

Soproni Egyetem

Doktori értekezés tézisei

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

Szász Botond

Sopron

2026

Roth Gyula Erdészeti és Vadgazdálkodási Tudományok Doktori
Iskola

Geoinformatika program

Témavezető: Dr. Király Géza

Az értekezés tárgya

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.

Mindezeket összesítve tehát az értekezés két részből tevődik össze. A szerző első körben UAV-alapú légi fotogrammetriai felmérések eredményeként létrehozott pontfelhők és felszínmodellek előállíthatóságát, osztályozási és feldolgozási lehetőségeit mutatja be, ezt követően pedig kisrepülő légi lézerszkennelés útján előállított nagy kiterjedésű és nagy felbontású domborzatmodellek elemzését ismerteti erdészeti termőhelyi szempontok figyelembevételével.

A kutatás célkitűzései

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 javaslattevél.
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 törzspozíció-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 erdőrészlet-szintű összevetése az Országos Erdőállomány Adattár vonatkozó adataival.

A kutatás módszertana

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

A vizsgálatokhoz a szerző négy, vegyes fafajszerkezetű, idősebb korú erdőrészletben jelölt ki 100x100 méter kiterjedésű mintaterületeket, ahol statikus földi lézerszkenneléssel mért referenciaadatokat a domborzatra, valamint a törzspozíciókra és a mellmagassági átmérőkre való tekintettel.

A kijelölt mintaterületeken három különböző (80, 100, 120 méter) repülési magasságból, 90%-os bázisirányú és 90%-os sorok közötti átfedéssel, lombos és lombtalan állapotban is légifényképezést hajtott végre egy *DJI Mavic 2 Pro* típusú UAV-val. Az így elkészült képanyag szűrésével 80, illetve 70%-os átfedéseket szimulálva, a repülési paraméterek több kombinációjából fotogrammetriai szoftverrel pontfelhőket állított elő.

A pontfelhők feldolgozására megalkotott egy folyamatsort, amely különböző zajsűrés, ritkítási és osztályozási lépéseket tartalmazva a lombtalan állapotú felvételekből domborzatmodell, a lombos állapotúakból pedig lombkorona-modell előállítására irányul. A domborzatmodell-előállítási folyamatsor részeként kifejlesztett egy célzott simítási eljárást, amely a szűrés eljárással által esetlegesen meghagyott pontzajból adódó durva hibák raszteres modellen végzett mérséklésére alkalmas. A lombkoronamodellek felhasználásával faegyed-azonosítást végzett kétlépcsős lokális maximumkeresést, majd inverz vízgyűjtő eljárás alapján lombkorona-szegmentálást alkalmazva. Emellett a legmagasabb átfedéssel készült képekből előállított, lombtalan állapotú pontfelhőn is végzett pontcsoportosulások detektálásán alapuló törzsazonosítást.

Az egyes adatgyűjtési és feldolgozási lépések, illetve az általuk felvehető paraméterértékek több kombinációjából kapott eredmények tekintetében a szerző SHAP-elemzéssel vizsgálta, hogy azok milyen mértékben és milyen irányban hatnak az egyes végeredmények pontosságára, illetve hibáira.

2. Kisrepülő légi lézerszkenneléssel előállított domborzatmodellek elemzése

A SoilSense projekt keretein belül eddig két mintaterület került kijelölésre: az egyik a Dudlesz-erdő területén, a másik pedig Réde községhatárán belül, melyek összesen több, mint 3000 hektárt fednek le. Ezek a mintaterületek szintén részét képezték a szerző doktori kutatásainak, ahol kisrepülő légi lézeres letapogatásból származó, nagy felbontású domborzatmodellek elemzését végezte, melyhez lejtést, kitettséget és domborzatformákat vezetett le.

A domborzatformák osztályozásához kétlépcsős topográfiai pozíció index (TPI) elemzést végzett. Az ehhez szükséges vizsgálati sugárértékek meghatározásához egy olyan empirikus modellt alkotott meg, amely objektíven képes megválasztani azokat, kiindulva a modell felbontásából és a domborzat helyi jellegzetességeiből.

Az így levezetett tematikus raszterek segítségével felülvizsgálta az Adattár vonatkozó adatait a két mintaterületen elhelyezkedő erdőrészek tekintetében. Mivel a változó kategória az Erdőrendezési Útmutató szerint nincs egyértelműen definiálva, ezért az erdőrészekre eső részkategóriák arányainak statisztikai elemzésével (frekvencia, stabilitás, Shannon-entrópia) vizsgálta az említett kategóriába sorolás matematikai szabályainak levezethetőségét.

Eredmények

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

A legtöbb repülési paraméterkombináció képanyaga sikeres képegyeztetést eredményezett, lombtalan állapotban 20, míg lombos állapotban az esetek 39%-ában volt sikertelen a képek tájékozása, így ennyivel redukálódott a mintaterületenkénti tényleges kombinációk száma.

A domborzatmodellek átlagos hibájára egyértelműen a repülési paraméterek gyakorolják a legjelentősebb hatást, ezt némileg lemaradva követi a talajpont-osztályozás léptéke, de nem elhanyagolható a zajszűrés eljárások hatásmértéke sem. A kiugró hibák esetén ugyan ezek továbbra is jelentősek, egyértelmű dominanciát mutat a szerző által fejlesztett célzott simítási eljárás. Az így kapott eltérési eredmények az átlagos hiba tekintetében 6 cm, míg a maximális kiugró hibák esetén 40 cm a legpontosabb domborzatmodellek tekintetében.

A lombos modellen történő egyesfa-azonosítás pontosságára a repülési paraméterek kevésbé (mindössze pár darab helyesen azonosított faegyed erejéig), a szűrés eljárások pedig gyakorlatilag egyáltalán nem hatnak. A kapott eredmények így leginkább a feldolgozási paraméterek megválasztásától függenek. A lokális maximumkeresésen alapuló koronacsúcs-azonosítás átlagos találati aránya 76%, míg ezt az inverz vízgyűjtő eljárás alapján végzett koronavetület-lehatárolás enyhén növelve, 78%-os arányt eredményezett, mindemellett pedig néhány százalékkal csökkentette a többletdetektálásokat, így összességében egyértelműen javította a detektálási pontosságot.

A lombtalan pontfelhőn végzett törzspozíció-detektálás eredménye két tényezőtől függ leginkább: fényviszonyok és koronaszerkezet. A legjobb eredményt hozó mintaterületen a találati arány 95% feletti, két másiknál 90% körüli, míg a negyedik, leggyengébben teljesítő mintaterület esetén 68% volt.

2. Domborzatmodellek elemzése, összehasonlítás az adattári adatokkal

A két vizsgálati terület (a Dudlesz-erdő és a rédei erdőtömb) eltérő domborzati jellegzetességeiből adódóan eltérő sugarakat kíván meg a kétlépcsős, TPI-alapú domborzatforma-osztályozáshoz: előbbi esetén 25 m és 100 m, míg utóbbinál 30 m és 80 m. Ezt a változatosságot támasztja alá a lejtés és kitettség elemzése is. A Dudlesz területének túlnyomó része a $2-5^\circ$ közötti lejtéskategóriába tartozik, míg a rédei erdőtömb esetén eggyel feljebb tolódva, az $5-10^\circ$ közötti kategória dominanciája figyelhető meg. A kitettség a Dudlesz esetén a keleti-északkeleti tartomány felé tolódik el erőteljesen, Réde esetén viszont bizonyos mértékű egyensúly figyelhető meg a délnyugati-nyugati és északkeleti-keleti kitettségek között.

A levezetett lejtés-, kitettség-, és domborzatforma-kategóriák erdőrésztlet-szintű megoszlásának vizsgálata, illetve azok frekvenciájának, stabilitásának és Shannon-entrópiájának elemzésével a változó kategóriára több feltétel is meghatározásra került, azonban a legjobb esetben is mindössze 63%-os egyezés volt megfigyelhető az adattári adatokkal a két mintaterület átlagában, így ezen kategória matematikai szabályai nem voltak levezethetők.

Következtetések

1. UAV-alapú fotogrammetria során előállított pontfelhők és felszínmodellek felhasználhatóság

A domborzatmodellek tekintetében a repülési magasság és az átfedések mértéke, illetve azok kombinációja igencsak nagy hatással van a pontosságra. Ezek a paraméterek különösen kiemelkednek a változó fényviszonyok és sűrű koronaszerkezet mellett. A pontfelhőfeldolgozási lépések közül a megbízhatósági szűrő, valamint a talajpontok osztályozási léptéke bizonyult meghatározónak. Az eredmények alapján a legjobb pontosságot a 100 méteres repülési magasság, 80%-os bázisirányú és 90%-os sorok közötti átfedés, a legalacsonyabb megbízhatósági pontok szűrése, valamint a 9 méteres talajpont-osztályozási lépték biztosítja, kiegészítve a szerző által fejlesztett célzott simítással, amely megfelelően képes redukálni a durva hibák kiterjedését és mértékét.

A koronaak azonosításának végeredményét a repülési paraméterek csak minimálisan befolyásolják, így elegendőek azok a nagyobb repülési magasságok és alacsonyabb átfedések, ahol a képegyeztetés még sikeresen végbemegy. A detektálás pontosságát elsősorban a feldolgozási paraméterek, azaz a lokális maximumkeresés ablakméretei, illetve az inverz vízgyűjtő eljárás maximális koronaátmérője határozza meg, de nem elhanyagolható a rászteres lombkoronamodell felbontása sem. A vizsgálatok alapján a legkedvezőbb detektálási arány 120 méteres repülési magassággal, 80%-os átfedésekkel, 0,3 m/pixel felbontással és 3 méteres keresési ablakmérettel, valamint 7 méteres maximális koronaátmérővel érhető el.

A törzsdetektálás eredményei alapján a repülési magasság optimális értéke erősen függ az állomány sűrűségétől. Ritkább koronastruktúráknál a 120 méteres repülés elegendő, érdekes módon ebben az esetben az alacsonyabb repülési magasság alacsonyabb detektálási arányokat produkált. Sűrűbb ágszerkezetű, valamint jelentős fenyőeleggyel tarkított faállományokban a 100 és 80 méteres magasság bizonyult hatékonyabbnak. A zajszűrők alkalmazása

jelentős pontvesztést okozott, ezért mellőzése indokolt, mivel a cél a törzspozíciók közelítő azonosítása, nem pedig az átmérő pontos becslése. A legsúlyosabb korlátozó tényezőt a sűrű koronaszerkezet és a közvetlen megvilágítás együttes hatása jelenti, ezért ilyen körülmények között az ilyen célú légifényképezés nem ajánlott.

2. Domborzati viszonyokra vonatkozó adattári adatokkal való összehasonlítás

Az adattári és a modellezett adatok összevetése alapján megállapítható, hogy az Országos Erdőállomány Adattár domborzati rovatainak (lejtés, fekvés, domborzatformák) pontossága és felépítése fejlesztésre szorul. A vizsgálatok szerint a változatosabb terepviszonyok mellett jelentősebb eltérések tapasztalhatók, de nem elhanyagolhatóak a kevésbé tagolt domborzatú területek adattárolási hibái sem.

A korszerű, országos lefedettségű domborzatmodellek alkalmazásával lehetőség nyílna az adattár frissítésére. Erre vonatkozóan a szerző több javaslatot is megfogalmazott, illetve elemezte azok megvalósíthatósági lehetőségeit és korlátait. Javaslatai között szerepel a változó kategória számszerűsítése, de tárgyalja annak kivezetését, a több részkategóriás, részarány-mértékkel kiegészített tárolás lehetőségét, valamint az erdőrésztlet-megosztás kérdéskörét is.

Az értekezés tézisei

1. A szerző kidolgozott 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. Elvégezte a feldolgozási sor paramétereinek hatásvizsgálatát, és javaslatot tett azok optimális értékére.
2. A fenti feldolgozási sor egyes kimenetei vonatkozásában meghatározta az optimális repülési paramétereket (repülési magasság, bázisirányú és sorok közötti átfedés) *DJI Mavic 2 Pro* típusú UAV-val végzett erdészeti célú adatgyűjtéshez.
3. Kifejlesztett egy olyan célzott simítási algoritmust, amely a hagyományos, a modellek teljes felületén végzett eljárásokkal szemben képes azonosítani, majd célzottan eltávolítani a talajpont-osztályozás és zajsűrés 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. A szerző igazolta, hogy a koronacsúcsok raszteres felszínmodellén végzett, lokális maximumként történő azonosítása inverz vízgyűjtő eljáráson alapuló koronaszegmentálással kiegészítve jelentősen pontosítható, a két módszer kombinálásával a törzsszámok pontosabban becsülhetővé válnak.
5. A szerző igazolta, 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. Kidolgozott egy empirikus modellt, amely a terepi jellegzetességeket figyelembe véve alkalmas a kétlépcsős

topográfiai pozíció index (TPI) vizsgálat paramétereinek objektív meghatározására.

7. Felülvizsgálta az Országos Erdőállomány Adattár domborzatra vonatkozó adatait (lejtés, kitettség, domborzatformák), ez alapján pedig javaslatokat fogalmazott meg azok tartalmának, illetve tárolásának fejlesztésére.

Az értekezéshez kapcsolódó publikációk listája

Szakdolgozatok, diplomatervek

SZÁSZ B. (2020): Faállomány-jellemzők vizsgálata UAV-k segítségével a Szombathelyi Erdészeti Zrt. területén. Diplomamunka. Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar

SZÁSZ B. (2024): Dendrometriai, topográfiai és orográfiai paraméterek levezetése és összehasonlítása légi lézeres pontfelhőből a Dudles területén. Szakdolgozat. Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar

Könyvrészletek

SZÁSZ B., KIRÁLY G. (2022): UAV-alapú légifelvételek készítése és feldolgozása az Erdőrezervátum-program keretein belül. In: CZIMBER K., HEIL B. (szerk.): Az Erdőmérnöki Kar tudományos kiadványa 2022. Soproni Egyetem Kiadó, Sopron

Lektorált folyóiratcikkek

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.

SZÁSZ B., BROLLY G., KIRÁLY G. (2026): Impact of UAV Photogrammetric Flight and Processing Parameters on Terrain Modelling Accuracy in Ageing Deciduous and Mixed Forests: A SHAP-Based Analysis. *Geomatics*, 6(1), pp. 17.

Konferenciakiadványok

SZÁSZ B., KIRÁLY G (2021): Faállomány-jellemzők vizsgálata UAV-k segítségével a Szombathelyi Erdészeti Zrt.-nél. In: GRIBOVSKÍ Z., KALICZ P., PÉTERFALVI J. (szerk.): Jankó Sándor díj konferencia. Soproni Egyetem Kiadó, Sopron

SZONDI I., SZÁSZ B., KIRÁLY G. (2022): GY-021 ERTI mintaterület UAV alapú felvételezése. In: GRIBOVSKÍ Z., ZAGYVAINÉ K. K. A. (szerk.): Jankó Sándor díj konferencia. Soproni Egyetem Kiadó, Sopron

SZÁSZ B., KIRÁLY G., BROLLY G. (2022): Digitális domborzatmodell-előállítás lehetőségeinek vizsgálata faállományok alatt UAV-alapú légifényképek segítségével. In: CZIMBER K. (szerk.): Erdészeti Tudományos Konferencia 2022. Soproni Egyetem Kiadó, Sopron

SZÁSZ B., CZIMBER K., KIRÁLY G. (2024): Digitális domborzatmodell-elemzés a Dudlesz-erdő területén a SoilSense projekt keretein belül. In: CZIMBER K. (szerk.): Erdészeti Tudományos Konferencia 2024. Soproni Egyetem Kiadó, Sopron

SZÁSZ B., CZIMBER K. (2026): Digitális domborzatmodell-elemzés a SoilSense projekt rédei mintaterületén. In: CZIMBER K. (szerk.): Erdészeti Tudományos Konferencia 2026. Soproni Egyetem Kiadó, Sopron