

Invazív növényfajok feltérképezése nagyfelbontású légi távérzékeléssel

Módszertani leírás és pontosság analízis a kanadai aranyvessző és a keskenylevelű ezüstfa detektálására

Huber Nóra^{1,*}

¹ Szent István egyetem

Összefoglalás— Az invazív növényfajok világméretű térhódítása szinte minden ember számára feltűnő jelenség, de csak kevesen tudják felmérni ennek valós környezeti hatásait, különösen hosszú távlatokban gondolkodva. Magyarország természetes élőhelyinek jelentős részén az inváziós fajok megjelenése és elterjedése komoly természetvédelmi problémaként jelentkezik. Elsősorban a védett területek életközösségiben való elszaporodásukkal veszélyeztetik a ritka és őshonos fajok fennmaradását. Egy invazív fajokkal fertőzött terület felszínborítási adatainak meghatározása kulcsfontosságú feladat a védekezés szempontjából. Napjainkban távérzékelési eljárások széles választéka kínálkozik a különböző természet-és tájvédelmi célok megvalósítására. Vizsgálataim során az új fejlesztésű magyar távérzékelési mérőberendezések alkalmazási hatékonyságát elemeztem két inváziós növényfaj, a kanadai aranyvessző (*Solidago canadensis*), illetve a keskenylevelű ezüstfa (*Elaeagnus angustifolia*) területi lefedettségének meghatározásában.

Index Terms: Invasive plants, Aerial remote sensing, classification, *Solidago*, *Elaeagnus*.

Kulcsszavak: Invazív növényfajok, légi távérzékelés, aranyvessző, ezüstfa.

1. Bevezetés

A kultúrnövények homogenizálódása és az ember tájtalakító tevékenysége olyan mértékben felgyorsult, hogy mára egy világméretű környezeti problémává vált az invazív növények előrenyomulása. Az invazív fajok elsősorban az őshonos vegetáció kiszorításával veszélyeztetik a természetes életközösségeket. Megjelenésük és elszaporodásuk védett és ritka növényfajok eltűnéséhez, élőhelyek pusztulásához, a biológiai sokféleség drasztikus csökkenéséhez vezet. Az ellenük való védekezés egyik alapfeltétele elterjedésük monitorozása, mely kulcsfontosságú feladattá vált világszerte.

A különböző távérzékelési technológiák fejlődése és széleskörű alkalmazása sok más tudományterület mellett, a vegetációkutatásban is komoly előrelépést jelentett, hatékony, új módszerek kialakulását elősegítve. Az információszerzés és feldolgozás terén kiemelkedő jelentőségű a speciális mérnöki felvételek kiértékelése alapján történő adatgyűjtési eljárások köre, a fotogrammetria tudománya. Egy terület növényállományának összetétele, szerkezete, valamint elterjedése nagyfelbontású légi ortofotók szoftveres elemzésével gyorsan és eredményesen, igen nagy pontossággal tanulmányozható. A vizsgálat szempontjából optimális részletgazdagság és pontosság elérését a célfeladatnak megfelelő geometriai és spektrális felbontás teszi lehetővé.

Az Interspect kutatócsoport által kifejlesztett IS 4 kamerarendszert speciálisan nagy felbontású légi felvételek készítésére tervezték. A 0,5 cm/pixel terepi felbontás elérését is elősegítő mérőkamera segítségével a vegetáció olyan sajátosságai is megfigyelhetők, mint a lombszerkezet, a levélállás, a levél- és kéregszín. A műszerrel elérhető terepi felbontás a flóra egyes elemeinek azonosítását és lehatárolását, illetve a pontos fajmeghatározást is elősegíti, míg a mérőberendezés spektrális érzékenysége az ökoфизиологikai jellemzők vizsgálati lehetőségét terjeszti ki. Kutatásom során a nagy felbontású légi felvételekből előállított ortofotó-mozaik szoftveres elemzését alkalmaztam két invazív növényfaj, a kanadai aranyvessző (*Solidago canadensis*), illetve a keskenylevelű ezüstfa (*Elaeagnus angustifolia*) területi lefedettségének meghatározásához. Célom, az alkalmazott módszer hatékonyságának és megbízhatóságának bemutatása a vizsgált fajok példáján keresztül.

2. Áttekintés

Távérzékelés során a természet folyamatairól, jelenségeiről, objektumairól a visszavert vagy az általuk kibocsátott sugárzást rögzítve jutunk információkhoz (Lóki 2002). A passzív (jelkibocsátás nélküli) távérzékelési módszerek nem befolyásolják a vizsgált felszín állapotát, elegendő távolságról elvégezve nem fejtenek ki semmiféle káros hatást a felmért felszín állat és növényvilágára, nem zavarjuk meg az ott megtalálható élőlényeket. Vagyis, a távérzékelés egy olyan eljárás, amely során a megfigyelt tárgy jellegéről és tulajdonságairól anélkül szerzünk adatokat, hogy azzal közvetlen kapcsolatba lépünk (Detrekői-Szabó 2005). Ennek megfelelően definiálhatjuk a távérzékelést úgy is, mint „a távból való megfigyelés tudományát” (Barrett-

Curtis 1992). A távérzékelés fogalma az adatszerzés mellett az adatok elemzését és kiértékelését is magába foglalja (Lóki 2002).

A fotogrammetria a görög eredetű fotos (fény), gramma (kép) és metron (mérték) szavakból származtatható szóösszetétel, mely tükörfordításban fényképmérést jelent. A fotogrammetria, mint tudományág, mérésre alkalmas fényképek, ún. mérőképek készítésével, feldolgozásával és kiértékelésével foglalkozik. Ezek a mérőképek lehetnek földi-, légi-, illetve kozmikus felvételek. „A fotogrammetriát a fényképek alapján történő alak-és méret meghatározás művészetének és tudományának” is nevezik (Kraus 1998), a távérzékeléssel beszerzett állomány geometriai helyesbítését értjük alatta.

A két definíció ismeretében megállapíthatjuk, hogy a fotogrammetria valójában a távérzékelés résztudománya, annak egyik eljárása (Nagy 1998), egy olyan a távérzékelés gyűjtőfogalmába tartozó adatnyerési forma, amely a földfelszín objektumainak közvetlen érintése nélkül teszi lehetővé azok tulajdonságainak meghatározását és mérést (Kraus 1998). Valójában a távérzékeléses adatgyűjtés és a fotogrammetria ma már elválaszthatatlan szakterületek, amelyek alkalmazása a célterkép készítés és a térbeli adatgyűjtés esetében egymás nélkül értelmezhetetlen (Bakó 2012).

2.1 Az ortofotó-mozaik elkészítése

Számos csoportosítási lehetőség létezik a fotogrammetria tudományának felosztására, ám a legtöbb szakirodalom általában három nagy kategóriát különít el: a felvétel helye, a kiértékeléshez használt képek száma, valamint a kiértékelés módja szerint.

Az egyképes vagy síkfotogrammetria a kiértékeléshez egyetlen képet használ fel, így a domborzati különbségekből fakadó geometriai hibákat nem semlegesíti és kétdimenziós helymeghatározást tesz lehetővé. A többképes vagy térfotogrammetria, melyet sztereo- vagy modell fotogrammetriának is neveznek, azon túl, hogy a domborzati torzulásokat is kijavítja, a képek páronkénti feldolgozásával és az így létrehozható térhatás segítségével teszi lehetővé a térbeli meghatározást.

Analóg képfeldolgozás során az eredeti, analóg felvételek alapján optikai-mechanikai módszerrel visszaállítják „a képek felvételtörli helyzetét”, vagyis azokat a sugárnyalábokat, melyek a képet létrehozták a felvételek készítése pillanatában, s a további méréseket ezek segítségével végzik el. Az analitikus fotogrammetria szintén nyers felvételekből indul ki, viszont a kiértékelés itt már számítógép segítségével történik, és a fényképen mért pontok képkordinátái valamint a tereppontok geodéziai koordinátái között lévő matematikai összefüggéseken alapszik. A mérések megbízhatósága elsősorban a kiindulási adatok pontosságától függ. A térfotogrammetriai módszert tekintik a legnagyobb mérési pontosságot biztosító eljárásnak (Kraus 1998). Az ortofotók előállítására légi felvételekből az ortorektifikáció folyamatán keresztül valósul meg. Az eljárás eredménye egy perspektív és egyéb (dőlésből, elfordulásból, magasság- és méretarány különbségből adódó) torzulásoktól mentes, nagy pontosságú ortofotó. Egy területet lefedő ortofotók egységes képpé formálásával (mozaikolásával) légifelvétel-térkép készíthető. A művelet során az egymással átfedő fényképek határvonalainak eltüntetése történik. Ezen térképek közös jellemzője a geometriai pontosság, valamint a fényképi jellegből adódó részletgazdagság, mely számos felszíni információt tárol a felvételezett területről egy adott időpontra vonatkozólag.

Paul J. Curran, amerikai természettudós szerint a nagy kiterjedésű területek légi felvételezésénél nélkülözhetetlen a geometriai és radiometrikus pontosság, melyet kifejezetten erre a célra tervezett légifényképező műszerek használatával érhetünk el. Egyes szakirodalmak térképező kameráknak is nevezik ezeket, a speciálisan fotogrammetriai célok kiszolgálására kialakított felvételkészítőket, amelyeket a lehető legkisebb optikai és geometriai hibalehetőséggel rendelkező, nagy felbontású, centrális vetítésű képek készítésére terveztek (Campbell 2002). A mérőkamerák az ún. mérőképek előállítására alkalmasak, melyek további kiértékelésre, vagyis az objektumok geometriai, alaki és

fizikai jellemzőinek meghatározására használt felvételek (Temesvári 2010). A fent említett célok ellátása érdekében a kamerák működésével szemben támasztott legfontosabb követelmény a részletgazdagság, azaz az optika élessége és felbontóképessége, a mérőhelyesség, vagyis az elrajzolás mentes leképezés valamint a geometriai hűség (Kraus 1998). Egy terület légi felvételezésekor a pontos és részletgazdag adatgyűjtés szempontjából elengedhetetlen a megfelelő felbontású, rendkívül érzékeny és gyors kiolvasású mérőkamera használata. A jelenleg elérhető legnagyobb terepi felbontású légi térképező eszköz kifejlesztése, az Interspect Csoport mintegy hat éves kutatómunkájának az eredménye. 2006 - 2010 között négy különböző kamerarendszer került kialakításra, természet-és tájvédelmi célú térképészeti feladatok ellátására. A fejlesztés irányvonalát elsősorban a spektrális és geometriai felbontás javítása, vagyis a felvételek információtartalmának, illetve pontosságának növelése jelentette. Az Interspect szenzorcsalád negyedik tagja (IS 4) egyedülálló felbontási paramétereivel az alkalmazott technológia élvonalát jelenti. A látható fény (RGB) és a spektrum közeli infravörös tartományában 16 csatornát képes rögzíteni, ebből 12 csatorna spektrális érzékenysége a felvételkészítés célja szerint változtatható. 0,5 cm-es terepi felbontással világrekordot ért el a rendszer segítségével 2012-ben (Bakó 2012, Bakó-Molnár 2012).

Az Interspect mérőkamerát szabványos lesség, felbontás, optimális kontraszt, kiváló expozíciós érzékenység, kiterjesztett korlátozott tónustartomány jellemzi, de a felvételek minőségét a légkör nedvességtartalma és szennyezettsége is befolyásolja.

A föld felszínén lévő objektumok (vegetáció, talajok, kőzetek) spektrális válaszele eltér az elektromágneses spektrum fotográfiaillal érzékeny tartományában is. Ezt a tulajdonságot használják ki a multispektrális készülékek és különböző spektrális érzékenyítésű csatornákon készítenek légifelvételeket az adott területről egyidejűleg, tehát azonos geometriai nézőpontról. Az így kapott eredmény, különböző hullámhosszon készült felvétel-komplex, amely csatornáinak együttes elemzése a tereptárgyak képi elkülönítésére alkalmasabb megoldást nyújt (Curran 1985). „A kombinációk segítségével sokszorosára nő az értelmezhető jelenségek köre, ami a felhasználási lehetőségeket is kibővíti” (Horváth-Simonkócs 1977).

2.2 Vegetáció felmérésre alkalmas felvételek készítése és kiértékelése

Az egyes légi felvételek hasznosítható információ-tartalma kódolva van a képek jellemző tulajdonságai (tónus, szín, árnyék, méret, alak, textúra, mintázat) által, melyek tulajdonságok „együttes megfigyelésével a tanulmányozás tárgyává tett jelenségek értelmezhetőkké válnak” (Horváth-Simonkócs 1977). Ezek feltárása, osztályozása és összefüggésinek elemzése a légifénykép-interpretáció keresztül valósul meg. Az interpretáció folyamata a fényképek értelmezését és feldolgozását követően lehetővé teszi az eltérő igényeknek megfelelő tematikus térképek előállítását (Nagy 1998). A felvételek kiértékelése alapvetően kétféle módon történhet: vizuális illetve digitális eljárással.

A természet-és tájvédelmi célok érdekében, különböző távérzékelési technológiákkal végzett vegetáció felmérés és elemzés napjainkra már kulcsfontosságúnak bizonyul az adatnyerési eljárások körében. Egy légi úton felvételezett terület, a növényállomány állapotáról, struktúrájáról, elterjedéséről, nagyságáról olyan információkat szolgáltat, melyek terepi felméréssel egyáltalán nem vagy csak kismértékben határozhatók meg. Azonban meg kell jegyezni, hogy a két módszer egymás elengedhetetlen kiegészítője, ugyanis az adatok hitelességét a helyszíni ellenőrzés és mintavételezés biztosítja. A gyakorlatban tehát a fotogrammetriai úton elkülönített vegetáció-foltok a távérzékelési adatokat kiegészítő, terepi felmérés során hozzárendelt minőségi és mennyiségi információkkal együtt alkotják a kiértékelt tematikus növényállomány-térképet (Bakó 2013b).

A különböző flóraelemek, vegetációtípusok, növényfajok felismerése és elkülönítése a köztük lévő különbségek alapján, csak optimális képminőség mellett valósítható meg, mely elsősorban a terepi felbontás, árnyalatterjedelem, árnyalatgazdagság, zaj és közeghiba mentesség és pontosság függvénye. A terepi felbontás (cm/pixel) az 1 pixelre eső terepi folt cm-ben mért oldalhosszúságát jelenti, tehát a felvételek részletességét határozza meg a térképi felbontással fordított arányosságban. Vegetációtérképezés céljaira általában nagyfelbontású (30 cm/pixel-nél jobb felbontású) légi felvételek használatosak (1.ábra). A terepi pontosság a térkép geometriai és méretaránybeli hibáit mutatja meg, szórással vagy középhibával számszerűsítve (Bakó 2011).



1. ábra Nagy felbontású légifelvétel-térkép részlete.
(Fotó: Interspect Kft., Bakó Gábor)

Az ortofotók terepi felbontását mindig a felvételkészítés céljához, valamint az adott vegetációtípushoz igazodva kell megválasztani. Ezen kívül a felismerés alapvető feltétele a különböző növényfajok textúrabeli, színbeli, valamint morfológiai bélyegeinek pontos ismerete. A kisebb felbontású (30 cm/pixel terepi felbontásnál kisebb részletességű) felvételek általában az erdőgazdálkodásban, a különböző felszínborítás kategóriák (lombos, örökzöld erdők, bokrosodó területek) elkülönítésére alkalmasak. A felbontás növelésével arányosan javul az egyes fajok felismerhetősége, a vegetációfoltok minél pontosabb lehatárolási lehetősége. 10 cm/pixel terepi felbontás már lehetővé teszi a flóra részletesebb vizsgálatát, egyes fajok esetében a pontos fajmeghatározást, a nádasok, mocsarak és egyéb vizes élőhelyek optimális elemzését, a növénybetegségek által fertőzött területek felderítését. Az igazán nagy (3-7 cm/pixel) felbontású légi felvételeket gyepek, valamint lágy szárú növények feltérképezésére, továbbá fás szárú növények esetében a levélállás és levélmorfológia meghatározására használják (Bakó 2010).

3. Növényi inváziók

3.1 Az invázióval kapcsolatos fogalmak áttekintése

A magyar szaknyelvben, valamint köznyelvben egyaránt elterjedt inváziós faj kifejezés a latin eredetű invázió szóra vezethető vissza, melyből később több, ma is használatos szinonim alak keletkezett, mint például az angol megfelelők (invader, invasive) magyarosításával az invádor vagy invazív elnevezések. Ezek mellett még gyakori forma az özőnnövény és az özőnfaj és szintén jelen van a köztudatban az idegenhonos és tájidegen szóalak (Mihály-Botta-Dukát 2004). Az inváziós faj fogalmának meghatározására számos alternatíva létezik, és a különböző szakirodalmak sokszor igen eltérő értelemben használják azt: egyes definíciók csak a gazdasági és ember-egészségügyi kárt okozó fajokat tekintik invazív

(Környezetvédelmi Lexikon), míg mások természetvédelmi szempontból különítik el ezeket a szervezeteket (IUCN). Azonban legegyszerűbben megfogalmazva elmondható, hogy „a biológiai invázió egy nem őshonos faj terjedését jelenti” (Csiszár 2012). Ez kicsit kibontva a következőképpen hangzik: „Általában értelemben adott területen, adott tér- és időskálán akkor beszélhetünk invázióról, ha egy nem őshonos faj elterjedési területe és populációmérete a számára megfelelő élőhelyeken az adott tér- és időskálán monoton módon növekszik” (Mihály-Botta-Dukát 2004).

Egy faj invazív vá válása során, az elterjedés sikeressége szempontjából több szakasz különíthető el. Az első, az ún. spontán megtelepedés, amikor kialakul az élőlények egy vadon élő, önállóan szaporodó csoportja, melynek képviselői az alkalmi jövevény fajok. Mivel fennmaradásuk folyamatos emberi tevékenységhez kötődik, az ide tartozó növények jelentős része nem lép tovább az invázió következő szakaszába, és kipusztul. Azokat a fajokat, amelyek a tartós megtelepedés során elérik az önfenntartó populációméretet és emberi beavatkozás nélkül, minimum 10 évig képesek azt fenntartani, meghonosodott jövevényeknek nevezzük. Az özőnnövények gyakorlatilag terjedő meghonosodott jövevények, azok a fajok, melyek igen nagyszámú reprodukciós utód létrehozására képesek az anyanövénytől jelentős távolságra, így módon hatalmas területen képesek elterjedni. A behurcolt, idegen vagy jövevény fajok jelenlété az adott területen szándékos vagy véletlen emberi tevékenységnek köszönhető, így ezek gyűjtőfogalmába az eddig említett kategóriák mindegyike besorolható (Richardson-Pyšek 2006).

A növényi inváziók definiálásánál további fontos szempont a behurcolás időpontja, mely alapján megkülönböztetjük az Amerika felfedezése előtt (*archeofitonok*) és után (*neofitonok*) megjelenő özőnfajokat. Az előbbieket, az ún. őjójóvényfajok általában közelebbi területekről (főként a Mediterráneumból), kisebb lépésekben érkeztek, és képviselői többnyire a mezőgazdasági gyomnövények, míg az utóbbiak csoportját képző újjójóvényfajok távolabbról, viszonylag nagy ugrásokkal, természetes ellenségeiket maguk mögött hagyva kerültek a természetes és féltermészetes élőhelyekre, komoly természetvédelmi problémákat okozva napjainkban (Mihály-Botta-Dukát 2004).

3.2 Hazai és nemzetközi inváziókutatás

Az invázióval kapcsolatos kutatások kialakulása szoros összefüggésben van a botanika tudományának fellendülésével, valamint a Föld növénykészletének felgyorsult mértékű homogenizálódásával, ami a 18. századra tehető. Bár tudjuk, hogy az inváziós tevékenység már a neolitikumban kezdetét vette a mezőgazdaság megjelenésével, erről az időről és az itt végbemenő biológiai változásokról mégis igen kevés információ áll a kutatók rendelkezésére. Az első, jövevény fajokkal foglalkozó tudományos munka a De coloniis plantarum (1768), mely Linné egyik tanítványa, Johan Flygare nevéhez fűződik. Ennek hatására egyre több, növényi invázióval kapcsolatos beszámoló látott napvilágot a 18-19. századi botanikusok körében. Ebben az időben a kutatások elsősorban az új fajok megjelenésének és térhódításának dokumentálást tűzték ki célul, bár Darwin az 1859-ben megjelent A fajok eredete című művében már az első, invázió mechanizmusaira vonatkozó hipotézist írta le: „elsősorban a nem őshonos genusok fajai a sikeresek, tágabb értelemben minél kevésbé vannak egy fajnak az új hazában rokonai, annál inkább képesek elszaporodni, mert a verseny a közeli rokonok között a legerősebb.” A 20. század eredményei közül az egyik legmeghatározóbb, Charles S. Elton The Ecology of Invasions by Animals and Plants (1958) című könyve, mely az invázióökológia tudományának születését tette lehetővé. Azt ezt követő időszak jelentősége főként a témában írt tudományos cikkek és értekezések egyre növekvő számában nyilvánult meg (Mihály-Botta-Dukát 2004).

Az inváziókutatás hazai pilléreit Kitaibel Pál munkássága teremtette meg a 18. században. Egyes művei számos, Magyarországon fellelhető invazív fajról számoltak be, mely adatok a későbbi botanikai vizsgálatok elengedhetetlen

alapjául szolgáltak. A 19. és 20. században a jövevényfajok további tanulmányozása olyan kiemelkedő botanikusok nevéhez fűződik, mint Borbás Vince, Jávorka Sándor, valamint Soó Rezső. A hazai és nemzetközi invázióval kapcsolatos kutatások iránya egészen az 1900-as évek kezdetéig hasonló tendenciát mutatott, amit átmeneti megtorpanás követett a magyar szakemberek részéről.

Napjainkban az inváziókutatás általában négy fő témakört ölel fel, melyek már Elton, 1958-as könyvében is megjelentek: 1. Az egyes fajok eltérő inváziós képessége, vagyis azok a tulajdonságok, amik képessé tesznek egy fajt a hatékony invázióra. 2. Az egyes területek vagy életközösségek eltérő invázióval szembeni ellenálló képessége, azok a sajátosságok, amelyek egy társulást érzékenyebbé tesznek bizonyos fajok inváziójára. 3. Az invázió általában negatív hatásai. 4. Az invázióval szembeni hatékony védekezés (Mihály-Botta-Dukát 2004).

A biológiai invázió egy természetes jelenség, mely mindig is része volt az élőlények evolúciós történelmének, ám az elmúlt évtizedekben ez a folyamat olyan ütemben felgyorsult, hogy mára az idegenhonos fajok behurcolása az ember által okozott globális környezeti változások egy meghatározó elemének tekinthető (Vitousek et al. 1996). A negatív hatások az egyedek szintjén, a genetikai állományban, a populációdinamikában, valamint az ökoszisztéma működésében egyaránt jelentkezhetnek (Parker et al. 1999). Az invazív fajok sokszor nem közvetlenül az őshonos populáció egyedét károsítják, csupán megváltoztatják azok ökológiai szerepét, ezzel komoly változásokat indukálva. Jelentős szerepük van továbbá a fajok kihalási rátájának növelésében, így a különböző biológiai rendszerek homogenizálódásával hozzájárulnak a biodiverzitás csökkenéséhez, leírhatatlan veszteséget okozva világszerte (Vila et al. 2006). Az özőnnövények térhódítása gyakran olyan méreteket ölt, hogy az adott életközösségre nézve az elsődleges veszélyeztető faktorrá válik. Észak-Amerika lombhullató erdőiben például kimutatták, hogy az invázió által bekövetkezett változások jóval felülmúlják az egyéb környezeti problémákat, úgy mint savas esők és szennyezések negatív hatásait (Lövei 1997). Habár, általában lokálisan és csak pár fajt érintve fejt ki hatását, az invázió mégis egy egész világra kiterjedő, globális veszélyt jelent a természetes életközösségek számára.

3.3 Az invázióval szembeni védekezés

Az inváziós növényfajok terjedése leginkább azokon az élőhelyeken figyelhető meg, ahol az adott életközösség természetes állapota emberi hatás következtében felbomlott, ezáltal mintegy teret nyitva a lehetséges hódítóknak. A védekezés szempontjából elengedhetetlen a szomszédos élőhelyek növényi összetételének ismerete, hiszen a természetben nincsenek éles határok, így egy adott terület inváziója önmagában gyakorlatilag nem értelmezhető. Leghatékonyabban már az idegenhonos faj megjelenése előtt lehet védekezni, illetve amikor a növény elterjedése még a kezdeti fázisban van. Az inváziós fajokkal szembeni védekezés módszereit két nagy csoportra oszthatjuk: kémiai, illetve nem kémiai eljárások. Amennyiben lehetséges, az utóbbit kell előnyben részesíteni, azonban ez legtöbbször munka és időigényes, alkalmazása pedig gyakran korlátozott. A kémiai védekezés legnagyobb kockázata, hogy az adott élőhely ökológiai egyensúlyát befolyásolhatja, veszélyt jelentve a beporzó rovarokra, magasabb rendű élőlényekre. Az alkalmazott technológiát ennek tükrében célszerű megválasztani, törekedve a lehetséges kockázatok minimalizálására. Ez kiemelten fontos a védett területeknél, ahol minden esetben egyedi engedélyeztetési eljárásnak kell megelőznie a kezelést. Nagyon fontos, hogy a megfelelő kemikália megfelelő időben, megfelelő dózisban valamint megfelelő módon kerüljön felhasználásra és csak adott foltokat, fertőzött területeket érintsen (fókuszált beavatkozás). Nagyobb területek esetén a térbeli felmérés, előzetes hatástanulmány készítése, és a kockázatok elemzése kulcsfontosságú lehet, mivel megalapozza a költségek optimalizálását, a területek bolygatásának minimalizálását. A védekezés hatékonyságát nagyban elősegítik a kezelések utáni utómunkálatok, úgy, mint a terület természetes állapotának

visszaállítása, őshonos fajok telepítése (Mihály-Botta-Dukát 2004).

3.4 Keskenylevelű ezüstfa (*Elaeagnus angustifolia* L.)

Az eredetileg Ázsia meleg kontinentális területeiről származó keskenylevelű ezüstfát (*Elaeagnus angustifolia*) előnyös tulajdonságai miatt kezdték telepíteni a természetes áréáján kívüli helyeken, ahol később elvadulva invazív vá vált. Mint a legtöbb idegenhonos fajnak, gazdasági jelentősége kimagasló: szerteágazó gyökérrendszere, szárazságtűrő képessége, kis tápanyagigénye alkalmassá teszi a laza homoktalajok megkötésére, ezáltal jelentős szerepe van az erózióvédelemben, sőtűrése következtében a szikfásítás egyik leggyakoribb fajtája, rendkívül igénytelen, a szennyezett levegőt, városi környezetet rendkívül jól tolerálja, ezen kívül jó mézélő, termése C-vitaminban gazdag, melyet egyes helyeken gyümölcsként fogyasztanak. Ezek a sajátosságok azonban sok egyéb adaptív jellemzővel együtt (hatékony terjedés, gyors csírázás, szimbionta nitrogénfixálás, gyors növekedés, korai termőre fordulás, jó regenerációs képesség), talaj és élőhely átalakító hatás mind hozzásegítik a fajt a sikeres invázióhoz. Levelei és hajtásai cserzőanyag-tartalmának köszönhetően igen kevés természetes károsítója van, mely szintén előnyt jelent számára az őshonos egyedekkel szemben. A faj jelenléte hazai vonatkozásban igen sokféle élőhelytípus számára jelent természetvédelmi problémát. Megjelenése és elszaporodása az ültetett állományok közelében, általában ártereken, nedves réteken, folyópartokon jellemző. Fátlan közösségekben való elterjedése a fényigényes fajok visszaszorításával okoz komoly károkat, míg a szikes területeken ligetes állományok létrehozásával számos védett és ritka növényfaj természetes élőhelyét alakítja át, az őshonos populációk egyedszámának jelentős csökkenését eredményezve. A szikes tavak mentén szintén gondot jelent tömeges előfordulása, ugyanis fészkelő helyet teremt azon ragadozók számára, melyek elszaporodása a honos vízimadár-kolónia nagymértékű visszaeséséhez vezet. Problémát jelent továbbá a faj nitrogénfixáló tulajdonsága, mely a természetes életközösségeket veszélyeztető nitrofil gyomok megjelenését indukálja az adott területen. Tetemes károkat okoz a Balaton-felvidéken, tönkreteszi a hagyományos tájképet, károsítja a legelő területeket. A Baranyai-dombvidéken és a Pécsi-síkon is tömeges a megjelenése, a Csepel-sziget északi felén rohamosan terjed. Leghatékonyabb védekezés ellene az új egyedek meglepedésének megelőzése, elszaporodott állományainak végleges kiirtása ugyanis szinte lehetetlen, igen erős regenerációs képessége és effektív terjedése következtében (Mihály-Botta-Dukát 2006).

3.5 Kanadai aranyvessző (*Solidago canadensis* L.)

A kanadai aranyvessző (*Solidago canadensis*), ahogy neve is utal rá, az észak-amerikai kontinens őshonos faja, amely dísznövényként való telepítése során került ki az elterjedési területéről, majd a természetes életközösségekben való elszaporodásával vált Európában egyik legagresszívabban terjedő invazív fajává. Erős kompetíciós képességét számos, erre adaptálódott tulajdonsága támogatja. A talaj víz- és tápanyag-ellátottságára nem érzékeny, igen sokféle termőhelyen megél, nagy kiterjedésű telepeket létrehozva. Intenzív növekedése és sűrű hajtásfejlésztése a terület leárnyékolásával a vetélytársak fejlődését akadályozza. Míg eredeti élőhelyén több mint 300 rovarfaj károsítja, Európában szinte nincs természetes ellensége, mely szintén hozzájárul a sikeres térhódításhoz. Allelopatikus hatással ugyancsak a honos vegetáció növekedését gátolja közvetlenül, illetve közvetve a talajlakó baktériumok működését korlátozva. Bár természetéhez általában nem fűződik gazdasági érdek, jó mézélő növény, szárított hajtásait pedig gyógynövényként hasznosítják. További telepítésének mellőzését azonban számos negatív hatása indokolja. Az őshonos vegetációt általában zárt állományaival veszélyezteteti, a növényzet fajgazdagságának csökkenését eredményezve. Az eredeti növénytakaró átalakulása az ökoszisztéma egészét

érinti: megváltozik a mikroklíma, a gerinctelen és gerinces fauna igen sok egyedének élettere tűnik el, mely további fajok visszaszorulásához vezet. A Balatoni nádasokban, elsősorban a pusztuló állományban és a nádas területek peremén a madarak élőhelyének megváltozásán keresztül jelent természetvédelmi veszélyt (Bakó 2013a), de a tölgyerdők megújulását gátolva is jelentős károkat okoz. Erdei közösségekben való megjelenése és elterjedése a csemeték növekedését gátolva komoly veszélyt jelent az erdőalkotó fajokra. Ember-egészségügyi szempontból allergén hatása miatt nem kívánatos faj nagyobb városok, illetve lakott területek környékén. A hatékony védekezés elvi alapja a megelőzés, illetve elszaporodása kedvező feltételeinek megszüntetése, a táj eredeti állapotának visszaállításával. Természetes és természet közeli élőhelyeken ez általában rendszeres legeltetéssel és kaszálással, valamint megfelelő talajműveléssel valósul meg. Kiirtása mechanikus vagy vegyszeres módszerekkel igen nagy kockázatot jelent főként a természetvédelmi területekre nézve, ritka és védett növényfajaink ugyanis kevésbé tolerálják az ilyen jellegű beavatkozásokat (Bakó 2013a, Mihály-Botta-Dukát 2004).

4. Módszer

A vizsgálat alapjául egy 4,5 cm/pixel terepi felbontású, geometriailag és radiometriailag korrigált, szabatos, EOVR rendszerű ortofotó mozaik valószínűsítő csatornái szolgáltattak, melyet az Interspect Kft. készített 2012. júliusában, IS 4 típusú mérőkamerával, Szigetszentmiklós külterületén. Az elemzésekhez a felvétel egy 6,8 hektárnyi területet reprezentáló részét határoltam le vizsgálati mintaterületnek, mely egy művelés alól kivett gyümölcsös (korábban kivágott alma ültetvény) egyik szegletét fedi le (2. ábra). Ez a terület az általam vizsgált invazív fajokkal (kanadai aranyvessző és keskenylevelű ezüstfa) erősen fertőzött, így a kutatási célok megvalósításához ideális alapot jelentett.

A felvétel kiértékelését terepi szemle előzte meg, ahol ellenőriztem a légifénykép alapján azonosított vegetációs elemeket, valamint feltérképeztem a vizsgálati terület inváziós fertőzöttségét. A két faj területi lefedettségét az ortofotó-térkép vizuális interpretációjával, illetve számítógépes osztályozásával határoztam meg, majd az eredményeket összevetve pontossági analízist készítettem. Vizuális interpretáció során először lehatároltam a vizsgált fajok által borított terepi foltokat, hézag és átfedés mentes poligonokból felépülő vektoros térképi fedvényt létrehozva. Ezt később kiegészítettem további két kategóriával, majd az így kapott felszínborítási adatokat referenciaként használtam fel a számítógépes eljárások pontosságvizsgálatához.

A szoftveres elemzést ellenőrzés nélküli, illetve ellenőrzött osztályozással is elvégeztem. Az osztályozás lényege, hogy a felvétel minden egyes képpontját különböző csoportokba sorolja a program bizonyos algoritmus szerint. Az eljárás segítségével megállapítható, hogy az általam vizsgált növényfajok lefedettségét értékei mennyire közelítik a kézi módszerrel nyert adatokat. Habár, csak a két fajlokizálása a cél, mégis szükséges bevonni az elemzésbe az összes jellegzetes területet, mivel az invazív növények területfoglalási méretei általában csak környezetükkel együtt értelmezhetők. Ez alapján a következő kategóriákat határoztam meg: aranyvessző, ezüstfa, egyéb fás szárúak, egyéb lágyszárúak. Az ellenőrzés nélküli osztályozás során a hasonló visszaverődési értékű képpontokat keresi meg a program, feltételezve, hogy azok közel azonos felületről származnak, így a különböző felszínborítási területeket egy-egy osztályba sorolja. Az ellenőrzött osztályozásnál az elemző adja meg az elkülöníteni kívánt folt típusokat, mint tanuló területeket, amelyekhez a számítógép hasonlókat keres az osztályozás során. A vizuális interpretációval és a számítógépes osztályozással kapott eredmények összehasonlításánál az egyes felszínborítottsági kategóriák lefedettségi hibaarányát határoztam meg. A lefedettségi hibaarány nem más, mint a vizuális és számítógépes eljárással nyert számszerű adatok különbségének a százalékban

kifejezett értéke, a kézi módszer eredményeihez képest. Kiszámítására az alábbi képlet alkalmazható:

$$\text{Lefedettségi hibaarány}[\%] = \frac{|\text{Vizuális} - \text{Számítógépes}|}{\text{Vizuális}} \cdot 100$$

A különböző módszerekkel végzett vizsgálatok összehasonlítása során számítottam még átlagos lefedettségi hibaarányt, amely az utóbbi, kategóriánként meghatározott lefedettségi hibaarányok számtani közepe.

A vizuális kiértékelést a QuantumGIS 2.0.1, a számítógépes analízist a MultiSpec nyílt forráskódú szoftver segítségével végeztem. A statisztikai számításokhoz és a diagramok készítéséhez MS Excel-t használtam.

5. Vizsgálati eredmények és értékelésük

5.1 Terepi vizsgálat

A különböző kiértékelési eljárások előtt, a terepbejárásnak igen jelentős szerepe van abban, hogy egy átfogó képet kapjunk a vizsgált terület botanikai állapotáról, valamint felmérjük a vizsgálat szempontjából fontos tényezőket. A rendelkezésre álló légi felvétel alapján a két faj viszonylag jól felismerhető és lokalizálható, a terepi viszonyok ismerete azonban elengedhetetlen az alapos és eredményes munkavégzéshez, valamint a felvétel megbízhatóságának ellenőrzéséhez. Az előzetesen, légi fénykép alapján felismert probléma a helyszínen is nyilvánvalóvá vált: a táj természetes állapota sérült, a vizsgált fajok egyedszáma meghatározó, a terület inváziós fertőzöttsége jelentős. A felvételen megfigyelhető felszínborítási elemek a terepen is igen jól azonosíthatók, de geometriai meghatározásuk terepi körülmények között lehetetlen. Ez az aranyvessző esetében három jellegzetes kategóriát jelent: 1. ahol a faj csak szórványosan vagy egyáltalán nincs jelen, 2. a faj kisebb csoportokban fordul elő nagy területi kiterjedésben, 3. a faj összefüggő, homogén foltokat alkot. Az ezüstfa megjelenése az egész területre jellemző, egyedei ligetes állományt alkotnak, ahogyan az a felvétel alapján egyértelműen kirajzolódik. A vizsgálat eredményeként bebizonyosodott, hogy az általam használt ortofotó alkalmas a szóban forgó fajok vizuális elkülönítésére, területi lefedettségük meghatározására. A terepen szerzett ismeretek felhasználásával a feldolgozás hatékonysága és pontossága növelhető, míg a bizonytalanság mértéke nagymértékben csökken. A terepi felbontás csökkentésével a térképezés pontossága radikálisan lecsökken, a felismerési bizonytalanság megnövekszik.

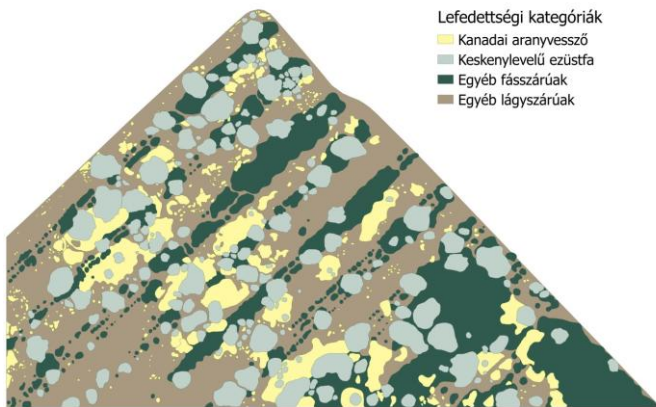
5.2 Vizuális interpretáció

Az összehasonlítás alapját képző referencia értékek megbízhatósága és szabotossága kulcsfontosságú tényező a további vizsgálatok elvégzéséhez. Vizuális interpretáció során az egyik legfontosabb szempont az objektumok felismerhetősége, melynek alapfeltétele a használt felvétel optimális felbontása. 4,5 cm/pixel terepi felbontása fajmeghatározáson túl, már az egyed szintű elkülönítést is lehetővé teszi mindkét faj (ezüstfa és aranyvessző) esetében. Ez különösen fontos az aranyvessző vizsgálata során, ugyanis az összefüggő vegetáció foltok mellett, a szórványosan megjelenő egyedek detektálása is lehetségessé vált. Az adott faj elterjedésének jellegéből adódóan ezek figyelmen kívül hagyása komoly vizsgálati hibát eredményezne, a terjedés megfékezésére tett erőfeszítéseket egy rosszul kivitelezett (alulbecslő) előzetes felmérés semmissé teheti. Ezen kívül, a felvétel felbontása olyan mértékű textúrabeli különbségeket mutat, mely a tónus és színárnyalat mellett tovább segíti a fajok azonosítását. Ez elsősorban az ezüstfa felismerésnél volt hasznos, olyan egyedeknél, ahol árnyalati különbségek alapján már nem volt egyértelmű a separáció. Ez a csupán 50 cm terepi felbontású ortofotók esetében már komoly gondot okozna. A vizuális kiértékelés során négy lefedettségi kategória



2. ábra A kiértékeléshez használt légi felvétel a kijelölt mintaterülettel. (Forrás: Interspect, fényképezte Bakó Gábor, fotogrammetriai térkép előállítás: Molnár Zsolt)

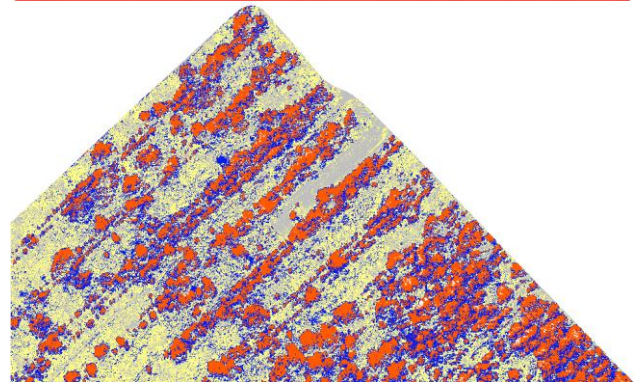
területfoglalási méretét kaptam eredményül, melyből kettő (aranyvessző, ezüstfa) a terület tényleges inváziós fertőzöttségét jellemzi. A 3. ábrán a leválogatott felszínborítási osztályok térképi fedvénye látható.



3. ábra Vizuális interpretációval nyert felszínborítási kategóriák.

5.2 Számítógépes osztályozás

A területet külön vizsgáltam ellenőrzött és ellenőrzés nélküli osztályozás módszerével. Az ellenőrzés nélküli eljárás, jellegéből adódóan akkor lehet hatékony, ha az elkülöníteni kívánt területek borítottsága nagymértékben eltér egymástól. Az általam vizsgált terület azonban nem ilyen, az elkülöníteni kívánt területekhez hasonló visszaverődési értékű képpontok tartoznak, amennyiben előosztályozás alkalmazása nélkül végezzük el az osztályozást. Az előosztályozás nélküli ellenőrzés nélküli osztályozással kapott eredmények a kitűzött céloknak nem feleltek meg. A fás- és a lágyszárú állomány elkülönítésén kívül, a különböző fajok kategorizálására a módszer már nem alkalmazható előosztályozás nélkül. A 4. ábrán egy minden előkészítés nélküli ellenőrzés nélküli osztályozással kapott térképi fedvény látható. A program által meghatározott négy lefedettség kategória, szemmel láthatóan nem esik egybe az általunk elkülöníteni kívánt osztályokkal. Ezek alapján nyilvánvalóvá vált, hogy a vizsgált fajok esetében előosztályozás, vagy ellenőrzött osztályozás alkalmazása szükséges.



4. ábra A vizsgálati terület ortofotója és előosztályozás nélküli automatikus osztályozással kapott térképi fedvénye. Az előkészítés (paraméteres előosztályozás) nélküli osztályozás nem vette figyelembe a felvételen rejlő árnyalatterjedelmi és árnyalatgazdagsági lehetőségeket.

Ezt követően elvégezték a terület ortofotó-mozaikjának előosztályozását, amely már jól közelíti a vizuális interpretáció eredményét (5. ábra). Ezzel invazív fajok térképezése esetén is beigazolódtott az előzetes vizsgálatok során is alkalmazott módszer (Bakó és Gulyás 2013) szükségessége, távérzékeléssel nyert állományok automatikus osztályozását csak a felvétel dinamikai tulajdonságait kiaknázó paraméteres előosztályozást követően érdemes elvégezni, mert a geoinformatikai szoftverek osztályozó moduljainak algoritmusai csak a monitorra optimalizált hisztogram-értékekre elemzik a felvételt (4. ábra). A modern távérzékelési adatok ennél azonban sokkal több információt tárolnak, mint ahogyan az a 4 és 5. ábrák összehasonlításával szembetűnővé válik.



5. ábra A mintaterület ortofotójának részlete és a fásszárúak lokalizálására végrehajtott előosztályozás eredménye.

5.4 A vizsgálatok hibalehetőségei

A számítógépes képfeldolgozás során elkerülhetetlen, hogy bizonyos mértékű pontatlanság jelentkezzen az egyes felszínborítási kategóriák osztályba sorolásánál. Ennek okait szeretném az alábbiakban bővebben kifejteni, a vizsgálati területre összpontosítva.

5.4.1 Árnyalat és textúrabeli átfedések

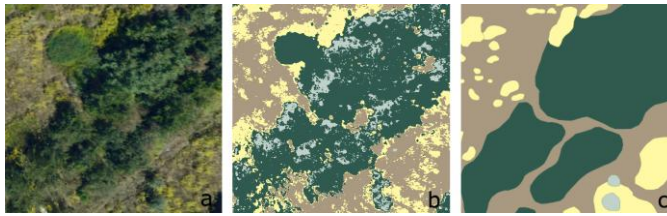
A számítógépes osztályozás pontossága leginkább attól függ, hogy az elkülöníteni kívánt területek milyen mértékben térnek el egymástól. A számítógép szempontjából ez azt jelenti, hogy az objektumokat alkotó képpontok visszaverődési értéke mennyire különbözik egymástól. Jól szemlélteti ezt az általam végzett vizsgálat. A fás szárú és a lágyszárú állomány szemmel láthatóan is jól elkülönül egymástól, az egyéb fás szárú növények és az

ezüstfa, valamint az aranyvessző és más lágyszárúak különválasztása azonban már igényli a képekben rejlő információbővel felszínre hozását. A légi felvételt közelebbről megvizsgálva látható, hogy bizonyos esetekben akadnak átfedések a két állomány között, nagyon hasonló, vagy akár teljesen egyforma képpontokat is felfedezhetünk az elkülöníteni kívánt állományok mindegyikében. Az átfedések mértéke döntő befolyással bír a módszer alkalmazhatóságára és a hibaarányra. A6. ábrán egy a monitorra optimalizált hisztogramú felvételen jól elkülönülő és egy kevésbé jól elkülönülő felületpárt figyelhetünk meg, az egyéb fás szárú növények és az ezüstfa kategóriái között.



6. ábra Különböző kategóriák közötti átfedések. (a: ezüstfa, b: egyéb fás szárúak)

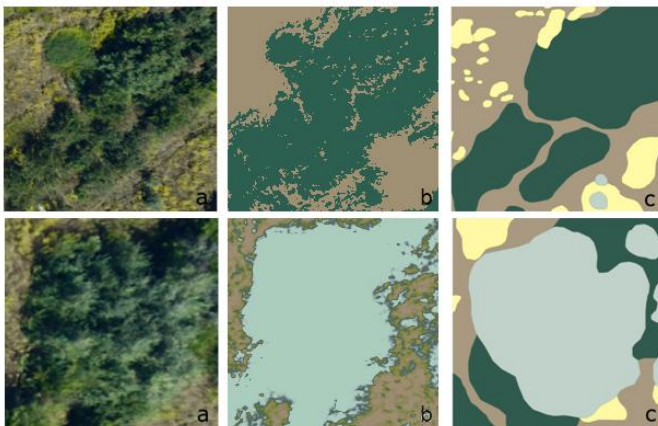
A leírtak alapján belátható, hogy számszerű lefedettségi értékek összehasonlítása mellett, először célszerű vizuális ellenőrzést végezni, és ennek alapján előosztályozással elkülöníteni a folt típusokat, majd az osztályozást követően szintén vizuálisan is összevetni az osztályozással kapott adatokat a légi felvétellel és a vizuális interpretáció eredményével. Egy viszonylag pontos borítottsági érték még nem feltétlen jelenti azt, hogy a program valóban a megfelelő fajokat ismerte fel, a megfelelő helyen. Jól szemlélteti ezt az ezüstfa és az egyéb fás szárúak viszonya az előosztályozás nélkül elvégzett osztályozás eredményén. A két osztály között bizonyos átfedést figyelhetünk meg. Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy a program az ezüstfával borított területeken is észlel egyéb fás szárú állományt, és fás szárú állománnyal borított területeken is ezüstfát. A vizuális összehasonlítás során jól látszanak ezek a területek. Így tehát pontatlan eredmények születnek, azonban ha a két hiba kompenzálja egymást, akkor a területi lefedettség különbség minimálisra is csökkenhet. Ez viszont a véletlennek köszönhető, és a kapott eredményt nem tekinthetjük mérvadónak, ismételhetőnek. Ez nem jelenti azt, hogy ezek az eredmények használhatatlanok, csupán az ezüstfa és az egyéb fás szárú állomány lefedettségi értékeit tágabb hibahatárral kell kezelniük, a beavatkozás tervezésénél a hibahatárokat közölni szükséges. Az aranyvessző esetén ez kevésbé figyelhető meg. A 7. és 8. ábrák a számítógép által hibásan felismert felületeket szemléltetik. Látható, hogy vizuális interpretáció során a képelemző képes a különböző kategóriák optimális besorolására, a számítógép viszont képpontok alapján dolgozik és az egyes csoportok elkülönülése nem mindig egyértelmű. Ahogyan a 9. ábrán megfigyelhető, az előosztályozás képes kiküszöbölni, de legalábbis mérsékelni a hibajelenséget.



7. ábra Osztályozási hiba 1: ezüstfának ítélt egyéb fásszárúak. (a: ortofotó, b: számítógépes osztályozás, c: vizuális interpretáció)



8. ábra Osztályozási hiba 2: egyéb fásszárúak kategóriába sorolt ezüstfa. (a: ortofotó, b: számítógépes osztályozás, c: vizuális interpretáció)

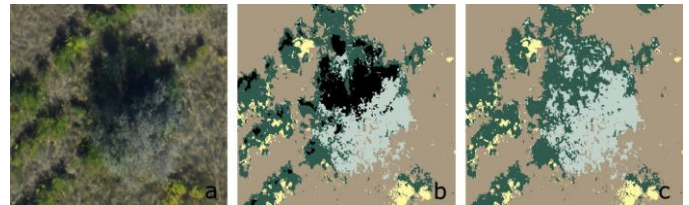


9. ábra Jól megfigyelhető, milyen nagymértékben csökkent az osztályozási hiba, amennyiben előosztályozást is végzünk. (a: ortofotó, b: előosztályozási eredmény, c: vizuális interpretáció)

5.4.2 Árnyékok

Az árnyék takarta felszínek eltérő tónusárnyalatai szintén torzítják az osztályozási eredményt. Az árnyékok okozta hibák mértékének felderítése céljából a vizsgálatot kétféle módszerrel végeztem: az árnyékok figyelembevétele nélkül, illetve ezek figyelembevételevel. Utóbbinál az árnyékos területeket külön mintaterületté definiáltam és az így kapott értékeket hozzáadtam az egyéb lágyszárúak és az aranyvessző által borított területekhez, a két kategória lefedettségének arányával súlyozva. Azért csak ehhez a két kategóriához, mert az árnyékok jelentős része értelemszerűen ezekre a felszínre vetül. (Minimális mértékben a fás szárú állományokra is, de ez a vizsgálat szempontjából elenyésző hányad). Ez a módszer ugyan több közelítést és egyszerűsítést is tartalmaz, a számszerű eredmények értékelésekor azonban egyértelműen látszik, hogy az ilyen módon korrigált adatok jobban közelítik a vizuális interpretációval nyert értékeket, ahol viszonylag pontosan lehet elvégezni az árnyékkal takart térszínek kategorizálását. A 10. ábrán a vizsgálati terület egy kiragadott részletének számítógépes osztályozással készült felszínborítási fedvénye látható, az árnyékok figyelembevétele nélkül, illetve árnyék, mint fiktív

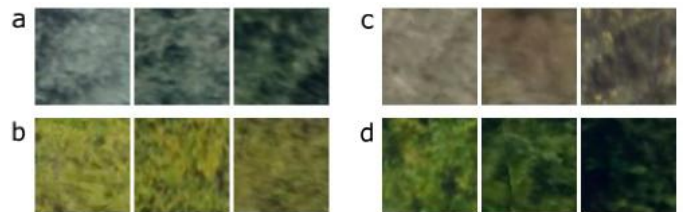
lefedettségi osztály figyelembevételével. Megfigyelhetjük, hogy az árnyékok helyére a számítógép a fás szárú állományokat (ezüstfa, egyéb fás szárúak) vette fel, mivel ezen kategóriák visszaverődési értéke áll legközelebb az árnyékos területek sötét tónusához. Ez azt is jelenti, hogy az árnyékok kettős torzítást okoznak a kapott eredményekben, mind az általuk kitakart területek, mind az helyükre felvett osztályok borítottsági értékének módosításával.



10. ábra Eredeti ortofotó (a) és a számítógépes kiértékelés eredménye árnyékkal (b), és árnyék figyelembevétele nélkül (c).

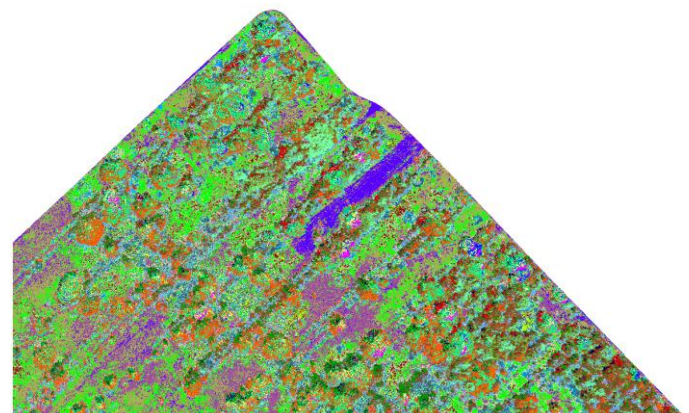
5.4.3 Mintaterületek, tanulóterületek

Az ellenőrzött osztályozás során kulcsfontosságú a megfelelő mintaterületek definiálása. Ez nem könnyű feladat, mivel ugyanazon kategóriába sorolni kívánt objektumok sem teljesen egyformák. A 11. ábrán látható példák azonos kategóriába sorolandó, ám szemmel láthatóan más visszaverődési értékű túlnagyított területrészeket.



11. ábra Lefedettségi kategóriákon belüli tónusváltozatok négyszeresen túlnagyítva. (a: ezüstfa, b: aranyvessző, c: egyéb lágyszárúak, d: egyéb fás szárúak)

A program alapvetően minden mintaterülethez egy lefedettségi osztályt rendel, de lehetőség van az egyes elemi kategóriák csoportosítására. A vizsgálat során egy általam meghatározni kívánt lefedettségi osztályhoz több mintaterületet is kijelöltem, amelyeket a program külön kategóriaként határozott meg (12. ábra). Ezeket később csoportosítottam és egy osztályként kezeltem (13. ábra).



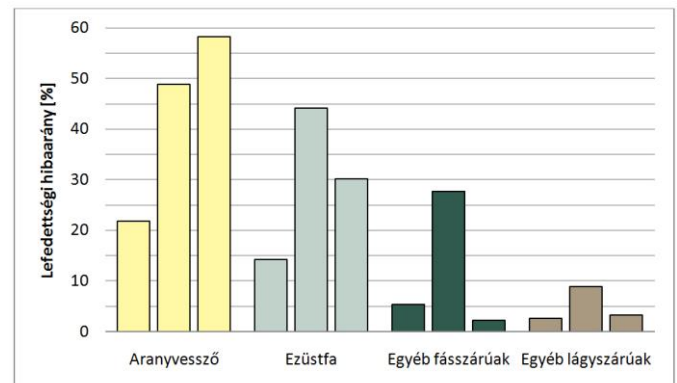
12. ábra Az egyes elemi osztályok csoportokba sorolás előtt.

számítógépes eljárás pontosságának vizsgálata során ezekre a kérdésekre kerestem a választ.

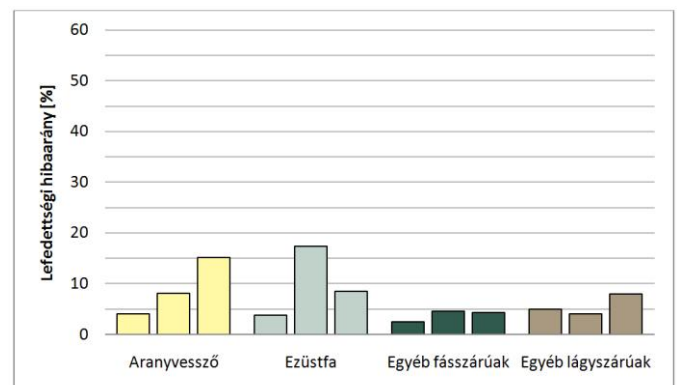
5.4.1.1 Lefedettségi hibaarány

Ahhoz, hogy megtudjam, hány elemi lefedettségi osztály felvétele optimális egy kategóriához, különböző számú mintaterület definiálásával végeztem el előosztályozás nélküli vizsgálatot. Az így nyert felszínborítási adatok elemzése során a lefedettségi hibaarányon túl még arra voltam kíváncsi, hogy a kapott eredmények azonos feltételrendszer szerint definiált mintaterületekkel, de függetlenül végzett vizsgálatokkal mekkora eltérést mutatnak egymáshoz képest. Az elemzést kategóriánként 1, 5 illetve 10 mintaterülettel végeztem. Mindegyik vizsgálatot háromszor, egymástól függetlenül megismételttem, árnyékkompenzáció nélkül, majd árnyékkompenzáció alkalmazásával. Összességében tehát 18 vizsgálat lefedettségi adatait elemeztem. Az egyes kategóriák lefedettségi hibaarányának meghatározásához az árnyékkompenzációval kapott eredményeket hasonlítottam össze. Mivel 4 kategóriát definiáltam, összesen 36 felszínborítottsági adat állt a rendelkezésemre.

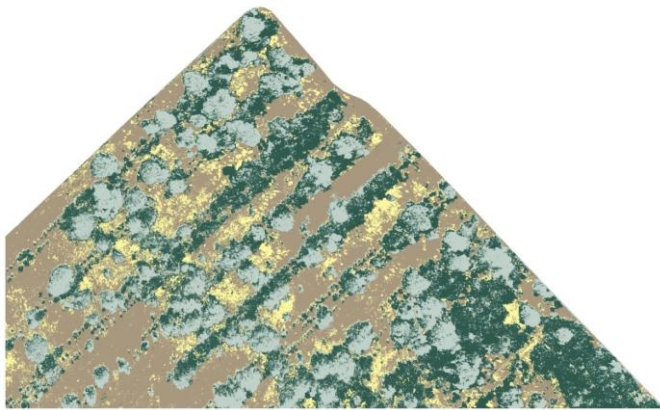
Az eredményeket a 15-17. ábrák szemléltetik. Az oszlopok a különböző kategóriák lefedettségi értékeinek százalékos hibaarányát mutatják, a vizuális interpretációhoz viszonyítva. Minden diagram egy azonos feltételek mellett végzett vizsgálat sorozat eredményét ismerteti. Az azonos kategóriához tartozó oszlopok tehát, három különböző mérés eredményét ábrázolják. Az eredmények könnyebb összehasonlíthatósága érdekében az egyes diagramok függőleges tengelyének léptéke azonos.



15. ábra Az egyes felszínborítási kategóriák lefedettségi hibaaránya 1 mintaterülettel végzett vizsgálat esetén

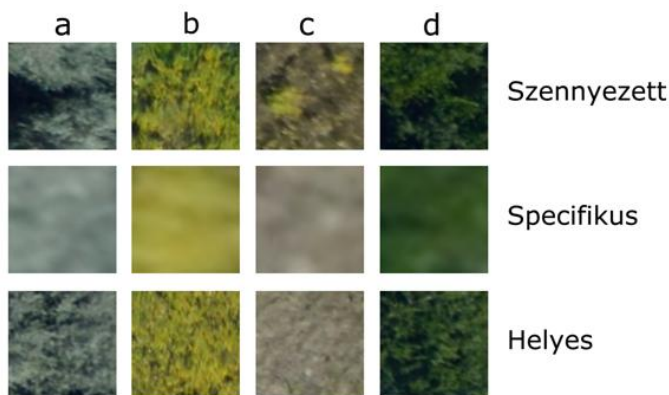


16. ábra Az egyes felszínborítási kategóriák lefedettségi hibaaránya 5 mintaterülettel végzett vizsgálat esetén



13. ábra A vizsgálati terület ellenőrzött osztályozással kapott térképi fedvénye.

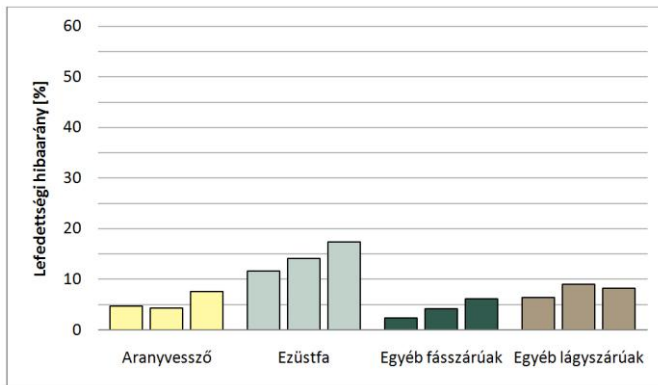
Ha a mintaterületek felvétele során nem vesszük figyelembe, hogy az azonos kategóriába sorolni kívánt felszínek minél több vizuálisan elkülöníthető variánsából legyen kiválasztva a tanulóterület, komoly vizsgálati hibát követünk el. A tanulóterületek számának növelésével is csak akkor tudunk érdemben pontosítani az eredményen, ha a kiválasztott mintákat ezen elv alapján definiáljuk. Másik lényeges szempont, hogy kerülni kell a más felülettípusokkal „szennyezett” területeteket. Nem célszerű például olyan felületet kiválasztani mintának, amelyben árnyékoltok vagy más kategóriába tartozó faj egyedei találhatók. Azonban a túlzottan jellemző színtónusú, nagyított felvételen kiválasztott mintákat is mellőzni kell, ez a területi borítottság jelentős alulbecslését eredményezi (14. ábra).



14. ábra A Hibás és helyes mintavételi egységek példája előosztályozás nélküli kiértékeléshez. (a: ezüstfa, b: aranyvessző, c: egyéb lágyszárúak, d: egyéb fás szárúak)

5.4.1 Pontosságvizsgálat

Az előző pontban már bemutatásra került, miként befolyásolják egyes tényezők az osztályozási eljárás pontosságát, azonban a módszer gyakorlati alkalmazhatósága szempontjából további kérdések merültek fel: Hány mintaterületet érdemes kiválasztani borítottsági kategóriánként? Milyen a kapott eredmények megbízhatósága? Hogyan hat a kapott eredményekre, ha árnyékkompenzációt használok? Hány százalékos hibahatárral lehet megbecsülni a vizsgált fajok felszínborítottságát? A



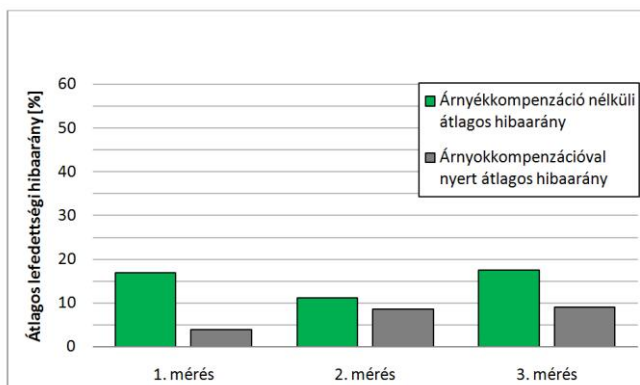
17. ábra Az egyes felszínborítási kategóriák lefedettségi hibaaránya 10 mintaterülettel végzett vizsgálat esetén

Látható, hogy az osztályonként 1 mintaterülettel végzett vizsgálat során nyert értékek nagy százalékos eltérést mutatnak egymáshoz képest, míg 5 mintaterülettel már nagyságrenddel jobb az eredmény, és 10 felvett mintaterület még egyenletesebbé teszi a lefedettségi hibaarányt. A diagramok tehát jól szemléltetik, hogy a mintaterületek számának növelésével, az azonos kategóriába tartozó lefedettségi értékek közötti szórás mértéke csökken. Ez azt jelenti, hogy nagyobb számú mintaterületeket felyvé a kapott eredmények megbízhatósága növekszik.

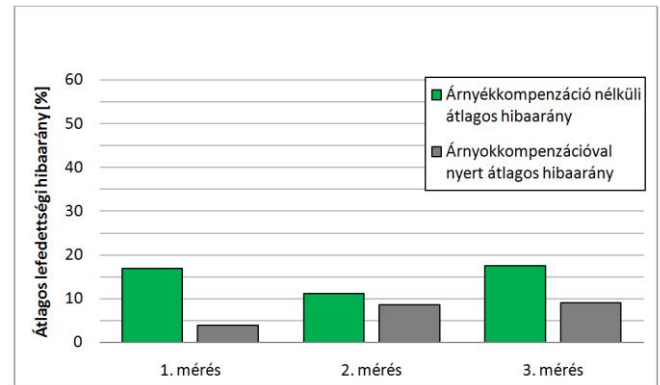
Érdemes megfigyelni azt is, hogy a 10 mintaterülettel végzett vizsgálat értékei nem pontosabbak, mint az 5 mintaterület vizsgálat eredményei, csupán a mérések szórása kisebb. Következésképpen megállapítható, hogy a mintaterületek további számának növelésével nem fogunk pontosabb adatokhoz jutni, viszont a kapott eredmények megbízhatóbbak, és ismételhetőek lesznek.

5.4.1.2 Átlagos hibaarány

Számszerű adatokat elemezve azt vizsgáltam, hogy az egyes mérések árnyékkompensációval korrigált eredményeinek hibaaránya milyen mértékben csökkent az eredeti mérések hibaarányához képest. Ebben az esetben nem a különböző kategóriák felszínborítottsági értékeit vettem össze, hanem az egyes vizsgálatokkal kapott hibaarányok átlagát. Ily módon egy vizsgálat eredményességét egyetlen adattal tudom jellemezni, ami még szemléletesebbé teszi az összehasonlítást. Az átlagos hibaarány meghatározására az 5 illetve 10 mintaterülettel végzett vizsgálatok eredményét használtam fel, mivel az 1 mintaterülettel nyert mérési adatok nem tekinthetők kellően megbízhatónak ahhoz, hogy az árnyékkompensáció hatását szemléltessék. A 18. és 19. ábrák az egyes mérések átlagos hibaarányait szemléltetik, mérésenként két eredménnyel.



18. ábra Árnyékkompensáció hatása 5 mintaterülettel végzett mérések átlagos hibaarányára.



19. ábra Árnyékkompensáció hatása 10 mintaterülettel végzett mérések átlagos hibaarányára.

A diagramok alapján egyértelműen látszik, hogy az árnyékkompensációs korrigálást követően az egyes mérések átlagos hibaaránya jelentősen javult az árnyékkompensáció nélküli mérések eredményeihez képest. Ez az 5 illetve 10 mintaterülettel végzett vizsgálatok mindegyikére elmondható. A legkisebb mértékű javítás 2,6%, míg a legnagyobb 13%, az átlagos különbség pedig 8,3%. Ezen értékeket a vizsgálat során kapott lefedettségi hibaarányok mértékével összevetve megállapíthatjuk, hogy árnyékkompensáció segítségével egyes vizsgálatok esetén akár kevesebb, mint harmadára csökkenthető az átlagos hibaarány. A különböző felszínborítási kategóriák esetén ez az érték több is lehet, de előfordulhat, hogy az árnyékkompensáció kisebb-nagyobb pontatlanságot eredményez. Ez részben a módszer során használt közelítések, részben az osztályozás alatt fellépő hibák negatív hatásának tudható be.

A hibaelemzéssel kapott eredmények rámutatnak arra, hogy a vizsgálatok közül a kategóriánként 10 mintaterülettel végzett, árnyékok figyelembevételével korrigált értékeket tekinthetjük a legmegbízhatóbbnak. Ezüstfa esetén 20%-os, aranyvessző esetén 10%-os hibahatáron belül megállapítható a lefedettség hibaaránya a vizuális interpretációhoz képest még előosztályozás nélküli kiértékelés esetén is. Azonban fontos megjegyezni, hogy ezen értékek kizárólag erre a mintaterületre vonatkoznak, más jellegű területek esetén az eredmény pontossága egyéb osztályozási tényezők függvénye.

6. További lehetőségek

A fotogrammetriai ortofotó előállítás módszertana lehetővé teszi az ortofotó-térképi textúrán túl háromdimenziós felületmodell előállítását is. A közepes magasságú (500-6000 m terepfeletti repülési magasság) repülések esetében előállított nagyrészletességű háromdimenziós felületmodell további eszköztárat kínál a vegetáció osztályozásához (20. ábra). A mintaterület esetében a háromdimenziós szűrővel az ezüstfa állomány lokalizálása még pontosabbá válhatott (21. ábra).

7. Következtetések és javaslatok

Az elvégzett vizsgálatok során elsősorban arra kerestem a választ, hogy használható-e a számítógépes képelemzés a szóban forgó invazív növényfajok elterjedésének meghatározására, és ha igen akkor milyen megbízhatósággal, milyen feltételek mellett.

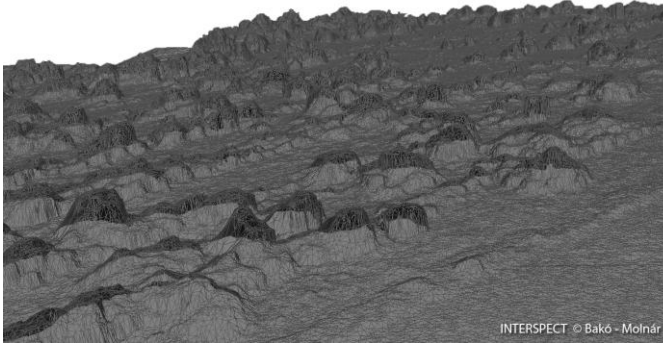
Egy szakszerűen elvégzett vizuális interpretáció által kapott adatoknál a számítógép előosztályozás nélküli eljárással nem képes pontosabb adatokat produkálni. A két eljárás közötti hiba mértéke dönti el hogy, az eljárás alkalmazható-e az adott feladatra. A megengedett hibaarány meghatározásakor mérlegelni kell botanikai, és gazdasági szempontokat egyaránt. Természetesen a vizuális interpretáció sem tökéletesen pontos, mint ahogy a terepi mérés sem az. Mindig az adott feladat alapján kell meghatározni, hogy mi a legnagyobb megengedhető hiba, amely a vizsgálati cél szempontjából kielégítő, ugyanakkor nem emészt fel indokolatlanul nagy erőforrást. A feldolgozásra szánt felvételek terepi felbontását is ennek tükrében célszerű megválasztani. A fotogrammetriai úton történő vegetációtérképezés során a költségek jelentős hányadát a felvételek elkészítése teszi ki. Nagyobb felbontású légi felvételek pontosabb adatszolgáltatást eredményeznek, ugyanakkor a felvételek ára és az elemzéshez használt számítógép hardverigénye is jelentősen növekszik. Az esetek túlnyomó részében azonban nem a legpontosabb eljárás a leghatékonyabb, hanem az, amelyik minimális ráfordítással megfelelő eredményre vezet. Azt, hogy az elvégzett vizsgálat elegendő pontossággal használható-e az egyes fajok területi lefedettségének meghatározására a következő egyenlőtlenség dönti el.

$$\text{Hibaarány} < \text{Megengedett hibaarány}$$

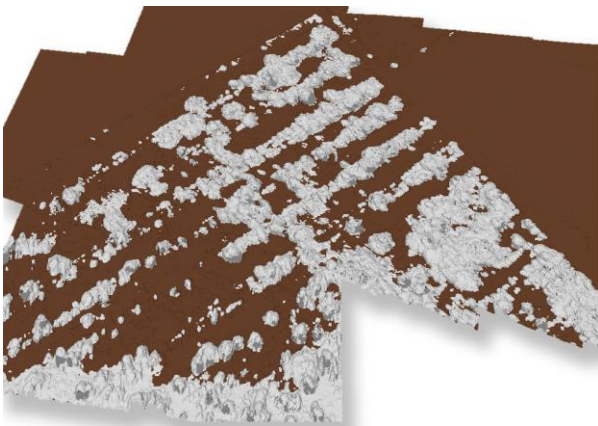
Abban az esetben, ha kizárólag számítógépes képelemzést alkalmazunk, nem tudjuk megbecsülni, hogy mekkora a kapott eredmények tényleges hibaaránya. Ehhez egy viszonyítási alapra, vagyis megfelelő referencia értékek előállítására van szükség. Nagy kiterjedésű területek esetében ezt elvégezhetjük a vizsgálati terület egy kisebb részletének vizuális interpretációjával, illetve terepi vizsgálattal. Fontos, hogy az elemzésbe bevont mintaterület az egész területre jellemző borítottsági kategóriákat tartalmazzon, reprezentatív legyen. Azon kívül, hogy így információt nyerhetünk arról, hogy mekkora hibaarányon belül lehetséges elvégezni az adott terület számítógépes elemzését, lehetőségünk van a vizsgálati paraméterek optimalizálására.

Invazív növényfajok területfoglalási méreteinek vizsgálata során legtöbbször az elterjedés időbeni változására vagyunk kíváncsiak, de az adatok kiértékelése fontos lehet még a védekezésre szánt erőforrás(élőmunka igény, vegyszerigény stb.) meghatározásához is. Ezen vizsgálati célok véleményem szerint nem követelnek pontosabb lefedettség hibaarányt, mint amit a kapott eredmények mutatnak. Az általam vizsgált terület közepesen összetettnek mondható, és meglehetősen jól szemlélteti a számítógépes képelemzés során felmerülő nehézségeket, ugyanakkor eléggé elkülöníthetők az egyes borítottsági osztályok ahhoz, hogy használható eredményekhez jussunk. Amennyiben alkalmaztam volna a szabványosított előosztályozási módszereket, a vizsgálat eredménye a levezetettől is pontosabb lett volna. Így valószínűsíthető, hogy kisebb terepi felbontással is kellően pontos felmérés végezhető a módszertani fejezetben bemutatott eszközökkel. Ezért célszerű volna további vizsgálatokat beiktatni a költségoptimalizált felbontás-tartomány megkeresésére.

Az invazív növényfajok elterjedésének vizsgálatán túl, a módszer még számos, a gyakorlatban is előforduló természet-és tájvédelmi feladat ellátására nagy megbízhatósággal alkalmazható, ezáltal a vizsgálati terület méretétől és borítottságától függetlenül, gyors és hatékony eszköz lehet a vegetáció-, valamint élőhely-térképezés területén.



20. ábra A mintaterület háromdimenziós modelljén az ortofotó-mozaik alkotja a textúrát



21. ábra A háromdimenziós felületmodellen is végrehajtható osztályozás, a magassági és reflektancia adatok komplex figyelembevételével (Bakó – Molnár)

Irodalomjegyzék

Alpert, P., Bone, E., Holzapfel, C. (2000): Invasiveness, invasibility and the role of environmental stress in the spread of non-native plants. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 3 (1): 52–66.

Bakó G. (2010): Multispektrális felvételek alapján készülő tematikus térképek minősége, a terepi felbontás és a képmínőség függvényében - *Tájökológiai Lapok* 8 (3): 507-522.

Bakó G. (2011): Légi távérzékeléssel készülő állományok minőségét befolyásoló tényezők. *RS&GIS Távérzékelési Technológiák és Térinformatika Online*, 1(2): 58-70.

Bakó G. (2012): A távérzékelés, a fotogrammetria, a térképészet és a térinformatika együttese, spektrum, szabotosság és adat-hozzáférhetőség – Kockázat - Konfliktus - Kihívás, A VI. Magyar Földrajzi Konferencia absztrakt kötete Szeged, 2012. szeptember 5-7., 7 p.

Bakó G. (2012): Gyors térképészeti mérések a levegőből. *Természet Világa*, 143 (10): 470-471.

Bakó G. (2013a): Idegen növény támadja a Balaton partját. *Élet és Tudomány* 68 (35): 1104-1106.

Bakó G. (2013b): Vegetációtérképezés nagyfelbontású valószínűségi- és multispektrális légifelvételek alapján – *Kitaibelia* 18 (1-2): 152–160.

Bakó G., Gulyás G. (2013): Légifelvételek költséghatékony osztályozási módszereinek kidolgozása az erdőgazdálkodás és a nemzeti parkok számára – *Botanikai Közlemények* 100(1–2): 63–76, 2013. 63-76. p

Bakó G., Molnár Zs. (2012): Új magyar fejlesztésű szenzorok a légi földmegfigyelés szolgálatában - Egy légi teszt sorozat fázisai. *Aeromagazin*, 14 (2): 20-21.

Barrett, E. C., Curtis, L. F. (1992): *Introduction to environmental remote sensing*. Chapman & Hall, London

Campbell, J. B. (2002): *Introduction to remote sensing*. Guilford Press, New York

Curran, P. J. (1985): *Principles of remote sensing*. Longman Scientific and Technical, New York

Csiszár Á. (2012): *Inváziós növényfajok Magyarországon*. Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Sopron, 364 p.

Detrekői Á., Szabó Gy. (2005): *Térinformatika*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 380 p.

Horváth Z., Simonkovics S. (1977): A fotogrammetria a környezetvédelem szolgálatában. *Műszaki tervezés*, 17 (11): 45-48.

Kraus, K. (1998): *Fotogrammetria: Alapok és általános módszerek*. Tertia Kiadó, Budapest, 379 p.

Lóki J. (2002): *Távérzékelés*. Kossuth Egyetemi Kiadó, Debrecen, 113 p.

Lövei G. 1997. Global change through invasion. *Nature*, 388 (6643): 627-628.

Mihály B., Botta-Dukát Z. (2004): *Özön növények – Biológiai inváziók Magyarországon*. Természetbúvár Alapítvány Kiadó, Budapest, 426 p.

Mihály B., Botta-Dukát Z. (2006): *Özön növények II. – Biológiai inváziók Magyarországon*. Természetbúvár Alapítvány Kiadó, Budapest, 414 p.

Nagy J. (1998): *Fotogrammetria I. Agrárszakoktatási Intézet*, Budapest, 125 p.

Parker, I.M., Simberloff, D., Lonsdale, W.M., Goodell, K., Wonham, M., Kareiva, P.M., Williamson, M.H., Von Holle, B., Moyle, P.B., Byers, J.E., Goldwasser, L. (1999): Impact: toward a framework for understanding the ecological effects of invaders. *Biological Invasions* 1, 3-19. p.

Richardson, D. M., Pyšek, P. (2006): Plant invasions: merging the concepts of species invasiveness and community invisibility. – *Progress in Physical Geography*, 30(3): 409–431.

Temesvári V. (2010): *Légifénykepező repülés tervezése a hagyományos eljárásoktól a digitális technológiáig*. Szakdolgozat, Eötvös Lóránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudomány Intézet, Budapest, 47 p.

Vila, M., Corbin, J.D., Dukes, J.S., Pino, J., Smith, S.D. (2006) Linking plant invasion to global environmental change. In: Candell J, Pataki D, Pitelka L (szerk.) *Terrestrial ecosystems in a changing world*. Springer, Berlin, 115–124. p.

Vitousek, P.M., D'Antonio C.M., Loope, L.L., Westbrooks, R. (1996): Biological invasions as global environmental change. *American Scientist* 84:468–478.

Williamson, M.H., Fitter, A. (1996): The characters of successful invaders. *Biological Conservation*, 78:163–170.