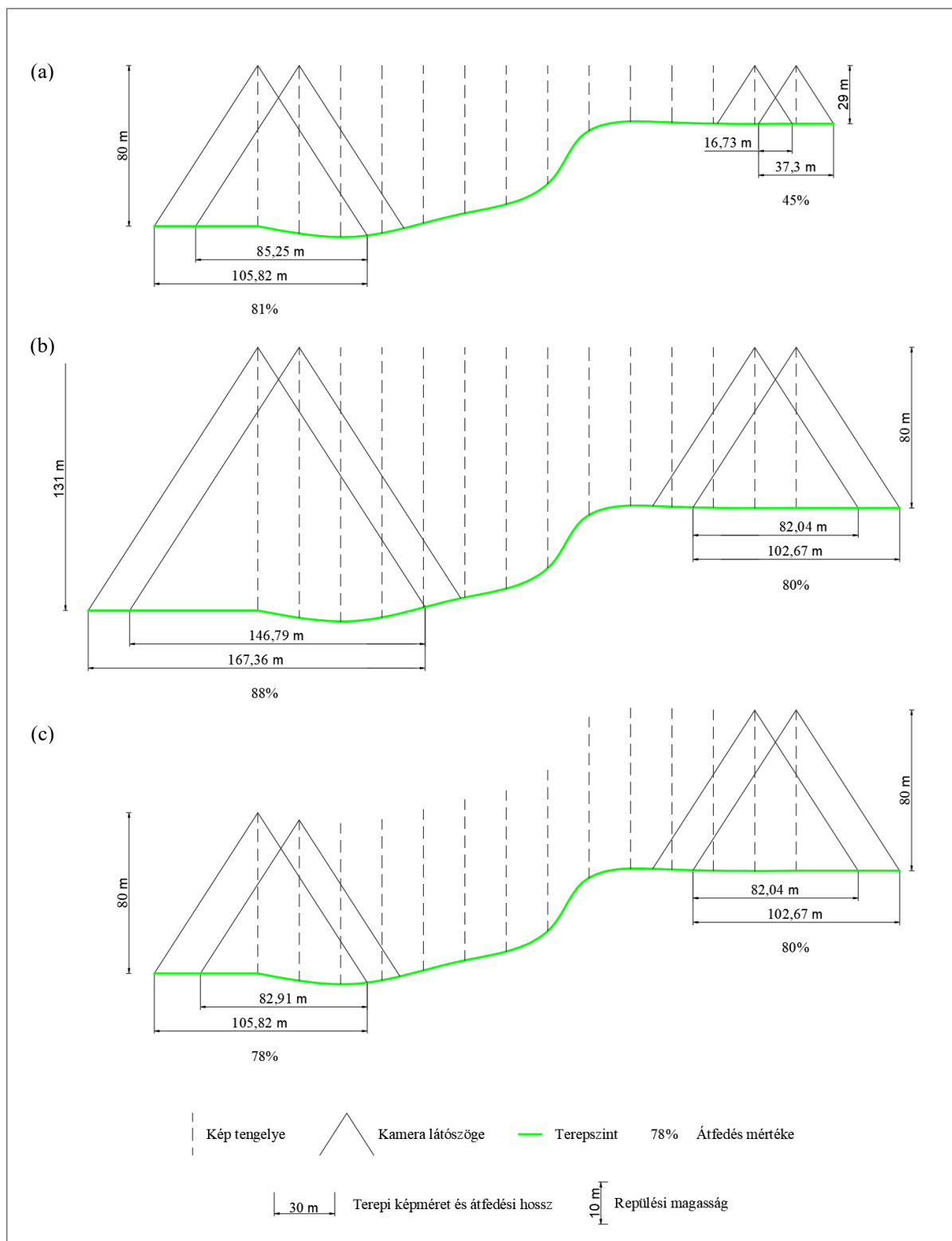
3. táblázat: Repülési magasságokhoz tartozó jellemzők

h_0 [m]	$S_{x,y}$ [m]		res [m/pixel]	$\Delta S_{x,y}$ [m]		T [ha]	$n_{kép}$ [db]
	x	y		x	y		
120	154,286	102,857	0,028	77,143	51,429	5,158	399
100	128,571	85,714	0,023	64,286	42,857	4,245	437
80	102,857	68,571	0,019	51,429	34,286	3,420	567

A repüléssel érintett területek poligonjait *QGIS* szoftverrel terveztem meg, majd ezeket betöltöttem a *DroneDeploy* nevű, felhőalapú alkalmazásba (14. ábra).



14. ábra: A DroneDeploy felhasználói felülete



15. ábra: A terep magassági viszonyainak hatása a képek közötti átfedésre (a, b: fix magasság két különböző felszállási ponthoz viszonyítva; c: domborzatkövetés)

A szoftverben beállítható a tervezett repülési magasság, illetve az átfedések, ezek alapján megtervezi a repülési sorokat, a repülés maximális sebességét, majd repülési időt becsül. Az alkalmazás tartalmaz egy domborzatkövető funkciót is, amely változatos tengerszint feletti magasságok esetén is biztosítja, hogy a repülőeszköz minden esetben a megadott magasságban legyen a terepszint fölött. Az ehhez szükséges domborzatmodell SRTM-alapú (FARR ÉS MTSAL,

2007). A domborzatkövetésre azért van szükség, mert konstans repülési magasság esetén a domborzat változásával az átfedés is változik, ez pedig negatívan befolyásolja, esetenként lehetetlenné teszi a képek feldolgozását, a pontfelhők előállítását. Ezt mutatja be a 15. ábra, ahol látható, hogy a konstans repülési magasság a magasabban fekvő területeken átfedéscsökkenést (a), az alacsonyabban fekvő területeken átfedésnövekedést (b), ezzel együtt viszont csökkenést eredményez a terepi felbontásban, viszont a domborzat követésével az átfedés közel konstans marad, csak 1-2%-os eltérés tapasztalható (c).

A repüléseket lombtalan és lombos állapotban is elvégeztem, előbbit a domborzat és a törzspoziciók, utóbbit pedig a lombkoronafelületek és a magasság meghatározása végett. Lombos állapotban, nyáron az időjárási körülmények kevésbé befolyásolják a repülés végrehajthatóságát, a szél és a csapadék a legkritikusabb tényezők. Télen, vagyis lombtalan állapotban ennél szűkebb az időjárás megengedőképesége, a szél és a csapadék mellett a köd (láthatóság), a túlzott hideg (akkumulátor működési ideje), az esetleges hótakaró, illetve a fényviszonyok is befolyásolják a művelet kivitelezhetőségét, illetve sikerességét. Utóbbi nem minden esetben jelent problémát, viszont eddigi tapasztalataim szerint a túlzott megvilágítás a sűrű ág szerkezetű faállományok esetén jelentősen sötétíti a talajszintet a képeken, így az nem jelenik meg megfelelő mértékben a pontfelhőben. Épp ezért a szórt fény (tehát a felhős idő) a legideálisabb a lombtalan repülések elvégzésére.

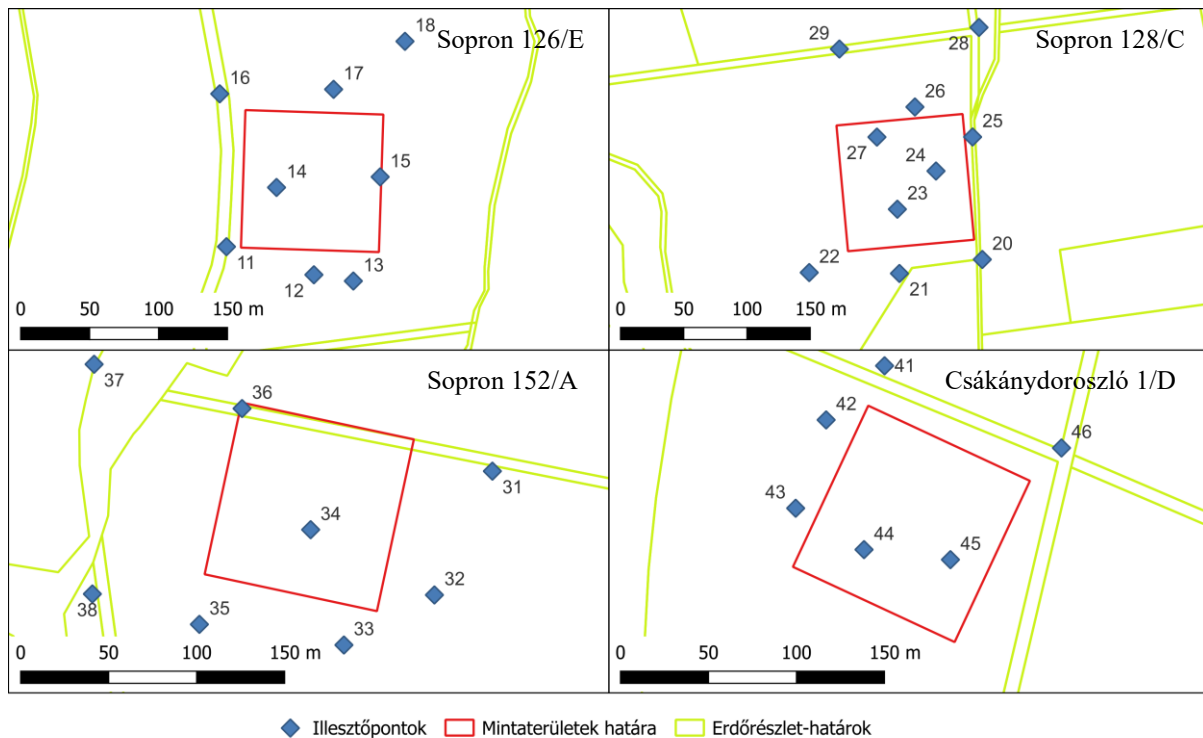
3.1.4. Terepi illesztőpontok elhelyezése

Terepi illesztőpontokra a képek, illetve az összeillesztésükből készült pontfelhő geodéziai pontosságú vetületbe illesztéséhez volt szükség. Az általam használt *DJI Mavic 2 Pro* esetén ez elengedhetetlen, ugyanis nincs RTK-modullal felszerelve. A kihelyezett illesztőpontok 30x30 cm nagyságú, kontrasztos (fekete-fehér) mintájú lapkák (16. ábra). A szögesen eltérő reflektancia biztosítja azok felismerhetőségét változatos fényviszonyok között is. A lapkák középpontja lyukasztott, így ráilleszthető a már állandósított pontokra, illetve könnyen bemérhető, ha ideiglenes elhelyezésűek.



16. ábra: Terepi illesztőpont

Az illesztőpontok kihelyezési feltétele, hogy jól látható legyen több képen is mind lombtalan, mind pedig lombos állapotban, így kisebb-nagyobb lécekben, nyiladékokban lettek kijelölve, majd állandósítva. Bemérésük a szkennelési álláspontokkal párhuzamosan történt, ugyanazokkal az eszközökkel és mérési eljárásokkal (3.1.2. fejezet). Mintaterületenkénti helyzetüket a 17. ábra szemlélteti. Pozícióik megválasztásakor igyekeztem a lehető legjobban lefedni a mintaterületek egészét, viszont a csákánydoroszlói mintaterületnél megfelelő közelségben levő lécek és nyiladékok hiányában ez nem volt teljes mértékben kivitelezhető.



17. ábra: Illesztőpontok elhelyezkedése

3.1.5. Képfeldolgozás, pontfelhők előállítás

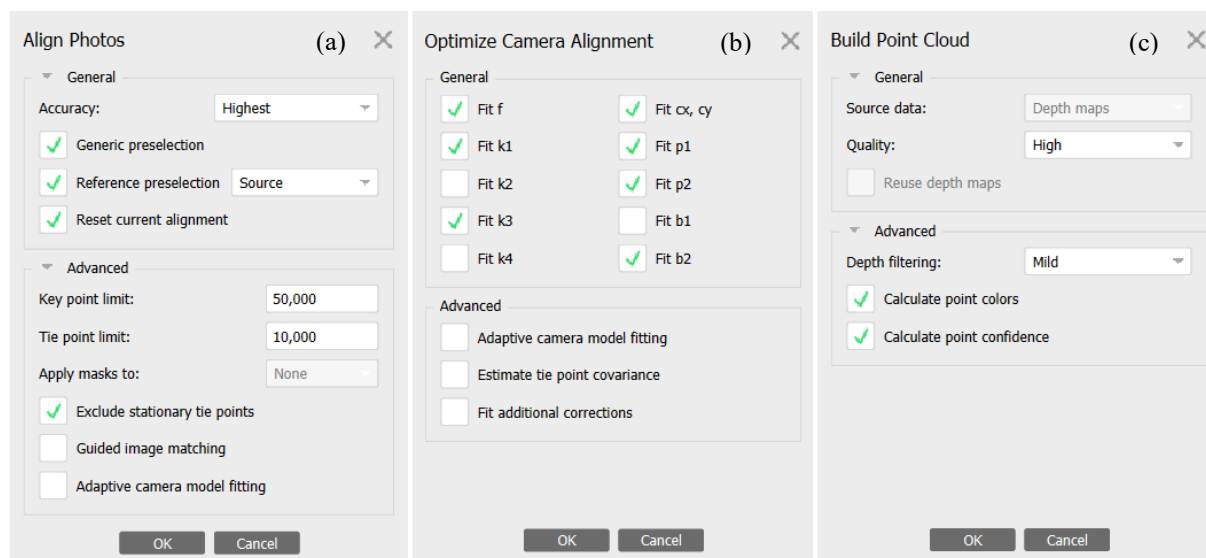
A képek elkészítése után következett azok feldolgozása. Ehhez az *Agisoft Metashape* (v2.0.2.) nevű fotogrammetriai szoftvert használtam. Az átfedéseket ugyan mindkét irányban 90-90%-ban határoztam meg, vizsgáltam azt is, hogy alacsonyabb átfedések esetén mennyivel csökken a kapott modellek pontossága. Ennek érdekében minden második, illetve minden harmadik kép, valamint minden második, illetve minden harmadik sor figyelembevételével 80 és 70%-os átfedést szimuláltam. Tekintve a három különböző repülési magasságot, bázisirányú, illetve sorok közötti átfedést, összesen 27 kombinációról beszélhetünk minden mintaterületen. A továbbiakban a kombinációkat „repülési-magasság_bázisirányú-átfedés_sorok-közötti-átfedés” formulával jelölöm (tehát pl. 120_80_70, ahol 120 (m) a repülési magasság, 80 (%) a bázisirányú, míg 70 (%) a sorok közötti átfedés).

A szoftver először elvégzi a képek egymáshoz illesztését (18a. ábra) a *Structure-from-motion* algoritmus segítségével. Ehhez a képeken egymásnak megfeleltethető, azonos színű pixeleket, pixelcsoportokat, alakzatokat keres. Első lépésként ezeket a jellegzetes pontokat választja ki az algoritmus attól függően, hogy milyen precizitást választunk (*highest*: szubpixel szinten; *high*: pixelenként; *medium*: minden második pixel soronként és oszloponként; stb.). Megadható továbbá, hogy maximálisan hány ilyen pontot válasszon ki képenként (*key point limit*), illetve legfeljebb hány pontot használjon fel ezek közül a relatív tájékozáshoz (*tie point limit*). Alapesetben az algoritmus minden képet hasonlít minden képhez, ami igencsak időigényes folyamat. A feldolgozási idő rövidítésére két gyorsító paraméter is rendelkezésre áll: *generic preselection*, ahol az algoritmus először alacsonyabb precizitással meghatározza az átfedő képpárokat, valamint a *reference preselection*, ahol a képek előzetes koordinátáinak ismeretében a képeket csak a szomszédjaival hasonlítja össze. A vizsgálat során precizitásként a *high* beállítást választottam (kivéve lombtalan állapotban az X_90_90 kombinációknál, ahol *highest* beállítással is elvégeztem a képegyeztetést, így a kombinációk száma 30-ra nőtt mintaterületenként, viszont ezeket a pontfelhőket csak a törzsazonosításhoz használtam fel),

továbbá alkalmaztam mindkét gyorsító opciót is, viszont ahol a képegyeztetés nem volt sikeres, ott újra lefuttattam a *generic preselection* mellőzésével.

A képegyeztetés végeztével egy előzetes pontfelhőt (*sparse cloud*) kapunk, melyet a képek közötti kapcsolópontok alkotnak. Az *Sfm* algoritmus meghatározza a kamera belső tájékozási paramétereit, illetve mivel mindegyik kép rendelkezik az eszköz által regisztrált külső tájékozási adatokkal is, a pontfelhő már geodéziai vetületbe illesztve jelenik meg a szoftver vizuális kezelőfelületén. RTK-modul alkalmazása esetén a számított külső és belső tájékozási paramétereket véglegesnek tekintjük, viszont ha földi illesztőpontokra támaszkodunk, azokat fel kell keresni, illetve megmérni minden egyes képen (amennyiben nincs takarásban). Az illesztőpontok elhelyezése után optimalizálhatók a belső tájékozás paraméterei (18b. ábra), amellyel minimálisra csökkenthető az illesztőpontok hibája, ezzel növelve a pontfelhő pontosságát. Az optimalizálás során figyelni kell arra, hogy ne történjen túlkalibráció. Ez a korrelációs mátrixban, illetve az optikai elrajzolás maradék hibáiban követhető nyomon, amennyiben két kalibrációs paraméter között fennáll a nagymértékű összefüggés, úgy a túlkalibrálás gyanúja is erősödik.

A képegyeztetést azoknál a kombinációknál tekintettem sikeresnek, ahol a képek legalább 90%-a sikeresen tájékozásra került. Csak ezekkel a kombinációkkal léptem tovább a következő munkaszakaszra, amely a sűrű pontfelhő (*dense cloud*) létrehozása volt (18c. ábra). Ez a legidőigényesebb folyamat. Az algoritmus először mélységtérképeket (*depth map*) készít a képekről az átfedések alapján, majd létrehozza a konkrét pontfelhőt. Bizonyos mértékben ez a folyamat is parametrizálható, hasonlóan a képegyeztetéshez, itt is beállítható a precizitás (*ultra high*: pixelenként; *high*: minden második pixel; *medium*: minden negyedik pixel; stb.). A mélység szűréséhez három különböző paraméter választható: *aggressive*, *mild*, illetve *moderate*. Az elsőt abban az esetben alkalmazzuk, ha a modellezendő objektum vagy terület nem tartalmaz jelentős, de kisméretű részleteket, míg a másodikat akkor, ha kifejezetten sok ilyen kis részlet van jelen. A harmadik egy átmeneti állapotot jelent a két mód között. Erdős területek esetén a *mild* beállítást célszerű alkalmazni, így ezzel a paraméterrel végeztem el a pontfelhők generálását.



18. ábra: Képegyeztetés (a), kalibráció optimalizálás (b), pontfelhő generálás (c)

3.1.6. Pontfelhők szűrése, modellalkotás

Ugyan a *Metashape* képes a pontfelhők további feldolgozására, talajpont-osztályozásra, 3D- és magasságmodellek előállítására, mégis ezeket a lépéseket más szoftverek bevonásával végeztem el a lényegesen jobb és széleskörűbb parametrizálhatóság miatt.

A generált pontok a térbeli koordináták és a színek mellett rendelkeznek egy megbízhatósági mérőszámmal is, amely az adott pont több nézetből történő illesztésének és rekonstrukciójának megbízhatóságát jellemzi, figyelembe véve a képi egyezések konzisztenciáját. Annak érdekében, hogy meghatározható legyen a legkisebb megbízhatóságú pontok hatása a végső modellekre, a vizsgálat itt kétfelé szakad mind lombos, mind pedig lombtalan állapotban: az egyik ágon a nyers pontfelhő megy tovább (melyeknek sűrűsége képszámtól függően 500–1000 pont/m²), míg a másikon az 1-es megbízhatósági értékű pontokat kiszűrve egy, az eredeti ponthalmaz körülbelül kétharmadát tartalmazó, csökkentett méretű pontfelhő.

Ezután következik a *LAStools* nevű szoftvercsomag alkalmazása, amit alapvetően légi lézeres letapogatással készült pontfelhők feldolgozására fejlesztettek ki, de fotogrammetriai pontfelhőkkel is képes dolgozni. A csomag több modullal is rendelkezik, mindegyik egy-egy célzott műveletet végez el. A pontfelhők feldolgozásához a *lasthin*, *lasnoise*, *lasground* és *las2dem* modulokat használtam fel különböző paraméterekkel és kombinációkkal.

3.1.6.1. Domborzatmodellek előállítása

A domborzatmodellek előállításában több modul is szerepet játszott, ezeknek a működését az alábbiakban részletezem.

A *lasthin* modul egy megadott cellaméretű szabályos rácsháló szerint ritkítja a pontfelhőt oly módon, hogy mindegyik cellában egyetlen pont marad. Paraméterként az is megadható, hogy magassági értelemben alulról vagy felülről nézve hányadik pontot, vagy magasság szerint rendezve hány százalékos percentilisének elhelyezkedő pontot hagyja meg az algoritmus. A vizsgálat itt összesen 12 ágra szakad: szűrtem a pontfelhőt úgy, hogy a cellákban az első, második, harmadik, negyedik, illetve ötödik legalacsonyabb magasságú pontok (rangsor alapú ritkítás), továbbá az 1-7%-nál elhelyezkedő pontok (percentilis alapú ritkítás) maradtak a cellákban, melyek méretét 5x5 centiméterre állítottam.

A *lasnoise* algoritmust a már ritkított pontfelhőkön futtattam. Ez a modul, ahogy a neve is mutatja, zajszűrést végez, mellyel eltávolítja a különálló, a nagyobb pontsokaságoktól messzebb helyet foglaló egyedüli pontokat, kisebb pontcsoportokat. A folyamat itt kétfelé ágazik: a lépés alkalmazása (10 centiméteres léptékkel), vagy mellőzése.

Több irányba való szétágazást eredményez a következő lépés, ahol a *lasground* modul a soros. Ez az algoritmus a talajpontok osztályozását végzi el, paraméterként annak léptéke adható meg, amely a kezdeti terepbecsléshez alkalmazott rácscellák méretét jelenti. Minél kisebb a lépték, annál inkább megtartja a folyamat a kisméretű részleteket. Itt összesen 10 különböző értékkel próbálkoztam, 3-12 méter közötti léptékekkel.

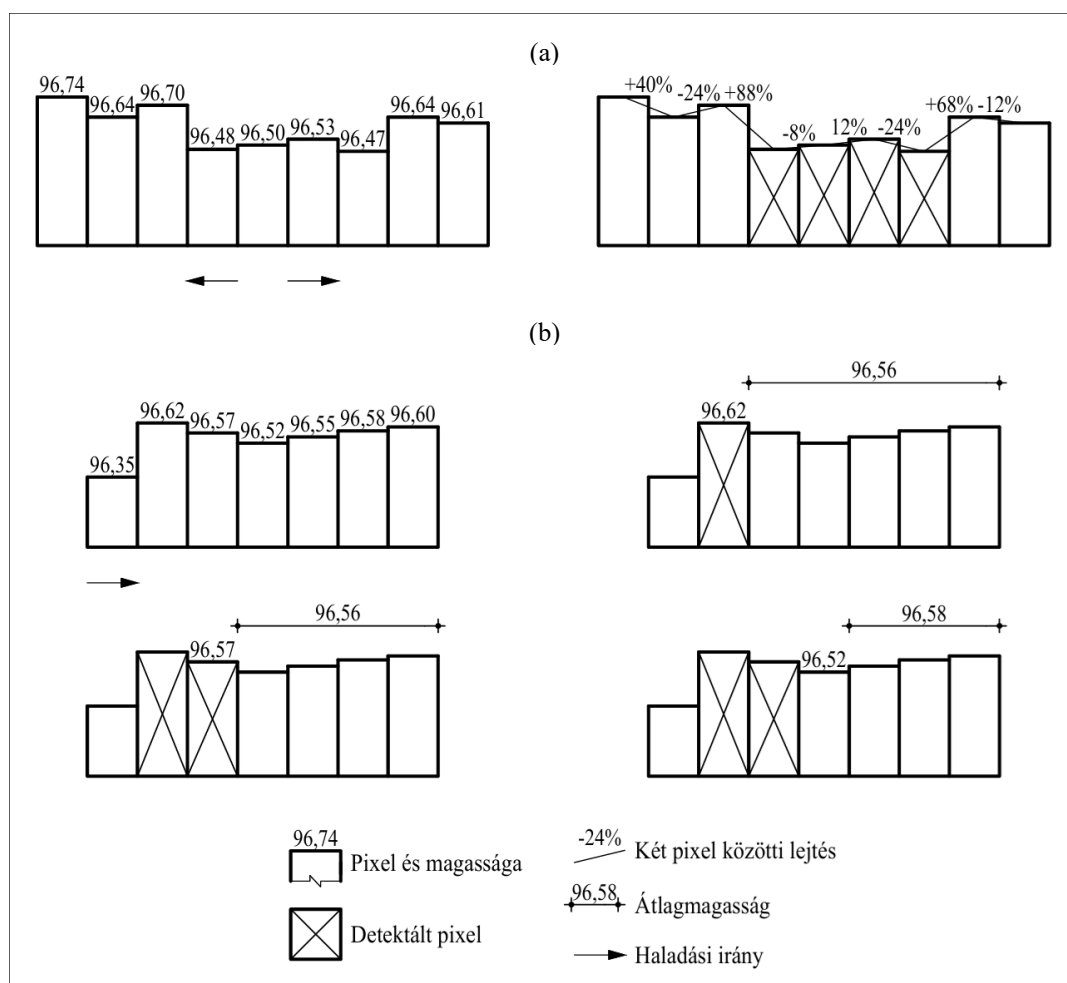
A domborzatmodellek elkészítése előtt még egy, általam kigondolt és programozott lépést alkalmaztam, ez a talajpontok szórás szerinti szűrése, szintén egy megadott cellaméretű szabályos rácsháló alapján. A szűrő vizsgálja a cellákba eső pontok magasságának szórását. Ha ez egy bizonyos érték fölé esik, az algoritmus eliminálja az összes pontot a cellából, így a raszterizálás során a környező pontok interpolációjával lesz meghatározva a cella magassága. Erre azért van szükség, mert sok esetben a talajpont-osztályozás során olyan pontok is a domborzati kategóriába sorolódnak, amik egy-egy nagyobb követ, tuskót, fatörzset írnak le. Továbbá a talajszint alatti, megmaradt zaj is kiszűrhető ezzel az eljárással. A vizsgálati lépés során a cellák nagyságát 25x25 centiméterben határoztam meg, a szórás küszöbértéke pedig egyenlő a cellák méretével.

A különböző paraméterű lépéseken átesett pontfelhőket a *las2dem* modullal raszterizáltam. A létrehozott modellek terepi felbontása 0,25 m/pixel, fájlformátuma „*bil*”.

3.1.6.2. Célzott simítási eljárás

A kész domborzatmodelleken egy úgynevezett célzott simítást végeztem, melyet szintén én fejlesztettem ki. Ez az eljárás azokat az esetlegesen benntartott kisebb-nagyobb kitüremkedéseket simítja el (például tuskók, vagy talajszint alatti pontok okozta kúpok), amelyek nem részei a valós domborzatnak, viszont kis méretük miatt a talajpont-osztályozási, valamint a fent felvázolt zajszűrő algoritmusok nem tudták megfelelően kiejteni őket.

Az algoritmus megadott hosszúságú, páratlan számú pixelből álló láncolatokat (vektorokat) vizsgál mind észak-dél, mind pedig kelet-nyugat irányban, tehát egy fokális műveletről beszélünk. Ezeken a vektorokon keres az algoritmus gödröket, illetve félgödröket (vagy kúpok, illetve félkúpok).



19. ábra: Gödör- (a) és félkúp-detektálás (b) szemléltetése

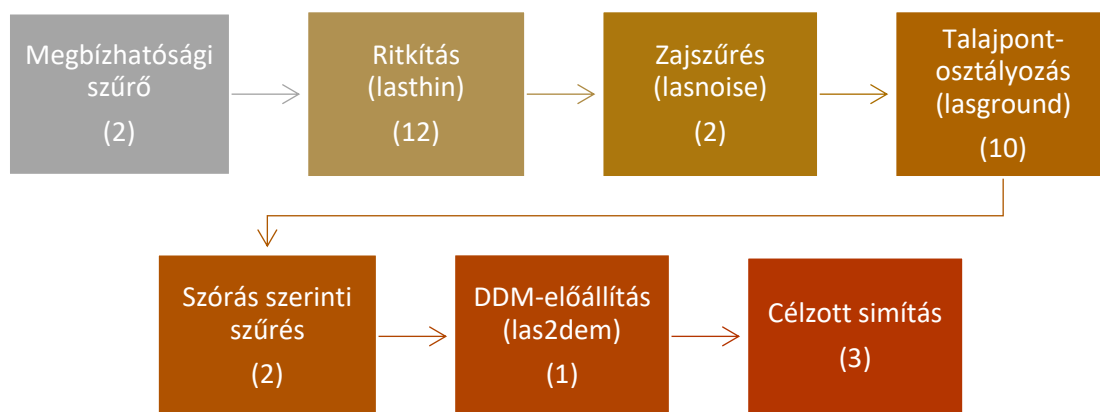
Gödrök és kúpok esetén a művelet a vektor közepén elhelyezkedő pixeltől indul ki, innen mindkét irányban egyesével haladva vizsgálja az egymás mellett álló pixelek magassági viszonyait. Amennyiben két pixel között a magasságkülönbségből adódó lejtés százalékos értéke nagyobb, mint a határként megadott, továbbá ez a feltétel a középponti pixeltől indulva mindkét irányban teljesül, és a lejtés iránya is megegyezik, úgy a pixelsor alacsonyabban (vagy magasabban) fekvő pixelei gödörként (vagy kúpként) lesznek azonosítva. Félgödrök és félkúpok esetén a vektor első két pixelétől indul a vizsgálat. Kezdőfeltétel a határérték feletti

lejtésszázalék, ha ez teljesül, akkor a vektor hosszán tovább haladva vizsgálja az algoritmus a pixelék átlagmagasságát. Simítandó pixelként lesznek megjelölve ezek a területek, amennyiben a soron következő pixelék átlagmagassága félgödör esetén nagyobb, félkúp esetén pedig kisebb, mint az aktuálisan vizsgált pixelé. Ezt a műveletet pixelenként előre haladva végzi az algoritmus egészen addig, amíg a vektor végére ér, vagy hamis lesz a feltétel. A vektoron előlről hátulra és hátulról előre is végigfut a vizsgálat.

A detektált pixelék egybefüggő területeket fednek le. Simításuk, azaz magasságuk újraszámítása IDW-interpolációval történik, melybe az összes, az egybefüggő területtel szomszédos pixel bevonásra kerül. A detektálást és simítást több iterációval futtatva jobb eredmény érhető el. A detektálási folyamatot és kritériumokat a 19. ábra grafikusan is szemlélteti.

A detektáláshoz és simításhoz gödörhossznak 9, félgödörhossznak 7 pixelt (tehát 2,25, illetve 1,75 métert) adtam meg, míg a lejtés határértékének 40, illetve 60%-ot, így két simított modell jött létre minden kombinációhoz.

A fent tárgyalt lépéseket, illetve hogy melyik hány ágra bontja a folyamatot, a 20. ábra összesíti. Tekintve, hogy mintaterületenként 27 kombinációból indultam ki (lásd 3.1.5. fejezet), a felsorolt lépések alapján a létrehozott domborzatmodellek lehetséges maximális darabszáma 77760.

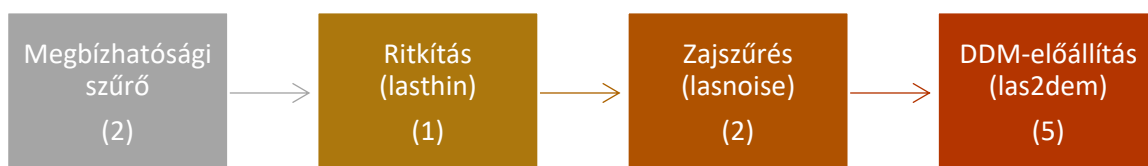


20. ábra: Domborzatmodellek előállításának lépései, az egyes lépések lehetséges paraméterszámával

3.1.6.3. Borított felszínmodellek

A borított felszínmodellek előállítása a fentinel kevesebb lépésből áll. A megbízhatósági értelemben szűrt és nem szűrt pontfelhőket először a *lasthin* modul segítségével 5x5 centiméteres cellákkal ritkítottam, meghagyva a legnagyobb magasságú pontokat. Ezután a *lasnoise* modullal szűrtem (vagy kihagytam, itt is kétfelé ágazás történt), majd pedig következett a raszterizálás a *las2dem* segítségével. Ezt 5 különböző terepi pixelmérettel (10-50 centiméter között, 10-es ugrásokkal) végeztem el. A fájlformátum szintén „*bil*”.

A lépéseket a 21. ábra szemlélteti. Kiindulva a 27 repülési paraméterkombinációból, a borított felszínmodellek lehetséges maximális darabszáma 540.



21. ábra: Borított felszínmodellek előállításának lépései

3.1.7. Domborzatmodellek pontosságának elemzése

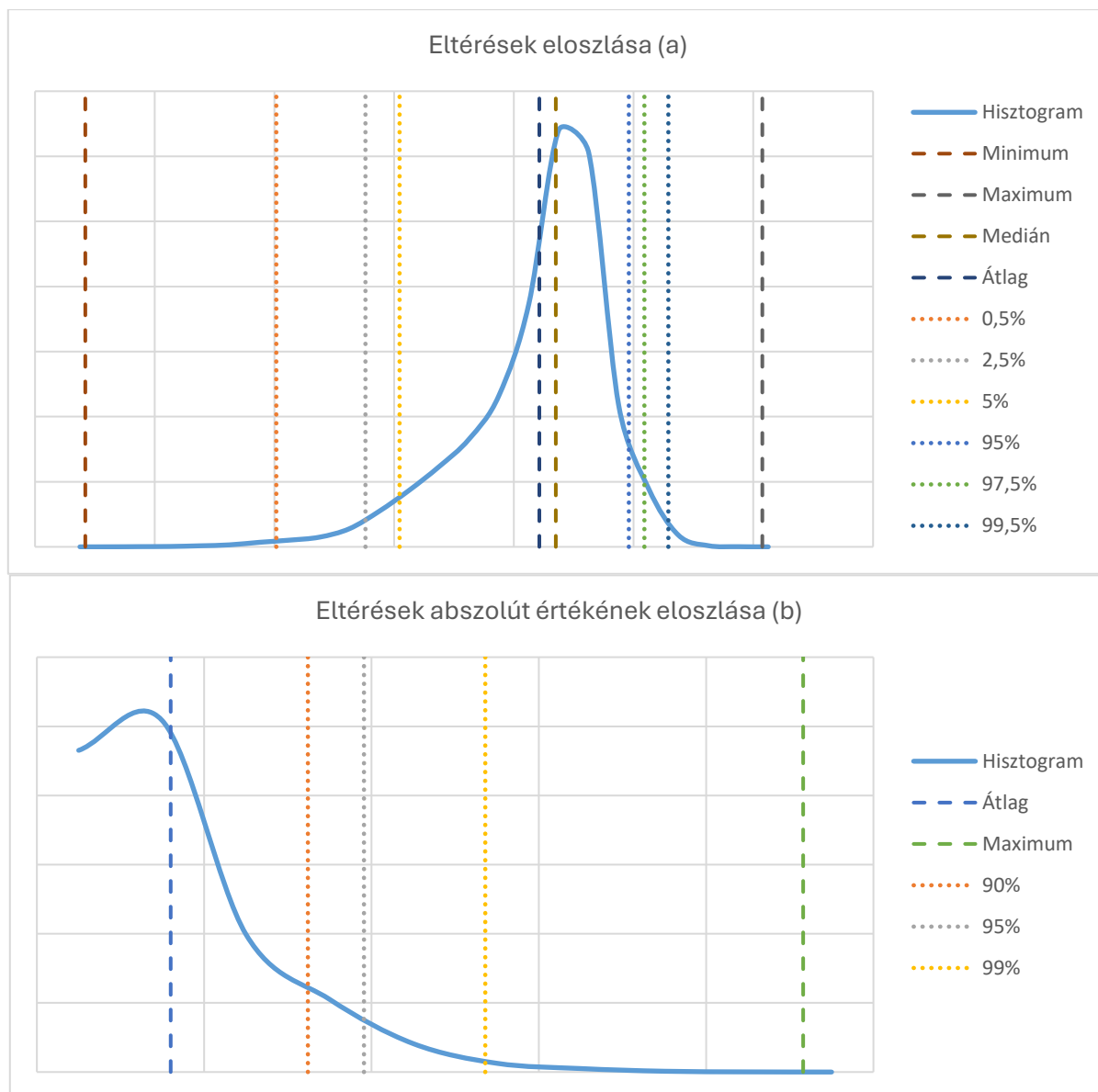
A mintaterületenként maximálisan létrehozható, 77760 kombináció eredményezte domborzatmodelleket a referenciamodellekhez hasonlítottam. Az előállított, illetve a referenciamodellek különbségét egyszerű raszteres művelettel hoztam létre. Az így kapott különbségrasztereket statisztikai elemzésnek vettem alá, vizsgálva az alábbi jellemzőket a mintaterületek határain belül, tehát nagyságrendileg 160 000 pixelértéket figyelembe véve (zárójelben az adott jellemző grafikonokon és táblázatokban megjelenített rövid neve, a 22. ábrán pedig ezek grafikus szemléltetése):

- globális minimum (min)
- medián (med)
- globális maximum (max)
- 99%-os kvantilis intervallum kiterjedése (CR_99)
 - 0,5%-os kvantilis (CI_005)
 - 99,5%-os kvantilis (CI_995)
- 95%-os kvantilis intervallum kiterjedése (CR_95)
 - 2,5%-os kvantilis (CI_025)
 - 97,5%-os kvantilis (CI_975)
- 90%-os kvantilis intervallum kiterjedése (CR_90)
 - 5%-os kvantilis (CI_050)
 - 95%-os kvantilis (CI_950)
- abszolút értékek átlaga (abs_avg)
- abszolút értékek szórása (abs_stdev)
- abszolút értékek 90%-os kvantilise (abs_90)
- abszolút értékek 95%-os kvantilise (abs_95)
- abszolút értékek 99%-os kvantilise (abs_99)
- abszolút értékek maximuma (abs_max)

A fenti statisztikai mérőszámok levezetése után vizsgáltam, hogy azokat az egyes repülési paraméterek, feldolgozási lépések, illetve az általuk felvehető paraméterértékek milyen irányban és milyen mértékben befolyásolják.

Ehhez SHAP (*SHapley Additive exPlanations*) elemzést alkalmaztam *python* programozási környezetben, amely egy játékelméleti alapokra épülő interpretációs módszer. A SHAP minden egyes bemeneti változóhoz hozzárendel egy értéket, amely azt fejezi ki, hogy a változó az adott megfigyelésben mennyivel növeli vagy csökkenti a modell által adott előrejelzést a kiinduló átlaghoz képest. A kapott értékek előjelesek, melyek azt mutatják, hogy az egyes bemeneti paraméterek pozitív vagy negatív irányban befolyásolják a kimenetet. Az abszolút SHAP-értékek átlagolásával pedig meghatározható a változók globális fontossága. (LUNDBERG – LEE, 2017).

A vizsgálat első körben le lett futtatva külön-külön mind a négy mintaterületre, majd pedig a teljes, összevont adathalmazra, így feltárható, hogy az egyes bemeneti változók más-más területeken is ugyanúgy (vagy hasonlóan) hatnak-e a modellek pontosságára, vagy pedig területenként változó mértékben teszik azt. A módszer által kapott fontossági mérőszámokat grafikonon ábrázoltam, ezzel összehasonlítva azok eredményeit, mellyel szintén további megállapításokat tehettem azok előrejelző és hatásbecslő alkalmasságára.



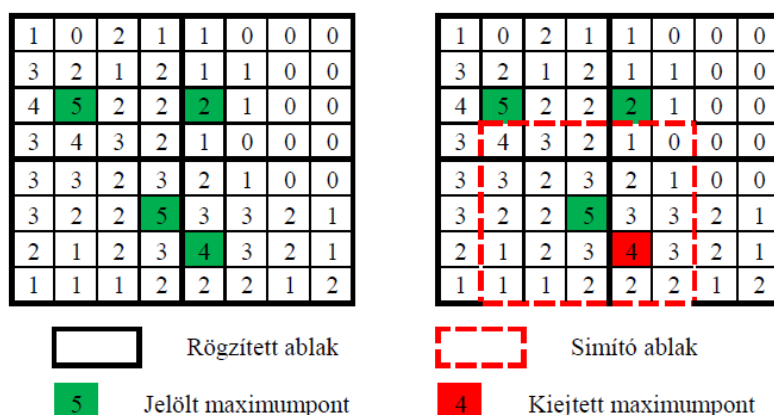
22. ábra: *Eltérések előjeles (a) és abszolút (b) értékének eloszlása, illetve a statisztikai mérőszámok szemléltetése egy példán keresztül*

3.1.8. Koronacsúcsok azonosítása, koronavetületek lehatárolása

A különböző felbontású borított felszínmodellek normalizálásával előállítottam a famagasságmodelleket, majd ezeken a diplomamunkámhoz (SZÁSZ, 2020) készített módszer továbbfejlesztett verzióját alkalmazva végeztem el az egyesfák korona alapján történő azonosítását, illetve koronavetületük lehatárolását.

A módszer első lépése a lokális maximumpontok keresése a famagasságmodellen. Ehhez először az algoritmus egy előre megadott ablakméret szerint egyenlő cellákra osztja a raszteres modellt, majd ezeken a cellákon belül megkeresi a legnagyobb magassági értékkel rendelkező pixelt. Ez a rögzített maximumpont-keresés. Ezt követi a maximumpontok simítása, amely szintén egy előre megadott ablakmérettel dolgozik, melynek a középpontja a rögzített keresés során azonosított maximumpontok. Amennyiben a simítás során egy ablakon belül több előzetesen detektált maximumpont foglal helyet, a legmagasabb marad maximumként megjelölve, a többi azonosítása törlésre kerül. A két lépést a 23. ábra grafikusán is szemlélteti.

Ezt a vizsgálatot 4-4 különböző értékkel (2, 3, 4 és 5 méter) futtattam, így mindegyik borított felszínmodell esetén 16 kombináció jött létre.



23. ábra: Rögzített és simító maximumkeresés

Az így azonosított maximumpontok feltételezhetően egy-egy koronacsúcsot jelentenek. A detektált csúcsponthalmaz pontosságának ellenőrzését a referencia-törzstérképből létrehozott Voronoi-poligonok segítségével végeztem, vizsgálva, hogy az egyes felületelemek területére hány detektált pont esik. A vizsgált kombinációk esetén így feljegyeztem a következő darabszámokat, illetve arányokat a valós törzsszámhoz viszonyítva:

- detektált törzsek száma és aránya: ahol a poligonok területére legalább egy pont került;
- pontosan detektált törzsek száma és aránya: ahol a poligonok területére kizárólag egy pont került;
- kihagyott faegyedek száma és aránya: ahol egyetlen pont sem esett a poligonok területére;
- többletdetektálások száma;
- összes detektálás száma és aránya.

Az egyes kombinációk teljesítményét egy képlet segítségével értékeltem, melynek eredménye egy úgynevezett detektálási pontszám. A legjobb detektálási pontszámot elért kombináció számít a legpontosabbnak. A képlet a következő:

$$A = \frac{D + P - K - T}{2 * N}$$

ahol:

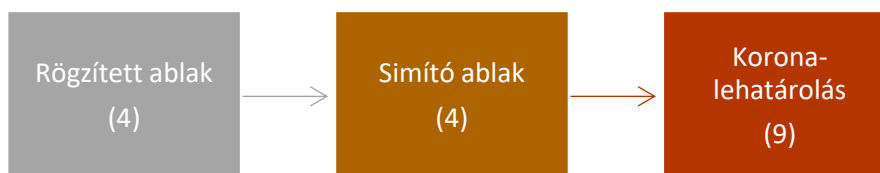
- A variáció pontszáma [-0,5;1]
- D detektált törzsek száma
- P pontosan detektált törzsek száma
- K kihagyott törzsek száma
- T többletdetektálások száma
- N valós törzsszám

Mivel viszonylag sok faegyed esetén tapasztalható, hogy a törzs és a koronacsúcs vízszintes vetülete nem esik egybe (esetenként az eltérés jelentős is lehet), így az alapvetően a törzsdetektálásra (lásd 3.1.9. fejezet) megalkotott képlet várhatóan jelentősen kisebb detektálási pontszámokat eredményez, azonban a kombinációk összehasonlítására mindenképpen alkalmas. A kapott eredményt befolyásolja az a tény is, hogy nem minden egyed lombkoronája

látható felülnézetből, azaz előfordulhatnak alá- és közbeszorult egyedek, amik szintén alacsonyabb detektálási pontszámot eredményeznek. Hogy erre a pontszámra, illetve annak összetevőire milyen hatással vannak az egyes paraméterek (mind a borított felszínmodell előállítása során, mind pedig a maximumpontok detektálása során felhasználtak), a 3.1.7. fejezetben is bemutatott SHAP-elemzéssel határoztam meg.

A feldolgozási sor mintegy utolsó lépését a koronavetületek lehatárolása jelenti. A módszer a detektált lokális maximumpontokból indul ki, majd pedig az inverz vízgyűjtő eljárás elvét követve keresi meg és jelöli ki a koronák közti határokat. Abban az esetben, ha a lehatárolás folyamata során két lokális vízgyűjtő érintkezik egymással, úgy az algoritmus az addig elhatárolt területek dimenziói alapján döntést hoz, hogy összevonja-e őket, vagy megtartsa mindkettőt független koronaként. Ez a részjelzés alapvetően arra hivatott, hogy az esetleges hamis maximumpontokat kiszűrje, ezzel megszüntetve a többletdetektálásokat, így csökkentve a detektált fák számát, illetve várhatóan növelve a törzsszáma vonatkozó pontosságot. Az viszont előfordulhat, hogy ha erősen villásodó faegyedek két koronarészt fejlesztenek, úgy az eljárás is két faegyedként fogja azonosítani őket.

Az algoritmus két bemeneti paramétere a vízgyűjtők maximális mélysége, ami a kiindulási maximumpont magasságának függvényében, százalékosan határozza meg, hogy az adott ponttól maximálisan milyen magasságeltérésig vizsgálódjon az eljárás, valamint a koronák maximális vízszintes kiterjedése (méterben megadva), ami a térképi X és Y irányban, valamint átlósan is érvényes, a lehatárolt vízgyűjtők nem nyúlhatnak ezen túl. Ez utóbbi határozza meg az összevonás alapfeltételét is, azaz két egymásba érő vízgyűjtő abban az esetben vonható össze, ha ezzel nem haladja meg egyik irányban sem a maximális vízszintes kiterjedést. A vizsgálatot 30%-os maximális mélységgel, valamint több maximális vízszintes kiterjedési értékkel (4-től 12 méterig, méterenként) futtattam le, ez újabb 9 lehetséges kombinációt jelent. A borított felszínmodellek előállítása, illetve feldolgozása így összesen szintén 77760 maximális végső kombinációs számot eredményezhet mintaterületenként. A feldolgozási rész lépéseit, illetve lépésenkénti kombinációs számait a 24. ábra mutatja be.



24. ábra: Normalizált borított felszínmodellek feldolgozásának lépései

A lehatárolt koronák ellenőrzése szintén a Voronoi-poligonok, valamint a detektálási pontszám képletének felhasználásával történt, azonban mivel itt nem pontokról, hanem kétdimenziós felületekről beszélhetünk, ezért az eljárás is némiképp változik: a lehatárolt koronák esetén azt vizsgálom, hogy területük mely poligonokkal fednek át, majd a legnagyobb arányban átfedő poligonhoz lesznek kapcsolva. Az így kapott találati számokat, illetve pontszámokat szintén vizsgáltam a fentitől független, azaz teljesen újrafuttatott SHAP-eljárás segítségével.

3.1.9. Törzspozíciók detektálása

A lombtalan állapotú felvételek, illetve a belőlük *highest* beállítással előállított pontfelhők sűrűségükből adódóan (rendszerint 2000 pont/m² felett) alkalmasak lehetnek az egyesfák törzspozícióinak meghatározására. Ehhez egy saját fejlesztésű algoritmust használtam, amely a pontcsoportosulások elhelyezkedésén, egymáshoz való viszonyának vizsgálatán alapul.

Mintegy nulladik lépésként a nyers pontfelhő normalizálása (szintén a pontfelhőből előállított domborzatmodell segítségével), valamint vágása történik, bent hagyva kizárólag azokat a pontokat, amik a vizsgálati magasságon belül helyezkednek el. Az aljnövényzet esetleges zavarása miatt a vizsgálatot 1 méterrel a talajszint felett kezdtem, egészen 6 méter magasságig haladva.

Az algoritmus előre megadott magassági szintekre, rétegekre (jelen esetben 20 cm) osztja a teret, és így halad lentől felfelé. Ezután minden rétegben a pontok szomszédsági viszonyainak elemzésével egymáshoz közel levő pontokat, azaz pontcsoportosulásokat azonosít, majd szintről szintre haladva hozzáadja az egymás felett elhelyezkedő ponthalmazokat a már meglévő csoportokhoz. Elsősorban az 1 és 2 méter magasság közötti pontokat nyilvánítja törzspontoknak, azonban mivel a fotogrammetriai pontfelhők esetén gyakran előfordulhat, hogy takarás miatt ebben a sávban nem minden faegyed jelenik meg, a magasabban álló pontok is számíthatnak egy-egy detektálható törzs kiindulásaként. A 6 méter alatt erősen villásodó faegyedeket is képes felismerni az algoritmus, ezeket nem két törzsként jeleníti meg. Az esetleges cserjeszint zavarása, hamis detektálási lehetősége is kizárásra került a pontcsoportosulások horizontális kiterjedésének figyelembevételével.

Az így szegmentált pontcsoportosulások adják a detektált törzseket, pozícióikat pedig az 1 és 2 méter közötti magassági sávban elhelyezkedő pontok koordinátáinak átlaga, ezek hiányában a magasabban fekvő összes pont koordinátáinak átlaga adja (utóbbi esetben a ferdülésének függvényében ez valamennyire eltérhet a valós pozíciótól).

A vizsgálat egy további paramétere a pontcsoportok azon minimális elemszáma, ahonnan azt faegyedként, nem pedig zajként értelmezi az algoritmus. Ezt 10, illetve 50 pontban meghatározva is lefuttattam a detektálást mindhárom repülési magasság esetén, a megbízhatósági szűrő (*filter by confidence*) alkalmazásával, illetve mellőzésével is, tehát a mintaterületenkénti kombinációs szám ennél a vizsgálatnál 12 volt.

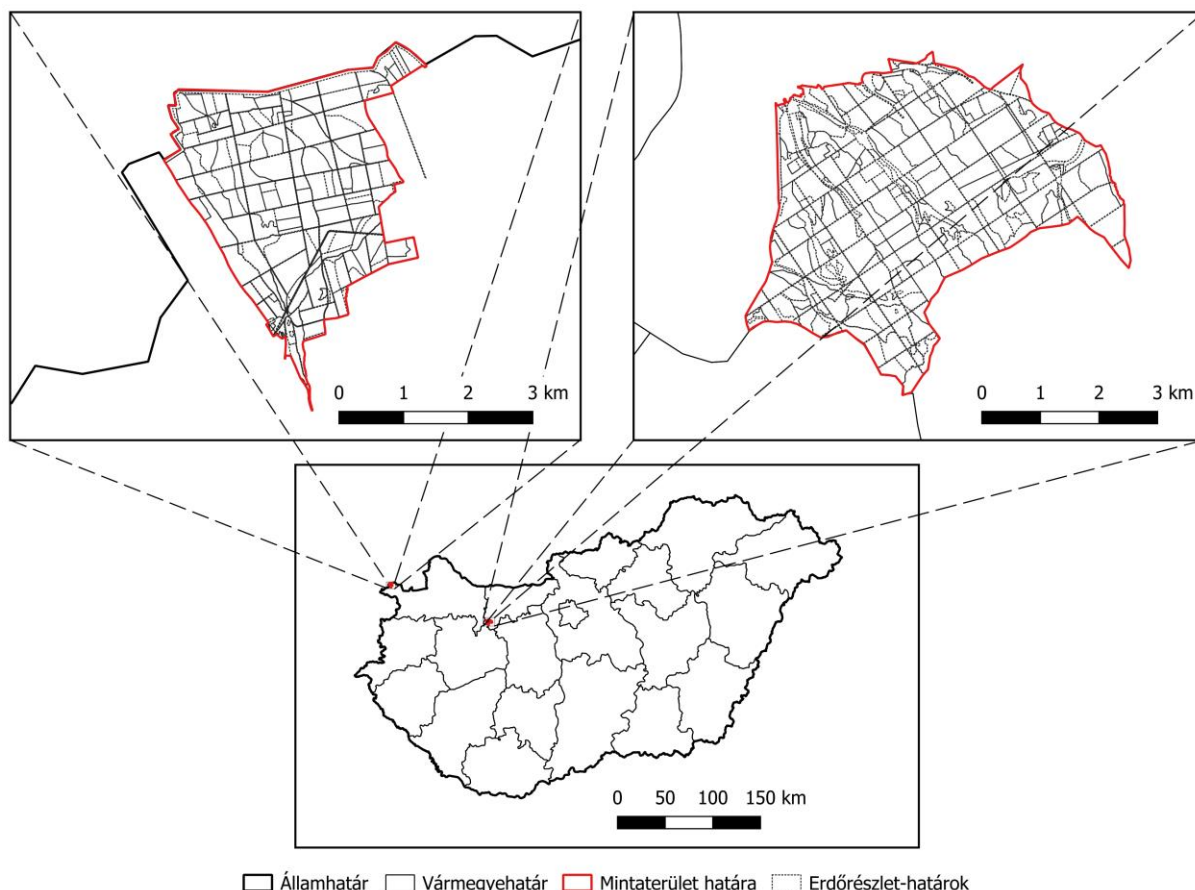
Az egyes paraméterkombinációk által kapott törzstérképek pontosságát a referenciatörzsek Voronoi-poligonjaival, valamint a 3.1.8. fejezetben ismertetett detektálási pontszám számításával vizsgáltam.

3.2. Kisrepülő lézerszkenneléssel előállított domborzatmodellek elemzése

3.2.1. A mintaterületek bemutatása

A SoilSense projekt keretein belül eddig két mintaterület került kijelölésre: az első a Sopron mellett található Dudlesz-erdő, a második pedig a Bakony északi lábánál elterülő, Réde község határon belül fekvő összefüggő erdőtömb (25. ábra). A két mintaterület összesen 3137 hektárt fed le, amelyen 697 darab erdőrészlet osztozik, melyből 439 ténylegesen erdővel borított terület (tehát ezen területekről tárol termőhelyi viszonyokra vonatkozó információkat az Országos Erdőállomány Adattár), míg a többi egyéb részlet (út, tisztás, nyiladék, vadföld stb.).

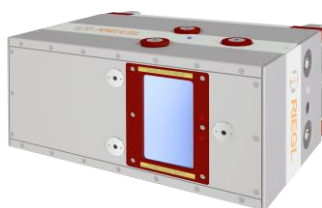
A Dudlesz-erdő, mintegy 1080 hektáron elterülve, a földrajzi tájbeosztás szerint a Fertőmelléki-dombság kistájához tartozik. Ez a térség fiatal, harmadidőszaki üledékes kőzetekből felépülő, gyengén tagolt felszínű, alacsony relatív reliefű, deráziós és eróziós eredetű dombsági formaegyüttes. A rédei mintaterület ennek közel a kétszeresére, 2057 hektárra terjed ki. A Sári-Bakonyalja kistáj részét képezi, amely a domborzatát tekintve aprólékosan tagolt, a magasabb fekvésű területeken erősen felszabdalt hegységelőtéri dombság (DÖVÉNYI, 2010).



25. ábra: A SoilSense projekt mintaterületeinek elhelyezkedése

3.2.2. Légi lézeres adatok feldolgozása, domborzatmodellek előállítása

A különböző felszínmodellek előállításához szükséges pontfelhőt az EnviroSense Hungary Kft. biztosította, amely egy *Riegl VQ780 II* szenzor (26. ábra) használatával, kisrepülőről lett felvételezve lombtalan állapotban, 2023-ban. A pontfelhő átlagos sűrűsége 20 pont/m², melyből levezetésre kerültek az egyes modellek a *TreeDetect* szoftver segítségével, amely kifejezetten légi lézeres letapogatásból származó pontfelhők feldolgozására fejlesztett ki a TopoLynx Kft. A program algoritmusai raszteres és vektoros állományokat hoz létre: a raszteres kimenetek a felszínmodelleket (lombkorona- és domborzatmodell), míg a vektoros eredmények faegyed-pozíciókat jelentenek. A feldolgozás első lépéseként a szoftver kiszűri az elszórtan elhelyezkedő, terepszint alatti alacsony pontokat, majd hierarchikus morfológiai szűrővel azonosítja a domborzatra jellemző pontokat (talajpontokat). Ezek interpolálásával készíti el a digitális domborzatmodellt. A második feldolgozási szakaszban a program eltávolítja a lombkoronaszint fölé eső, kiugróan magas pontokat, majd kiválasztja a lombkoronához köthetőket. Ezek interpolálásával állítja elő a lombkoronamodellt. A harmadik lépésben voxel aggregációs algoritmus segítségével történik az egyes fák koronáinak szegmentálása.



26. ábra: Riegl VQ780 II szenzor (forrás: riegl.com)

Az előállított raszteres termékek terepi felbontása 1 m/pixel, melyek közül disszertációmban a domborzatmodellt használtam fel különböző elemzések elvégzésére.

3.2.3. Tematikák levezetése

Az előállított domborzatmodell felbontásából kifolyólag a nagy felbontású, rendkívül részletgazdag modellek kategóriájába tartozik, melyen kisebb mélyedések, gödrök, kúpok, valamint erdei utak is jól kivehetőek, viszont ezek a termőhelyi térképezés léptékének tekintetében jelentéktelennek hathatnak, sőt, kisebb mértékben befolyásolhatják annak pontosságát. Emiatt egy Gauss-szűrés elvégzésére volt szükség ($r = 10$ m, $s = 100$ m), amellyel a domborzatmodell termőhelyfeltárási szempontból releváns részletességűvé tehető.

A domborzati viszonyok jellegzetességeinek elemzésére különböző tematikákat vezettem le: lejtés, kitettség, valamint topográfiai pozíció index (TPI). Mindhárom eljárás fokális raszteres műveletként a szomszédos cellák alapján számolja ki a megfelelő értékeket. A lejtés értéke a környező pixelek alapján mért, fokban kifejezett lejtőszöget jelenti, míg a kitettség a legmeredekebb magasságcsökkenés irányát mutatja meg $0-360^\circ$ között, az északi iránytól indulva, az óramutató járásának megfelelően. A topográfiai pozíció index az egyes pixelek helyzetét mutatja be a környező cellák magasságához viszonyítva.

Mivel a levezetett tematikák folytonos értékeket tárolnak, a könnyebb feldolgozhatóság, értelmezhetőség, és nem utolsósorban az összehasonlíthatóság érdekében kategorizáltam őket, lejtés esetén 5° -os élességgel, míg a kitettség esetén a 4 fő- és 4 mellékégtáj szerint, összesen 8 kategóriába soroltam őket, úgy, ahogy az erdőállomány adattárban is szerepelnek. A 2° alatti lejtőszögű területek mind a lejtés-, mind pedig a kitettségraszteren a SÍK kategóriába lettek besorolva.

3.2.3.1. TPI-sugarak megválasztása

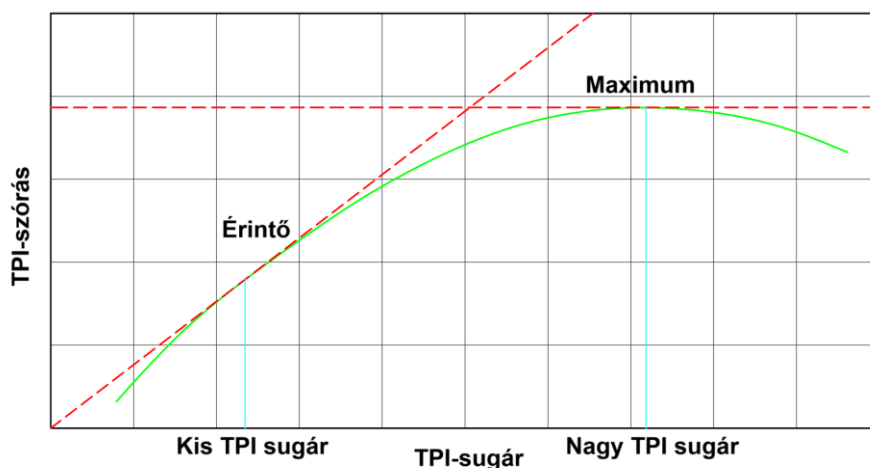
A topográfiai pozíció index (TPI) számításának egyik legkritikusabb lépése a vizsgálati sugarak megfelelő megválasztása. A különböző sugárméretek eltérő részleteket hagyhatnak figyelmen kívül vagy emelhetnek ki, így alapvetően befolyásolják a TPI-alapú osztályozás eredményeként kapott domborzatformák területi eloszlását. Az egyik lehetséges megközelítés egy reprezentatív részterület kijelölése, majd több vizsgálati sugár kombinálása annak érdekében, hogy az optimális konfigurációt empirikusan válasszuk ki. Ez a módszer azonban magában hordozza a szubjektív döntésekből fakadó torzítás lehetőségét. Ezen probléma kiküszöbölésére egy új, objektívebb megközelítést dolgoztam ki.

Az alkalmazott módszer a domborzatmodell térbeli felbontásából indul ki, amely ebben az esetben 1 m/pixel. A TPI-számításokat először ennek ötszörösével és annak egész számú többszörösével (azaz 5, 10, 15, 20 és 25 méteres vizsgálati sugarakkal) végeztem el. Ezt követően minden egyes alapértékhez további három vizsgálati sugarat rendeltem, mégpedig a három-, négy-, illetve ötszörös értékek figyelembevételével (például a 20 méteres sugárhoz tartozó további értékek: 60, 80 és 100 méter) (4. táblázat). Ennek eredményeként összesen 14 különböző TPI-modellt állítottam elő.

4. táblázat: Választott TPI-sugarak (zárójelben a duplumok)

	Sugárértékek [m]				
Alapérték	5	10	15	20	25
Háromszoros	(15)	30	45	60	75
Négyszeres	(20)	40	(60)	80	100
Ötszörös	(25)	50	(75)	(100)	125

Az elkészült TPI-modelleken kör alakú, 25 m sugarú környezetben szórásalapú statisztikai elemzést végeztem, amelynek eredményeként létrejöttek az egyes modellekhez tartozó szórásraszterek. Az ezekből kiolvasott globális maximumértékeket egy grafikonon ábrázoltam a sugár függvényében. A felhordott pontokra másodfokú polinomiális trendvonalat illesztettem, amelynek deriváltja alapján meghatározható a két vizsgálati sugár: a trendvonal maximumpontjához legközelebb eső TPI-sugár adja a nagyobbik értéket, míg a trendgörbét az origón keresztül húzott érintő érintési pontjához legközelebb eső sugár a kisebbik vizsgálati sugárértéket jelöli (27. ábra).



27. ábra: A TPI-sugarak megválasztását elősegítő modell

Előfordulhat, hogy a trendvonal annyira magasan helyezkedik el, hogy nincs olyan érintője, amelyik metszi az origót. Ebben az esetben a függőleges tengelyen felfelé haladva kell nézni az egész értékeket, és kiválasztani azt, amelyen már keresztülhalad olyan egyenes, amely érinti a trendgörbét. Tehát ha például a grafikon koordináta-rendszerének (0;0) pontján nem halad át olyan egyenes, amely érintené a görbét, de a (0;1) ponton már igen, úgy ezen érintő érintési pontja fogja meghatározni a TPI-vizsgálat kisebbik sugarát.

A kiválasztott két vizsgálati sugár alapján levezetett TPI-raszterek kombinálásával lehetőség nyílik az eredeti domborzatmodell 10 különböző domborzati kategória szerinti osztályozására. Az egyes kategóriák megnevezését, valamint matematikai feltételeit az 5. táblázat mutatja be.

5. táblázat: Levezetett domborzatformák (JENNESS, 2006)

Megnevezés	Kis sugarú TPI	Nagy sugarú TPI	Lejtés
Mély völgy/vízfolyás	$TPI \leq -1$	$TPI \leq -1$	
Közepes lejtésű vízfolyás, sekély völgy	$TPI \leq -1$	$-1 < TPI < 1$	
Vízfolyás hegy/dombtetőn	$TPI \leq -1$	$TPI \geq 1$	
U-alakú völgy	$-1 < TPI < 1$	$TPI \leq -1$	
Sík	$-1 < TPI < 1$	$-1 < TPI < 1$	$\leq 2^\circ$
Nyílt lejtő	$-1 < TPI < 1$	$-1 < TPI < 1$	$> 2^\circ$
Fennsík, lejtők magasabb részei	$-1 < TPI < 1$	$TPI \geq 1$	
Kisebb gerinc/domb völgyben	$TPI \geq 1$	$TPI \leq -1$	
Közepes lejtésű gerinc, kisebb domb síkon	$TPI \geq 1$	$-1 < TPI < 1$	
Hegy/dombtető, magas gerinc	$TPI \geq 1$	$TPI \geq 1$	

3.2.4. Levezetett tematikák elemzése, adattári adatokkal való összehasonlítása

A levezetett és kategorizált raszterek, valamint az erdőrésztetek területeinek összevetésével vizsgáltam, hogy a három levezetett tematika esetén az egyes kategóriák milyen arányban vannak jelen az egyes erdőrésztetekben. Első összehasonlításként a legnagyobb részterületű kategóriákat hasonlítottam az adattári adatokkal, viszont ebben az esetben a változó kategória nem idézhető elő. Mivel ezen kategória kritériumai nincsenek lefektetve az Erdőrendezési Útmutatóban, statisztikai mérőszámokkal próbáltam definiálni. Ezek a mérőszámok az alábbiak:

- Frekvencia: a legnagyobb kiterjedésű kategória területének aránya az erdőrésztet teljes területéhez viszonyítva;
- Stabilitás: a legnagyobb és a második legnagyobb kiterjedésű kategóriák az erdőrésztet teljes területéhez viszonyított arányának különbsége;
- Shannon-entrópia (SHANNON, 1948):

$$H(S) = -1 * \sum_{i=1}^n P_i * \log_2 P_i$$

ahol P_i a relatív gyakoriság (adott kategória részterülete / a teljes erdőrésztet területe).

A fent felsorolt számadatokat egyesével vizsgálva, majd pedig egymással kombinálva is felállítottam több kritériumot az egyes tematikák alapján történő változó kategóriába sorolásra, melyek a következők (zárójelben az összes lehetséges eset):

- Frekvencia esetén (5): ha az értéke 0,3 alatti (és ugyanígy 0,1-es nagyságrendű ugrásokkal 0,7-ig);
- Stabilitás esetén (5): ha az értéke 0,1 alatti (és ugyanígy 0,05-os nagyságrendű ugrásokkal 0,3-ig);
- Entrópia esetén (7): ha az értéke 1 feletti (és ugyanígy 0,25-os nagyságrendű ugrásokkal 2,5-ig).

Ha egy erdőrésztet nem felel meg a változó kategóriába sorolási kritériumának, úgy a legnagyobb részterületű kategória értékét veszi fel. Az egyes kritériumok szerinti kategorizálást hibamátrixok segítségével ábrázoltam, valamint meghatároztam a találati arányt. Mindhárom mérőszám esetén tovább vittem azt a kritériumot, amely a legjobb találati arányt eredményezte, majd ezeket logikai ÉS (&) illetve VAGY (|) feltételekkel, az összes lehetséges variációt (összesen 8) felhasználva összekapcsoltam azzal a feltételezéssel, hogy ez javíthatja a találati arányt. A variációk az alábbiak:

1.	frekvencia	ÉS	stabilitás	ÉS	entrópia
2.	frekvencia	VAGY	stabilitás	VAGY	entrópia
3.	(frekvencia	ÉS	stabilitás)	VAGY	entrópia
4.	frekvencia	ÉS (	stabilitás	VAGY	entrópia)
5.	(frekvencia	VAGY	stabilitás)	ÉS	entrópia
6.	frekvencia	VAGY (	stabilitás	ÉS	entrópia)
7.	(frekvencia	ÉS	entrópia)	VAGY	stabilitás
8.	(frekvencia	VAGY	entrópia)	ÉS	stabilitás

A két mintaterületre külön-külön vizsgáltam az egyes kritériumok, illetve kritériumkombinációk eredményeit, így kimutathatók az eltérő domborzatviszonyok esetén tapasztalható esetleges eltérések.

A lejtés és kitettség esetén az összehasonlítás egyértelmű, mivel ugyanazokat a kategóriákat vezettem le, amik az adattárban is szerepelnek. Kicsit árnyaltabb a helyzet a

domborzatformák esetén, ugyanis az adattári kategóriák és a JENNESS (2006) által leírt domborzatalakulatok között nincs tökéletes egyezés. Az összehasonlítás végett viszont, ha szubjektíven is, de megfeleltettem egymásnak azon kategóriákat, amelyek a két vizsgált erdőtümb esetén jelen vannak, így valamilyen képet kaphattam ezen jellemző adattári helyzetéről is. Az egymásnak megfeleltetett kategóriákat a 6. táblázat sorolja fel.

6. táblázat: Adattári és TPI-alapú kategóriák megfeleltetése

Adattári kategória	TPI-ből levezetett kategória
Sík (lapály)	Sík
Hegy-, domb-, buckaoldal	Nyílt lejtő
Hegy-, domb-, buckatető, hegyhát, gerinc	Fennsík, lejtők magasabb részei
Völgy, hegyláb, buckaköz	U-alakú völgy
Mélyedés, teknő, töbör	Mély völgy/vízfolyás
Árok, vízmosás, szurdok, vápa	

4. Eredmények

4.1. UAV-alapú fotogrammetria segítségével előállított felszínmodellek és pontfelhők feldolgozása

4.1.1. Képegyeztetések eredményei

A repülési magasság, valamint a bázisirányú és sorok közötti átfedés összes lehetőségeit tekintve a képegyeztetés jellemzően nem sikerült minden kombináció esetén. Ezek sikerességét, valamint az egyes kombinációkhoz szükséges, a *DroneDeploy* által kalkulált repülési időt és képszámot az 7. táblázat szemlélteti a *high* beállítású képegyeztetések esetén.

7. táblázat: Képegyeztetések sikeressége

Repülési magasság [m]	Bázis-irányú átfedés [%]	Sorok közötti átfedés [%]	Repülési idő [perc]	Képszám [db]	Lombtalan				Lombos			
					SOP 126/E	SOP 128/C	SOP 152/A	CSDO 1/D	SOP 126/E	SOP 128/C	SOP 152/A	CSDO 1/D
120	90	90	22,90	399	x	x	x	x	x	x	x	x
		80	13,50	209	x	x	x	x	x	x	x	x
		70	10,37	146	x	x	x	x		x	x	x
	80	90	14,08	198	x	x	x	x	x	x	x	x
		80	8,58	104	x	x	x	x	x	x	x	x
		70	6,75	73	x	x		x				
	70	90	11,15	132	x	x	x	x	x	x	x	x
		80	6,95	70	x	x						x
		70	5,55	49	x	x						
100	90	90	26,07	437	x	x	x	x	x	x	x	x
		80	15,05	227	x	x	x	x	x	x	x	x
		70	11,37	159	x	x	x	x		x	x	x
	80	90	14,40	216	x	x	x	x	x	x	x	x
		80	8,58	114		x	x	x		x	x	x
		70	6,63	79		x	x	x				
	70	90	11,22	144		x	x	x	x	x	x	x
		80	6,82	76		x	x	x		x		x
		70	5,35	53		x						
80	90	90	29,68	567	x	x	x	x	x	x	x	x
		80	16,70	297	x	x	x	x		x	x	x
		70	11,50	189	x	x	x	x		x	x	
	80	90	18,08	283		x	x	x		x	x	x
		80	10,35	148		x		x		x	x	x
		70	7,30	94		x		x				
	70	90	13,12	189		x	x	x		x	x	x
		80	7,62	99		x		x				
		70	5,50	63		x		x				

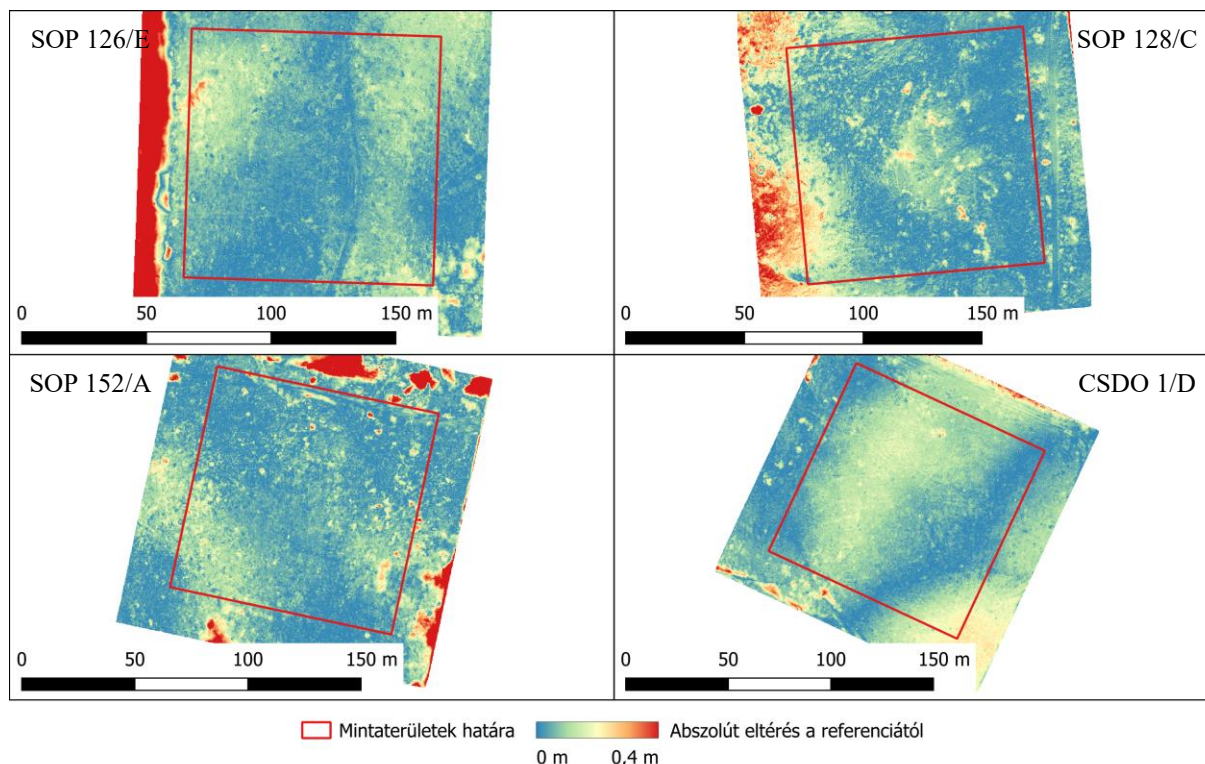
4.1.2. Domborzatmodellek pontossága

Az előállított pontfelhőkön, illetve a domborzatmodelleken, különböző paraméterkombinációkkal elvégzett műveletek a végtermék pontosságára gyakorolt hatásainak elemzésével megállapítható, hogy az egyes elemeket érdemes-e beépíteni a feldolgozási sorba, illetve milyen paraméterértékekkel érdemes futtatni. A vizsgálat során 18 különböző statisztikai mérőszámot vezettem le a különbségraszterekből (egyések között kapcsolat áll fenn). Ezek közül a legfontosabb a referenciától mért átlagos eltérés értéke, amely még pontosabb képet ad, ha az eltérések abszolút értékének átlagát vesszük. Ez a mérőszám megmutatja az előállított domborzatmodell átlagos abszolút hibáját.

Az átlagos hiba mellett a kiugró hibákkal a megbízhatóság is jellemezhető, így szintén egy fontos mérőszám a pozitív és negatív irányú legnagyobb eltérés. A kiugró hibák gyakoriságának kérdésére pedig a kvantilis intervallumok kiterjedése ad választ. Az alábbi alfejezetekben így a fent felsorolt három mérőszám-csoportot elemzem részletesen, az összes mérőszámra vonatkozó abszolút hatásértékek megtalálhatók az 1. mellékletben. A legjobb átlagos eltérést hozó kombinációk statisztikai jellemzőit a 8. táblázat mutatja be, míg az abszolút eltérések eloszlását a 28. ábra szemlélteti vizuálisan.

8. táblázat: A legpontosabbnak ítélt domborzatmodellek statisztikai mutatói mintaterületenként

Mérőszám	SOP 126/E	SOP 128/C	SOP 152/A	CSDO 1/D
min	-0,398	-0,358	-0,411	-0,302
med	-0,051	-0,013	-0,046	-0,017
max	0,252	0,354	0,213	0,248
CI_005	-0,212	-0,193	-0,231	-0,203
CI_025	-0,154	-0,133	-0,165	-0,144
CI_050	-0,135	-0,109	-0,133	-0,115
CI_950	0,013	0,105	0,017	0,097
CI_975	0,027	0,138	0,036	0,139
CI_995	0,065	0,198	0,093	0,191
CR_90	0,148	0,214	0,150	0,212
CR_95	0,181	0,271	0,201	0,283
CR_99	0,277	0,391	0,324	0,394
abs_avg	0,060	0,049	0,055	0,050
abs_stdev	0,043	0,043	0,042	0,043
abs_90	0,116	0,107	0,106	0,108
abs_95	0,135	0,135	0,134	0,142
abs_99	0,182	0,195	0,203	0,195
abs_max	0,398	0,358	0,411	0,302



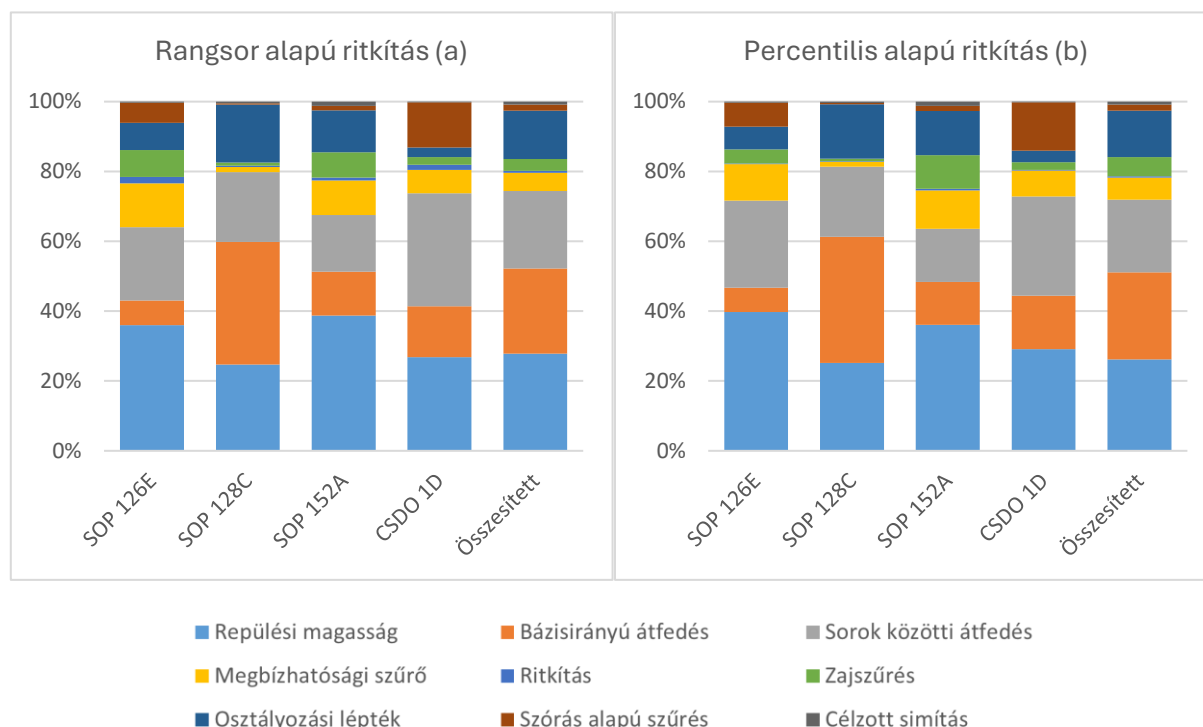
28. ábra: A legjobbnak ítélt modellek eltérésképe

4.1.2.1. Eltérések abszolút értékének átlaga

Az eltérések abszolút átlagát, mivel ez a legfontosabb mérőszám, mintaterületek szintjén, illetve összesítve is bemutatom. A 29a. ábra a rangsor alapú, míg a 29b. ábra a percentilis alapú ritkítás után létrehozott domborzatmodellek esetében prezentálja az egyes repülési és feldolgozási paraméterek relatív hatását a SHAP elemzés szerint. Mindkét esetben a repülési magasság, a bázisirányú és a sorok közötti átfedés mutatja a legnagyobb befolyásoló hatást, ami jól tükrözi ezen paraméterek alapvető szerepét. Szintén általánosan jelentős szerepe van az osztályozási léptéknek. Előbbieknél megfigyelhető a mintaterületenkénti változatosság, együtt kezelve őket azonban viszonylag kiegyenlítődik a szerepük. Ennél a paraméternél az általam fejlesztett módszerek közül sem a szórás alapú szűrés, sem pedig a célzott simítás nem mutat általánosságban nagy jelentőséget, előbbi a csákánydoroszlói mintaterületen mondható észrevehető hatásúnak. A mintaterületek közötti változások jól mutatják, hogy a terepviszonyok, a faállomány szerkezete, illetve a felvételezés során tapasztalt fényviszonyok jelentős hatással vannak az egyes feldolgozási lépések szükségességére, illetve paramétereinek megválasztására.

A 9. táblázat az egyes repülési paraméterek átlagos eltérésre gyakorolt hatásait mutatja be. Mivel minél kisebb az eltérés, annál pontosabb az előállított domborzatmodell, így a táblázatban feltüntetett negatív értékek tekintendők a pontosság növekedésére, azaz az átlagos eltérés csökkenésére irányuló hatásnak. A repülési magasság esetén a 100 méter mutatja a legjobb értéket összességében, ettől csak a Sopron 126/E erdőrészletben fekvő mintaterület tér el jelentősen, aminek valószínűsíthető oka, hogy a 120 méteren végzett repüléskor még egységes fényviszonyok voltak jellemzők, míg a 100 és 80 méter magasból történt felvételezés közben már váltakozott a szórt fény és a közvetlenül megvilágított állapot. Bázisirányú átfedés tekintetében érdekes módon a 80% adta a legjobb eredményt, rációfolva arra az általános feltételezésre, hogy a minél nagyobb átfedés (és ezzel együtt a minél nagyobb képszám) pontosabb végeredményt szolgáltat. A sorok közötti átfedés esetén ez már nem figyelhető meg,

a három lehetséges paraméter közül egyértelműen a 90% a legalkalmasabb, a másik kettő már az átlagnál rosszabb pontosságot eredményez.



29. ábra: SHAP szerinti relatív fontosság az eltérések abszolút értékének átlaga esetén

9. táblázat: Repülési paraméterek hatása az eltérések abszolút értékének átlagára

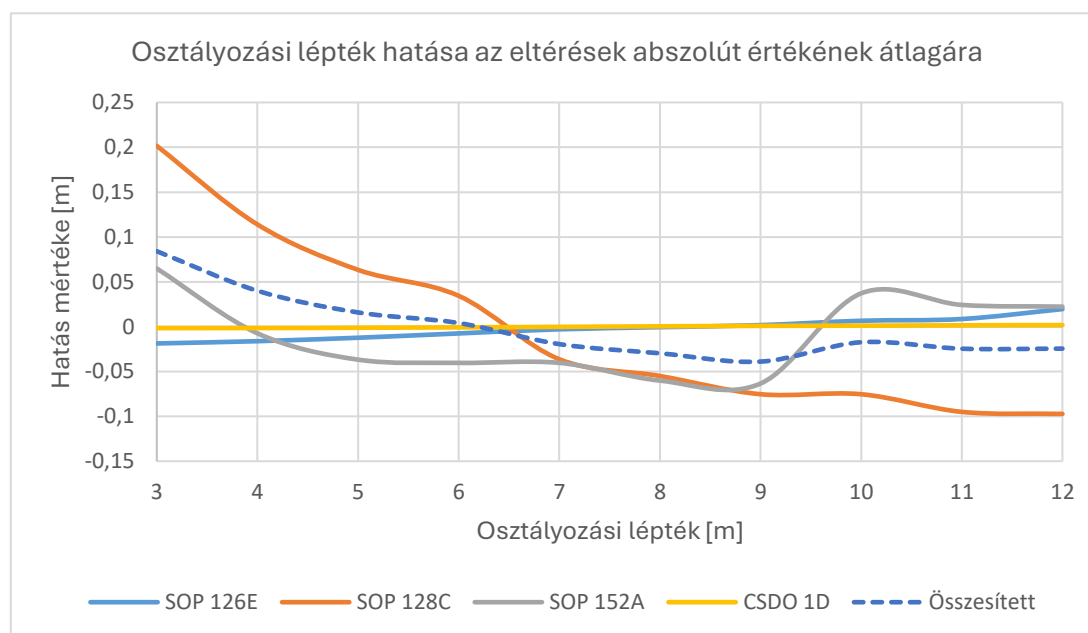
Mintaterület	Repülési magasság [m]			Bázisirányú átfedés [%]			Sorok közti átfedés [%]		
	120	100	80	90	80	70	90	80	70
SOP 126/E	-0,057	0,041	0,073	0,006	-0,014	-0,011	-0,037	0,017	0,046
SOP 128/C	0,199	-0,081	-0,120	-0,152	-0,142	0,282	-0,132	-0,025	0,158
SOP 152/A	0,240	-0,210	0,032	-0,012	0,029	-0,035	-0,033	0,069	0,042
CSDO 1/D	0,013	-0,003	-0,007	0,000	-0,003	0,007	-0,003	-0,010	0,021
Összesített	0,093	-0,061	-0,050	-0,034	-0,062	0,114	-0,060	0,003	0,082

A fent ismertetett eredmények viszont csak az egyes paraméterek önálló hatását képesek szemléltetni, ezért a 10. táblázat azok kombinációinak hatását mutatja be az összesített adathalmazra. 120 méter esetén az átlagnál enyhén jobb eredményt a 90 és 80%-os bázisirányú, a 90%-os sorok közötti átfedés, illetve érdekes módon a 80-70%-os kombináció hoz, 100 méternél viszont a 70-70%-os kombináció kivételével mindenhol jobb értéket kapunk, és ugyan árnyalatnyival, de a 70-90% és a 80-80% bizonyul a legjobb kombinációnak. Szintén érdekes, hogy 80 méternél a legnagyobb képszám (tehát a legnagyobb átfedések kombinációja) az átlagnál rosszabb várható értéket jelez előre, illetve itt is a 80-80%-os kombináció adja a legjobb eredményt.

10. táblázat: A három repülési paraméter együttes hatásai az eltérések abszolút értékének átlagára²

h_0		120 m			100 m			80 m		
b.i.	s.k.	90%	80%	70%	90%	80%	70%	90%	80%	70%
90%		-0,024	0,000	0,018	-0,031	-0,030	-0,017	0,011	-0,022	-0,004
80%		-0,017	0,058	-0,011	-0,037	-0,039	-0,035	-0,036	-0,040	-0,036
70%		0,016	0,118	0,264	-0,039	-0,020	0,127	-0,035	-0,019	0,015

A három repülési paraméter mellett a talajpontok osztályozási léptéke vesz részt számottevően a végeredmény alakításában. Mivel itt 10 különböző paramétert vizsgáltam, azok hatásainak mértékét vonaldiagramon ábrázolom (30. ábra). Sopron 126/E és Csákánydoroszló 1/D esetén ezek az értékek közel maradnak a nullához, azaz ebben az esetben a felvehető paraméterértékek nem módosítják számottevően a végeredményt. Annál inkább szembetűnő a változás a másik két terület esetén, Sopron 128/C-nél például a lépték növekedésével csökken az átlagos eltérés, azaz egyre pontosabb lesz a domborzatmodell. Sopron 152/A esetén kezdetben szintén megfigyelhető egy csökkenés a lépték növekedésével, azonban annak 9-ről 10-re lépésével egy ugrás figyelhető meg a görbén, ahonnan kezdve már nagyobb eltérések várhatók. Összesítve a négy területet az látható, hogy a 9 méteres lépték hozza a legjobb eredményt.



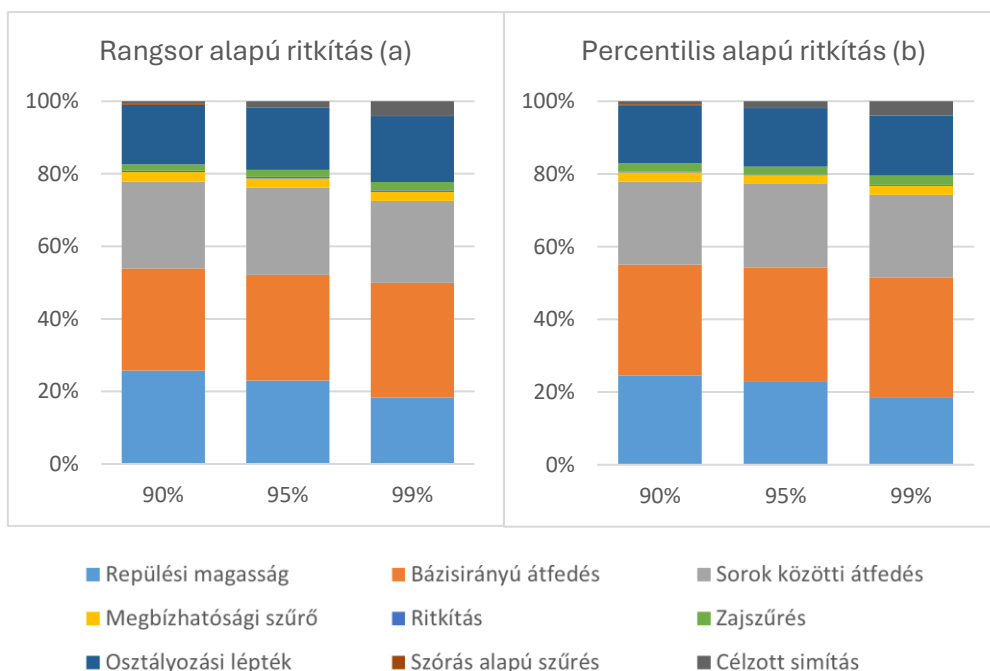
30. ábra: Osztályozási lépték hatása az eltérések abszolút értékének átlagára

4.1.2.2. Kvantilis intervallumok kiterjedése

A kvantilis intervallumok határai, illetve az azokból számított terjedelmek mintegy konfidenciaintervallumként jellemzik egyrészt, hogy mennyire egységesek a pixelek eltéréserértékei, másrészt pedig a kiugró hibák gyakoriságát. A 31. ábra bemutatja az egyes összetevők a három (90, 95, illetve 99%) kvantilis intervallum kiterjedésére gyakorolt hatásait a SHAP alapú elemzés szerint a teljes adatsor tekintetében. A három repülési paraméter

² h_0 – repülési magasság; b.i. – bázisirányú átfedés; s.k. – sorok közötti átfedés

összesítve több, mint 70%-os fontosságot tud felmutatni, emellett az osztályozási lépték mutat csak 10% feletti értéket. Ezeknél a mérőszámoknál már előbukkan a célzott simítás is, egyre növekvő mértékű hatást mutatva a kvantilis intervallum nagyságának növekedésével párhuzamosan.



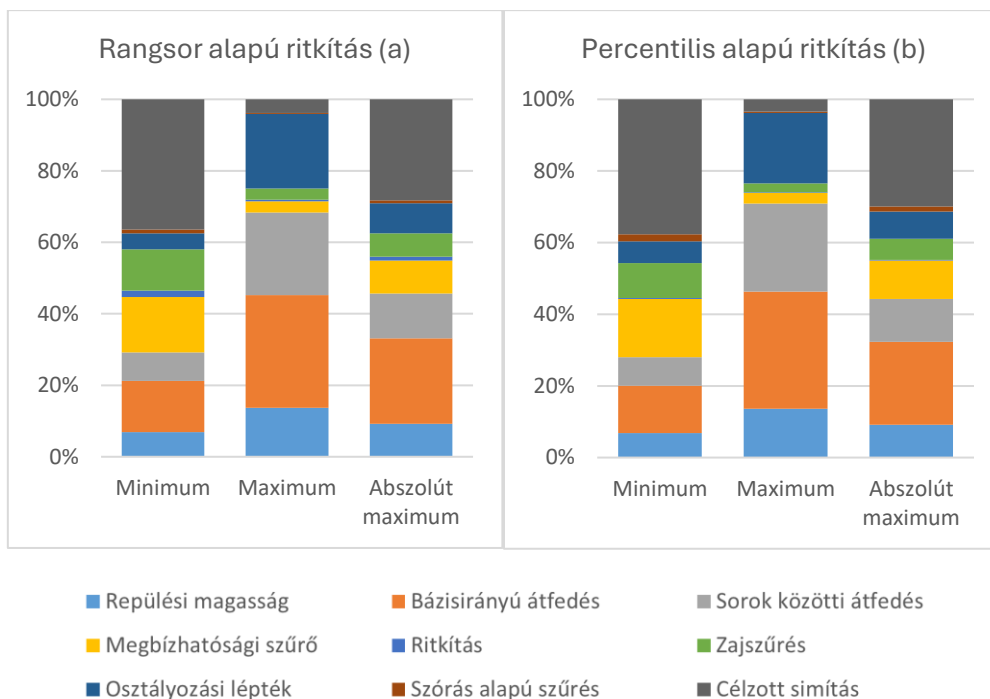
31. ábra: SHAP szerinti relatív fontosság a 90, 95 és 99%-os kvantilis intervallum esetén

4.1.2.3. Minimum, maximum, illetve abszolút maximum eltérések

A kiugró hibák és a SHAP elemzés kombinációja esetén a repülési paraméterek, illetve az osztályozási lépték ugyan nem szorulnak a háttérbe, azonban a megbízhatósági szűrő is valamivel jelentősebb hatást mutat az eddig tapasztaltakhoz viszonyítva, akárcsak a zajszűrés is (32. ábra). Mivel mindkettő a pontfelhőzajt hivatott kiszűzni, ez nem okoz meglepetést, azonban még ezeknél is nagyobb hatással van a végeredményre a célzott simítás, amely már nem a pontfelhőn, hanem az elkészült raszteren végez egyfajta zajszűrést. A módszer két paraméterrel való alkalmazásának, illetve mellőzésének hatását a 11. táblázat szemlélteti.

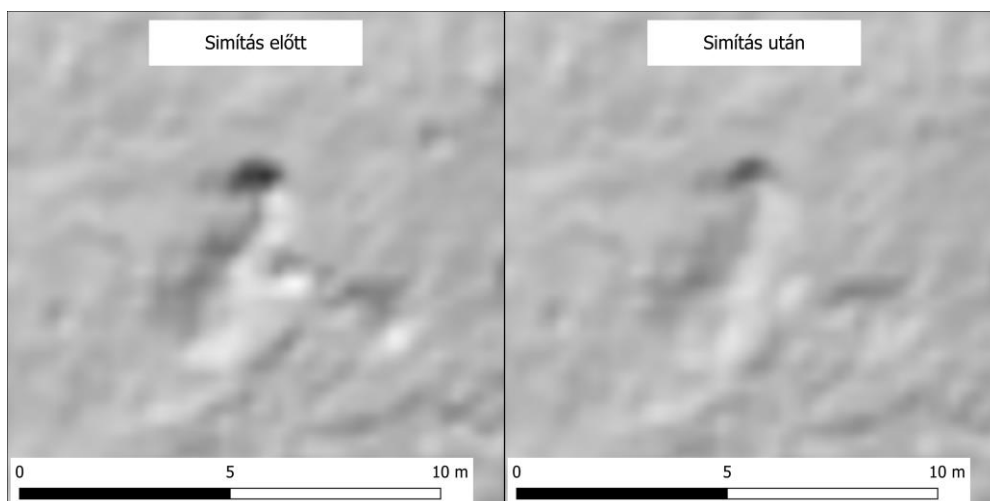
11. táblázat: Célzott simítás hatása a minimum, maximum eltérésekre, valamint azok abszolút értékére

Mérőszám	Célzott simítás nélkül	Célzott simítással	
		Lejtés határértéke [%]	
		40	60
Minimum	-3,153	1,607	1,529
Maximum	0,226	-0,117	-0,080
Abszolút maximum	2,996	-1,562	-1,466



32. ábra: SHAP szerinti relatív fontosság a minimum, maximum eltérések, valamint azok abszolút értékének esetén

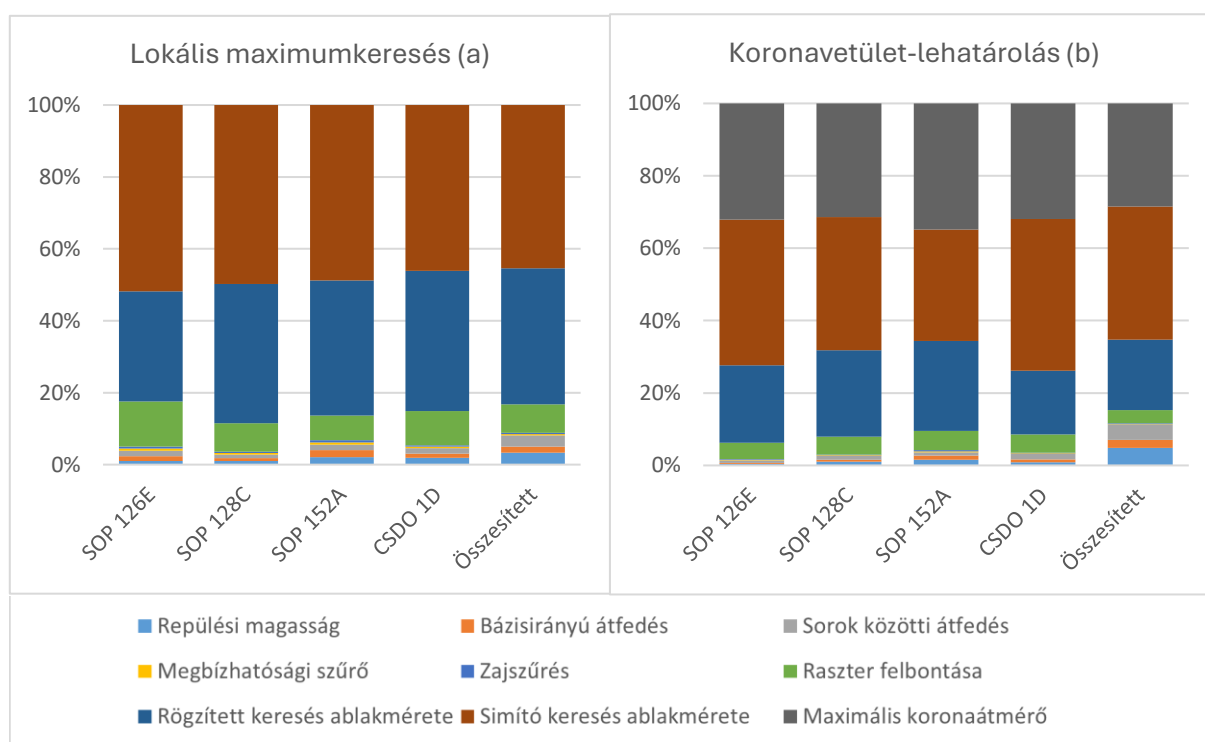
A minimumeltérések esetén jelentős, méter fölötti mértékű hibamérséklő hatás figyelhető meg, ez azt irányozza előre, hogy a módszer hatékonyan képes az egyéb zajszűrő módszerek által bent hagyott, talajszint alatti pontfelhőzajt immár raszteres formában kiszűrni. A módszer alkalmazása még a maximumeltérések tekintetében is javulást eredményez. Az eltérések abszolút értékeinek maximuma esetén a hatásmértéket leginkább a minimumok abszolút értékei képviselik. A két különböző lejtési határérték között is megfigyelhető kisebb eltérés, jellemzően a 40%-os mérték produkál jobb eredményeket. Az eljárást eredményét domborzatárnyékoláson keresztül szemlélteti a 33. ábra.



33. ábra: Célzott simítás szemléltetése

4.1.3. Koronák azonosítása

A lombos állapotban végzett repülésekből előállított és normalizált borított felszínmodelleken végzett koronacsúcs-azonosítás, majd pedig koronavetület-lehatárolás esetén tapasztalt, a detektálási pontszámra gyakorolt hatások relatív fontosságát a 34. ábra mutatja be. Az eredmények alapján a feldolgozási paraméterek domináns szerepet játszanak: különösen a keresési ablakméretek és a maximális koronaátmérő (mindhárom 20% felett) befolyásolja az egyedazonosítás sikerességét. Ezzel szemben a repülési paraméterek hatása általában kisebb, ugyanakkor a sorok közötti átfedés nem tekinthető elhanyagolhatónak (5%), míg a bázisirányú átfedés (2%) már mérsékeltbb jelentőségű. A zajszűrési eljárások és a megbízhatósági szűrő hatása gyakorlatilag elenyésző ($\approx 0,1\%$). Az abszolút értékek is megerősítik, hogy az egyedazonosítás pontosságát elsősorban a feldolgozási beállítások határozzák meg.



34. ábra: SHAP szerinti relatív fontosság a detektálási pontszám esetén

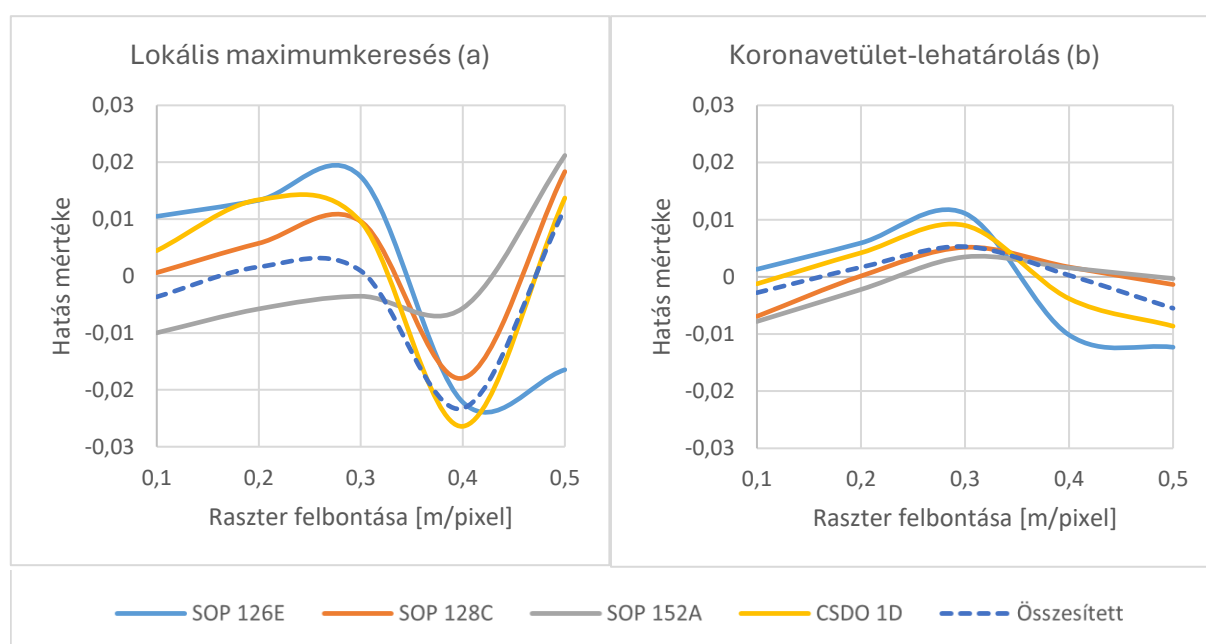
12. táblázat: A lokális maximumkeresés és a koronavetület-lehatárolás detektálási arányszámai³

Mérőszám	SOP 126/E		SOP 128/C		SOP 152/A		CSDO 1/D	
	Max.	K-vet.	Max.	K-vet.	Max.	K-vet.	Max.	K-vet.
Talált	67,8%	79,8%	80,2%	71,5%	76,7%	77,0%	78,7%	81,7%
Pontos	53,4%	61,9%	55,2%	57,9%	55,9%	59,8%	58,1%	64,2%
Kihagyott	32,2%	20,2%	19,8%	28,5%	23,3%	23,0%	21,3%	18,3%
Többlet	16,1%	24,9%	33,2%	21,2%	27,2%	24,5%	24,1%	21,8%
Összes	83,9%	86,8%	113,3%	79,1%	103,9%	84,3%	102,8%	86,0%
Pontszám	0,364	0,483	0,412	0,398	0,411	0,447	0,457	0,529

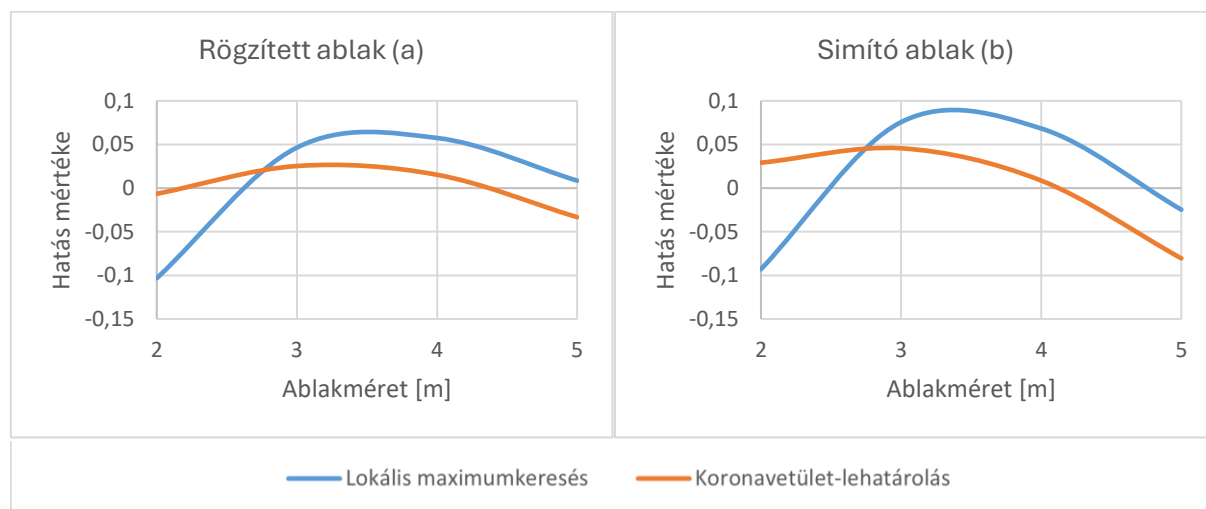
³ Max. – Lokális maximumkeresés; K-vet. – Koronavetület-lehatárolás

A detektálási hatásokat valamiképp árnyalja, hogy a koronacsúcs-azonosítás esetén tapasztalt legnagyobb detektálási pontszám relatíve alacsonynak tűnik, a teljes adatsort tekintve 0,45, míg a koronavetület-lehatárolással kiegészítve ez a szám 0,53-ra növekszik. A legnagyobb detektálási pontszámokat eredményező kombinációk találati arányszámait a 12. táblázat mutatja be.

Mivel az abszolút hatásmérték a detektálási pontszám tekintetében lett meghatározva, a pozitív előjelű értékek jelentik a kedvező értékeket, mivel az a pontszám átlaghoz viszonyított növekedését jelenti. Tekintve a felbontás hatását, megfigyelhető, hogy ugyan csak 1-2 század értékben, de kiugróan negatívan befolyásolja a 0,4 m/pixel felbontás a kizárólag lokális maximumkeresésen alapuló detektálási pontszámot, a többi vizsgált felbontás növekedésével növekvő pontosság tapasztalható. A koronavetület-lehatárolással kiegészített feldolgozási sor esetén ezek a hatásmértékek valamivel csökkennek, ugyanakkor az imént említett kiugrás sem tapasztalható, a görbe csúcsa, ezzel együtt pedig a legjobb eredményt adó felbontás 0,3 m/pixelnél figyelhető meg (35. ábra).



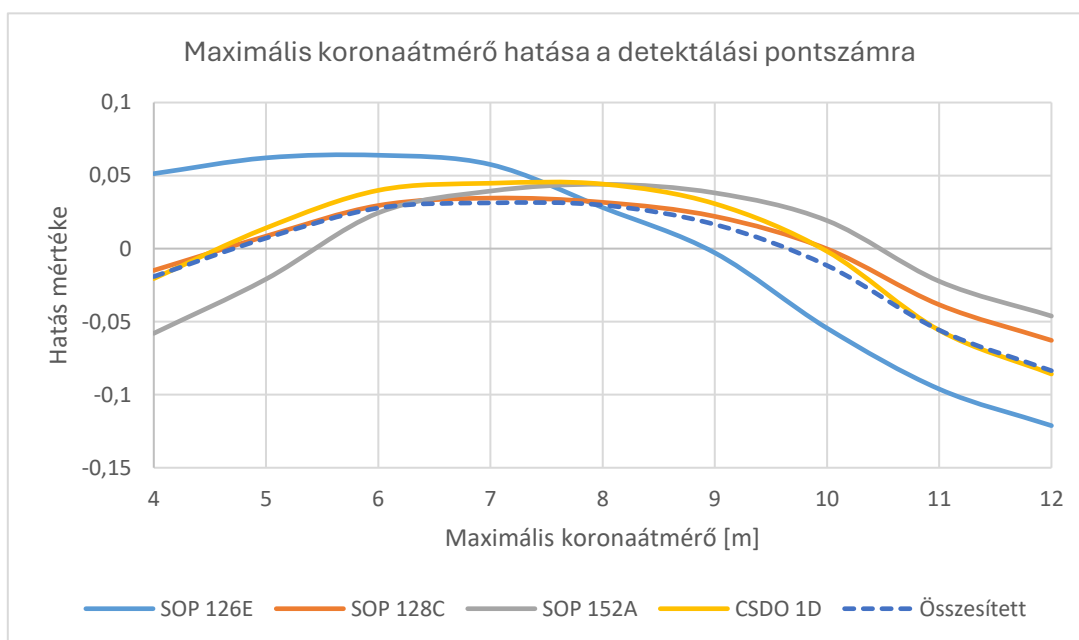
35. ábra: Famagasságmodell felbontásának hatása a detektálási pontszámra



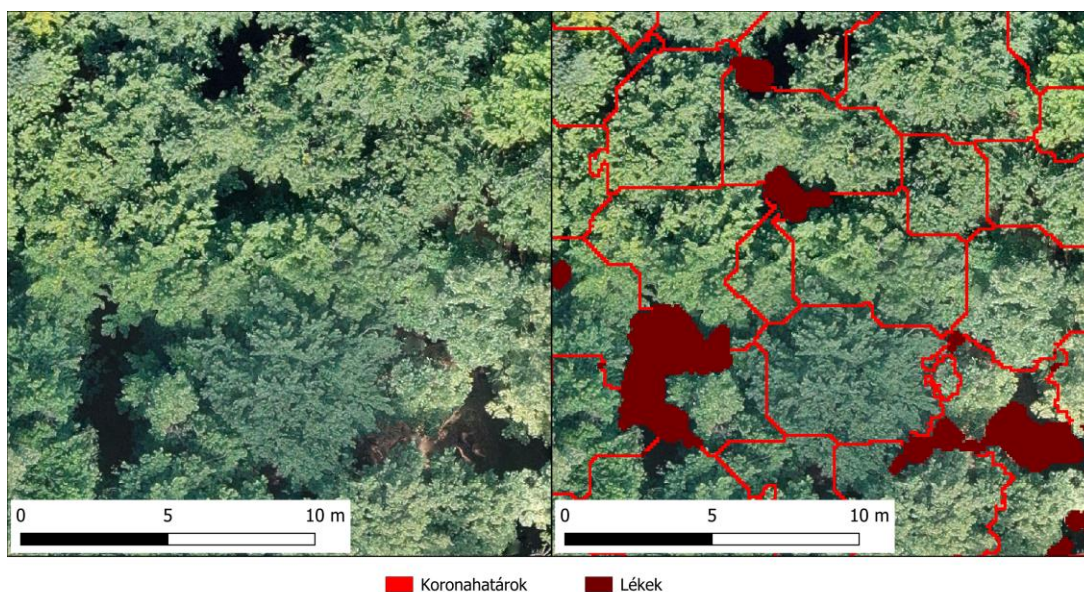
36. ábra: Rögzített és simító ablakméret hatása a detektálási pontszámra

A teljes adatsor tekintetében vizsgálva a maximumkeresés rögzített, illetve simított ablakméretének hatásait, megállapítható, hogy a koronacsúcsok azonosítása esetén mindkét ablakméret 3 és 4 méter esetén eredményez pontosabb detektálást (ezen két érték hatása közel ugyanaz). Kiegészítve az inverz vízgyűjtő eljárással, ez némiképp változik, a hatásgörbe mindkét esetben 3 méternél kulminál, ezután a rögzített ablakméret utáni növekedése enyhébb, a simítóé pedig valamivel jelentősebb csökkenést mutat (36. ábra).

A koronavetület-lehatárolás változó paramétereként megadott maximális koronaátmérő mértékének hatását a detektálási pontszámra a 37. ábra szemlélteti, ahol összességében 4-től 6 méterig növekedés, innen 9-ig viszonylagos stagnálás, ezután pedig csökkenés figyelhető meg. A többitől valamivel eltér a Sopron 126/E erdőrészletben elhelyezkedő mintaterület, mivel itt 4-7 méter között figyelhető meg a görbecsúcs, és ezután indul meg a csökkenés. Ez egyértelműen annak tulajdonítható, hogy itt a legnagyobb a törzsszám a vizsgált területek közül.



37. ábra: Maximális koronaátmérő hatása a detektálási pontszámra

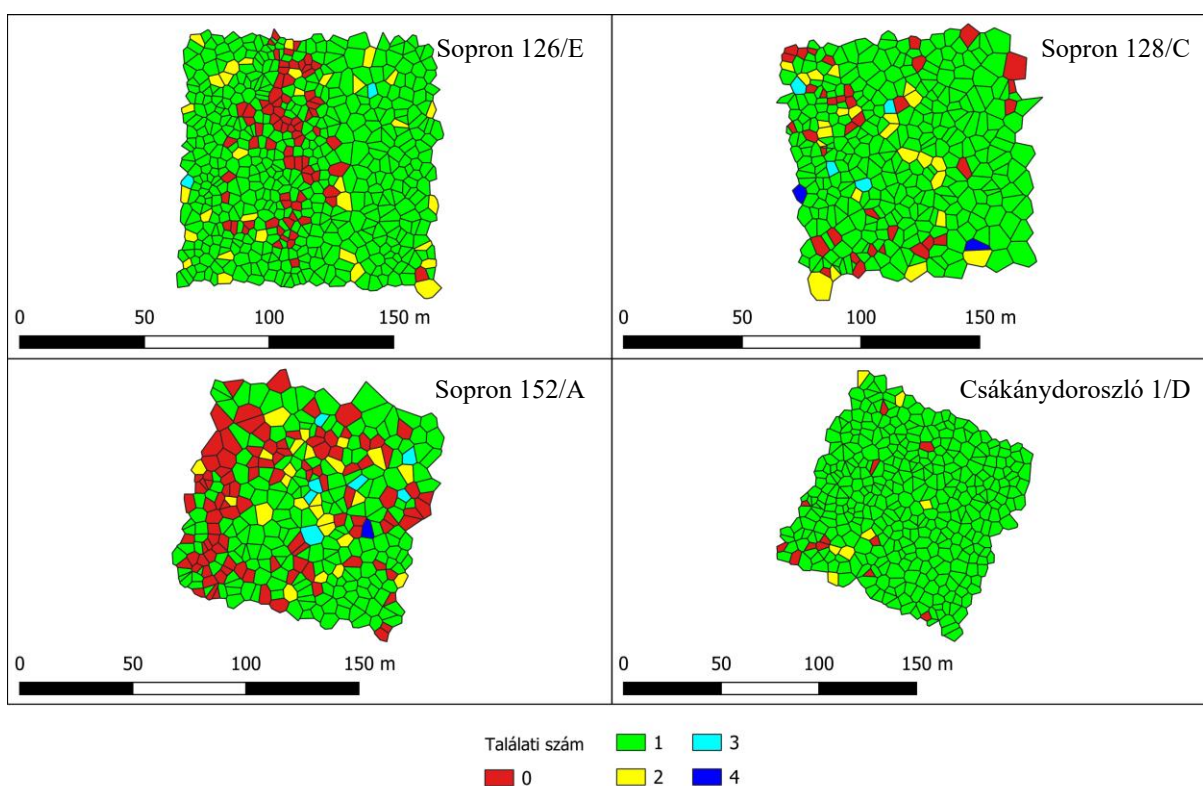


38. ábra: Koronavetületek lehatárolásának szemléltetése

A koronavetületek lehatárolását szemlélteti egy példán keresztül a 38. ábra. Ezen látható, hogy az eljárás azonosítja a koronák közötti határokat, valamint külön jelöli azokat a pixeleket, amelyek túl alacsonyan helyezkednek el a koronacsúcsokhoz viszonyítva, így azokat lékeként tartja nyilván. Ezáltal biztosított, hogy a koronavetületek kiterjedésének számításakor ezek nem kerülnek figyelembevételre. Ezen a példán szintén látható, hogy mivel a koronák közötti határok gyakran elmosódnak azok egymásba lógása miatt, a tökéletes határegyeztetés szinte lehetetlen, de a megközelítések is jó eredményeket szolgáltathatnak az állományviszonyokról.

4.1.4. Törzspozíciók detektálása

A mintaterületenkénti 12 paraméterkombináció közül a legjobb detektálási pontszámot eredményezők a 13. táblázatban kerültek felsorolásra, míg a Voronoi-poligonokra eső detektálási számokat a 39. ábra szemlélteti. A legjobb detektálási pontszámot a csákánydoroszlói mintaterület adta, nagyjából hasonló mértékűt eredményezett két soproni, míg a harmadik ezekről jelentősen lemaradt.



39. ábra: A faegyedek Voronoi-poligonjaira eső találati számok

13. táblázat: A legjobb detektálási pontszámot adó kombinációk mintaterületenként

Mintaterület	Repülési magasság	Megbízhatósági szűrő	Csoportok min. elemszáma	Detektálási pontszám
SOP 126/E	120 m	nem	10	0,756
SOP 128/C	80 m	nem	10	0,764
SOP 152/A	100 m	nem	10	0,419
CSDO 1/D	120 m	nem	10	0,945

Megfigyelhető, hogy a megbízhatósági szűrő esetén egyöntetűen annak mellőzése eredményez magasabb pontszámot. Ugyanez tapasztalható a pontszámhatár esetén is, ahol a 10

pont, mint detektálási ponthatár dominál az 50-nel szemben. Számszerűen nézve, a megbízhatósági szűrésen átesett pontfelhő átlagosan 25%-kal kevesebb törzset képes detektálni, cserébe mindössze 3%-kal kevesebb a többletdetektálások száma. Az 50 pontban meghatározott detektálási határnál ezek a számok 10%, illetve 3%.

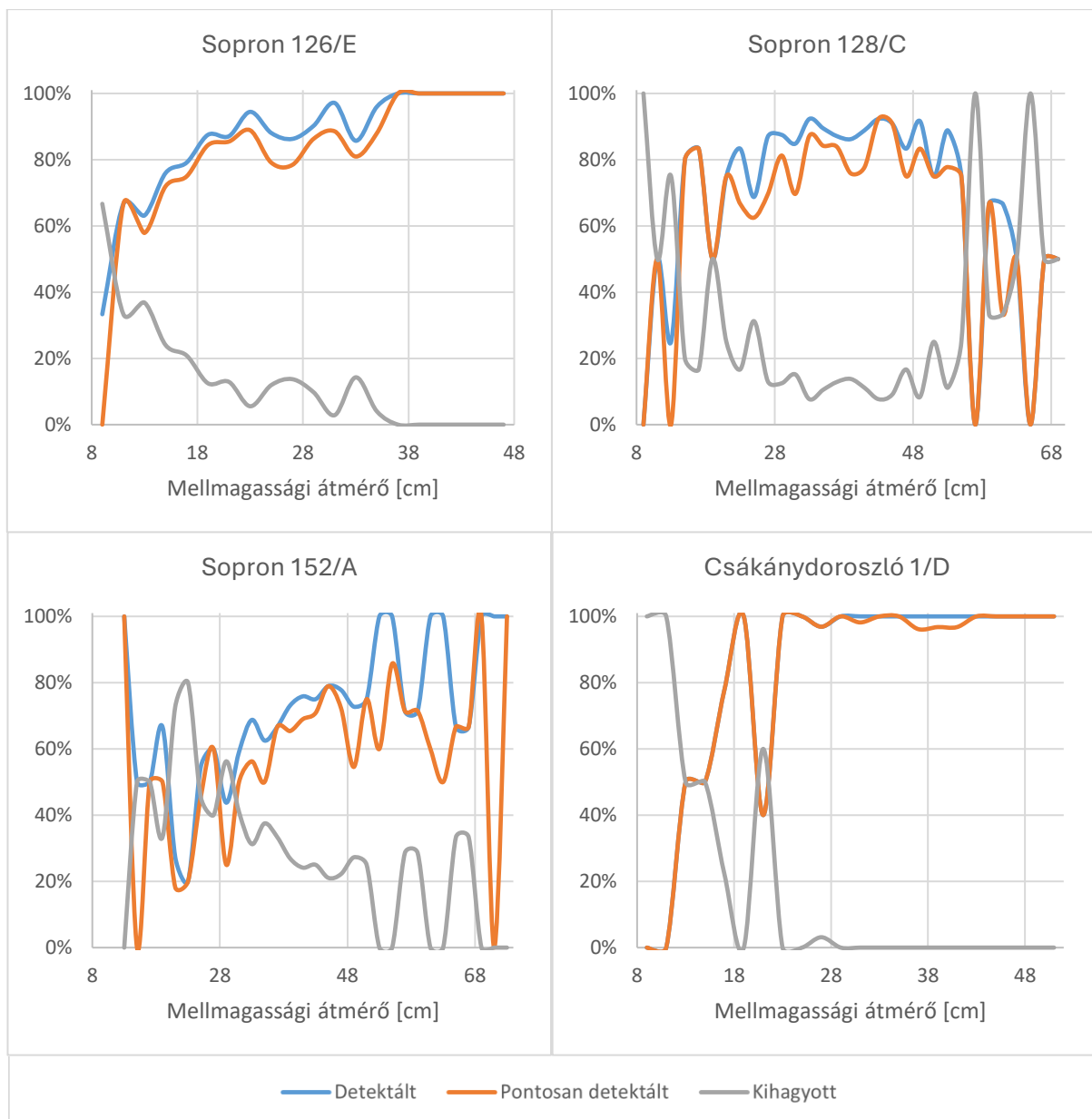
A 14. táblázat bemutatja, hogy a fent ismertetett paraméterkombinációk milyen találati arányokat eredményeztek. A legjobb detektálási pontszámnak megfelelően a csákánydoroszlói mintaterület esetén teljesített a legjobban az eljárás, mindössze 3%-át nem találta meg a faegyedeknek, valamint a több ponttal detektált törzsek aránya is mindössze 1%. A Sopron 128/C erdőrészletben elhelyezkedő mintaterületen a törzsek 90%-a volt felismerhető, azonban ezek közül viszonylag sok többletdetektálás is megfigyelhető volt. Ugyan kisebb detektálási, viszont közel ugyanolyan pontos találati arányt mutathat fel a Sopron 126/E erdőrészletben kijelölt mintaterület, a sort pedig Sopron 152/A zárja igencsak alacsony, 68%-os találati aránnyal.

14. táblázat: Törzsdetektálás találati arányai mintaterületenként

Mintaterület	Detektált	Pontosan detektált	Kihagyott	Többlet-detektálás	Összes detektálás
SOP 126/E	87,4%	82,1%	12,6%	5,6%	92,9%
SOP 128/C	90,2%	82,3%	9,8%	10,1%	100,3%
SOP 152/A	68,3%	58,9%	31,7%	11,8%	80,2%
CSDO 1/D	97,0%	96,0%	3,0%	1,0%	98,0%

A 40. ábra vonaldiagram segítségével szemlélteti, hogy a detektálást, a pontos detektálást, valamint a kihagyott törzsek arányait mennyiben befolyásolja a faegyedek mellmagassági átmérője, 2 cm-es kategóriákba sorolva. A Sopron 126/E és Csákánydoroszló 1/D erdőrészletek mintaterületei esetén egyértelmű detektálási aránynövekedés figyelhető meg a mellmagassági átmérő növekedésével egyetemben, előbbi esetén 18 cm felett 80%-os, 38 cm felett pedig egyértelmű 100%-os, utóbbinál pedig már 24 cm után 95% feletti találati aránnyal. Valamivel hektikusabb, de összességében véve növekvő tendenciát mutat a Sopron 152/A erdőrészletben elhelyezkedő mintaterület is, a Sopron 128/C esetén azonban érdekes módon az átmérő 48 cm feletti növekedésével a detektálási arány csökkenése tapasztalható.

Az egyes törzsek azonosíthatóságára (azaz megfelelő számú ponttal való megjelenésére a pontfelhőben) hatással lehet a megvilágítás, a törzsek színe, valamint a takarás mértéke, amit a törzsszám és a koronasűrűség befolyásol. A megvilágítás alapvetően nehezen számszerűsíthető, az eddigi tapasztalatok alapján egyértelműen a szórt fény a legkedvezőbb, ez minden felvételezés során adott volt. A koronasűrűség mértékére jó közelítést adhat a pontsűrűség. A Voronoi-poligonokon belüli (tehát a faegyedek fölötti), 120 méteres repülési magasságból készült felvételekből előállított, 5 méter fölötti relatív magasságú pontok bevonásával mért átlagos pontsűrűséget a detektált és kihagyott törzsekre bontva a 15. táblázat szemlélteti. A Sopron 152/A erdőrészletben kijelölt mintaterület esetén ez az összehasonlítás magyarázatot jelenthetne a törzsek takarására (a kihagyott törzsek fölött közel 30%-kal nagyobb a pontsűrűség), viszont a másik három mintaterület esetén tapasztalt értékek ezt a megfigyelést több szempontból is megcáfolják. Egyrészt Sopron 126/E és Csákánydoroszló 1/D esetén érdekes módon a sikeresen detektált törzsek fölött nagyobb a pontsűrűség, mint a kihagyott esetében, másrészt Sopron 128/C esetén a detektált törzsekhez tartozó érték több, mint kétszerese a Sopron 152/A kihagyott törzseinél tapasztaltaknak. Megjegyzendő, hogy a Sopron 128/C erdőrészletben elhelyezkedő mintaterület esetén a kiugró pontsűrűség annak köszönhető, hogy itt a legnagyobb az örökzöld faegyedek aránya.



40. ábra: Detektált és kihagyott törzsek aránya a mellmagassági átmérő függvényében, 2 cm-es élességgel

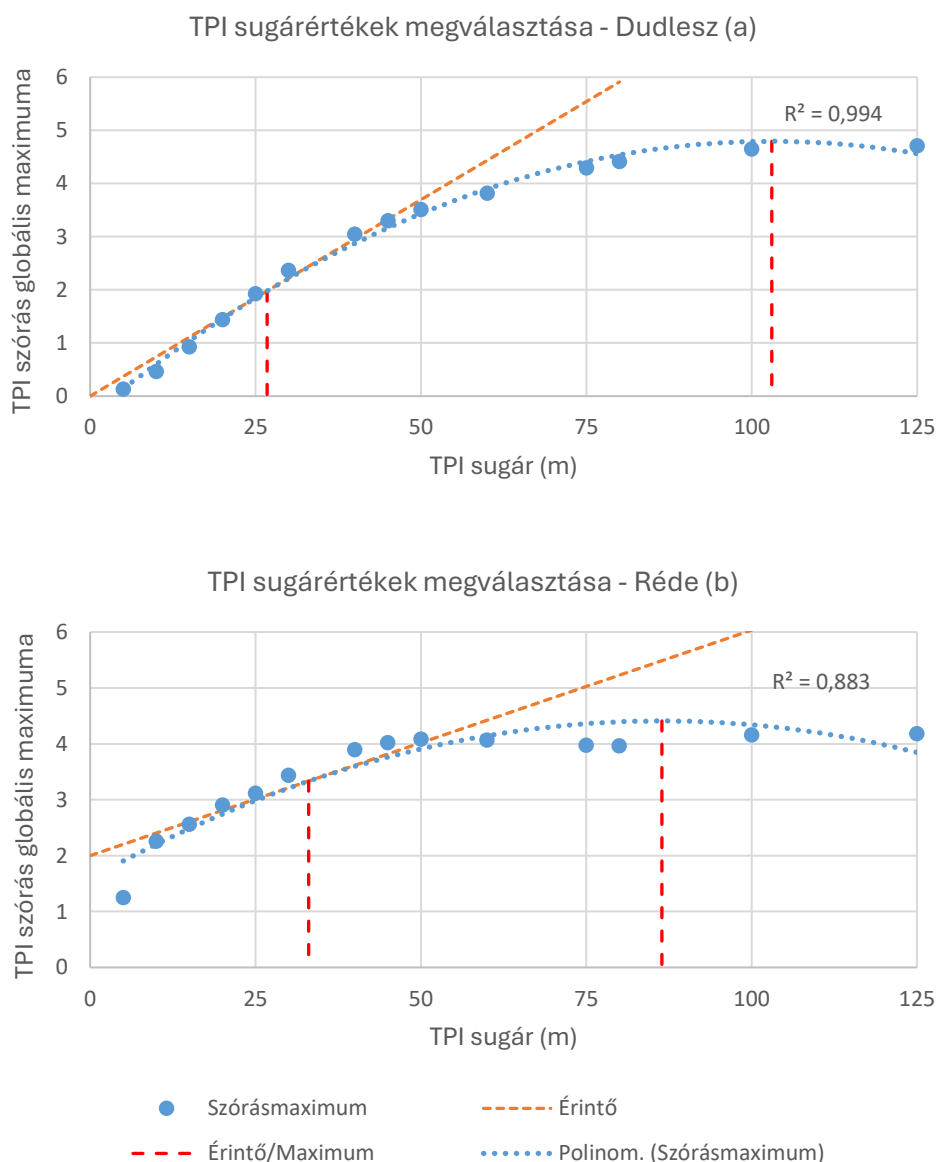
15. táblázat: Detektált és kihagyott faegyedek fölötti átlagos pontsűrűség (pont/m²)

Mintaterület	Detektált	Kihagyott
SOP 126/E	201	98
SOP 128/C	1403	1645
SOP 152/A	468	605
CSDO 1/D	286	236

4.2. Domborzatmodellek elemzése, összehasonlítás az adattári adatokkal

4.2.1. TPI-sugarak megválasztása

A két vizsgálati terület eltérő jellege vizuálisan is megállapítható, így várható volt, hogy a TPI sugarak megválasztására kidolgozott eljárás is különböző értékeket fog adni. A Dudlesz-erdő esetén a kevésbé markáns domborzat alacsonyabb globális maximumokat eredményezett a TPI szórásrasztereken, így az ezekre illesztett másodfokú polinomiális trendgörbe rendelkezik olyan érintővel, amely átmegy az origón. A görbe maximuma 103,03 méternél található, míg az említett érintő 26,75 méternél érinti a görbét (41a. ábra). A rédei erdőtömb szabdaltabb és változatosabb domborzatának köszönhetően az alacsonyabb sugárértékű TPI raszterek szórásmaximumai magasabbak, így az origón is áthaladó érintője nincs a trendgörbének, ezért az y-tengely magasabb egész értékeihez tartozó érintőket vizsgálva végül a (0;2) ponton áthaladó határozza meg a kisebbik TPI sugarat. Így tehát a görbe 86,44 méternél kulminál, az említett ponthoz tartozó egyenes pedig 33,04 méternél érinti azt (41b. ábra).

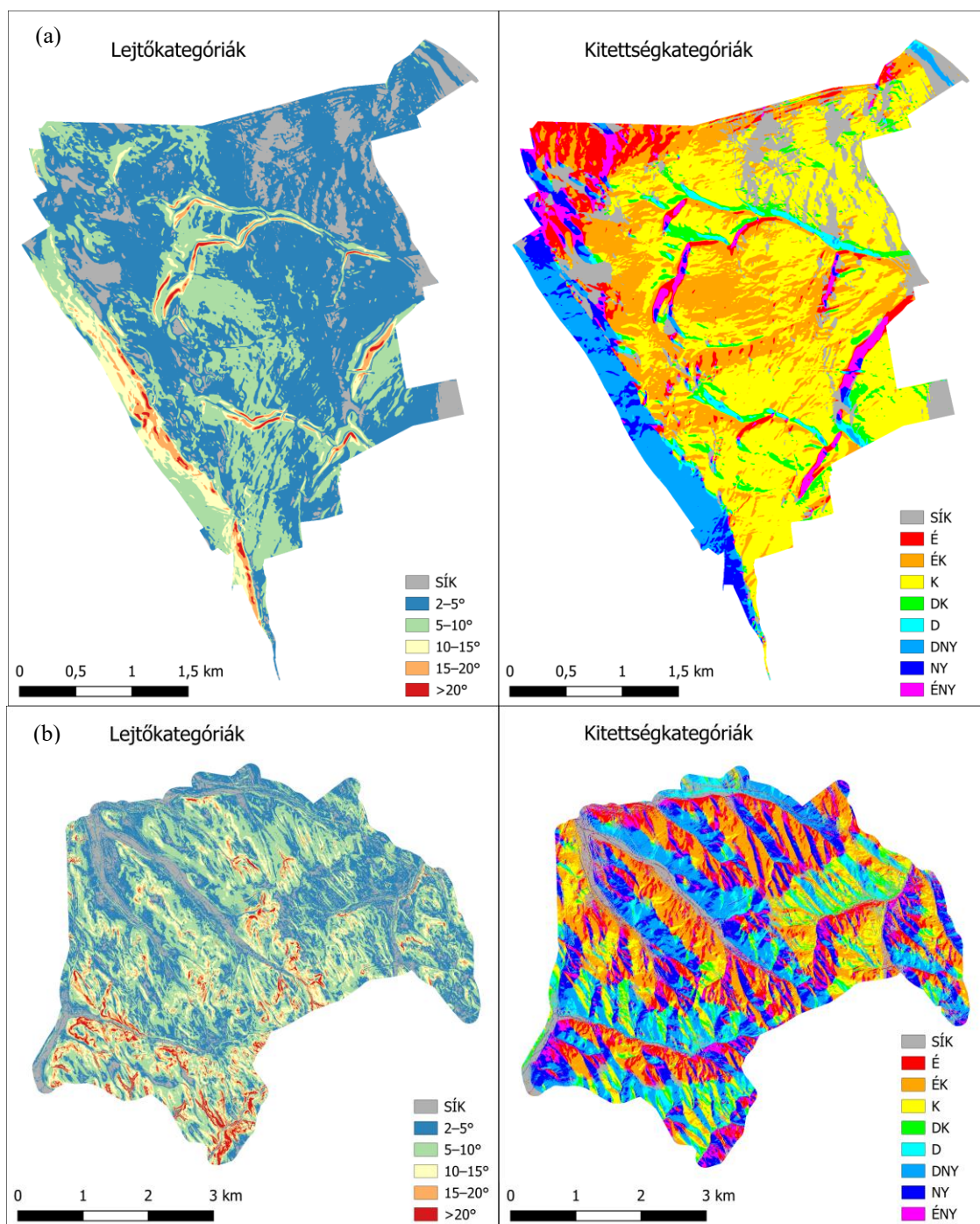


41. ábra: Dudlesz (a) és Réde (b) TPI sugárértékeinek megválasztása

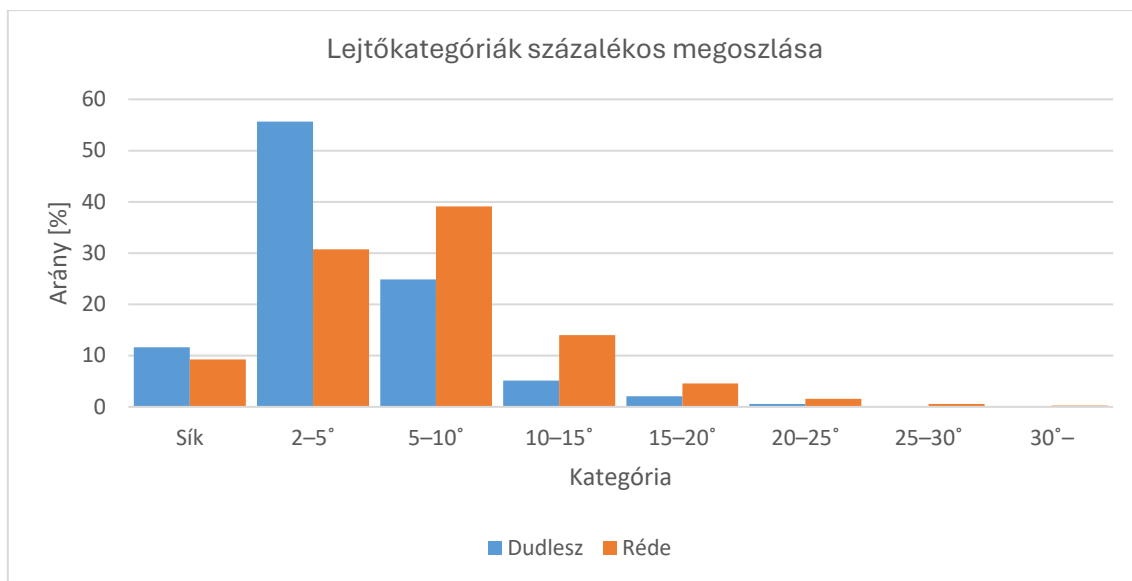
A kapott értékeket a legközelebbi olyan számokra kerekítettem, amelyekre már el lett készítve a TPI-raszter, így a dudlesz-erdei mintaterület két TPI-sugara 25 és 100 méter, míg a rédei esetén 30 és 80 méter.

4.2.2. Levezetett tematikák területi megoszlása

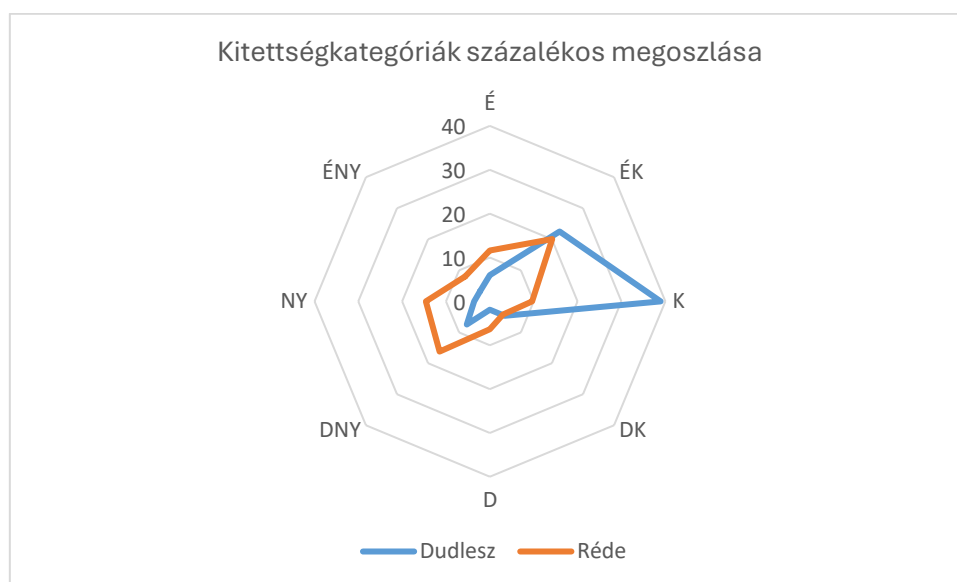
A két vizsgálati mintaterület lejtő- illetve kitettségkategóriáit a 42. ábra mutatja be. A lejtések területi megoszlását a 43. ábra, a kitettségeket pedig a 44. ábra szemlélteti.



42. ábra: Lejtő- és kitettségkategóriák a Dudlesz-erdőben (a) és a rédei mintaterületen (b)



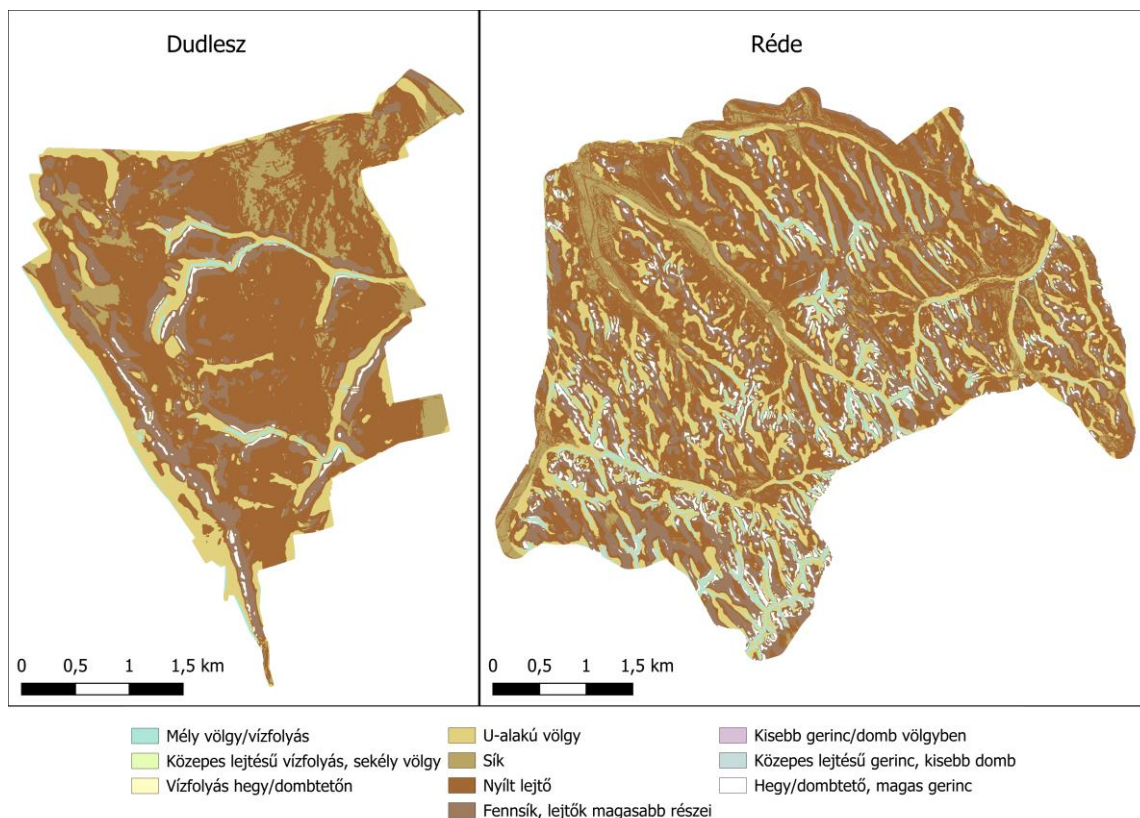
43. ábra: Lejtőkategóriák százalékos megoszlása



44. ábra: Kitettségkategóriák százalékos megoszlása

A fenti ábrákon számszerűsítve is látható, hogy a két vizsgálati terület jellegében eltér egymástól. A sík területek részaránya nagyságrendileg megegyezik, azonban míg a Dudlesz esetén a súlypont a 2-5° közötti kategóriára esik, addig Rédén ez eltolódik egy kategóriával feljebb, továbbá az előlotti lejtésértékek is jóval nagyobb arányban képviseltetik magukat. Ez tehát azt mutatja, hogy míg a Dudlesz-erdőben csak a pár völgy esetében beszélhetünk meredekebb lejtőkről, addig a rédei területen, köszönhetően a domborzat szabdaltságának, jóval nagyobb területen oszlanak meg ezek a lejtők, és a meredekségük is jelentősebb. Kitettség tekintetében a Dudleszben leginkább a keleti-északkeleti kategóriák dominálnak, míg Rédén ezek mellett a nyugati-délnyugati lejtők is jelentős részarányt képviselnek.

A két különböző sugárral végzett TPI-vizsgálat eredményeként kapott domborzati alakzatok eloszlását is szemléltetem vizuálisan a 45. ábrán, míg számszerűsítve a 16. táblázatban.



45. ábra: Domborzatformák megoszlása

16. táblázat: Domborzatformák területi megoszlása

Kategória	Dudlesz		Réde	
	Terület [ha]	Arány [%]	Terület [ha]	Arány [%]
Mély völgy/vízfolyás	10,41	0,96	93,91	4,57
Közepes lejtésű vízfolyás, sekély völgy	0,20	0,02	4,41	0,21
Vízfolyás hegy/dombtetőn	0,20	0,02	0,66	0,03
U-alakú völgy	142,81	13,23	415,31	20,22
Sík	101,26	9,38	120,43	5,86
Nyílt lejtő	646,59	59,90	903,09	43,97
Fennsík, lejtők magasabb részei	163,60	15,15	414,99	20,20
Kisebb gerinc/domb völgyben	0,23	0,02	2,02	0,10
Közepes lejtésű gerinc, kisebb domb	1,26	0,12	8,15	0,40
Hegy/dombtető, magas gerinc	12,96	1,20	90,99	4,43
	1079,52	100	2053,96	100

Ezekből az adatokból is könnyen következtetni lehet a rédei terület magasabb szintű változatosságára, mivel nagyobb arányban jelennek meg a „szélsőségesebb” domborzatformák, úgy, mint a mély völgy, illetve a hegy/dombtető, valamint a völgyek aránya is nagyobb, mint a Dudlesz esetében, ahol a nyílt lejtők egyértelmű, abszolút dominanciája figyelhető meg.

4.2.3. Összehasonlítás adattári adatokkal

Az erdőrészletenként kiszámított három statisztikai mérőszám (frekvencia, stabilitás, entrópia) értékei alapján előállított hibamátrixok megmutatják, hogy az egyes kritériumok alapján történő változó kategóriába sorolással mekkora találati arányok érhetők el. A 17. táblázat megmutatja, hogy melyik mérőszám melyik kritériuma eredményezte a legjobb találati arányt.

17. táblázat: A legnagyobb találati arányt eredményező mérőszámok kritériumai

Mérőszám	Lejtés		Kitettség		Domborzatformák	
	Dudlesz	Réde	Dudlesz	Réde	Dudlesz	Réde
Frekvencia	< 0,50	< 0,30	< 0,50	< 0,40	< 0,30	< 0,30
Stabilitás	< 0,15	< 0,10	< 0,25	< 0,15	< 0,10	< 0,10
Entrópia	> 1,50	> 2,50	> 1,75	> 2,25	> 2,00	> 2,25

A 18. táblázat a konkrét találati arányokat mutatja, így a két táblázatot együtt nézve megállapítható, hogy helyenként a frekvencia, máshol pedig az entrópia szerinti változó kategóriába sorolás hozott jobb találatokat, viszont a kritériumok értékei változóak, nem fedezhető fel bennük rendszer. A Dudlesz domborzatformái esetén a két mérőszám egyes kritériumai ugyanazt az eredményt adták. Szintén itt láthatóak a mérőszámonként legnagyobb találatot eredményező kritériumok kombinációjából adódó feltételegyüttesek, melyek a változó kategóriába sorolást, így pedig a teljes kategorizálást voltak hivatottak pontosítani, azonban a várakozásokkal ellentétben ez nem hozott még 0,5 százalékpontos növekedést sem, sőt, bizonyos esetekben még csökkenést is eredményezett.

18. táblázat: Az egyes mérőszámok alapján kapott legmagasabb találati arányok, valamint ezek kombinációja (félkövérrel kiemelve a legmagasabb mindkettő esetén)

Mérőszám/ Kombináció	Lejtés		Kitettség		Domborzatformák	
	Dudlesz	Réde	Dudlesz	Réde	Dudlesz	Réde
Frekvencia	76,8%	44,4%	71,0%	61,6%	52,9%	59,5%
Stabilitás	70,3%	36,6%	64,5%	56,0%	50,3%	53,2%
Entrópia	80,0%	44,0%	78,7%	60,6%	52,9%	59,9%
F & S & E	74,2%	36,3%	71,6%	59,2%	50,3%	53,9%
F S E	76,1%	43,3%	70,3%	56,7%	52,9%	59,2%
(F & S) E	78,1%	44,0%	73,5%	60,9%	52,9%	59,2%
F & (S E)	76,8%	44,7%	72,3%	62,0%	52,9%	59,5%
(F S) & E	78,7%	44,7%	77,4%	62,0%	52,9%	60,2%
F (S & E)	76,8%	44,4%	71,0%	62,0%	52,9%	59,5%
(F & E) S	74,8%	44,7%	70,3%	58,5%	52,9%	59,5%
(F E) & S	72,3%	36,6%	66,5%	59,9%	50,3%	53,2%

A fenti találatokat eredményező hibamátrixok közül a legjobb arányúakat az egyes jellemzőkre és mintaterületekre a 3. melléklet tartalmazza. Ahol több kritérium is ugyanazt az eredményt adta, ott a sorban az első alapján készült mátrix kerül bemutatásra.

5. Eredmények megvitatása, következtetések

5.1. UAV-alapú fotogrammetria során előállított pontfelhők és felszínmodellek felhasználhatósága

5.1.1. Képegyeztetések sikeressége

A fotogrammetriai pontfelhők, ezáltal pedig a felszínmodellek előállításának kulcsmomentuma az adott domborzati, faállomány-, és fényviszonyoknak megfelelő repülési paraméterek megválasztása. Amennyiben ezek nincsenek összhangban a fent felsorolt paraméterekkel, úgy a képegyeztetés sikeressége forog kockán, sikertelenség esetén a pontfelhő előállítása nem kivitelezhető. Ugyan mivel mindezen viszonyok tökéletes szimulálhatósága a majdhogynem végtelen számú kombinációs lehetőségek miatt nem kivitelezhető, az általam vizsgált négy mintaterületen tapasztaltak alapján levont következtetések jó irányt adnak az egyes repülési paraméterek megválasztásához.

Tekintve a lombtalan felvételek egyeztetésének sikerességét, az ideális állapotot a Sopron 128/C erdőrészletben elhelyezkedő mintaterület mutatta, ahol az összes vizsgált repülési paraméter esetén képes volt a szoftver a képek külső tájékozását megfelelően meghatározni, dacára a terület nyugati felében található meredekebb lejtőnek, illetve a jelen levő fenyőelegynek. Ezt az a tény segítette, hogy a négy repülés során itt volt tapasztalható a legegyenletesebb, szórt fényű, de nem elégtelen mértékű megvilágítás. Hasonlóan egyenletes fényviszonyok voltak jellemzők a Sopron 152/A-ban található mintaterület lombtalan lerepülésekor, viszont itt már kevesebb kombináció eredményezett sikeres képegyeztetést, amit feltételezhetően a nagyobb domborzati változatosság okoz. Sopron 126/E esetén a megvilágítás befolyásolta a leginkább ezt a folyamatot, mivel a 120 méteres repülés során még viszonylag egyenletes megvilágítás volt tapasztalható, addig a 100 és 80 méter esetén már váltakozott a szórt fény és a közvetlen megvilágítás, így ezeknél a magasságoknál csak a magasabb átfedések hoztak eredményes tájékozást. A legcsekélyebb domborzati változatosságot felmutató csákánydoroszlói mintaterület lerepülése során szintén előfordult, hogy pár percig a felhők mögül előbújt Nap közvetlenül megvilágította a koronákat, növelve ezzel a képek kontrasztját, ami miatt elsötétült a talajszint, így a kevesebb érzékelhető talajpont az alacsonyabb átfedésű kombinációk esetén sikertelen képegyeztetést eredményezett, de közel sem olyan mértékben, mint a jelentősebb lejtőn fekvő Sopron 126/E mintaterület tekintetében.

A lombos állapotban végzett felvételezések kevésbé érzékenyek a megvilágítás váltakozására. Az alacsony átfedésű kombinációk általánosságban véve nem hoznak sikeres képegyeztetést, ami egyértelműen a talajszint takarásának, ezen keresztül pedig a relatív repülési magasság „de facto” változásának számlájára írható, ugyanis az így felmért felület nem a domborzat maga, hanem annak az átlagos famagassággal megemelt értéke. Tehát például, ha a repülési magasság 80 méter, a faállomány magassága pedig 20 méter, akkor valójában az érzékelő és a felület között 60 méter távolság tapasztalható, amely így csökkenti a valós (vagyis a lombkoronafelszínen elért) átfedést, ennek eredményeképp pedig magasabb névleges átfedésekre van szükség a képegyeztetések sikerességéhez. Minél alacsonyabb a repülési magasság, annál magasabb átfedésekre van szükség, továbbá a meredekebb domborzat szintén magasabb átfedéseket kíván meg.

A képegyeztetési eredmények, az egyes átfedési kombinációk szükséges repülési ideje, valamint a fenti megállapítások figyelembevételével általánosságban a 19. táblázat szerinti átfedések kombinációi szükségesek a lehető legrövidebb repülési idő esetén a *DJI Mavic 2 Pro* által készített képek eredményes külső tájékozáshoz.

19. táblázat: Szükséges minimális átfedések repülési magasságoként

Repülési magasság	Lombtalan		Lombos	
	Bázisirányú	Sorok közötti	Bázisirányú	Sorok közötti
120 m	80%	80%	80%	80%
100 m	90%	70%	70%	90%
80 m	90%	70%	90%	90%

5.1.2. Domborzatmodellek pontossága

A domborzatmodellek pontosságának legalapvetőbb mérőszáma a referenciafelülettől való átlagos eltérés, melyet abszolút értékkel adunk meg. Az egyes repülési, illetve feldolgozási paraméterek hatásainak vizsgálata alapján megfigyelhető, hogy az egyes, az előző alfejezetben is felsorolt körülmények szintén befolyásolják azok mértékét.

A repülési paraméterek közül a magasság fontossága a változó fényviszonyok és a sűrű ágszerkezet esetén felértékelődik, míg a jobban látható talajszint ezt valamennyire redukálja, de még így is nagy jelentőség tulajdonítható ennek a paraméternek. A bázisirányú átfedés leginkább az olyan markáns domborzatú területeken mutat nagy jelentőséget, ahol a lombos mellett nagyobb fenyőcsoportok is helyet foglalnak, míg a sorok közötti átfedés jelentősége érdekes módon inkább az enyhe domborzatú területeken kimagasló. Az eltérések megbízhatóságára vonatkozó kvantilis intervallumok nagysága esetén viszont a bázisirányú átfedés mutat egyértelmű dominanciát a három paraméter közül, ugyanez pedig a kiugró értékek esetén is megfigyelhető. Tekintve a konkrét számokat, az a következtetés vonható le, hogy a nagyobb repülési magasság esetén kívánatos nagyobb mértékű átfedésekkel dolgozni, míg lefelé haladva érdemes csökkenteni ezeken (természetesen figyelembe véve, hogy ez ne befolyásolja a képegyeztetés sikerességét). Ennek oka valószínűleg a kisebb képszám, amely a kis heterogenitást mutató avartakaró felületén várhatóan kevesebb zajt eredményez.

A pontfelhő-feldolgozási lépések közül az eltérések abszolút értékének átlaga többnyire a talajpontok osztályozási léptékétől függ. Ez a kijelentés leginkább a sűrűbb koronaszerkezetű, valamint nagyobb fenyves foltokkal tarkított állományok esetére igaz, ahol ritkábban állnak az azonosított talajpontok. A változó megvilágítás okozta kontrasztváltozás az eredmények alapján nem befolyásoló tényező ennél a paraméternél. Számszerűleg, általánosságban nézve a 9 méter nagyságú osztályozási léptékkel érdemes dolgozni a *LAStools lasground* modullal erdőállománnyal borított területen. A kvantilis intervallumok kiterjedésére szintén ez a paraméter van a legnagyobb hatással, a többi többnyire elenyészőnek tekinthető.

A kiugró hibák tekintetében a minimumokra egyértelműen a célzott simítás, míg a maximumokra az osztályozási lépték hat a legjobban, az abszolút értékeket nézve pedig továbbra is a célzott simítás dominál. Az említett, általam fejlesztett módszer képes kiszűrni az egyes zajsűrítési eljárások során kiejtésre nem került pontokból adódó felületi hibákat, ezzel pedig jelentősen csökkenti a legnagyobb mértékű, kiugró eltérések értékét, vagyis az előállított domborzatmodell durva hibáit.

A kapott eredmények, valamint a fenti megállapítások ismeretében az alábbi lépéseket, illetve paramétereket javaslom a megfelelő pontosságú domborzatmodellek előállításához *DJI Mavic 2 Pro* típusú UAV-val készített felvételekkel:

- repülési magasság (100 m)
- bázisirányú átfedés (80%)
- sorok közötti átfedés (90%)
- megbízhatósági szűrő (1-es értékkel rendelkező pontok eltávolítása)
- ritkítás (legalacsonyabban fekvő pont meghagyása az 5 cm oldalhosszú cellákon belül)

- *lasground* – osztályozási lépték (9 m)
- célzott simítás (40% lejtési határértékkel)

Mindezek mellett továbbra is az állandó, szórt fényben történő repülés ajánlott, mivel a váltakozó megvilágítás nemcsak a képegyeztetés sikerességét, hanem a zajt is jelentősen növelheti, melyet nem minden esetben képesek kiszűrni a zajsűrő eljárások.

A kapott 6 centiméter alatti átlagos hiba egyértelműen összhangban van, sőt, bizonyos mértékben felül is múlja HUGENHOLTZ ÉS MTSAI (2016) állítását, miszerint illesztőpontokkal 12 centiméter alatti érték érhető el. Az átfedések tekintetében viszont ez a megállapítás ellentmond a PESSACG ÉS MTSAI (2022) általi megállapítással, ők ugyanis a magasabb bázisirányú átfedést részesítették előnyben.

5.1.3. Koronák azonosítása

A domborzatmodell-pontossággal ellentétben a koronák azonosítása esetén a repülési paraméterek hatása lényegesen alacsonyabb, a detektálási számokat érdemben nem, vagy csak nagyon minimális, néhány faegyednyi mértékben befolyásolják. Az egyes zajsűrő eljárások esetén ez még jelentéktelenebb, jellemzően nem javítják vagy rontják a találati arányokat. Ezért tehát a repülési paraméterek megválasztásának tekintetében inkább arra kell törekedni, hogy a képegyeztetés sikeres legyen, valamint ne legyenek anomáliák a borított felszínmodellben. Így nem szükséges a legmagasabb átfedéseket, illetve alacsonyabb repülési magasságokat választani, ami az időbeli hatékonyság tekintetében is előnyös.

A koronacsúcs-azonosítás, illetve a koronavetület-lehatárolás során kapott egyedszám és pozíció pontossága tehát így leginkább a két, illetve három feldolgozási paraméter függvénye. A simító maximumkeresés mindkét esetben valamivel nagyobb jelentőséget mutat a rögzítetténél, utóbbi esetében pedig a maximális koronaátmérőnél is. Szintén értelmezhető szintű befolyást gyakorol a végeredményre a famagasságmodellek felbontása, a koronavetület-lehatárolás esetén enyhén csökkenő mértékben.

Vizsgálataim alapján azt is megállapítottam, hogy az inverz vízgyűjtő eljárás közel 20%-kal képes javítani a lokális maximumon alapuló faegyedazonosítás pontosságát, így kombinált alkalmazásuk javasolt. Ennek megfelelően, illetve az egyes paraméterek hatásmértékei alapján az alábbi lépéseket, illetve paramétereket javaslom alkalmazni az ismertetett eljárásokhoz *DJI Mavic 2 Pro* típusú UAV-val készített felvételek feldolgozása esetén:

- repülési magasság (120 m)
- bázisirányú átfedés (80%)
- sorok közötti átfedés (80%)
- ritkítás (legmagasabban fekvő pont meghagyása az 5 cm oldalhosszú cellákon belül)
- famagasságmodell felbontása (0,3 m/pixel)
- rögzített és simító maximumkeresés ablakmérete (3 m)
- maximális koronaátmérő mérete (7 m)

Ugyan az így kapott detektálási pontszámok (és ezáltal a pontosan detektált faegyedek) elmaradnak a törzsdetektálás során tapasztaltaktól, megmutatva ennek a módszernek a korlátait, ennek ellenére átfogó képet szolgáltat az adott faállományról. Az egyes koronacsúcsokhoz tartozó magasságok adják az egyesfák magasságait, a lehatárolt koronák vetülete pedig alkalmas a mellmagassági átmérőkre való következtetésre.

A repülési magasság tekintetében ez az eredmény megegyezik a DHURVA ÉS MTSAI (2024) általi megállapítással, viszont a 80%-os átfedések egyértelműen alacsonyabbak az általuk 90% és 85%-os átfedéseknél, így az ismertetett módszer jobb időbeli hatékonyságot mutat. Ugyan

az általuk elért faegyed-detektálási arány érezhetően nagyobb, viszont vizsgálatuk telepített fenyves állományban lett elvégezve, ahol alapvetően magasabb a várható találati arány a szabályos geometriájú faállományszerkezenek köszönhetően.

5.1.4. Törzspozíciók detektálása

A négy mintaterületen végzett törzsdetektálás eredményei alapján több következtetés is levonható. Egyrészt a repülési magasság láthatóan nem egységesen választandó különböző állományviszonyoknál. A kevésbé sűrű koronaszerkezet esetén a 120 méter elegendő, az alacsonyabb repülési magasságok érdekes módon kisebb detektálási arányt produkálnak ebben az esetben. Sűrűbb koronaszerkezet tekintetében a 100 méter magasságú repülés hozta a legjobb arányt, azonban megjegyzendő, hogy ebben az esetben is mindössze a faegyedek kétharmadának felismerése volt sikeres (még a nagyobb átmérőjű törzsek esetén is), így az erre vonatkozó megállapítás nem áll teljesen szilárd lábakon. Az örökzöld foltokkal jelentősen tarkított faállományok esetén viszont egyértelmű, hogy az alacsonyabb, 80 méteres repülési magasság átlagosan több törzspontot, valamint jobb detektálást eredményez.

A pontos detektálási arányok három mintaterület esetén is felülmúlták a DIETENBERGER ÉS MTSAI (2023) által kapott 70%-os eredményt, mindössze a Sopron 152/A erdőrészletben elhelyezkedő mintaterület esetén volt ez a szám alig 10 százalékponttal kevesebb, azonban, ha a teljes detektálási arányt nézzük, úgy ezen mintaterület közel ugyanazt az értéket produkálta. Ha a detektálási pontszám alapján végzünk összehasonlítást, úgy az említett tanulmány közölt számértékeiből kiszámítható 0,53 értéket is jelentősen felülmúlja a három említett mintaterület, a negyedik viszont elmarad tőle. Ugyan a FRITZ ÉS MTSAI (2013) által elért 71%-os detektálást is felülmúlta az általam alkalmazott módszer, mivel a repülési paraméterek és a felmérés céljai nem teljesen fednek át (a hivatkozott tanulmányban a törzsek teljes rekonstrukciója volt a cél), így kevésbé releváns ez az összehasonlítás.

A Sopron 152/A erdőrészlet mintaterületén tapasztalt alacsony (70% alatti) detektálási arány konkrét oka nem állapítható meg teljes biztonsággal. Több feltételezés is előkerült a vizsgálat során, miszerint összefüggésben lehet a törzsszámmal, esetleg a fafajjal. Ezek végül elvetésre kerültek, ugyanis a négy közül ez a legalacsonyabb törzsszámú mintaterület, így ezen a szinten nem beszélhetünk magasabb fokú takarásról, míg a bükk jellegzetes szürke kérgének esetleges negatív hatása a törzsrekonstrukcióra szintén elvetődött, ugyanis ez a probléma nem jelentkezett a többi mintaterületen, ahol jelentős mennyiségű bükk lelhető fel. Egyedül a faegyedek fölötti abszolút pontsűrűség az, ami okozhatta a végeredményt, azonban ezt némileg árnyalja az a tény, miszerint a Sopron 128/C erdőrészletben elhelyezkedő mintaterületen a nagymértékű fenyőelegy ellenére is 90% körüli detektálási arány volt elérhető.

Tekintve a megbízhatósági szűrő alkalmazását, az drasztikus mértékű csökkenést eredményez, ezzel megmutatva, hogy annak mellőzése egyértelműen javallott. Ugyan az így kiszűrt pontok valószínűleg nem illeszkednek tökéletesen a törzs valós pozíciójához, viszont mivel a bemutatott módszer célja nem az átmérőbecslés, hanem csupán a törzspozíció hozzávetőleges felkeresése, így ezek a pontok is kulcsszerepet játszanak a módszer pontosságában.

A fentiek alapján ugyan óvatosan, de kijelenthető, hogy a leghátráltatóbb tényező a sűrű koronaszerkezet, amelyet egy esetleges direkt megvilágítás még jobban kihangsúlyoz. Előbbi esetben a még magasabb átfedés hozhat esetlegesen (de nem lényegesen) jobb eredményt, az utóbbi esettel kombinálva viszont az ilyen célú légifényképezés egyáltalán nem ajánlott.

5.2. Domborzati viszonyokra vonatkozó adattári adatokkal való összehasonlítás

Az adattári adatokkal való összehasonlítás eredményei arra utalnak, hogy a nyilvántartás pontossága helyenként megkérdőjelezhető, a módszertan pedig fejlesztésre szorul. Ennek hátterében az áll, hogy az ALS-alapú DDM-ek a korábbi, terepi szemlére épülő eljárásokhoz képest részletesebb és objektívebb besorolást tesznek lehetővé, amelyek a jelenlegi nyilvántartás készítésekor még nem álltak rendelkezésre. A Dudlesz-erdő esetén ugyan a lejtés és a kitettség tekintetében is az osztályozás eredménye közel 80%-os egyezést mutatott az adattári adatokkal, a rédei területen ez már jóval alacsonyabb, ebből tehát következik, hogy a változatosabb domborzatú területeken még inkább jellemzőek a helytelen és/vagy elnagyolt nyilvántartási adatok. Mivel a változó kategóriába sorolásnak az ERDŐRENDEZÉSI ÚTMUTATÓ (2004) szerint nincsenek szigorú kritériumai, bárhol, bármely erdőrészlet esetén megjelenhet a nyilvántartásban, helyenként megfelelő alátámasztottság nélkül. De ha mégis indokolt az ebbe a kategóriába sorolás, tág fogalomköre miatt nem juthatunk olyan megfelelő mennyiségű és minőségű információhoz az adott erdőrészletek tekintetében, amelyek a közeljövőben kulcsfontosságúak a klímaváltozás hatásainak mérséklése terén.

Ezek alapján arra a következtetésre jutottam, hogy az Országos Erdőállomány Adattár domborzati viszonyokra vonatkozó rovatai (lejtés, fekvés (kitettség), domborzat) átszervezést igényelnek. A 21. század technológiai fejlődésének köszönhetően már megfelelő pontosságú domborzatmodellek érhetőek el, amelyek immár az egész ország területét lefedik, ezek alapján pedig belátható időn belül elkészíthető az adattár frissítése.

Az esetleges átalakításra több lehetséges megoldást is javaslok. Talán a legegyszerűbb a változó kategória számszerű definiálása, majd ez alapján a teljes Adattár frissítése. A szabály megalkotásához az egyes részkategóriák frekvenciáját és stabilitását veszem alapul, a javaslat szerint pedig akkor kerülne a változó kategóriába az adott erdőrészlet, ha a legnagyobb kiterjedésű kategória frekvenciája kisebb, mint 0,4, ha pedig efölötti, akkor a stabilitása kisebb, mint 0,2. Az ehhez megalkotott függvény tehát az alábbiak szerint nézne ki:

$$C = \begin{cases} \text{VÁLT} & \text{ha } f < 0,4 \\ \text{VÁLT} & \text{ha } f \geq 0,4 \text{ és } s < 0,2 \\ f_{\max} & \text{egyébként} \end{cases}$$

ahol:

- C erdőrészletre meghatározandó kategória
- f frekvencia [0;1]
- s stabilitás [0;1]
- $f_{\max}$ részletszinten legnagyobb frekvenciájú kategória

Hogy ez hogyan változtatná meg a két vizsgált mintaterület esetén a változó kategóriába eső erdőrészletek számát, azt a 20. táblázat szemlélteti, ahol látható, hogy összességében a Dudlesz-erdő esetén enyhe csökkenés, Réde esetén viszont jelentős növekedés tapasztalható azok darabszámában.

Ez a megoldás azonban továbbra is magával hordozza a változó kategóriából adódó bizonytalanságot, miszerint nincs semmilyen mögöttes információ arról, hogy ténylegesen mik alkotják a változatos jelleget. Konkrét gyakorlati munkák esetén is hátrányos a kategória megtartása, ugyanis például az erdőrészletek egy bizonyos kitettség szerinti listázásakor a változó kategóriába soroltak teljesen kimaradnak. Erre lehet megoldás, továbbra is a jelenlegi adattárszerkezet mellett maradván, a változó kategória kivezetése, majd a legnagyobb részarányt képviselő kategória szerepeltetése az egyes adatrovatokban. Ez viszont így a változatosság meglétére, illetve annak mértékére semmilyen formában nem utal, erősen változatos

erdőrészek esetén pedig csak a relatív domináns kategória jelenne meg az adattárban, azaz az erdőrészlet több, mint feléről nem lenne információ.

20. táblázat: A jelenlegi, valamint a javasolt képlettel számított, változó kategóriába eső erdőrészletek száma

Jellemző	Dudlesz		Réde	
	Adattár	Számított	Adattár	Számított
Lejtés	38	36	51	159
Kitettség	63	47	119	171
Domborzatforma	56	38	36	136

Ennek kiküszöböléséhez viszont már az adattári struktúra átalakítására van szükség, több rovatot szánva a három domborzati jellemző tárolására, ahol több részkategória jelenne meg. Hogy a két, vagy esetleg három legnagyobb arányú részkategória ilyen jellegű tárolása átlagosan, illetve minimálisan milyen mértékű lefedést biztosít a vizsgált területek erdőrészletei esetén, a 21. táblázat mutatja be.

21. táblázat: A két és három legnagyobb részkategória által lefedett területarány erdőrészletenkénti átlaga, illetve minimuma

Jellemző	Részletérték	Két kategória		Három kategória	
		Dudlesz	Réde	Dudlesz	Réde
Lejtés	Átlag	91%	81%	97%	92%
	Minimum	46%	41%	64%	57%
Kitettség	Átlag	83%	67%	91%	80%
	Minimum	43%	37%	57%	49%
Domborzatforma	Átlag	89%	78%	97%	91%
	Minimum	56%	47%	79%	65%

Ez alapján az látható, hogy ugyan a két kategóriás tárolásnál az átlag jellemzően 80% körüli, esetenként azt jóval meghaladja (kivéve a kitettség Réde esetén), ami már elégséges lehet, azonban a minimumokat tekintve inkább a három kategóriás tárolás lenne indokolt, ezzel ugyanis majdnem minden esetben 50% feletti (kivétele szintén a rédei kitettség, ahol 49%) lefedettség érhető el. Abban az esetben, ha az egyes kategóriák részaránya is fontos információ, a fent felvázolt többkategóriás tárolási módszer kiegészíthető a részarány mértékével, ennek köszönhetően viszont az eredeti egy rovatot hat váltaná, ez pedig egyrészt jelentős struktúraátalakítást, másrészt nagymértékű tárhelyigény-növekedést is eredményez.

Egy másik lehetséges megoldása a problémának az erdőrészletek megosztása, alrészletekbe sorolása, amelynek az egyes kategóriák adnának alapot. Viszont ez a megközelítés lényegesen nagyobb változtatásokat igényelne, egyrészt mert együttesen kellene figyelembe venni mindhárom rovatot, másrészt az egyes kategóriák nem minden esetben alkotnak egybefüggő területet, hanem mozaikosan jelennek meg. Továbbá sok esetben olyan pár hektár kiterjedésű erdőrészletben is el kellene végezni ezt a műveletet, ahol a feldarabolás az erdőrészlet fogalmának jogszabályi keretekben foglalt minimális méretét feszegetné.

Ha még inkább előre tekintünk a jövőbe, várhatóan a nagyfelbontású, egész országterületeket lefedő domborzatmodellek is ingyenesen, bárki számára hozzáférhetők lehetnek. Ebben az esetben pedig akár az erre vonatkozó adatok adattári tárolásának mellőzése is elképzelhető, ugyanis a széleskörű hozzáférhetőségnek köszönhetően az egyes szakterületek,

részszafterületek által megkívt, domborzati viszonyokra vonatkozó adatok bárki által levezethetővé válhatnak.

6. Összefoglalás

Doktori disszertációmban lombos és lombtalan állapotban készített UAV-alapú RGB-légifényképek alkalmazhatóságát vizsgáltam domborzatmodellezési és faállomány-felmérési tekintetben, emellett nagyterületű légi lézeres letapogatásból származó domborzatmodellek elemzését végeztem, illetve hasonlítottam össze az Országos Erdőállomány Adattár erre vonatkozó adataival.

Kidolgoztam egy olyan műveletsort, amely UAV-alapú lombos és lombtalan állapotú légifényképek készítésére, illetve azok feldolgozására irányul. A vizsgálat egy *DJI Mavic 2 Pro* típusú UAV-val történt, így a megállapítások alapvetően erre az eszközre vonatkoznak, viszont azok könnyen átültethetők más eszközökkel való felmérésekre is. A lombtalan állapotban készített felvételekből domborzatmodelleket állítottam elő, majd elemeztem az egyes lépések, illetve az általuk felvehető paraméterek hatásait az átlagos és kiugró hibákra. A vizsgálatok eredményei alapján javaslatot tettem az egyes repülési és feldolgozási paraméterek konkrét értékeire, amelyek általánosan alkalmazhatók olyan lombhullató (esetlegesen helyenként fenyővel elegyített) faállományok esetén, amelyek már a növedékfokozó gyérítések időszakában vannak. Ehhez a feldolgozási sorhoz kidolgoztam egy célzott simítási módszert, amely a zajszűrő eljárások által bent hagyott pontzajból adódó domborzatmodell-hibákat hivatott elsimítani, hatékonyan mérsékelve a kiugró hibák eloszlását és értékeit. Az így kapott domborzatmodellek átlagos hibája 6 cm, maximális kiugró hibája pedig 40 cm, mellyel egyértelműen alkalmas a borított felszínmodellek normalizálására, ezáltal pedig a famagasság becslésére. A lombos képek felhasználásával lombkoronamodelleket generáltam, majd azok feldolgozásához lokális maximumkeresésen alapuló koronacsúcs-azonosítást alkalmaztam, annak eredményét pedig inverz vízgyűjtő eljáráson alapuló koronavetület-lehatárolással sikeresen, közel 20%-os pontossági növekedéssel javítottam.

A legnagyobb sűrűségi beállításokkal előállított, lombtalan állapotú pontfelhők esetén vizsgáltam annak lehetőségét, hogy alkalmas-e törzspozíciók azonosítására, melyhez pontcsoportosulás-azonosítási eljárást alkalmaztam. Ugyan az azonosítás megvalósíthatósága igencsak érzékeny bizonyos tényezőkre, mint például a fényviszonyok és a vizsgált faállomány koronaszerkezete, ideális körülmények között akár 95% feletti pontossággal is meghatározhatók az egyes fák törzseinek pozíciói.

A nagyterületű domborzatmodellekből levezettem a lejtési és fekvési viszonyokat, valamint a topográfiai pozíció index segítségével kategorizáltam az egyes domborzatformákat. Ez utóbbihoz megalkottam egy empirikus modellt, amely objektív módon képes meghatározni az elemzéshez szükséges két vizsgálati sugárérték nagyságát, figyelembe véve a modell felbontását, illetve a vizsgált terület domborzati jellegzetességeit. Az egyes kategóriák erdőrésztlet-szintű megoszlását vizsgálva megállapítottam, hogy sok esetben azok nincsenek összhangban az Adattári adatokkal, valamint utóbbinál a változó kategória alkalmazása nem következetes. Ezért több javaslatot is megfogalmaztam az adattárolás felülvizsgálatára és átalakítására, valamint elemeztem azok megvalósítási előnyeit és korlátait.

7. Tézisek

1. Kidolgoztam egy feldolgozási sort, amely lombos és lombtalan állapotban készített UAV-alapú RGB képekből fotogrammetriai pontfelhő, domborzatmodell, lombkorona-felszínmodell előállítására, valamint törzspozíciók, facsúcsok és koronaméretek meghatározására alkalmas. Elvégeztem a feldolgozási sor paramétereinek hatásvizsgálatát, és javaslatot tettem azok optimális értékére.
2. Meghatároztam a fenti feldolgozási sor egyes kimenetei vonatkozásában az optimális repülési paramétereket (repülési magasság, bázisirányú és sorok közötti átfedés) *DJI Mavic 2 Pro* típusú UAV-val végzett erdészeti célú adatgyűjtéshez.
3. Kifejlesztettem egy olyan célzott simítási algoritmust, amely a hagyományos, a modellek teljes területén végzett eljárásokkal szemben képes azonosítani, majd célzottan eltávolítani a talajpont-osztályozás és zajszűrés után visszamaradó, nem valós felszíni kiemelkedéseket (pl. tuskók, zajból származó hamis gödrök). A detektálási elv alapján az eljárás felhasználható gödrök és depóniák azonosítására is.
4. Igazoltam, hogy a koronacsúcsok raszteres felszínmodellen végzett, lokális maximumként történő azonosítása inverz vízgyűjtő eljáráson alapuló koronaszegmentálással kiegészítve jelentősen pontosítható, a két módszer kombinálásával a törzsszámok pontosabban becsülhetővé válnak.
5. Igazoltam, hogy lombtalan állapotban előállított, maximális sűrűségű fotogrammetriai pontfelhők felhasználásával a törzspozíciók meghatározása optimális körülmények között (szórt megvilágítás, ritkább koronaszerkezet) 95% feletti pontossággal is végezhető olyan idősebb erdőrészekben, ahol már elkezdődtek a növedékfokozó gyérítések.
6. Kidolgoztam egy empirikus modellt, amely a terepi jellegzetességeket figyelembe véve alkalmas a kétlépcsős topográfiai pozíció index (TPI) vizsgálat paramétereinek objektív meghatározására.
7. Felülvizsgáltam az Országos Erdőállomány Adattár domborzatra vonatkozó adatait (lejtés, kitettség, domborzatformák), ez alapján pedig javaslatokat fogalmaztam meg azok tartalmának, illetve tárolásának fejlesztésére.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton köszönetet szeretnék mondani témavezetőmnek, Dr. Király Gézának, aki a jelen doktori disszertáció mellett TDK-dolgozatom, illetve diplomamunkám koordinálásával is hozzájárult szakmai és tudományos előrehaladásomhoz.

Kiemelt köszönet jár a SoilSense projektben részt vevő kollégáimnak, Prof. Dr. Czímber Kornélnak, Prof. Dr. Heil Bálintnak, Dr. Kovács Gábornak, Dr. Illés Gábornak, Dr. Veperdi Gábornak, Dr. Heilig Dávidnak és Mészáros Diánának az ezzel kapcsolatos publikációkban való szerepvállalásért.

Köszönöm a Geomatikai és Kultúrmérnöki Intézet munkatársainak, kollégáimnak, Dr. Brolly Gábornak, Gallai Bencének és Szalai Áronnak, valamint az Erdőmérnöki Kar már végzett és jelenlegi hallgatóinak, Bati Péternek, Dobosi Ferencnek, Fekete Gellértnek, Kálmán Eriknek, Kobra Lászlónak, Sziklai Szabolcsnak és Ujhegyi Kristófnak a terepi referenciamérésekben való segítségüket.

Köszönöm a TAEG Zrt. és a Szombathelyi Erdészeti Zrt. vezérigazgatóinak hozzájárulását a cégek területén végzett kutatásokhoz, valamint Farkas Rolfnak és Németh Zoltánnak a csákánydoroszlói mintaterületre való kijutás biztosítását.

Nem utolsósorban köszönöm a családomnak a mértéktelen szellemi és anyagi támogatást, amelynek köszönhetően eljuthattam idáig.

A kutatás előrehaladásához az Agrárminisztérium által támogatott, EGF/365/2023 számú, „Digitális termőhely-térképezés és szénkészlet meghatározás hazánk erdőtalajaiban” című, valamint a Kulturális és Innovációs Minisztérium által gondozott Témaerületi Kiválósági Program (TKP2021-NVA-13) projektek járultak hozzá.

Ábrajegyzék

1. ábra: TAHAR (2013) által vizsgált illesztőpont-kiosztások.....	5
2. ábra: A három felszínmodell-típus (KIRÁLY ÉS MTSAL, 2017).....	7
3. ábra: A felbontás változásának szemléltetése (forrás: wikimedia.org).....	8
4. ábra: Ruha szimulációs (CSF) szűrő (ZHANG ÉS MTSAL, 2016).....	10
5. ábra: Raszteres műveletek hatáskörei (TOMLIN, 1990).....	11
6. ábra: Geomorphonok osztályozása a nyolc térképi irány alapján (JASIEWICZ – STEPINSKI, 2013).....	12
7. ábra: Két léptékben végzett domborzatosztályozás (JENNESS, 2006).....	13
8. ábra: Voxel aggregációs eljárás szemléltetése (CZIMBER ÉS MTSAL, 2025).....	18
9. ábra: A módszerek kidolgozásának fő lépései	19
10. ábra: Mintaterületek elhelyezkedése az erdőrésztleteken belül	20
11. ábra: Leica ScanStation P40 (a), Leica GS16 (b), Leica TS03 (c).....	21
12. ábra: Szkennelési álláspontok mintaterületenként	22
13. ábra: DJI Mavic 2 Pro	22
14. ábra: A DroneDeploy felhasználói felülete	23
15. ábra: A terep magassági viszonyainak hatása a képek közötti átfedésre (a, b: fix magasság két különböző felszállási ponthoz viszonyítva; c: domborzatkövetés)	24
16. ábra: Terepi illesztőpont.....	25
17. ábra: Illesztőpontok elhelyezkedése	26
18. ábra: Képegyeztetés (a), kalibráció optimalizálás (b), pontfelhő generálás (c)	27
19. ábra: Gödör- (a) és félkúp-detektálás (b) szemléltetése	29
20. ábra: Domborzatmodellek előállításának lépései, az egyes lépések lehetséges paraméterszámával.....	30
21. ábra: Borított felszínmodellek előállításának lépései.....	30
22. ábra: Eltérések előjeles (a) és abszolút (b) értékének eloszlása, illetve a statisztikai mérőszámok szemléltetése egy példán keresztül	32
23. ábra: Rögzített és simító maximumkeresés	33
24. ábra: Normalizált borított felszínmodellek feldolgozásának lépései	34
25. ábra: A SoilSense projekt mintaterületeinek elhelyezkedése.....	36
26. ábra: Riegl VQ780 II szenzor (forrás: rieg.com)	36
27. ábra: A TPI-sugarak megválasztását elősegítő modell	38
28. ábra: A legjobbnak ítélt modellek eltérésképe	43
29. ábra: SHAP szerinti relatív fontosság az eltérések abszolút értékének átlaga esetén	44
30. ábra: Osztályozási lépték hatása az eltérések abszolút értékének átlagára	45
31. ábra: SHAP szerinti relatív fontosság a 90, 95 és 99%-os kvantilis intervallum esetén....	46
32. ábra: SHAP szerinti relatív fontosság a minimum, maximum eltérések, valamint azok abszolút értékének esetén	47
33. ábra: Célzott simítás szemléltetése.....	47
34. ábra: SHAP szerinti relatív fontosság a detektálási pontszám esetén	48
35. ábra: Famagasságmodell felbontásának hatása a detektálási pontszámra.....	49
36. ábra: Rögzített és simító ablakméret hatása a detektálási pontszámra.....	49
37. ábra: Maximális koronaátmérő hatása a detektálási pontszámra	50
38. ábra: Koronavetületek lehatárolásának szemléltetése	50
39. ábra: A faegyedek Voronoi-poligonjaira eső találati számok	51
40. ábra: Detektált és kihagyott törzsek aránya a mellmagassági átmérő függvényében, 2 cm-es élességgel	53
41. ábra: Dudlesz (a) és Réde (b) TPI sugárértékeinek megválasztása.....	54
42. ábra: Lejtő- és kitettségkategóriák a Dudlesz-erdőben (a) és a rédei mintaterületen (b) ...	55

43. ábra: Lejtőkategóriák százalékos megoszlása	56
44. ábra: Kitétségekategóriák százalékos megoszlása	56
45. ábra: Domborzatformák megoszlása	57

Táblázatjegyzék

1. táblázat: Az Erdőrendezési Útmutató szerinti domborzatformák (ERDŐRENDEZÉSI ÚTMUTATÓ KÓDJEGYZÉKE ÉS MELLÉKLETEI, 2004)	14
2. táblázat: A mintaterületeket tartalmazó erdőrészek jellemzői	20
3. táblázat: Repülési magasságokhoz tartozó jellemzők	23
4. táblázat: Választott TPI-sugarak (zárójelben a duplumok)	37
5. táblázat: Levezetett domborzatformák (JENNESS, 2006)	38
6. táblázat: Adattári és TPI-alapú kategóriák megfeleltetése	40
7. táblázat: Képegyeztetések sikeressége	41
8. táblázat: A legpontosabbnak ítélt domborzatmodellek statisztikai mutatói mintaterületenként	42
9. táblázat: Repülési paraméterek hatása az eltérések abszolút értékének átlagára	44
10. táblázat: A három repülési paraméter együttes hatásai az eltérések abszolút értékének átlagára	45
11. táblázat: Célzott simítás hatása a minimum, maximum eltérésekre, valamint azok abszolút értékére	46
12. táblázat: A lokális maximumkeresés és a koronavetület-lehatárolás detektálási arányszámai	48
13. táblázat: A legjobb detektálási pontszámot adó kombinációk mintaterületenként	51
14. táblázat: Törzsdetektálás találati arányai mintaterületenként	52
15. táblázat: Detektált és kihagyott faegyedek fölötti átlagos pontsűrűség (pont/m ²)	53
16. táblázat: Domborzatformák területi megoszlása	57
17. táblázat: A legnagyobb találati arányt eredményező mérőszámok kritériumai	58
18. táblázat: Az egyes mérőszámok alapján kapott legmagasabb találati arányok, valamint ezek kombinációja (félkövérrel kiemelve a legmagasabb mindkettő esetén)	58
19. táblázat: Szükséges minimális átfedések repülési magasságonként	60
20. táblázat: A jelenlegi, valamint a javasolt képlettel számított, változó kategóriába eső erdőrészek száma	64
21. táblázat: A két és három legnagyobb részkategória által lefedett területarány erdőrészekénti átlaga, illetve minimuma	64

Irodalomjegyzék

- AHMED, S., EL-SHAZLY, A., ABED, F. & AHMED, W. (2022): The Influence of Flight Direction and Camera Orientation on the Quality Products of UAV-Based SfM-Photogrammetry. *Applied Sciences* 12(20). pp. 10492.
- AXELSSON, P. (2000): DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models. *International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences* 33. pp. 110–117.
- AYREY, E., FRAVER, S., KERSHAW JR., J. A., KENEFIC, L. S., HAYES, D., WEISKITTEL, A. R. & ROTH, B. E. (2017): Layer Stacking: A Novel Algorithm for Individual Forest Tree Segmentation from LiDAR Point Clouds. *Canadian Journal of Remote Sensing* 43(1). pp. 16–27.
- BABOS, I., PROSZT, S., JÁRÓ, Z., KIRÁLY, L., SZODFRIDT, I., TÓTH, B. (1966): Erdészeti termőhelyfeltárás és térképezés. Akadémiai Kiadó, Budapest. pp. 30.
- BALÁZSIK, V. (2010): Fotogrammetria 1.: A távérzékelés fogalma, a fotogrammetria és a távérzékelés kapcsolata. Nyugat-Magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kara, Székesfehérvár. pp. 1, 3.
- BALÁZY, R., KAMIŃSKA, A., CIESIELSKI, M., SOCHA, J. & PIERZCHALSKI, M. (2019): Modeling the Effect of Environmental and Topographic Variables Affecting the Height Increment of Norway Spruce Stands in Mountainous Conditions with the Use of LiDAR Data. *Remote Sensing* 11(20). pp. 2407.
- BALOGH, R. (2013): Légifelvételzés a természettudomány szolgálatában. *Repüléstudományi Közlemények* 25(2). pp. 591–599.
- BELÉNYESI, M., BURAI, P., CZIMBER, K., KIRÁLY, G., KRISTÓF, D. & TANÁCS, E. (2013): Távérzékelési adatok és módszerek erdőtérképezési célú felhasználása, megvalósíthatósági tanulmány. An Augur Kft., Budapest. pp. 4-5.
- BOHLIN, J., WALLERMAN, J. & FRANSSON, J. E. S. (2012): Forest variable estimation using photogrammetric matching of digital aerial images in combination with a high-resolution DEM. *Scandinavian Journal of Forest Research* 27(7). pp. 692–699.
- BROLLY, G. (2013): Locating and Parameter Retrieval of Individual Trees from Terrestrial Laser Scanner Data. PhD Dissertation. Sopron. pp. 10-11.
- BROLLY, G., KIRÁLY, G., LEHTOMÄKI, M. & LIANG, X. (2021): Voxel-Based Automatic Tree Detection and Parameter Retrieval from Terrestrial Laser Scans for Plot-Wise Forest Inventory. *Remote Sensing* 13(4). pp. 542.
- BRUGGISSER, M., HOLLAUS, M., KÜKENBRINK, D. & PFEIFER, N. (2019): COMPARISON OF FOREST STRUCTURE METRICS DERIVED FROM UAV LIDAR AND ALS DATA. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* IV-2-W5. pp. 325–332.
- CAI, S., ZHANG, W., LIANG, X., WAN, P., QI, J., YU, S., YAN, G. & SHAO, J. (2019): Filtering Airborne LiDAR Data Through Complementary Cloth Simulation and Progressive TIN Densification Filters. *Remote Sensing* 11(9). pp. 1037.
- CHEN, Q., BALDOCCHI, D., GONG, P. & KELLY, M. (2006): Isolating Individual Trees in a Savanna Woodland Using Small Footprint Lidar Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72(8). pp. 923–932.
- CHEN, Q., LUO, H., CHENG, Y., XIE, M. & NAN, D. (2024): An Individual Tree Detection and Segmentation Method from TLS and MLS Point Clouds Based on Improved Seed

Points. *Forests* 15(7). pp. 1083.

- COLOMINA, I. & MOLINA, P. (2014): Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92. pp. 79–97.
- COMPEÁN-AGUIRRE, J. L., LÓPEZ-SERRANO, P. M., SILVÁN-CÁRDENAS, J. L., MARTÍNEZ-GARCÍA-MORENO, C. A., VEGA-NIEVA, D. J., CORRAL-RIVAS, J. J. & POMPA-GARCÍA, M. (2024): Evaluation of Two-Dimensional DBH Estimation Algorithms Using TLS. *Forests* 15(11). pp. 1964.
- CONTI, A., PAGLIARICCI, G., BONORA, V. & TUCCI, G. (2024): A COMPARISON BETWEEN TERRESTRIAL LASER SCANNING AND HAND-HELD MOBILE MAPPING FOR THE DOCUMENTATION OF BUILT HERITAGE. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLVIII-2-W4-2024*. pp. 141–147.
- COOPS, N. C., IRWIN, L. A. K., SEELY, H. S. & HARDY, S. J. (2025): Advances in Laser Scanning to Assess Carbon in Forests: From Ground-Based to Space-Based Sensors. *Current Forestry Reports* 11(1). pp. 11.
- CZIMBER, K. (2001): Geoinformatika. Elektronikus jegyzet. Nyugat-Magyarországi Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Földmérési és Távérzékelési Tanszék, Sopron.
- CZIMBER, K., BURAI, P., KOVÁCS, Z. & GERENCSÉR, A. (2019): Erdőleltározás légi lézeres letapogatással és közeli fotogrammetriával – Első tesztek eredményei. In: VANDA, É. (ed): *Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában*. Vol. 10. pp. 77–81.
- CZIMBER, K., SZÁSZ, B., ÁCS, N., HEILIG, D., ILLÉS, G., MÉSZÁROS, D., VEPERDI, G., HEIL, B. & KOVÁCS, G. (2025): Estimation of the Total Carbon Stock of Dudles Forest Based on Satellite Imagery, Airborne Laser Scanning, and Field Surveys. *Forests* 16(3). pp. 512.
- DALRYMPLE, J. B., BLONG, R. J. & CONACHER, A. J. (1968): A hypothetical nine unit landsurface model. *Zeitschrift für Geomorphologie* 12. pp. 60–76.
- DANSZKY, I. & ROTT, F. (1964): Általános irányelvek. Erdő- és termőhelytípus térképezés. Országos Erdészeti Főigazgatóság, Budapest. p. 213.
- DHARVA, A., HARTLEY, R. J. L., REDPATH, T. A. N., ESTARIJA, H. J. C., CAJES, D. & MASSAM, P. D. (2024): Effective UAV Photogrammetry for Forest Management: New Insights on Side Overlap and Flight Parameters. *Forests* 15(12). pp. 2135.
- DI COSMO, L., GIULIANI, D., DICKSON, M. M. & GASPARINI, P. (2020): An individual-tree linear mixed-effects model for predicting the basal area increment of major forest species in Southern Europe. *Forest Systems* 29(3).
- DI STEFANO, F., CHIAPPINI, S., GORREJA, A., BALESTRA, M. & PIERDICCA, R. (2021): Mobile 3D scan LiDAR: a literature review. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 12(1). pp. 2387–2429.
- DIKAU, R. (1989): The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. *Three Dimensional Applications In GIS*. CRC Press.
- DIETENBERGER, S., MUELLER, M. M., BACHMANN, F., NESTLER, M., ZIEMER, J., METZ, F., HEIDENREICH, M. G., KOEBSCH, F., HESE, S., DUBOIS, C. & THIEL, C. (2023): Tree Stem Detection and Crown Delineation in a Structurally Diverse Deciduous Forest Combining Leaf-On and Leaf-Off UAV-SfM Data. *Remote Sensing* 15(18). pp. 4366.
- DONG, Y., CUI, X., ZHANG, L. & AI, H. (2018): An Improved Progressive TIN Densification Filtering Method Considering the Density and Standard Variance of Point Clouds. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 7(10). pp. 409.

- DÖVÉNYI, Z. & BECSE, A. (2010): Magyarország kistájainak katasztere. Második, átdolgozott és bővített kiadás. MTA Földrajztudományi Kutatóintézet, Budapest.
- DRĂGUȚ, L. & BLASCHKE, T. (2006): Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology* 81(3). pp. 330–344.
- DUNCANSON, L. I., COOK, B. D., HURTT, G. C. & DUBAYAH, R. O. (2014): An efficient, multi-layered crown delineation algorithm for mapping individual tree structure across multiple ecosystems. *Remote Sensing of Environment* 154. pp. 378–386.
- ECKELMANN, W., SPONAGEL, H. & GROTTENTHALER, W. (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung 5. Verbesserte und erweiterte Auflage*, p. 57-67.
- Erdőrendezési Útmutató. Állami Erdészeti Szolgálat. 2004. p. 32-33.
- Erdőrendezési Útmutató kódjegyzéke és mellékletei. Állami Erdészeti Szolgálat, Budapest. 2004. p. 17.
- Erdőrendezési Utasítás. Országos Erdészeti Főigazgatóság. 1955. p. 23-24.
- EVANS, J. S. & HUDAK, A. T. (2007): A Multiscale Curvature Algorithm for Classifying Discrete Return LiDAR in Forested Environments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45(4). pp. 1029–1038.
- FARHADUR RAHMAN, Md., ONODA, Y. & KITAJIMA, K. (2022): Forest canopy height variation in relation to topography and forest types in central Japan with LiDAR. *Forest Ecology and Management* 503. pp. 119792.
- FARR, T. G., ROSEN, P. A., CARO, E., CRIPPEN, R., DUREN, R., HENSLEY, S., KOBRICK, M., PALLER, M., RODRIGUEZ, E., ROTH, L., SEAL, D., SHAFFER, S., SHIMADA, J., UMLAND, J., WERNER, M., OSKIN, M., BURBANK, D. & ALSDORF, D. (2007): The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics* 45(2).
- FLORIS, A. & DI COSMO, L. (2022): Protective Function and Primary Designated Management Objective. In: GASPARINI, P., DI COSMO, L., FLORIS, A., & DE LAURENTIS, D. (eds): *Italian National Forest Inventory—Methods and Results of the Third Survey: Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio—Metodi e Risultati della Terza Indagine*. Springer International Publishing, Cham, pp. 469–502.
- FRANÇA, L. L. S. DE, TEODORO DA PENHA, A. L., & CARVALHO, J. A. B. (2019). Comparison Between Absolute and Relative Positional Accuracy Assessment – A Case Study Applied to Digital Elevation Models. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 25(1): e2019003.
- FRITZ, A., KATTENBORN, T. & KOCH, B. (2013): UAV-based Photogrammetric Point Clouds – Tree Stem Mapping in Open Stands in Comparison to Terrestrial Laser Scanner Point Clouds. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-1-W2*. pp. 141–146.
- FURUKAWA, Y. & HERNÁNDEZ, C. (2015): Multi-View Stereo: A Tutorial. *Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision* 9(1–2). pp. 1–148.
- GLENN, N. F., SPAETE, L. P., SANKEY, T. T., DERRYBERRY, D. R., HARDEGREE, S. P. & MITCHELL, J. J. (2011): Errors in LiDAR-derived shrub height and crown area on sloped terrain. *Journal of Arid Environments* 75(4). pp. 377–382.
- GUVERNUL ROMÂNIEI. (2022): Ordinul nr. 2.536/2022 pentru aprobarea Normelor tehnice privind amenajarea pădurilor și a Ghidului de bune practici privind amenajarea pădurilor. *Monitorul Oficial al României, Partea I. Vol. 999/14.X.2022*.
- HARWIN, S., LUCIEER, A. & OSBORN, J. (2015): The Impact of the Calibration Method on the Accuracy of Point Clouds Derived Using Unmanned Aerial Vehicle Multi-View Stereopsis. *Remote Sensing* 7(9). pp. 11933–11953.

- HAUGERUD, R. A. & HARDING, D. J. (2001): Some algorithms for Virtual Deforestation (VDF) of LiDAR topographic survey data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 34(3). pp. 211–217.
- HIRSCHMULLER, H. (2005): Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05), San Diego, CA, USA. pp. 807–814.
- HU, H., DING, Y., ZHU, Q., WU, B., LIN, H., DU, Z., ZHANG, Y. & ZHANG, Y. (2014): An adaptive surface filter for airborne laser scanning point clouds by means of regularization and bending energy. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92. pp. 98–111.
- HUGENHOLTZ, C., BROWN, O., WALKER, J., BARCHYN, T. E., NESBIT, P., KUCHARCZYK, M. & MYSHAK, S. (2016): Spatial Accuracy of UAV-Derived Orthoimagery and Topography: Comparing Photogrammetric Models Processed with Direct Geo-Referencing and Ground Control Points. *Geomatica* 70(1). pp. 21–30.
- HYYPPÄ, J., KELLE, O., LEHIKONEN, M. & INKINEN, M. (2001): A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39(5). pp. 969–975.
- IGLHAUT, J., CABO, C., PULITI, S., PIERMATTEI, L., O'CONNOR, J. & ROSETTE, J. (2019): Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: a Review. *Current Forestry Reports* 5(3). pp. 155–168.
- IIZUKA, K., YONEHARA, T., ITOH, M. & KOSUGI, Y. (2018): Estimating Tree Height and Diameter at Breast Height (DBH) from Digital Surface Models and Orthophotos Obtained with an Unmanned Aerial System for a Japanese Cypress (*Chamaecyparis obtusa*) Forest. *Remote Sensing* 10(1). pp. 13.
- JANCsó, T. (2010): *Fotogrammetria 10.: Tájékozások*. Nyugat-Magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kara, Székesfehérvár. p. 3, 9.
- JASIEWICZ, J., STEPINSKI, T. (2013): Geomorphons — a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology* 182. pp. 147-156.
- JENNESS, J. (2006): Topographic position index (TPI). An ArcView 3.x tool for analyzing the shape of the landscape
- JIA, J., ZHANG, L., YIN, K. & SÖRGEL, U. (2025): An Improved Tree Crown Delineation Method Based on a Gradient Feature-Driven Expansion Process Using Airborne LiDAR Data. *Remote Sensing* 17(2). pp. 196.
- KARAMI, E., PRASAD, S. & SHEHATA, M. (2017): Image Matching Using SIFT, SURF, BRIEF and ORB: Performance Comparison for Distorted Images
- KATTENBORN, T., HERNÁNDEZ, J., LOPATIN, J., KATTENBORN, G. & FASSNACHT, F. E. (2018): Pilot Study on the Retrieval of DBH and Diameter Distribution of Deciduous Forest Stands Using Cast Shadows in UAV-based Orthomosaics. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* IV–1. pp. 93–99.
- KELLY, A., BLESÍUS, L., DAVIS, J. D. & BENTLEY, L. P. (2025): Using Unoccupied Aerial Systems (UAS) and Structure-from-Motion (SfM) to Measure Forest Canopy Cover and Individual Tree Height Metrics in Northern California Forests. *Forests* 16(4). pp. 564.
- KHAN, N. A., CARABIN, G. & MAZZETTO, F. (2025): Mobile Laser Scanning in Forest Inventories: Testing the Impact of Point Cloud Density on Tree Parameter Estimation. *Sensors* 25(18). pp. 5798.
- KIENZLE, S. (2004): The Effect of DEM Raster Resolution on First Order, Second Order

- and Compound Terrain Derivatives. *Transactions in GIS* 8(1). pp. 83–111.
- KIRÁLY, G. (2007): A távérzékelés erdészeti alkalmazása. Doktori (PhD) értekezés. Sopron. p. 17, 33.
 - KIRÁLY, G., BALLA, C., BARTON, I., MÉSZÁROS, G., PETRÁNYI, B. & SZABÓ, K. (2017): Borított felszínmodellek erdészeti felhasználása. In: BIDLÓ, A. & FACSKÓ, F. (eds): Soproni Egyetem Erdőmérnöki Kar VI. Kari Tudományos Konferencia. Soproni Egyetem Kiadó, Sopron, pp. 118–122.
 - KIRÁLY, G. & SZÁSZ, B. (2025): Fotogrammetria. In: CZIMBER, K. (ed): Geomatika az erdészetben. Országos Erdészeti Egyesület, Budapest. p. 21-22.
 - KOREŇ, M., SCHEER, L., SEDMÁK, R. & FABRIKA, M. (2024): Evaluation of tree stump measurement methods for estimating diameter at breast height and tree height. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 129. pp. 103828.
 - KRAMM, T., HOFFMEISTER, D., CURDT, C., MALEKI, S., KHORMALI, F. & KEHL, M. (2017): Accuracy Assessment of Landform Classification Approaches on Different Spatial Scales for the Iranian Loess Plateau. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 6(11). pp. 366.
 - KRAUS, K. & PFEIFER, N. (1998): Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 53(4). pp. 193–203.
 - KRAUSE, S., SANDERS, T. G. M., MUND, J.-P. & GREVE, K. (2019): UAV-Based Photogrammetric Tree Height Measurement for Intensive Forest Monitoring. *Remote Sensing* 11(7). pp. 758.
 - KRŮČEK, M., KRÁL, K., CUSHMAN, K., MISSAROV, A., KELLNER, J.R. (2020): Supervised Segmentation of Ultra-High-Density Drone Lidar for Large-Area Mapping of Individual Trees. *Remote Sensing* 12(19). pp. 3260.
 - KUANG, W., HO, H. W., ZHOU, Y., SUANDI, S. A. & ISMAIL, F. (2024): A comprehensive review on tree detection methods using point cloud and aerial imagery from unmanned aerial vehicles. *Computers and Electronics in Agriculture* 227. pp. 109476.
 - KWONG, I. H. Y. & FUNG, T. (2020): Tree height mapping and crown delineation using LiDAR, large format aerial photographs, and unmanned aerial vehicle photogrammetry in subtropical urban forest. *International Journal of Remote Sensing* 41(14). pp. 5228–5256.
 - LEE, H., SLATTON, K. C., ROTH, B. E. & CROPPER JR, W. P. (2010): Adaptive clustering of airborne LiDAR data to segment individual tree crowns in managed pine forests. *International Journal of Remote Sensing* 31(1). pp. 117–139.
 - LI, F., ZHU, H., LUO, Z., SHEN, H. & LI, L. (2021): An Adaptive Surface Interpolation Filter Using Cloth Simulation and Relief Amplitude for Airborne Laser Scanning Data. *Remote Sensing* 13(15). pp. 2938.
 - LI, J. & HEAP, A. D. (2014): Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environmental Modelling & Software* 53. pp. 173–189.
 - LI, S., ZHAO, S., YUE, J. & GONG, A. (2024): Comparison of Tree Species Classification from Individual Tree Features Based on ALS and ULS Data. *IGARSS 2024 - 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Athens, Greece, 2024, pp. 5276–5279.
 - LI, W., GUO, Q., JAKUBOWSKI, M. K. & KELLY, M. (2012): A New Method for Segmenting Individual Trees from the Lidar Point Cloud. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 78(1). pp. 75–84.

- LI, Z., ZHU, C. & GOLD, C. (2004): Digital Terrain Modelling: Principles and Methodology. CRC Press, Boca Raton., p. 7.
- LIANG, X., HYYPPÄ, J., KAARTINEN, H., LEHTOMÄKI, M., PYÖRÄLÄ, J., PFEIFER, N., HOLOPAINEN, M., BROLLY, G., FRANCESCO, P., HACKENBERG, J., HUANG, H., JO, H.-W., KATOH, M., LIU, L., MOKROŠ, M., MOREL, J., OLOFSSON, K., POVEDA-LOPEZ, J., TROCHTA, J., WANG, D., WANG, J., XI, Z., YANG, B., ZHENG, G., KANKARE, V., LUOMA, V., YU, X., CHEN, L., VASTARANTA, M., SAARINEN, N. & WANG, Y. (2018): International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 144. pp. 137–179.
- LIANG, X., KUKKO, A., KAARTINEN, H., HYYPPÄ, J., YU, X., JAAKKOLA, A. & WANG, Y. (2014): Possibilities of a Personal Laser Scanning System for Forest Mapping and Ecosystem Services. *Sensors* 14(1). pp. 1228–1248.
- LIU, X. (2008): Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 32(1). pp. 31–49.
- LOHMANN, P. (2002): Segmentation and filtering of laser scanner digital surface models. *International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences* 34(2). pp. 311–316.
- LUNDBERG, S. & LEE, S.-I. (2017): A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. *Advances in neural information processing systems* 30.
- MAO, Z., LU, Z., WU, Y. & DENG, L. (2023): DBH Estimation for Individual Tree: Two-Dimensional Images or Three-Dimensional Point Clouds? *Remote Sensing* 15(16). pp. 4116.
- McNAB, W. H. (1989): Terrain Shape Index: Quantifying Effect of Minor Landforms on Tree Height. *Forest Science* 35(1). pp. 91–104.
- MENG, X., CURRIT, N. & ZHAO, K. (2010): Ground Filtering Algorithms for Airborne LiDAR Data: A Review of Critical Issues. *Remote Sensing* 2(3). pp. 833–860.
- MEYER, W. J. (2004): Concepts of Mathematical Modelling. Courier Corporation. p. 2.
- MILNE, J. D. G., CLAYDEN, B., SINGLETON, P. L. & WILSON, A. D. (1995): Soil description handbook. Revised edition. Manaaki Whenua, Lincoln, New Zealand.
- MOKARRAM, M. & SATHYAMOORTHY, D. (2018): A review of landform classification methods. *Spatial Information Research* 26(6). pp. 647–660.
- MOKARRAM, M. & SATHYAMOORTHY, D. (2016): Relationship between landform classification and vegetation (case study: southwest of Fars province, Iran). *Open Geosciences* 8(1). pp. 302–309.
- MURPHY, P. N. C., OGILVIE, J., MENG, F.-R. & ARP, P. (2008): Stream network modelling using lidar and photogrammetric digital elevation models: a comparison and field verification. *Hydrological Processes* 22(12). pp. 1747–1754.
- NELSON, R. (2013): How did we get here? An early history of forestry lidar1. *Canadian Journal of Remote Sensing* 39(sup1). pp. S6–S17.
- NEX, F. & REMONDINO, F. (2014): UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics* 6(1). pp. 1–15.
- OEHMCKE, S., LI, L., REVENGA, J. C., NORD-LARSEN, T., TREPEKLI, K., GIESEKE, F. & IGEL, C. (2022): Deep learning based 3D point cloud regression for estimating forest biomass. *Proceedings of the 30th International Conference on Advances in Geographic Information Systems, SIGSPATIAL '22*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA.

- PANAGIOTIDIS, D., ABDOLLAHNEJAD, A., SUROVÝ, P. & CHITECULO, V. (2017): Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *International Journal of Remote Sensing* 38(8–10). pp. 2392–2410.
- PAVELKA, K., MATOUŠKOVÁ, E. & PAVELKA, K. (2023): Remarks on Geomatics Measurement Methods Focused on Forestry Inventory. *Sensors* 23(17). pp. 7376.
- PESSACG, F., GÓMEZ-FERNÁNDEZ, F., NITSCHKE, M., CHAMO, N., TORRELLA, S., GINZBURG, R., DE CRISTÓFORIS, P. (2022): Simplifying UAV-Based Photogrammetry in Forestry: How to Generate Accurate Digital Terrain Model and Assess Flight Mission Settings. *Forests* 13, p. 173.
- PEUCKER, T. K. & DOUGLAS, D. H. (1975): Detection of Surface-Specific Points by Local Parallel Processing of Discrete Terrain Elevation Data. *Computer Graphics and Image Processing* 4(4). pp. 375–387.
- PINGEL, T. J., CLARKE, K. C. & MCBRIDE, W. A. (2013): An improved simple morphological filter for the terrain classification of airborne LIDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 77. pp. 21–30.
- POLAT, N. & UYSAL, M. (2018): An Experimental Analysis of Digital Elevation Models Generated with Lidar Data and UAV Photogrammetry. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 46(7). pp. 1135–1142.
- POURREZA, M., MORADI, F., KHOSRAVI, M., DELJOUEI, A. & VANDERHOOF, M. K. (2022): GCPs-Free Photogrammetry for Estimating Tree Height and Crown Diameter in Arizona Cypress Plantation Using UAV-Mounted GNSS RTK. *Forests* 13(11). pp. 1905.
- RUHE, R. V. & WALKER, P. H. (1968): Hillslope models and soil formation II: Open systems. *Proceedings of 9th congress of the International Soil Science Society* 4. pp. 551–560.
- SADEQ, H. A. (2019): Accuracy assessment using different UAV image overlaps. *Journal of Unmanned Vehicle Systems* 7(3). pp. 175–193.
- SANZ-ABLANEDO, E., CHANDLER, J. H., RODRÍGUEZ-PÉREZ, J. R. & ORDÓÑEZ, C. (2018): Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used. *Remote Sensing* 10(10). pp. 1606.
- SHANNON, C. E. (1948): A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal* 27, pp. 379–423.
- SHARMA, R. P., BÍLEK, L., VACEK, Z. & VACEK, S. (2017): Modelling crown width–diameter relationship for Scots pine in the central Europe. *Trees* 31(6). pp. 1875–1889.
- SHARY, P. A., SHARAYA, L. S. & MITUSOV, A. V. (2005): The problem of scale-specific and scale-free approaches in geomorphometry. *Geografía Física e Dinámica Cuaternaria* 28(1). pp. 81–101.
- SITHOLE, G. (2001): Filtering of laser altimetry data using a slope adaptiv filter. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 34(3). pp. 203–210.
- SITHOLE, G. & VOSSELMAN, G. (2004): Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 59(1). pp. 85–101.
- SPEIGHT, J. (1990): Landform. *Australian Soil and Land Survey Field Handbook*. p. 13–45.
- SPRING, A. P. (2020): A History of Laser Scanning, Part 1: Space and Defense Applications. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 86(7). pp. 419–429.

- SPURR, S. H. & BARNES, B. V. (1980): Forest Ecology. Wiley. p. 207–208.
- STEPINSKI, T. & JASIEWICZ, J. (2011): Geomorphons - a new approach to classification of landforms. *Proceedings of geomorphometry* pp. 109–112.
- SZÁSZ, B. (2020): Faállomány-jellemzők vizsgálata UAV-k segítségével a Szombathelyi Erdészeti Zrt.-nél. Diplomamunka. Soproni Egyetem.
- SZÁSZ, B., HEIL, B., KOVÁCS, G., HEILIG, D., VEPERDI, G., MÉSZÁROS, D., ILLÉS, G. & CZIMBER, K. (2024): Investigation of the Relationship between Topographic and Forest Stand Characteristics Using Aerial Laser Scanning and Field Survey Data. *Forests* 15(9). pp. 1546.
- SZÁSZ, B., HEIL, B., KOVÁCS, G., MÉSZÁROS, D., CZIMBER, K. (2025): Comparison of Advanced Terrestrial and Aerial Remote Sensing Methods for Above-Ground Carbon Stock Estimation—A Comparative Case Study for a Hungarian Temperate Forest. *Remote Sensing* 17(13). pp. 2173.
- SZIJÁRTÓ, A. (2007): 3D domborzat modell készítése raszteres térképek alapján. *MultiMédia az Oktatásban 2007 konferencia*. pp. 365–371.
- TAHAR, K. N. (2013): An Evaluation on Different Number of Ground Control Points in Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetric Block. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-2-W2*. pp. 93–98.
- TATENO, R. & TAKEDA, H. (2003): Forest structure and tree species distribution in relation to topography-mediated heterogeneity of soil nitrogen and light at the forest floor. *Ecological Research* 18(5). pp. 559–571.
- TOMLIN, C. D. (1990): *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*. Prentice Hall.
- VERHOEVEN, G., DONEUS, M., BRIESE, Ch. & VERMEULEN, F. (2012): Mapping by matching: a computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs. *Journal of Archaeological Science* 39(7). pp. 2060–2070.
- VERŐNÉ WOJTASZEK, M., SZABÓ, V. & KAUSER, J. (2020): A talaj és a növény vízellátottságának mérési lehetőségei távérzékelési módszerekkel. *Agrofórum - A növénytermesztők és növényvédők havilapja* 31(8). pp. 120–124.
- VERYKOKOU, S. & IOANNIDIS, C. (2025): Image Matching: A Comprehensive Overview of Conventional and Learning-Based Methods. *Encyclopedia* 5(1). pp. 4.
- VOSSELMAN, G. (2000): Slope based filtering for laser altimetry data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 33. pp. 935–942.
- WARDIUS, Y. & HEIN, S. (2024): Terrestrial laser scanning vs. manual methods for assessing complex forest stand structure: a comparative analysis on plenter forests. *European Journal of Forest Research* 143(2). pp. 635–649.
- WEISS, A. (2001): Topographic position and landforms analysis. Poster presentation, ESRI user conference, San Diego, CA.
- WESTOBY, M. J., BRASINGTON, J., GLASSER, N. F., HAMBREY, M. J. & REYNOLDS, J. M. (2012): ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179. pp. 300–314.
- WHITE, J. C., WULDER, M. A. & BUCKMASTER, G. (2014): Validating estimates of merchantable volume from airborne laser scanning (ALS) data using weight scale data. *The Forestry Chronicle* 90(03). pp. 378–385.

- WIESER, M., MANDLBURGER, G., HOLLAUS, M., OTEPKA, J., GLIRA, P., PFEIFER, N. (2017): A Case Study of UAS Borne Laser Scanning for Measurement of Tree Stem Diameter. *Remote Sensing* 9(11). pp. 1154.
- WOOD, A. (1942): The development of hillside slopes. *Proceedings of the Geological Association* 53. pp. 128–140.
- YAN, M., BLASCHKE, T., LIU, Y. & WU, L. (2012): An object-based analysis filtering algorithm for airborne laser scanning. *International Journal of Remote Sensing* 33(22). pp. 7099–7116.
- ZHANG, W., QI, J., WAN, P., WANG, H., XIE, D., WANG, X. & YAN, G. (2016): An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. *Remote Sensing* 8(6). pp. 501.
- ZHONG, L., CHENG, L., XU, H., WU, Y., CHEN, Y. & LI, M. (2017): Segmentation of Individual Trees From TLS and MLS Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 10(2). pp. 774–787.

Mellékletek

1. Melléklet – Domborzatmodellek eltérési statisztikáira vonatkozó hatások ⁴

1.1. Repülési magasság (h_0 [m])

	SOP 126/E			SOP 128/C			SOP 152/A			CSDO 1/D			Összes		
h_0	120	100	80	120	100	80	120	100	80	120	100	80	120	100	80
min	0,89	-0,76	-0,76	-1,63	0,47	1,04	-0,05	1,48	-1,47	-0,06	-0,01	0,07	-0,25	0,08	0,29
median	0,05	-0,04	-0,06	-0,06	0,03	0,03	-0,04	0,06	-0,07	-0,02	0,00	0,02	-0,02	0,02	0,00
max	-0,02	-0,01	0,06	1,35	0,05	-1,15	2,39	-1,55	-0,81	-0,02	-0,03	0,05	0,71	-0,06	-0,60
CR 90	-0,13	0,08	0,20	1,23	-0,46	-0,73	1,46	-1,12	-0,16	0,00	-0,01	0,02	0,59	-0,33	-0,37
CR 95	-0,16	0,09	0,25	1,39	-0,49	-0,82	2,06	-1,52	-0,34	0,00	-0,02	0,03	0,72	-0,37	-0,44
CR 99	-0,22	0,15	0,33	1,71	-0,41	-1,10	2,78	-2,11	-0,42	0,00	-0,01	0,03	0,86	-0,37	-0,56
abs avg	-0,06	0,04	0,07	0,20	-0,08	-0,12	0,24	-0,21	0,03	0,01	0,00	-0,01	0,09	-0,06	-0,05
abs stdev	-0,04	0,03	0,06	0,37	-0,11	-0,23	0,43	-0,35	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,17	-0,07	-0,11
abs 90	-0,11	0,08	0,14	0,79	-0,35	-0,49	0,65	-0,54	0,07	0,02	0,00	-0,01	0,32	-0,19	-0,19
abs 95	-0,13	0,09	0,19	1,20	-0,44	-0,72	1,27	-1,00	-0,10	0,01	0,00	-0,01	0,56	-0,29	-0,36
abs 99	-0,18	0,12	0,27	1,44	-0,36	-0,91	2,19	-1,65	-0,34	-0,01	-0,01	0,03	0,72	-0,29	-0,47
abs max	-0,89	0,76	0,76	2,39	-0,31	-1,67	1,62	-2,43	0,85	0,04	0,00	-0,05	0,69	-0,08	-0,68

1.2. Bázisirányú átfedés (p%)

	SOP 126/E			SOP 128/C			SOP 152/A			CSDO 1/D			Összes		
p%	90	80	70	90	80	70	90	80	70	90	80	70	90	80	70
min	0,37	-0,14	-1,01	1,77	-1,04	-1,31	1,49	-1,31	-2,80	-0,09	0,08	0,02	0,95	-0,26	-0,83
median	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	-0,03	-0,05	0,06	0,06	0,00	0,00	-0,01	-0,03	0,03	0,02
max	0,01	-0,02	-0,02	-2,77	-1,27	4,44	-0,96	1,16	0,69	0,01	-0,02	0,03	-1,24	-0,32	2,27
CR 90	0,03	-0,05	-0,04	-1,02	-1,05	2,00	-0,38	0,48	0,14	0,01	-0,02	0,03	-0,39	-0,35	0,97
CR 95	0,04	-0,07	-0,05	-1,41	-1,27	2,70	-0,59	0,72	0,35	0,02	-0,03	0,03	-0,56	-0,40	1,29
CR 99	0,04	-0,09	-0,07	-2,39	-1,42	4,07	-0,87	0,86	0,76	0,04	-0,04	0,02	-0,99	-0,48	2,02
abs avg	0,01	-0,01	-0,01	-0,15	-0,14	0,28	-0,01	0,03	-0,04	0,00	0,00	0,01	-0,03	-0,06	0,11
abs stdev	0,01	-0,02	-0,01	-0,42	-0,30	0,73	-0,15	0,18	0,11	0,00	-0,01	0,00	-0,17	-0,10	0,37
abs 90	0,02	-0,03	-0,03	-0,53	-0,57	0,97	-0,07	0,14	-0,09	0,01	-0,01	0,01	-0,14	-0,21	0,44
abs 95	0,02	-0,05	-0,04	-1,00	-1,02	1,97	-0,37	0,49	0,11	0,02	-0,02	0,01	-0,38	-0,34	0,95
abs 99	0,04	-0,07	-0,06	-1,91	-1,27	3,33	-0,74	0,93	0,37	0,03	-0,03	0,01	-0,78	-0,38	1,63
abs max	-0,36	0,13	1,01	-3,86	0,30	4,48	-2,17	2,41	2,82	0,10	-0,08	-0,02	-1,89	0,17	2,48

1.3. Sorok közötti átfedés (q%)

	SOP 126/E			SOP 128/C			SOP 152/A			CSDO 1/D			Összes		
q%	90	80	70	90	80	70	90	80	70	90	80	70	90	80	70
min	-0,07	0,51	-0,27	1,41	0,48	-1,54	-0,89	0,21	1,86	0,03	0,10	-0,15	-0,04	0,43	-0,34
median	0,04	-0,01	-0,05	0,00	0,01	-0,02	-0,03	0,06	0,00	0,00	0,01	-0,02	0,00	0,02	-0,02
max	-0,04	0,04	0,03	-2,24	0,40	2,32	-0,87	1,68	0,78	-0,01	-0,05	0,11	-1,11	0,30	1,19
CR 90	-0,09	0,10	0,07	-0,96	0,03	1,04	-0,40	0,84	0,36	-0,02	-0,02	0,08	-0,47	0,16	0,53
CR 95	-0,10	0,10	0,09	-1,31	0,13	1,35	-0,56	1,15	0,50	-0,02	-0,04	0,11	-0,63	0,21	0,68
CR 99	-0,08	0,07	0,09	-1,96	0,11	2,19	-0,60	1,22	0,56	-0,03	-0,06	0,14	-0,88	0,15	1,05
abs avg	-0,04	0,02	0,05	-0,13	-0,02	0,16	-0,03	0,07	0,04	0,00	-0,01	0,02	-0,06	0,00	0,08
abs stdev	-0,02	0,02	0,02	-0,37	0,03	0,39	-0,11	0,26	0,06	0,00	-0,01	0,02	-0,16	0,05	0,18
abs 90	-0,07	0,06	0,07	-0,48	-0,20	0,63	-0,13	0,29	0,12	-0,01	-0,01	0,03	-0,21	-0,01	0,32
abs 95	-0,07	0,05	0,08	-0,93	0,00	1,02	-0,34	0,76	0,28	-0,01	-0,02	0,05	-0,44	0,14	0,52
abs 99	-0,06	0,02	0,09	-1,66	0,25	1,71	-0,53	1,09	0,49	-0,02	-0,03	0,09	-0,74	0,21	0,82
abs max	0,07	-0,51	0,26	-3,03	0,33	3,01	0,34	1,07	-1,78	-0,03	-0,11	0,18	-0,75	-0,09	0,98

⁴ A ritkítás ebben a léptékben nem mutatott megjeleníthető mértékű hatásokat

1.4. Megbízhatósági szűrő (CF)

	SOP 126/E		SOP 128/C		SOP 152/A		CSDO 1/D		Összes	
CF	igen	nem	igen	nem	igen	nem	igen	nem	igen	nem
min	0,95	-0,82	0,84	-0,91	1,82	-1,59	0,12	-0,15	0,93	-0,88
median	0,02	-0,01	0,01	-0,01	0,05	-0,05	0,00	0,00	0,02	-0,02
max	0,01	-0,01	0,26	-0,29	0,12	-0,15	0,00	0,00	0,11	-0,12
CR 90	-0,04	0,03	0,04	-0,04	-0,06	0,07	0,00	0,01	0,00	0,00
CR 95	-0,05	0,04	0,08	-0,08	-0,09	0,08	-0,01	0,01	0,00	0,00
CR 99	-0,09	0,07	0,14	-0,14	-0,16	0,13	-0,02	0,02	0,00	0,00
abs avg	-0,02	0,02	0,00	0,00	-0,05	0,05	0,00	0,00	-0,02	0,01
abs stdev	-0,02	0,02	0,02	-0,02	-0,04	0,04	0,00	0,00	-0,01	0,00
abs 90	-0,03	0,03	-0,01	0,01	-0,09	0,10	-0,01	0,01	-0,03	0,03
abs 95	-0,05	0,04	0,04	-0,04	-0,08	0,08	-0,01	0,01	-0,01	0,01
abs 99	-0,08	0,06	0,12	-0,12	-0,13	0,11	-0,01	0,02	0,00	0,00
abs_max	-0,96	0,82	-0,39	0,41	-1,61	1,34	-0,11	0,14	-0,73	0,67

1.5. Zajszűrés (Noise)

	SOP 126/E		SOP 128/C		SOP 152/A		CSDO 1/D		Összes	
Noise	igen	nem	igen	nem	igen	nem	igen	nem	igen	nem
min	0,46	-0,58	0,55	-0,41	1,52	-1,38	0,05	-0,07	0,54	-0,66
median	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,04	-0,04	0,00	0,00	0,01	-0,01
max	0,00	0,00	0,28	-0,20	0,11	-0,14	0,00	0,00	0,10	-0,11
CR 90	-0,03	0,03	0,01	0,00	-0,07	0,07	0,00	0,00	-0,02	0,03
CR 95	-0,04	0,04	0,04	-0,03	-0,09	0,08	0,00	0,00	-0,01	0,02
CR 99	-0,07	0,07	0,13	-0,08	-0,25	0,19	-0,01	0,01	-0,02	0,04
abs avg	-0,01	0,01	0,00	0,00	-0,04	0,04	0,00	0,00	-0,01	0,01
abs stdev	-0,01	0,01	0,02	-0,01	-0,05	0,04	0,00	0,00	-0,01	0,01
abs 90	-0,02	0,02	-0,01	0,01	-0,07	0,08	0,00	0,00	-0,02	0,03
abs 95	-0,03	0,03	0,01	0,00	-0,08	0,08	0,00	0,00	-0,02	0,03
abs 99	-0,06	0,06	0,11	-0,08	-0,16	0,12	-0,01	0,01	-0,01	0,02
abs_max	-0,46	0,58	-0,21	0,15	-1,27	1,13	-0,05	0,06	-0,38	0,46

1.6. Talajpont-osztályozási lépték (Step [m])

	SOP 126/E									
Step	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
min	0,47	0,45	0,39	0,27	0,27	0,27	0,22	-0,65	-0,62	-0,61
median	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01
max	0,07	0,05	0,03	0,02	0,00	-0,01	-0,03	-0,03	-0,04	-0,05
CR 90	-0,03	-0,03	-0,03	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	0,01	0,03	0,06
CR 95	-0,05	-0,04	-0,04	-0,03	-0,02	-0,02	-0,02	0,04	0,04	0,08
CR 99	-0,08	-0,07	-0,06	-0,05	-0,05	-0,04	-0,04	0,08	0,08	0,14
abs avg	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02
abs stdev	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,01	0,02	0,03
abs 90	-0,03	-0,03	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,01	0,05
abs 95	-0,05	-0,04	-0,03	-0,03	-0,02	-0,01	-0,01	0,02	0,03	0,07
abs 99	-0,08	-0,07	-0,06	-0,05	-0,04	-0,03	-0,02	0,06	0,07	0,13
abs_max	-0,47	-0,45	-0,39	-0,27	-0,28	-0,27	-0,22	0,64	0,62	0,62

	SOP 128/C									
Step	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
min	0,26	0,18	0,13	0,09	0,03	-0,03	-0,05	-0,12	-0,15	-0,15
median	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
max	4,92	2,83	1,32	0,49	-0,49	-1,07	-1,58	-1,74	-1,85	-1,93
CR 90	1,41	0,85	0,50	0,40	-0,14	-0,29	-0,58	-0,58	-0,76	-0,78
CR 95	2,27	1,17	0,54	0,35	-0,28	-0,47	-0,77	-0,78	-0,94	-0,99
CR 99	4,05	2,15	1,09	0,24	-0,63	-0,90	-1,22	-1,28	-1,44	-1,52
abs_avg	0,20	0,11	0,06	0,03	-0,04	-0,05	-0,08	-0,08	-0,09	-0,10
abs_stdev	0,69	0,37	0,20	0,09	-0,10	-0,15	-0,23	-0,24	-0,28	-0,29
abs_90	0,67	0,49	0,28	0,14	-0,18	-0,23	-0,28	-0,28	-0,40	-0,41
abs_95	1,38	0,83	0,50	0,38	-0,13	-0,30	-0,56	-0,56	-0,74	-0,76
abs_99	3,47	1,73	0,91	0,27	-0,54	-0,74	-1,02	-1,12	-1,25	-1,31
abs_max	3,72	1,92	0,85	0,31	-0,55	-0,84	-1,22	-1,32	-1,35	-1,38
	SOP 152/A									
Step	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
min	0,78	0,69	0,63	0,58	0,49	0,51	0,43	-1,03	-1,04	-1,07
median	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	-0,10	-0,06	-0,06
max	2,37	0,44	0,04	0,01	-0,03	-0,21	-0,40	-0,88	-0,97	-1,03
CR 90	0,55	0,19	0,08	0,04	-0,01	-0,34	-0,38	-0,22	-0,22	-0,23
CR 95	0,99	0,14	0,06	0,06	0,04	-0,26	-0,41	-0,36	-0,38	-0,42
CR 99	1,61	0,05	-0,16	-0,14	-0,13	-0,30	-0,51	-0,36	-0,43	-0,51
abs_avg	0,06	-0,01	-0,04	-0,04	-0,04	-0,06	-0,06	0,04	0,02	0,02
abs_stdev	0,25	0,02	-0,02	-0,03	-0,03	-0,10	-0,12	-0,05	-0,05	-0,06
abs_90	0,35	0,14	-0,09	-0,17	-0,19	-0,22	-0,22	0,02	0,02	0,02
abs_95	0,50	0,19	0,07	0,04	-0,02	-0,34	-0,37	-0,19	-0,19	-0,21
abs_99	1,37	0,08	-0,06	-0,05	-0,05	-0,26	-0,47	-0,34	-0,41	-0,47
abs_max	0,67	-0,37	-0,58	-0,57	-0,50	-0,67	-0,77	0,42	0,36	0,34
	CSDO 1/D									
Step	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
min	0,07	0,07	0,06	0,04	0,04	0,03	0,02	-0,06	-0,19	-0,09
median	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
max	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
CR 90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CR 95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CR 99	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
abs_avg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
abs_stdev	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
abs_90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
abs_95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
abs_99	0,00	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
abs_max	-0,06	-0,06	-0,05	-0,04	-0,04	-0,03	-0,03	0,05	0,18	0,09
	Összes									
Step	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
min	0,39	0,36	0,31	0,25	0,21	0,19	0,15	-0,37	-0,39	-0,38
median	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	-0,02	-0,01	-0,02
max	2,25	1,11	0,49	0,23	-0,14	-0,39	-0,62	-0,77	-0,82	-0,85
CR 90	0,62	0,35	0,21	0,16	-0,04	-0,17	-0,28	-0,24	-0,30	-0,30
CR 95	1,02	0,46	0,23	0,15	-0,07	-0,20	-0,35	-0,34	-0,39	-0,41
CR 99	1,74	0,76	0,34	0,09	-0,21	-0,35	-0,52	-0,49	-0,54	-0,57
abs_avg	0,08	0,04	0,02	0,00	-0,02	-0,03	-0,04	-0,02	-0,02	-0,02
abs_stdev	0,29	0,14	0,07	0,03	-0,04	-0,07	-0,10	-0,09	-0,10	-0,10
abs_90	0,33	0,22	0,09	0,02	-0,08	-0,11	-0,13	-0,08	-0,12	-0,11
abs_95	0,60	0,35	0,20	0,15	-0,04	-0,17	-0,28	-0,23	-0,29	-0,28
abs_99	1,48	0,64	0,32	0,11	-0,17	-0,29	-0,44	-0,43	-0,48	-0,49
abs_max	1,28	0,46	0,06	-0,08	-0,34	-0,49	-0,62	-0,23	-0,23	-0,26

1.7. Szórás alapú szűrés (StD)

	SOP 126/E		SOP 128/C		SOP 152/A		CSDO 1/D		Összes	
StD	igen	nem	igen	nem	igen	nem	igen	nem	igen	nem
min	0,21	-0,19	0,04	-0,04	0,16	-0,17	0,00	0,00	0,10	-0,09
median	-0,01	0,01	-0,01	0,01	-0,01	0,01	-0,01	0,01	-0,01	0,01
max	-0,02	0,02	-0,01	0,01	-0,02	0,02	-0,01	0,01	-0,01	0,01
CR 90	0,00	0,00	-0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CR 95	0,00	0,00	-0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CR 99	0,00	0,01	-0,01	0,01	-0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
abs avg	0,01	-0,01	0,00	0,00	0,01	-0,01	0,00	-0,01	0,00	0,00
abs stdev	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
abs 90	0,01	-0,01	0,00	0,00	0,01	-0,01	0,01	-0,01	0,00	0,00
abs 95	0,01	-0,01	0,00	0,00	0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
abs 99	0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
abs_max	-0,21	0,19	-0,03	0,03	-0,16	0,17	0,00	0,01	-0,09	0,07

1.8. Célzott simítás (HF [%])

	SOP 126/E			SOP 128/C			SOP 152/A			CSDO 1/D			Összes		
HF	nem	40	60	nem	40	60	nem	40	60	nem	40	60	nem	40	60
min	-2,04	0,96	0,93	-3,70	1,52	1,39	-7,75	3,85	3,72	-0,17	0,09	0,07	-3,18	1,62	1,54
median	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
max	0,01	-0,01	0,00	0,58	-0,19	-0,10	0,32	-0,17	-0,14	0,00	0,00	0,00	0,23	-0,11	-0,08
CR 90	0,00	0,00	0,00	0,02	-0,01	0,00	0,08	-0,03	-0,03	0,00	0,00	0,00	0,02	-0,01	-0,01
CR 95	0,00	0,00	0,00	0,11	-0,03	-0,02	0,14	-0,07	-0,05	0,00	0,00	0,00	0,07	-0,03	-0,02
CR 99	0,02	-0,01	-0,01	0,47	-0,18	-0,09	0,34	-0,17	-0,15	0,00	0,00	0,00	0,22	-0,10	-0,07
abs avg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
abs stdev	0,01	0,00	0,00	0,07	-0,02	-0,02	0,11	-0,05	-0,05	0,00	0,00	0,00	0,05	-0,02	-0,02
abs 90	0,00	0,00	0,00	-0,02	0,00	0,01	0,03	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
abs 95	0,00	0,00	0,00	0,03	-0,01	0,00	0,08	-0,03	-0,03	0,00	0,00	0,00	0,02	-0,01	-0,01
abs 99	0,01	-0,01	0,00	0,23	-0,09	-0,06	0,19	-0,10	-0,09	0,00	0,00	0,00	0,12	-0,05	-0,04
abs_max	2,04	-0,96	-0,93	3,24	-1,30	-1,15	7,71	-3,86	-3,73	0,17	-0,09	-0,07	3,02	-1,56	-1,47

2. Melléklet – Koronacsúcs-azonosítás és koronavetület-lehatárolás eredményeire vonatkozó paraméterhatások ⁵

2.1. Repülési magasság (h_0 [m]) – koronacsúcs-azonosítás

	SOP 126/E			SOP 128/C			SOP 152/A			CSDO 1/D			Összes		
h_0	120	100	80	120	100	80	120	100	80	120	100	80	120	100	80
Talált	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	-6
Pontos	0	0	1	0	0	0	-1	-1	1	1	-1	-1	4	1	-8
Kihagy.	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	4	-17
Többlet	0	0	0	0	0	0	1	1	-2	-1	0	1	-3	0	5
Összes	0	0	1	0	0	0	1	1	-2	-1	0	2	0	0	0
Pontsz.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

2.2. Repülési magasság (h_0 [m]) – koronavetület-lehatárolás

	SOP 126/E			SOP 128/C			SOP 152/A			CSDO 1/D			Összes		
h_0	120	100	80	120	100	80	120	100	80	120	100	80	120	100	80
Talált	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-4
Pontos	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3	0	-8
Kihagy.	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	3	-21
Többlet	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	3
Összes	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	-3
Pontsz.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01

2.3. Bázisirányú átfedés (A%) – koronacsúcs-azonosítás

	SOP 126/E			SOP 128/C			SOP 152/A			CSDO 1/D			Összes		
A%	90	80	70	90	80	70	90	80	70	90	80	70	90	80	70
Talált	0	0	-1	0	0	-1	1	-2	-1	1	0	0	2	-2	-1
Pontos	0	0	-1	0	0	0	0	-1	-1	0	0	-1	2	-2	-2
Kihagy.	0	0	1	0	0	1	-1	2	1	-1	0	0	4	-3	-4
Többlet	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	1	-1	0	0	1	0
Összes	1	-1	-2	0	0	-2	1	-3	0	2	-1	-1	1	-1	-1
Pontsz.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

2.4. Bázisirányú átfedés (A%) – koronavetület-lehatárolás

	SOP 126/E			SOP 128/C			SOP 152/A			CSDO 1/D			Összes		
A%	90	80	70	90	80	70	90	80	70	90	80	70	90	80	70
Talált	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0
Pontos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1
Kihagy.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	-3	-4
Többlet	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Összes	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	1	0	-1
Pontsz.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

2.5. Sorok közötti átfedés (B%) – koronacsúcs-azonosítás

	SOP 126/E			SOP 128/C			SOP 152/A			CSDO 1/D			Összes		
B%	90	80	70	90	80	70	90	80	70	90	80	70	90	80	70
Talált	0	-1	-	0	0	-1	0	0	-1	1	0	0	3	-1	-10
Pontos	1	-1	-	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	4	-1	-14
Kihagy.	0	1	-	0	0	1	0	0	1	-1	0	0	9	-3	-27
Többlet	0	0	-	0	0	0	0	-1	2	0	0	0	-2	0	9
Összes	1	-1	-	0	1	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	-1
Pontsz.	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

⁵ A megbízhatósági szűrő és a lasnoise zajszűrés ebben a léptékben nem mutatott megjeleníthető mértékű hatásokat

2.6. Sorok közötti átfedés (B%) – koronavetület-lehatárolás

	SOP 126/E			SOP 128/C			SOP 152/A			CSDO 1/D			Összes		
B%	90	80	70	90	80	70	90	80	70	90	80	70	90	80	70
Talált	0	-1	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-8
Pontos	0	-1	-	0	0	-1	0	0	0	1	0	-1	3	-1	-14
Kihagy.	0	1	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	-3	-30
Többslet	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	6
Összes	0	-1	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-4
Pontsz.	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01

2.7. Borított felszínmodell felbontása (res [m/pixel]) – koronacsúcs-azonosítás

	SOP 126/E					SOP 128/C					SOP 152/A				
res	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Talált	8	10	11	-11	-20	3	4	6	-7	-12	4	6	6	-5	-10
Pontos	3	3	5	-5	-4	-1	0	2	-1	2	-2	-2	-1	2	2
Kihagy.	-8	-10	-11	11	20	-3	-4	-6	8	12	-4	-6	-6	5	10
Többslet	7	8	8	2	-25	4	4	5	1	-36	13	14	14	-3	-32
Összes	16	18	18	-8	-44	7	8	11	-7	-48	18	19	20	-7	-40
Pontsz.	0,01	0,01	0,02	-0,02	-0,02	0,00	0,01	0,01	-0,02	0,02	-0,01	-0,01	0,00	-0,01	0,02
	CSDO 1/D					Összes									
res	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5					
Talált	3	6	6	-10	-14	4	5	7	-9	-14					
Pontos	0	1	2	-2	2	-1	0	0	-2	1					
Kihagy.	-3	-6	-6	10	14	-4	-5	-6	8	14					
Többslet	4	3	6	0	-38	9	8	11	2	-34					
Összes	7	9	12	-9	-51	12	14	17	-6	-48					
Pontsz.	0,00	0,01	0,01	-0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	-0,02	0,01					

2.8. Borított felszínmodell felbontása (res [m/pixel]) – koronavetület-lehatárolás

	SOP 126/E					SOP 128/C					SOP 152/A				
res	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Talált	3	4	6	-6	-9	1	3	4	-2	-5	1	2	4	-2	-6
Pontos	0	2	4	-3	-4	-2	0	1	1	0	-2	-1	1	1	0
Kihagy.	-3	-4	-6	6	9	-1	-3	-4	2	5	-1	-2	-4	2	6
Többslet	3	4	3	-3	-8	5	6	6	-4	-10	5	6	5	-5	-12
Összes	4	5	7	-6	-11	3	6	7	-3	-10	3	5	6	-4	-11
Pontsz.	0,00	0,01	0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	CSDO 1/D					Összes									
res	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5					
Talált	2	4	6	-4	-6	2	3	5	-3	-7					
Pontos	-1	0	2	0	-2	-1	0	1	0	-1					
Kihagy.	-2	-4	-6	4	6	-2	-2	-3	3	6					
Többslet	4	5	6	-3	-8	4	5	5	-5	-10					
Összes	4	5	7	-4	-9	3	5	6	-4	-11					
Pontsz.	0,00	0,00	0,01	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	-0,01					

2.9. Rögzített maximumkeresés ablakmérete (M_r [m]) – koronacsúcs-azonosítás

	SOP 126/E				SOP 128/C				SOP 152/A			
M_r	2	3	4	5	2	3	4	5	2	3	4	5
Talált	49	25	-25	-67	29	20	-10	-37	26	19	-5	-32
Pontos	-2	17	9	-24	-14	9	13	3	-22	1	9	6
Kihagy.	-48	-25	25	67	-29	-20	10	37	-25	-19	5	32
Többslet	90	-6	-47	-59	104	-9	-62	-79	137	19	-46	-72
Összes	138	20	-72	-124	133	13	-73	-118	161	40	-52	-103
Pontsz.	0,01	0,05	0,02	-0,08	-0,08	0,06	0,07	0,02	-0,16	0,02	0,06	0,03

	CSDO 1/D				Összes			
M_r	2	3	4	5	2	3	4	5
Talált	24	19	-6	-35	31	21	-10	-40
Pontos	-23	9	16	11	-19	7	11	2
Kihagy.	-24	-19	6	35	-31	-21	9	40
Többlet	102	-8	-61	-80	119	2	-53	-71
Összes	125	13	-67	-113	148	27	-63	-112
Pontsz.	-0,10	0,06	0,08	0,03	-0,10	0,05	0,06	0,01

2.10. Rögzített maximumkeresés ablakmérete (M_r [m]) – koronavetület-lehatárolás

	SOP 126/E				SOP 128/C				SOP 152/A			
M_r	2	3	4	5	2	3	4	5	2	3	4	5
Talált	28	15	-17	-46	18	12	-9	-29	17	13	-2	-25
Pontos	11	10	-4	-27	-1	5	2	-8	-6	3	5	0
Kihagy.	-28	-15	17	46	-18	-12	9	29	-17	-13	2	25
Többlet	27	2	-15	-24	39	5	-22	-38	47	13	-22	-43
Összes	36	14	-22	-52	38	13	-21	-47	42	17	-16	-43
Pontsz.	0,03	0,03	-0,02	-0,08	0,00	0,03	0,01	-0,04	-0,03	0,03	0,03	-0,01

	CSDO 1/D				Összes			
M_r	2	3	4	5	2	3	4	5
Talált	13	11	-5	-26	22	16	-4	-26
Pontos	-5	4	4	-4	-1	5	3	-7
Kihagy.	-13	-11	5	26	-22	-16	4	26
Többlet	30	6	-17	-29	48	14	-15	-29
Összes	25	11	-13	-35	44	20	-11	-38
Pontsz.	-0,01	0,02	0,01	-0,03	-0,01	0,03	0,02	-0,03

2.11. Simító maximumkeresés ablakmérete (M_s [m]) – koronacsúcs-azonosítás

	SOP 126/E				SOP 128/C				SOP 152/A			
M_r	2	3	4	5	2	3	4	5	2	3	4	5
Talált	86	30	-44	-102	53	30	-14	-49	40	21	-15	-47
Pontos	7	21	3	-49	-22	12	15	-1	-31	4	13	8
Kihagy.	-86	-30	45	102	-53	-30	15	49	-40	-21	15	47
Többlet	137	-15	-60	-70	181	-6	-72	-89	189	3	-71	-94
Összes	226	8	-104	-162	231	21	-87	-132	230	22	-88	-137
Pontsz.	0,05	0,06	-0,01	-0,15	-0,12	0,08	0,08	-0,01	-0,21	0,05	0,08	0,03

	CSDO 1/D				Összes			
M_r	2	3	4	5	2	3	4	5
Talált	63	35	-18	-57	52	25	-24	-63
Pontos	-28	16	18	-1	-19	13	14	-5
Kihagy.	-63	-35	18	57	-52	-25	23	62
Többlet	190	-12	-75	-90	154	-17	-78	-94
Összes	254	20	-93	-144	206	5	-104	-151
Pontsz.	-0,10	0,09	0,08	-0,03	-0,09	0,08	0,07	-0,02

2.12. Simító maximumkeresés ablakmérete (M_s [m]) – koronavetület-lehatárolás

	SOP 126/E				SOP 128/C				SOP 152/A			
M_s	2	3	4	5	2	3	4	5	2	3	4	5
Talált	51	22	-26	-73	32	16	-11	-38	27	14	-12	-38
Pontos	25	18	-9	-49	3	8	2	-14	-3	5	4	-8
Kihagy.	-51	-22	26	73	-32	-16	11	38	-27	-14	12	38
Többlet	37	1	-20	-30	57	9	-25	-41	65	7	-32	-52
Összes	62	21	-31	-80	59	18	-24	-55	60	14	-28	-60
Pontsz.	0,08	0,05	-0,03	-0,14	0,02	0,04	0,01	-0,07	-0,02	0,03	0,02	-0,05

	CSDO 1/D				Összes			
M _s	2	3	4	5	2	3	4	5
Talált	42	23	-13	-50	39	21	-12	-44
Pontos	5	11	2	-21	7	10	3	-19
Kihagy.	-42	-23	13	50	-38	-21	12	44
Többslet	63	10	-22	-36	57	10	-23	-39
Összes	66	23	-21	-58	63	23	-22	-58
Pontsz.	0,04	0,05	0,00	-0,10	0,03	0,05	0,01	-0,08

2.13. Maximális koronaátmérő (D_{max} [m]) – koronavetület-lehatárolás

	SOP 126/E								
D _{max}	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Talált	42	42	37	24	9	-17	-33	-54	-64
Pontos	15	20	21	20	13	2	-18	-33	-42
Kihagy.	-42	-42	-37	-24	-9	17	33	54	64
Többlet	45	32	15	0	-10	-17	-23	-26	-27
Összes	55	51	39	24	2	-20	-40	-60	-69
Pontsz.	0,05	0,06	0,06	0,06	0,03	0,00	-0,05	-0,10	-0,12
	SOP 128/C								
D _{max}	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Talált	24	24	22	15	7	-6	-18	-32	-39
Pontos	-5	0	5	7	7	6	1	-7	-12
Kihagy.	-24	-24	-22	-15	-7	6	18	32	39
Többlet	56	46	27	9	-9	-22	-33	-40	-43
Összes	49	44	31	18	0	-16	-32	-48	-55
Pontsz.	-0,01	0,01	0,03	0,03	0,03	0,02	0,00	-0,04	-0,06
	SOP 152/A								
D _{max}	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Talált	18	18	18	13	5	-5	-19	-33	-40
Pontos	-14	-7	3	7	9	9	6	-2	-7
Kihagy.	-18	-18	-18	-14	-5	5	19	33	40
Többlet	59	48	26	4	-17	-30	-42	-50	-52
Összes	46	40	25	13	-4	-20	-37	-53	-60
Pontsz.	-0,06	-0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,02	-0,02	-0,05
	CSDO 1/D								
D _{max}	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Talált	28	29	28	22	12	-3	-19	-35	-43
Pontos	-11	-3	6	10	10	9	3	-9	-16
Kihagy.	-28	-29	-28	-22	-12	3	19	35	43
Többlet	64	51	31	7	-8	-19	-27	-32	-33
Összes	51	47	34	23	7	-10	-26	-43	-51
Pontsz.	-0,02	0,01	0,04	0,04	0,04	0,03	0,00	-0,06	-0,09
	Összes								
D _{max}	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Talált	22	22	21	14	4	-10	-24	-39	-47
Pontos	-6	0	6	7	7	5	0	-12	-18
Kihagy.	-22	-22	-21	-14	-5	10	24	39	46
Többlet	51	41	22	3	-13	-25	-33	-39	-41
Összes	43	38	26	14	-3	-19	-36	-52	-60
Pontsz.	-0,02	0,01	0,03	0,03	0,03	0,02	-0,01	-0,06	-0,08

3. Melléklet – Lejtés, kitétség és domborzatformák kategorizálása után kapott hibamátrixok

3.1. Lejtés – Dudlesz (entrópia > 1,5)

	SÍK	5	10	15	20	>20	VÁLT
SÍK	4	1	0	0	0	0	0
5	3	78	5	0	0	0	3
10	0	1	19	0	0	0	1
15	0	0	0	0	0	0	2
20	0	0	0	0	0	0	0
VÁLT	0	12	2	1	0	0	23

3.2. Lejtés – Réde (F & (S | E))

	SÍK	5	10	15	20	VÁLT
SÍK	17	17	0	0	0	0
5	4	35	9	0	0	0
10	1	31	63	7	0	4
15	0	1	31	3	0	0
20	0	0	2	3	2	3
VÁLT	0	9	34	1	0	7

3.3. Kitétség – Dudlesz (entrópia > 1,75)

	SÍK	É	ÉK	K	DK	D	DNY	NY	ÉNY	VÁLT
SÍK	4	0	0	1	0	0	0	0	0	0
É	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
ÉK	0	0	16	4	0	0	0	0	0	0
K	2	0	2	43	0	0	0	0	0	4
DK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DNY	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0
NY	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2
ÉNY	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1
VÁLT	0	1	3	11	0	0	2	0	0	46

3.4. Kitétség – Réde (F & (S | E))

	SÍK	É	ÉK	K	DK	D	DNY	NY	ÉNY	VÁLT
SÍK	17	1	2	0	0	1	1	1	0	5
É	1	3	6	0	0	0	0	0	0	2
ÉK	2	2	28	4	0	0	0	0	0	4
K	1	0	3	5	0	0	0	0	0	5
DK	1	0	1	0	0	1	0	0	0	4
D	1	0	1	0	0	0	1	0	0	2
DNY	0	0	0	0	0	0	24	2	0	7
NY	0	0	1	0	0	0	0	7	1	5
ÉNY	3	0	0	0	0	0	0	2	1	6
VÁLT	6	0	7	1	0	0	9	5	0	91

3.5. Domborzatformák – Dudlesz (frekvencia < 0,3) ⁶

	5	6	7	4	1	VÁLT
SÍK	3	1	0	1	0	0
OLD	2	79	2	9	0	0
MÉT	0	0	2	0	0	0
VÁLT	1	36	13	5	1	0

3.6. Domborzatformák – Réde ((F | S) & E)

	5	6	7	4	1	VÁLT
SÍK	8	12	0	6	0	0
OLD	3	141	17	10	1	21
TETŐ	0	4	3	1	0	0
VHL	0	3	0	3	0	1
MÉT	0	1	0	2	0	0
ÁVM	4	2	0	5	0	0
VÁLT	0	12	5	3	0	16

⁶ 5 – Sík; 6 – Nyílt lejtő; 7 – Fennsík, lejtők magasabb részei; 4 – U-alakú völgy; 1 – Mély völgy/vízfolyás