10.14751/SZIE.2017.015

SZENT ISTVÁN EGYETEM

KÖRNYEZET- ÉS TERMÉSZETVÉDELMI VONATKOZÁSÚ VÁLTOZÁSOK NYOMON KÖVETÉSE NAGYFELBONTÁSÚ LÉGI TÁVÉRZÉKELÉSSEL

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS

BAKÓ GÁBOR

GÖDÖLLŐ

2017

10.14751/SZIE.2017.015

A doktori iskola

megnevezése: Biológiatudományi Doktori Iskola

tudományága: Biológiai tudományok

vezetője: Dr. Nagy Zoltán

intézetvezető, egyetemi tanár, MTA doktora

SZIE, Mezőgazdaság- és Környezettudományi Kar,

Növénytani és Ökofiziológiai Intézet

Témavezető: Dr. Szerdahelyi Tibor

Egyetemi docens, intézetigazgató helyettes

SZIE, Mezőgazdaság- és Környezettudományi Kar,

Növénytani és Ökofiziológiai Intézet

Növénytani Tanszék

....

Az iskolavezető jóváhagyása A témavezető jóváhagyása

10.14751/SZIE.2017.015

Tartalomjegyzék

1 BEVEZETÉS 7
1.1 A téma aktualitása 7
1.2 Problémafelvetés 8
1.2.1 A terepi felbontás, a felmérés elvégzéséhez és kiértékeléséhez szükséges idő 8
1.2.2 A nagy mennyiségű adatra és a komplex adatgyűjtésre vonatkozó igény problémaköre 9
1.2.3 A terepi felbontás növelése a repülési sebesség csökkenése nélkül 10
1.2.4 A légi felmérési szabályzatok ellentmondásai 11
1.2.5 A légifelvétel kiértékelés szubjektivitása 12
1.3 Általános és részletes célkitűzések 13
2 IRODALMI ÁTTEKINTÉS 15
2.1 Légi távérzékelés 15
2.1.1 A légi távérzékelés platformjai 16
2.1.2 A szenzorok csoportosítása 16
2.1.3 Az adatgyűjtés minősége 17
2.1.4 Terepi felbontás 21
2.1.5 Spektrális felbontás 22
2.1.6 A felmérés minőségét meghatározó tényezők 23
2.1.7 Kamera kalibráció 27
2.2 Fotogrammetria, képfeldolgozás 29
2.3 A fotogrammetriai munkálatok minőségének ellenőrzése 36
2.4 Légi távérzékeléssel készült termékek elemzése 36
2.4.1 Élőhely és vegetáció felmérés 40
2.4.2 A terepi mintavétel 41
2.4.3 Foltdinamika 43
2.4.4 Tematikus térképek 43
3 ANYAG ÉS MÓDSZER 44
3.1 A légi felmérés folyamata 44
3.1.1 Repüléstervező szoftver készítése 44
3.1.2 A repülést megelőző és az azt követő teendők 46
3.1.3 Alkalmazott repülőgépek 46
3.1.4 A precíziós repülések 47

3.2 Mérőkamera kalibráció ... 48
3.3 A szenzorok kidolgozása ... 49
3.4 A precíziós repülések statisztikájának elkészítése ... 52
3.5 Kiértékelési torzítás ellenőrzésének menete ... 53
3.6 A felvételek kiértékelésének felgyorsítása ... 55
3.7 A vizuális interpretáció és a félautomatikus osztályozás összehasonlítása ... 57
4 EREDMÉNYEK ... 59
4.1 A precíziós repülések statisztikai eredményei ... 59
4.1.1 Magasság tartás ember vezette repülőgépen ... 64
4.1.2 Kameradőlések ... 64
4.2 A repülési paraméterekkel szemben támasztott elvárások megfogalmazása ... 66
4.3 A mérőkamera előállítás eredményei ... 68
4.3.1 Kiegészítő megoldások a felhasznált alkatrészek elemzésében ... 68
4.3.2 Kivitelezés és tapasztalatok ... 68
4.3.3 A soron belüli átfedés biztosítása ... 74
4.3.4 Képvándorlás-mentes felvételezés ... 77
4.3.5 Multispektrális csatornák geometriai összehangolása ... 80
4.3.6 A fotogrammetriai labormunka automatizálhatósága ... 82
4.4 Egy komplex penta mérőkamera tervezése ... 84
4.5 Megoldás a légi távérzékeléssel készített anyagokkal szemben támasztott új követelményekre ... 89
4.6 A terepi felbontás hatása a kiértékelési torzításra ... 91
4.6.1 A szubjektív hatás értékelése ... 91
4.6.2 A vizuális interpretáció és a félautomatikus számítógépes kiértékelés összehasonlításának eredményei ... 95
4.7 Állati populációk és a vegetáció felmérése, mint környezeti indikátorok ... 96
4.7.1 Vegetáció felmérés ... 97
4.7.2 Természetvédelmi indikátorok térbeli elemzése ... 108
4.7.3 Árvízmodellezés költséghatékonyan beszerzett téradatokkal ... 110
4.7.4 Belvízfelmérés költséghatékonyan beszerzett téradatokkal ... 110
4.7.5 Távközlési tornyok tájba történő optimális kihelyezése ... 112
4.7.6 Közigazgatási térinformatikai rendszerek raszteres fedvényei ... 113
4.8 Következtetések ... 114
4.9 Új tudományos eredmények ... 115
5 KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK ... 116

6 ÖSSZEFOGLALÁS 117
7 SUMMARY 118
8 IRODALOMJEGYZÉK 119
9 FÜGGELÉK 131
10 KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS 176

10.14751/SZIE.2017.015

10.14751/SZIE.2017.015

1 BEVEZETÉS

A településtervezés, a városfejlesztési tervek elkészítése és a természet közeli területek védelme, rekonstrukciója nagy mennyiségű, gyakori ismétlésben gyűjtött adat gyors és pontos értékelésére épül. Így lehetséges az anomáliák kimutatása, a kockázatok lehetőség szerinti kizárása, valamint a kedvező életfeltételek és fenntartható gazdálkodás biztosítása. Bizonyos esetekben a repülőgépes légi távérzékelés a szükséges információk, téradatok beszerzésének ideális, vagy egyetlen megfizethető módja. A természetvédelem az 1970-es évek óta alkalmazza a légi adatgyűjtéssel szerzett információkat, a vízügy és más szakterületek pedig már az 1920-as évektől folyamatosan használják térképezési és monitoring célokra, feladataik megoldásához. A közszolgáltatás (településüzemeltetés, ingatlan és műtárgy ellenőrzés, tájrendezés, környezeti hatáselemzés) folyamatosan növekvő tendenciával és egyre többféle területen alkalmazza a légi felmérés segítségével előállított téradatokat, így a felhasználás ma már jellemezően többcélú.

1.1 A téma aktualitása

A természetközeli állapotú felszínek csökkenésének gyorsuló üteme (Hoekstra et al. 2005), a klíma változása (Gian-Reto et al. 2004; Schuur és Abbott 2011), a természetvédelem megváltozó helyzete (Schenk et al. 2007; Daily et al. 2000) nélkülözhetetlenné teszik, hogy tudományos eredményekkel alátámasztott indoklással támogassuk a döntéshozók munkáját, amelyek igazolják a tájak, a természetes vegetációval borított területek, a puffer zónák védelmének fontosságát, segítenek felbecsülni az ökoszisztéma szolgáltatások gazdasági értékeit, elősegítik a megalapozott érvrendszer felépítését a biodiverzitás megőrzése és fenntartható tájgazdálkodási irányelvek mellett. Már a XX. században bebizonyosodott, hogy a távérzékelés, mint a vizsgált közeget kevéssé vagy egyáltalán nem befolyásoló, gyors és általában költséghatékony adatgyűjtési módszer, valamint a térinformatika, mint az objektumok és jelenségek kapcsolatrendszerének feltárására létrehozott komplex térbeli adatelemezést elősegítő adatbázis kezelési rendszerek összessége, hasznos, sőt nélkülözhetetlen a tájban történő gazdálkodás optimális tervezéséhez és a beavatkozások hatáselemzéséhez (Rose et al. 2015). Mára azonban az emberi jelenlét, a mesterséges műveletek és azok hatásainak jelenléte olyan mértékű, hogy csak mélyreható és összetett vizsgálatok segítségével végezhetjük el a természeti állapot felmérést és a hatásvizsgálatokat (McKinney és Lockwood 1999). A történelmi, közelmúltbeli és a várható beavatkozások hatásainak és összefüggéseinek, valamint a számos beavatkozás-végrehajtó szervezet bevallásai és a monitoring adatok vizsgálatával végbemenő elemzések olyan modern számítástechnikai és statisztikai módszereket vesznek igénybe, mint

például a *big data* analízis (Marx 2013). A multitemporális és interdiszciplináris vizsgálatsorok közös értékelése ma már számítástechnikai megoldások nélkül elképzelhetetlen. Mivel a környezetvédelmi és a természetvédelmi szempontokból releváns adatok térben és időben képződnek le, ezek a vizsgálatok egyre inkább a térinformatikai alapú adatbázisokban elemző algoritmusokra támaszkodnak.

A természetes vegetáció elemzéséhez éppúgy nélkülözhetetlenek a nagyfelbontású térinformatikai adatbázishoz kapcsolt térképfedvények, mint a városökológiai vizsgálatoknál, a felosztott földfelszín keskeny határsávjaiban végbemenő, az ipari és beépített területeket valamelyest pufferelő mezsgyék felméréséhez. Általánosságban elmondható, hogy a kis kiterjedésű felszínelemek megismerése a céltérképező szolgáltatások alapvető feladatává vált. A nagy felmérési részletesség a nagy kiterjedésű monokultúrákban lezajló folyamatok megismeréséhez éppúgy fontos (Mulla 2013), mint a parcellák között fellelhető, fészkelő helyként szolgáló és az őshonos növényfajok populációit megmentő keskeny sávok esetében (Csathó 2009), vagy a települési szintű objektum elemzéskor közigazgatási feladatoknál (Yalcin és Selcuk 2014; Rupnik et al. 2015). Ennek megfelelően komoly igény tapasztalható a távérzékeléses felmérési módszerek felbontás növelése iránt. Felgyorsult világunk problémáira a felszínváltozás monitoring műveletei is egyre gyorsabban ismétlődő felvételezéssel reagálnak, hogy még idejekorán jelezhessék az anomáliákat, megadva ezzel a káros folyamatok visszaszorításának lehetőségét. A növekvő terepi felbontású és gyakoriságú felmérések azonban számos korlátba ütköznek, és ezeket a problémákat legtöbbször több tudományterületnek közösen kell orvosolnia.

1.2 Problémafelvetés

1.2.1 A terepi felbontás, a felmérés elvégzéséhez és kiértékeléséhez szükséges idő

A térképészeti részletesség, azaz a terepi felbontás, valamint a vizsgálati frekvencia, azaz a felvételezések ismétlési gyakoriságának növelési igényével párhuzamosan született meg az igény a gyors és magas szinten automatizálható, minél kevesebb manuális munkát és ellenőrzést igénylő kiértékelési, tematikus térképezési módszerek iránt. Mindez indokolt, mert a nagy részletességű, nagy területeket rövid időközönként térképező eljárásokból származó fotogrammetriai termékek kiértékelését manuálisan (például vizuális interpretációval) az időhiány és a megnövekedett vizsgálati részletesség miatt már nem képesek elvégezni a szakemberek. Ez a nagyfelbontású távérzékeléses adatgyűjtési módszerek felmérési gyorsaságának növelését is maga után vonja, mert a részben automatizált kiértékelés csak akkor

lehet igazán sikeres, ha a légi vagy űr fényképezés olyan rövid idő alatt zajlott le, hogy a napállás, a felhőzet, a légköri viszonyok, a légszennyezettség és egyéb paraméterek megváltozása csak minimálisan befolyásolják a munkaterületet lefedő digitális állományt (Bakó 2013a). A felhőzet, a felhőárnyékok és a napállás változásából adódó besugárzás különbségek, az inverziós réteg tisztulása mind olyan eltéréseket okoznak a felvétel-mozaikon, amelyek nem a felszíni tulajdonságok térbeli változatosságából adódnak. Amikor a felvétel csatornáin az intenzitás változásokat nem a felszínborítás, vagy a vizsgálat szempontja szerinti felszín variabilitás határozza meg, hanem ismeretlen és területenként változó mértékű légköri hatások is érvényesülnek benne, akkor a tematikus térképezés folyamata lelassul, nehézkessé válik. Módszertől és felmérési paraméterektől függően a különböző spektrális tulajdonságú csatornákra eltérő hatást gyakorolnak ezek a káros légköri és megvilágításbeli inhomogenitások, így bizonyos mértékben visszakövetkeztethetők, ugyanakkor a felméréskor a felszínen tapasztalható folthatárok jó elkülöníthetőségét negatívan befolyásolják. Lassítják és meg is hiúsíthatják a megbízható vegetációtérképezést és az egyéb felszínborítási céltérképezési feladatokra kognitív módszerekkel felépített számítástechnikai algoritmusainak elfogadható hibahatáron belüli működését.

1.2.2 A nagy mennyiségű adatra és a komplex adatgyűjtésre vonatkozó igény problémaköre

A nagy mennyiségű adat nagyobb megbízhatóságot, jobb osztályozási pontosságot nyújt (Tobak 2013), ugyanakkor a nagyszámú csatornára nagy térbeli felbontással gyűjtött adatok kiértékelése olyan nehézség elé állítja a szakembereket, amelynek megoldásában a célszerű és letisztult elvek alapján végbemenő adatbányászaton és számítástechnológiai fejlődés elősegítőin kívül az adatgyűjtő rendszerek tervezőinek van jelentős felelőssége. Ezért a széles körben alkalmazható, de kis geometriai felbontású képalkotók mellett nagy jelentősége van a célfeladatokra optimalizált mérőberendezéseknek. Újabban az olyan berendezések kifejlesztésére mutatkozik igény, amelyek széleskörű céltérképezési eljárásokban alkalmazhatók nagy terepi felbontással, esetleg átállítható spektrális (szűrőzés, finomhangolás) és/vagy képalkotás-geometriai paraméterekkel (pl. látószög, fókusztávolság, esetleg cserélhető szenzorelemek). Ez a törekvés nem csak a feldolgozandó adatok mennyiségének csökkentésére irányul, hanem úgy is felfogható, hogy az eltárolható adatmennyiséget úgy vesszük föl, hogy azok nagyobb részben tartalmazzanak a célfeladat szempontjából releváns információkat. Ilyen módon a felmérés sikerének, pontosságának és gyorsaságának növelésére is nagyobb esélyünk van. Célszerű tudatosan megtervezni a felméréseket, és ehhez alakítani az eszközparkot, megspórolva a felesleges adatok kiértékelésére fordított munkaidőt. A felvételi paraméterek kiválasztásánál

hangsúlyozni kell a vizsgált jelenségek, folyamatok tudományos megközelítésének fontosságát, hiszen az adattöbblet nem mindig jár információ többlettel (Verőné 2010). Komoly technikai kihívásokat jelent a nagy mennyiségű adat kezelése a növekvő terepi felbontású hiperspektrális (HS) állományok esetében (Deli 2010). Pedig a képalkotó spektroszkópia elvitathatatlan előnyökkel rendelkezik a felszíni elemzések során (Mucsi et al. 2008). Mégis számos esetben előfordul, hogy a hiperspektrális állományokat a végfelhasználó számítógépes kapacitása nem képes megnyitni, így a felvételek nem kerülnek tényleges felhasználásra. Ennek elsődleges okai a gyakorlati tapasztalat és a kellő szoftveres és hardveres eszközháttér hiánya. Többek között erre a problémára kerestem megoldást egy, az adat fizikai tárhely igényét és kiértékelési, felhasználási nehézségeit minimalizáló eljárással. Amennyiben azt is figyelembe vesszük, hogy a hiperspektrális adatkocka adott felmérési feladathoz történő multispektrális térben végbemenő elemzését a gyakorlatban a legmegfelelőbb (általában 4-8) csatornapáron szokták megvalósítani, a nagyszámú folytonos színképű csatorna (HS adatrögzítés) raszteres térbeli leképzése számos esetben nem indokolható. Ugyanakkor a magas (24 - 1800) csatornaszám miatt a felvételek terepi felbontása (geometriai részletessége) korlátozott a hiperspektrális adatok esetében, így a képszegmentálás gyenge geometriai felbontású felvételeken megy végbe. Amennyiben viszont csupán néhány nagy terepi felbontású csatornával rendelkezik a képalkotó eszközünk (multispektrális berendezés), annak a lehetőségét veszítjük el, hogy az objektumok felületének teljes színképét rögzíthessük.

1.2.3 A terepi felbontás növelése a repülési sebesség csökkenése nélkül

Filmes technológiával nagyjából 5 cm terepi felbontás érhető el gazdaságos felvételezési sebesség mellett. A minőségi digitalizált film és a digitalizáláshoz képest azonos elemi képpont méretű, azonos körülmények között exponált hasonló tulajdonságú digitális felvétel részletessége azonos (Hartmut 1997). Ez azt jelenti, hogy a hasonló dinamikai, minőségi tulajdonságú film és a digitális képérzékelő azonos körülmények között nagyjából azonos minőségű képet produkál. Körülbelül 2006-ban érte el a nagymennyiségben hozzáférhető digitális fényképezőgépek minősége a jó minőségű film képminőségét (Booth és Cox 2006). Azóta mind a csúcsminőségű analóg (filmre rögzített), mind pedig a csúcsminőségű digitális felvételek lehetővé teszik a nagyfelbontású (5 – 10 cm / pixel terepi felbontás) légifelvételezést. Ez a felbontás elősegíti a városi, vízügyi, erdészeti, kataszteri felmérések hagyományos minőségű elvégzését, azonban részletes céltérképezéshez és közvagyon kataszter készítéshez, valamint szennyező források felderítéséhez már nem minden esetben, a részletes vegetáció felméréshez és vadszámláláshoz pedig leggyakrabban nem elegendő. Ha a repülőgép lejjebb ereszkedik, az megzavarhatja az állatokat, helyenként szabályellenes és veszélyes is lehet, ráadásul fototechnikai korlátokba

ütközik. A nagy sebességgel alacsonyabbról történő fényképezés képvándorláshoz vezet. Amennyiben viszont lassabb a haladási sebesség, a repülőgép áteshet, a költségek megnövekszenek, az állatok átvándorolhatnak az egyik pásztáról a másikra, mire a repülőgép, vagy helikopter visszaér a következő repülési soron. A lassabban haladó platformok (pl. mikro uav technológia és helikopterek) gazdaságos megoldást jelentenek a kis munkaterületek felméréséhez, de az említett felmérési sebességgel kapcsolatos problémák mellett a rövid időn belül gazdaságosan felmérhető terület mérete miatt sem jelentenek megoldást a problémára.

A légi felvételezés sebességének növelése nem csupán gazdasági kérdés. A nagy területek rövidebb idő alatt történő légi fényképezésével készített raszter állományok elemzése pontosabb képet szolgáltat egy térség állapotáról. A megközelítőleg azonos időjárási körülmények között és napszakban fényképezett képsorok elemzésekor a kiértékelési eredményt kevésbé befolyásolják a légköri hatásokból és besugárzás-változásból eredő képminőség különbségek. A korszerű Földmegfigyelési, távérzékelési módszerek alkalmazásakor az egyik legnagyobb kihívást a megfelelő részletességgel előállított fényképi raszter-állomány egyenletes minőségű előállítása jelenti. Mindemellett a gazdaságossá váló és gyorsabban kiértékelhető felmérés gyakorisága is növelhető, ami kifinomult monitoring tevékenységhez vezet.

A távérzékelési módszerekkel történő információszerzés kihívása az adatok megbízhatóságának, a felmérés részletességének és pontosságának növelése a felmérési idő csökkentése mellett. A terepi felbontás növelésével részletesebb és pontosabb adatbázisok vezethetők le, mert az ortofotó-mozaik geometriai megbízhatósága is növekszik.

1.2.4 A légi felmérési szabályzatok ellentmondásai

Az elmúlt száz évben – a repülőgépes légi térképészet gyakorlati alkalmazásának története során – számos szabályzat látott napvilágot (Williams 1966, L1 Szabályzat 1977, Specification for Aerial Survey Photography, Canada, 1982, Kaliforniai légi felmérési szabályzat 2006, Indiana Photogrammetric Mapping Specifications and Services Manual 2013, Ortofotók áillami átveteli szabályzata 2015, stb.). A legtöbb rendelkezik a légifelvétel készítés precíziós repüléseire vonatkozó minőségi követelményekről, ugyanakkor a tervezett repülési soroktól való síkrajzi és magassági eltérés, valamint a tengelydőlések korlátozására elfogadott értékeket nem hosszú adatsorok elemzésével alkották meg, mert a GPS technológia az ezredforduló előtt ezt még nem tette lehetővé. Egyes szabályzatokban számos ellentmondás is megtalálható. A digitális mérőkamerákhoz és a korban modern részletességű felmérési módszerekhez alkalmatlan iránymutatásokkal is találkozunk.

1.2.5 A légifelvétel kiértékelés szubjektivitása

A tárérzékeléssel készült eredeti térképek minőségén túl az azokból levezetett céltérképek minőségét az információkinyerés pontossága is befolyásolja. Természetesen a terepi módszerekről is elmondható, hogy eltérő szakmai hátterű kutatók eltérő megbízhatóságú térképeket készítenek (Molnár et al. 1998), de a légi távérzékelt adatokra ez halmozottan igaz.

1.3 Általános és részletes célkitűzések

A dolgozat célja az előző fejezetben ismertetett problémák megoldása, enyhítése passzív légi távérzékelési módszertan és műszaki fejlesztések segítségével.

- Ezért egy komplex eljárás és berendezés háttér kidolgozását tűztem ki célul, amelyben az interpretációs, képszegmentálási, osztályozási, foltlehatárolási feladatok térképészeti pontosságát, valamint a vegetációs és egyéb indexek kiszámítását a nagyfelbontású (50 MP) multispektrális csatornák támogatják, míg a spektroszkópia a felvételek közepén a felszínről visszaverődő sugárzás spektrális összetételének vizsgálatára ad lehetőséget. Egyik legfontosabb célom a tervezés során a légi felmérések sebesség növelésének megvalósítása a felmérés részletességének és geometriai pontosságának megőrzése mellett. Célom a műszaki berendezésháttér kidolgozásán túl módszertani útmutatók készítése, céltérképezési lehetőségek ismertetése az új műszaki megoldások kipróbálásán keresztül. Fontos cél ezen távérzékelési adatgyűjtő és adatfeldolgozó módszerek pontosságának és hatékonyságának megismerése és javítása.
- A vizsgálatok során arra is választ kerestem, hogy a megfelelő képi minőségű, felbontású és pontosságú ortofotók előállításához milyen legnagyobb haladási sebességgel készíthetők légi felvételek az elérhető technológiai szinten. Azt is vizsgáltam, hogy milyen terepi felbontás és soron belüli átfedés érhető el különböző repülési sebességek mellett.
- Céljaim közé tartozik a 2009 - 2016 időszakban végrehajtott légi távérzékelési repüléseink statisztikai értékelése, majd az IS1 légi felmérési szabályzat revideálása ezen eredmények alapján. Napjainkban már rendelkezésre állnak évtizedes adatsorok, amelyeket a globális helymeghatározó rendszerek segítségével (GPS, GLONASS) rögzítettek, ezért céljaim közé tartozik az Interspect Kft. saját repülőgépes szolgáltatásában végzett (ezért jogi értelemben is felhasználható) fotogrammetriai célú légi felvételező repülések elemzésével megállapítani, hogy betarthatók-e a korábbi (például az IS1 szabályzatban meghatározott) precíziós repüléssel szemben támasztott elvárások. Az adatok értékelése után javaslatot teszek egy, a repülések tapasztalatain alapuló, a minőségi passzív képalkotó kockázó távérzékelés feltételeit biztosító értéksorozat kidolgozására.

- Vizsgálni fogom a terepi felbontás céltérkép pontosságára gyakorolt hatását, mert tapasztalataim szerint a terepi felbontás csökkenése különböző mértékben torzítja a

különböző felszínborítási kategóriák kiértékelési eredményeit (Bakó 2010a). Érdemes megvizsgálni a felbontás csökkenésével tapasztalható kiértékelési torzítás mértékét néhány, a hazai felmérések során gyakran előforduló felszínborítási kategóriára vonatkozóan annak érdekében, hogy már a tervezésnél tisztában legyünk a várható eredmény megbízhatóságával, és a felmérési paraméterek beállításával optimalizálhassuk azt.

- Vizsgálni fogom a szubjektív hatás okozta kiértékelési torzítás alakulását a vizuális interpretáció esetében, különböző terepi felbontásra vonatkoztatva. Elenőrzöm a számítógépes félautomata osztályozási módszer és a vizuális interpretáció eredményben megmutatkozó különbségeit is.

- Szintén fontos vizsgálni, hogy melyek azok a felszínelemzési paraméterek, amelyek az ismertetésre kerülő módszerekkel felmérhetők, kellő pontosságú tematikus térképkészítést tesznek lehetővé. Különös tekintettel a környezeti állapot változás és természetvédelmi mutatók elemzéshez szükséges térbeli változásvizsgálati paraméterekre koncentráltam. Néhány, kifejezetten a terepi felbontás növelésével elérhetővé vált, vagy az új felmérési sebességtartományból eredő monitoring lehetőség tesztelését és rövid értékelését is bemutatom. Szeretnék rávilágítani a gyors légi-térképészeti megoldás alkalmazási lehetőségeire. A céljaim közé tartozik olyan mintafeladatok megvalósítása is, amelyek elvégzésére korábban azonos hatásfokkal, vagy ilyen gazdaságosan nem lett volna lehetőség.

- Célom egy olyan jövőbeli, a vizsgálatokhoz elkészített mérőkamera-rendszeren túlmutató, komplex berendezés vázlatos bemutatása, amely bármilyen pilóta vezette merevszárnyú platformra integrálható, minimális térbeli felbontású spektrális adatokat és nagy terepi felbontású multispektrális csatornákat rögzít, miközben részletes térfelmérésre is alkalmas.

2 IRODALMI ÁTTEKINTÉS

Napjainkban a részben automatizált kiértékelés lehetővé teszi nagyobb állományok gyors elemzését, a felbontás növekedésével pedig pontosabb vektorgrafikus adatbázisok készülnek a részletes raszter állományok osztályozásával. Egy erre vonatkozó kísérletben Myeong és társai (2001) 81.75% pontosságot értek el vegetációval tarkított vizsgálati területen. A vízfelületek esetében a pontosság általában még nagyobb volt. A nagy részletességű ortofotók nem csak homogén felületek és monokultúrák, ültetvények esetében nyújtanak pontosabb térképezési és azonosítási lehetőségeket (Halla et al. 2003), hanem a települési és az élőhely felméréseknél, erdőtérképezésnél (Suárez et al. 2005) is növelik a levezetett adatok, a tematikus térképek pontosságát. A növénybetegségek felmérése is differenciáltabbá válhat nagyobb terepi felbontás esetén, ahogyan a környezeti adottságokhoz történő alkalmazkodás is hatékonyabb, a gazdálkodás fenntarthatósága ellenőrizhető lehet. Ezért a távérzékelésben a geometriai felbontás növelésének korszakát éljük. UAS (pilóta nélküli felmérő platform) technológiával már számos kísérletet végeztek a szubcentiméteres terepi felbontás-tartományú ortofotók felhasználási előnyeire vonatkozóan. Általános tendenciaként megállapítható (a legújabb technológiák használata esetén is), hogy a terepi felbontás csökkenésével romlik az elkészíthető ortofotó térkép pontossága (Kung et al. 2011). Például Zhang és Elaksher (2012) csapata 0,5 cm terepi felbontásnál, 1 cm-nél jobb pontosságot ért el 2012-ben az utak felszínének háromdimenziós felmérésénél. A nagyfelbontású légi felmérés a klasszikus légi felmérések információtartalmán kívül számos kiegészítő információt hordoz magában a vegetáció egészségi állapotáról és jelentősen felgyorsítja a terepi adatgyűjtést is (Wulder et al. 2012).

2.1 Légi távérzékelés

A légi felmérésnél valamilyen erőtér (elektromágneses hullámok, hang, mágneses tér, gravitációs tér) változásainak vizsgálatával előállított távérzékelési termékek biztosítják a munkaterület jó áttekinthetőségét, elősegítik a bizonyos tulajdonságok szempontjából homogén folthatárok meghatározását, információt szolgáltatnak a nehezen megközelíthető helyekről. Ezáltal rejtőző élőhely foltok is térképezhetővé válnak, felderíthetők a speciális szerkezetek, elrendeződések, és szabatos termék esetén pontosíthatók a korábbi felmérések eredményei és térképei. Idősor esetében nyomon követhetők a változások, lehetőségünk van a vegetációdinamikai folyamatok vizsgálatára (Gearhart 2011). Például vizsgálhatjuk az erdősülés, az erdősítés, az erdőirtás folyamatát, az erdők kiritkulását, a ligetek záródását (Bán és Báder 1968). Követhetjük a fák fejlődését, a természeti területek degradációját és a szukcessziós folyamatokat.

A távérzékeléssel nyert adatok előnye a kizárólag terepen történő nagy részletességű pontszerű mintavételi raszteren végrehajtott adatgyűjtéshez képest a nagy területekre vonatkoztatott térbeli információszerzés és a művelet költségeinek jelentős csökkentése. A különböző terepi és különböző típusú légi távérzékelési adatok integrált felhasználása részletesebb és pontosabb eredményre vezet, mint a különböző adatok önálló értékelése (Zhang, 2010).

2.1.1 A légi távérzékelés platformjai

A légi távérzékelés elvégzéséhez olyan platformot célszerű választani, amely hosszú időn keresztül a levegőben tudja tartani a szükséges felvevő berendezéseket, stabil, ellenáll a turbulens hatásoknak és az adott felvételezési módszernek megfelelő sebességet biztonságosan és stabilan képes tartani (IS1 2009). A légi távérzékelés első eszközei a ballonok voltak, majd a léghajók, később a merev héjszerkezetű léghajók, végül a merevszárnyú repülőgépek és a helikopterek alkalmazása került előtérbe. Az 1970-es évektől fokozatosan megjelentek, majd az ezredfordulótól az energiatárolási módszerek forradalmával ugrásszerű fejlődésnek indulhattak a távirányítású és autonóm távérzékelésre optimalizált repülő eszközök, amelyek a személyzet helyett további erőforrást biztosító üzemanyagot, akkumulátorokat vagy nehezebb felvevő berendezéseket képesek hordozni, más esetben pedig kisebb méretű és tömegű, alacsonyabb előállítási költségű platformot jelentenek a kis tömegű szenzorok hordozásához (Bakó 2015a).

2.1.2 A szenzorok csoportosítása

A légi szenzorok esetében is megkülönböztetjük az aktív (elektromágneses sugár- vagy hangforrással rendelkező berendezések) és passzív (a környezetből származó energiakülönbségek detektálására előállított eszközök) berendezéseket (Balázsik 2010). A passzív képalkotó szenzorok két fő típusa a kamera (framing system vagy frame camera) és a pásztázó elven működő szkennelő rendszer. Utóbbi esetben a pásztázás iránya általában a haladási irányra merőleges, és bár a perspektív nézőpont nagy repülésre merőleges látószöget eredményez, a platform alatti területtől távolodva a képi és geometriai minőség és helyreállíthatóság általában jelentősen romlik, ráadásul a bonyolult mechanikai elemek sokszor nem szisztematikus, nehezen rekonstruálható elrajzolásokat eredményeznek (Poli és Toutin 2012). Ezeknek a rendszereknek a karbantartása és előállítása is nehezebb. Vitathatatlan előnyük, hogy adott felszínrészletet csak egyszer, vagy (turbulencia okozta helyzetváltozás, bólintás miatt) csak néhányszor vesznek fel, így adatmennyiség szempontjából nem pazarlók (Tempelmann et al. 2000). Ezzel szemben a frame rendszerű képalkotó berendezések ismételt diszkrét megvilágítási időintervallumok alatt készült felvételeinek topológiai meghatározottsága

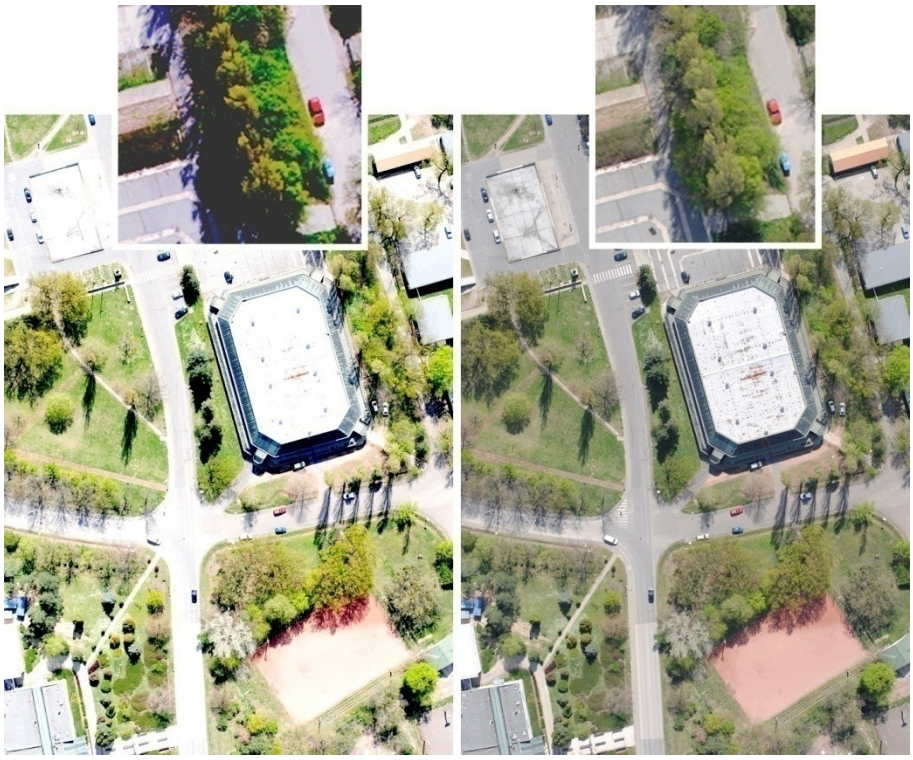
a korrekciós egyenletek segítségével könnyebben topográfiai szabatosságra váltható. Mindez a számítási hibalehetőséget és az ismeretlenek számát csökkenti. Ugyanakkor jóval több képfelvétel rögzít egy adott térrészt. A kockázó felmérés átlagosan 9 - 14 felvételen rögzít egy felszíni pontot.

A passzív távérzékelési rendszerek általában nappal, tiszta és napfényes időjárási viszonyok mellett alkalmazhatók. Kivétel a felhőborítás esetén is alkalmazható passzív mikrohullámú mérés, az éjszaka is alkalmazható, sőt a legtöbb esetben – a napsugárzás felületeket felmelegítő hatásának kiszűrése érdekében – éjszaka vagy a hajnali órákban alkalmazandó termális (hőtérképezési) technológia (Licskó 2005), valamint az extrém érzékenységű passzív éjszakai légi fotogrammetria. Utóbbit alkalmazzák például a településeken megtalálható világítótestek fényszennyezésének kimutatására is (Kuechlya et al. 2012).

2.1.3 Az adatgyűjtés minősége

A passzív távérzékelési eljárások esetében a napból származó elektromágneses sugárzás reflektált, azaz a felületről visszaverődő hányadát, valamint a felületek saját kisugárzását vizsgáljuk (Schowengerdt 2006). A reflektancia a sugárzás fluxus meghatározott kúp alakzaton belül történő visszaverődési hányada (Nadal és Barnes 1999). Ismert megvilágítás (besugárzás vagy irradiancia) esetén, a légköri hatásokat elhanyagolva, egy Lamberti típusú visszaverő felszín esetében a radiancia fluxus reflektált hányada azonos geometriával és hullámhosszal verődik vissza (Painter és Dozier 2004). A pillanatnyi látómező egységnyi térszögéből a szenzor adott fotodiódájára (1 pixel) beérkező összes sugárzás a radiancia. Az érzékelő radiometriai felbontásától függően a felvételen egy pixel DN (intenzitás, digital number) értéke különböző értékmennyiséget vehet fel. A valósszínes (RGB) és kompozit digitális felvételek három csatornából épülnek fel. A valósszínes felvételek esetében a vörös (R), zöld (G) és kék (B) csatornák együtt tartalmazzák a ~400-700 nm hullámhossz tartománybeli értékeket (a képérzékelő vagy film spektrális érzékenységétől és az expozíció során beérkező sugarak hullámhosszától függően). Minden pixel színét ez a három alapszín adja ki. A számítástechnika és az Internet jelenlegi fejlettségi szintje még csak a 24 bites színes digitális felvételek használatát teszi lehetővé szélesebb körben. A 24 bites felvételek három 8 bites csatornából épülnek fel, ahol 0-255 értéket vehet fel egy pixel minden csatorna esetében. Ezért akár 256^3=16777216 féle színárnyalatot is felvehet egy adott pixel egy 24 bites digitális felvételen (Markelin és Honkavaara 2004), legyen az valósszínes (RGB) kép, vagy multispektrális felvételből létrehozott háromcsatornás kompozit. Korunk digitális fényképezőgépei, szkennerei

és a modern számítógépek képesek 12-14 bites csatornákat rögzíteni és kezelni. A legtöbb rendszer 16 biten tudja eltárolni a 14 bites csatornákat. A 3 x 16, azaz 48 bites RGB felvételek esetében egy pixel 65536^3, azaz 281474976710656 féle színértéket is felvehet (Bakó 2011a). A digitális felvételek radiometriai felbontását jelző bit mélység azonban önmagában még nem definiálja a felvétel dinamikáját. Az analóg értelemben vett dinamika azt jelenti, hogy a minimális (már érzékelhető) energiamennyiség ($Lmin_\lambda$) és a maximális (még érzékelhető) energiamennyiség ($Lmax_\lambda$) közötti intervallumban hányféle energiaszintet tud az érzékelő-rendszer megkülönböztetni, ugyanakkor a radiometrikus felbontás révén nem a felszínről visszavert energiaértéket olvashatjuk ki a pixel értékeként, hanem az ún. intenzitásértéket (DN) (Bakó 2012a). Mindennek a jelentőségét az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra A bal oldali ortofotó részlet dinamikája olyan alacsony, hogy a megfelelően exponált területek mellett előfordulnak alul- illetve felülexponált részek is, a fák nem különíthetők el rajta, és a mesterséges térszín is egybeolvad a földutakkal (Bakó et al. 2015). A légifelvételek részletes elemezhetőségét nem csak a felbontás, de az árnyalatterjedelem és árnyalatgazdagság is jelentősen befolyásolja.

A távérzékelésre használt elektrooptikai eszközök a műszer adott nyílásszöggel jellemezhető optikáján keresztül a színszűrökkel meghatározott hullámhossztartományba eső, a meghatározott érzékenységű detektor felületére érkező sugárzás teljesítményét mérik. A műszerek kalibrációjakor megállapítják a műszerbe jutó radiancia és a műszer által kiadott digitális jelszint közötti kapcsolatot. A műszerek előállítás során törekednek arra, hogy ez a

kapcsolat lineáris legyen (Berke et al. 2010). Az adott hullámhosszon, a detektoron mérhető spektrális radiancia értéke kiszámolható a következő képlet alapján

$$L\lambda = \frac{\mathrm{Lmax}_\lambda - \mathrm{Lmin}_\lambda}{\mathrm{Qcalc}} \cdot \mathrm{DN} + \mathrm{Lmin}_\lambda \qquad (1)$$

ahol Lλ az adott hullámhossznak megfelelő radiancia, Lmax_λ az adott hullámhossznak megfelelő maximális sugárzásteljesítmény érték, Lmin_λ az adott hullámhossznak megfelelő legkisebb sugárzásteljesítmény érték, Qcalc a maximális lehetséges pixelérték a radiometrikus felbontás szerint (8 bit esetén 255 W/m2•sr•μm), DN a nyers digitális számérték (Mucsi 2013).

A radiometrikus korrekcióval előállítjuk a %-ban kifejezhető reflektancia értéket, amely az adott hullámhossztartományban a felületről visszavert összenergia, valamint a Napból induló és felületre (atmoszférikus hatásoktól mentes) beérkező összenergia hányadosának a 100-szorosa. Mivel a radiancia és a reflektancia értékek számításakor a detektor paraméterei sávonként változnak, a függvényeket csatornánként kell alkalmazni. Értelemszerűen nem lehet reflektanciát számolni a hőtartományú infravörös adatokra, mert a földfelszín által kisugárzott energiát és a földfelszínről visszavert elektromágneses sugárzást együttesen detektáljuk. Ellenben a radiancia ismeretében (a visszavert hasonló spektrumú sugárzást kivonva) kiszámolható a felszín hőmérséklete (Chander és Markham, 2003 in Mucsi 2013). Ez elvben lehetővé tenné a nappal végbemenő légi hőtérképezést, de az ilyen felvételeken általában a közvetlen napsugárzás által felhevített felszínek dominálnának.

A reflektancia érték kiszámítása a radiancia adatokból megoldható a következő képlettel:

$$Ref\lambda = \frac{\pi \cdot \mathrm{L}^\lambda \cdot \mathrm{d}^2}{\mathrm{ESUN}^\lambda \cdot \cos(\Theta)} \qquad (2)$$

ahol Refλ az adott λ hullámhosszon a reflektancia értéke, Lλ a detektoron mérhető spektrális radiancia, d a Föld-Nap távolsága csillagászati egységben, ESUNλ az atmoszférikus irradiancia átlaga, θ a napsugarak beesési szöge a zenithez képest fokokban (Chandler és Markham, 2003 in Mucsi 2013). A kiszámolt reflektancia értéke 0 és 1 közé eső szám, melyet 100-zal megszorozva kapjuk meg a reflektanciát %- ban.

Az adott hullámhosszon mérhető radianciát a felszín tulajdonságain kívül befolyásolják a szenzor tulajdonságai, az atmoszféra optikai tulajdonságai, valamint a Nap és a szenzor helyzete (amelyet a zenittel és azimuttal bezárt szöggel szokás leírni). Az atmoszféra sugárzást abszorbeál, ami csökkenti a vizsgált felületről detektálható radiancia mértékét (Borengasser et al. 2007). Azonos szenzorral, hasonló tárgytávolságról (relatív repülési magasság) különböző időpontokban elvégzett felmérések felvételeinek feldolgozását, kiértékelését csak akkor lehetne

tökéletesen automatizálni, ha a felszínborítási kategóriákat analizáló algoritmus tökéletesítése mellett minimalizáljuk a légköri hatásokat és a megvilágítás irányától való függést (Szalay 2014). Számos kísérlet törekszik olyan abszolút skála kidolgozására, amely segítségével két vagy több különböző időpontban exponált távérzékelési felvétel sorozat tökéletesen összehasonlíthatóvá válik egymással (Rahman és Dedieu 1994; Vermote et al., 1997; Berk et al. 2003).

A vizsgált felület adott pontjára beérkező elektromágneses hullámok a légkörön áthaladó direktsugárzás mellett a többszörös szóráson átesett diffúz sugárzás és a tárgyakon és a légkörön szórt diffúz sugárzási komponensekből tevődnek össze (Lee és Kaufman, 1986). A szenzorba érkezik egy, a földfelszín tulajdonságaitól független komponens is, amely a direkt sugárzás légkör által szórt résznek szenzor felé irányuló hányada, ami fototechnikai szempontból egyfajta surlófény. Míg utóbbi elsősorban a színvisszaadásra és az árnyalatgazdagságra hat, addig a környező területek által visszavert, majd a légkör által a szenzor felé szórt sugárzás káros hatással van a szenzor és az optikai rendszer térbeli feloldóképességére is. A mért radiancia tehát a légkörről, a vizsgált felszíni pontról és a vizsgált felszíni pont környezetéről is tartalmaz információt (Kern 2011). Az adott képponton leképződő adat minősége függ továbbá a megfigyelés geometriájától, hiszen a nadírtól (a kameratengely talppontja a vizsgált felszínen) eltérő megfigyelési szög növekedése növeli a sugárzás légkörön át megtett útjának hosszát, gyengítve a felszíni hozzájárulásból érkező radianciát. A légköri abszorpció energiaveszteséget okoz, ugyanis a légkör összetevői és további alkotórészei (elsősorban a vízgőz, a széndioxid és az ózon, illetve az aeroszol részecskék) különböző mértékben abszorbeálják a vizsgált felszín által visszavert különböző hullámhosszú elektromágneses sugárzást, így ennek egy bizonyos hányada nem jut el a detektorig (Kern 2011). Ezért a relatív repülési magasság (tárgytávolság) növekedésével egyre szükségesebb a légköri korrekciók elvégzése. Számos esetben műholdfelvételek kiértékelésénél sem alkalmaznak légköri korrekciót (Spiliotopoulos et al. 2014), holott ez már a nagyobb munkamagasságban végbemenő repülőgépes felvételezéshez is szükséges (Honkavaara és Markelin 2007). Napjainkban egyre többször merül fel az alacsony és közepes magasságú légi felméréseknél is a kalibrált szenzorokról származó korrigált felszín-visszaadású felvételek igénye, beleértve a légköri korrekciót is (Kelcey és Lucieer 2012).

A légköri korrekció elvégzésénél a szenzor által mért nyers jelből a mérés időpontjára vonatkozó legpontosabb légköri adatok felhasználásával meg kell határozni a mért radianciát illetve reflektanciát. A légköri korrekció elvégzéséhez ismernünk kell a gázok elnyelésének mértékét és a légkör adott szintjeire vonatkozó Rayleigh szórásuk megadásához szükséges légköri modellt. Mindehhez – a szórások modellezésén túl – a felvételezéskori légnyomás és

hőmérséklet érték, valamint a szenzor és a vizsgált felszín között jelenlévő vízgőz- és ózon tartalom ismerete szükséges. Az alapvető légköri korrekció a digitális számértékek átszámítása az egységnyi légoszlop vertikálisan integrált vízgőz- és ózontartalmával és az adott hullámhossznak megfelelő aeroszol optikai mélységgel a légköri összes aeroszol tartalomára, valamint a felszíni légnyomás és a Nap és a szenzor állásaiból adódó geometriai információkkal (Chander et al. 2004). Ezeket az adatokat a szenzor kalibráció során készített fájlokból (belső adatok), archív földi mérőállomás adatokból és archív műholdas adatsorokból érhetjük el (Jääskeläinen et al. 2016). Utóbbiak rendelkezésre állása korlátozott, a terepi mérőállomások korlátozott száma és a megfelelő sávokkal rendelkező műholdak ritka áthaladása, korlátozott terepi felbontása miatt. Ezért a szenzorok építésénél figyelembe vehető szempont a légköri korrekcióhoz szükséges paraméterek szimultán gyűjtésének igénye.

2.1.4 Terepi felbontás

A *terepi felbontás* az elemi képpont által leképzett terepi folt szélességével kapcsolatos (Bakó 2010b), és így a felvételek részletességét a különböző raszteres fényképes adatgyűjtési eljárásokban is összehasonlíthatóan jellemzi. Alkalmazzák még a terepi mintavételezési távolságot (GSD - Ground Sampling Distance), ami a két szomszédos pixelcentrum távolsága és így ekvivalens a terepi felbontás értékével, de az állomány adattartalom részletessége az egy négyzetméterre vonatkoztatott elemi képpontok számával is kifejezhető. Utóbbi esetben az érték növekedése a felbontás finomodását jelenti, míg a terepi felbontás és GSD esetében ez fordított. Az olyan pixelek, amelyek több különböző spektrális tulajdonsággal rendelkező felület találkozását fedik le, a lefedett felületek valós tulajdonságaitól eltérő hamis intenzitás értékeket vesznek fel. Ezért az ilyen pixeleket *kevert pixel*nek nevezzük. Az osztályozás során a felszínborítási határokon eltéréseket okoznak. A hibás zónák mérete a terepi felbontás növekedésével csökken. Minél finomabb egy felvétel terepi felbontása és élessége, annál pontosabb adatokat szolgáltat a felszínborításról és annak jelenségeiről (Bakó 2011b). A terepi felbontás a nadírban a legnagyobb és a felvételek szélei felé csökken, így egy felvételen belül képpontonként sem azonos. A domborzat változatossága a tárgytávolság változását eredményezi, így ezekből a tényezőkből együttesen adódik a felmérés átlagos terepi felbontása. A felmérés részletességét tehát az *átlagos terepi felbontás* adja meg, amely a területfedéses sorozat-felvételezés képfelvételeinek teljes felületére értelmezett átlagos terepi felbontások átlaga a teljes munkaterületre vonatkozóan.

2.1.5 Spektrális felbontás

A spektrális felbontás azt fejezi ki, hogy az adott rendszer hány és milyen széles spektrális tartományban (csatornán, band) érzékeli az elektromágneses energiát (Domokos Gy-né 1984). Csatornaszám alapján a távérzékelt felvételeket **egy csatornás** (pl. az emberi szem számára is látható spektrum-tartományt egy fekete fehér csatornán rögzítő *pankromatikus*); **három csatornás** (a számítástechnikában széleskörűen vizualizálható *színes RGB* és *kompozit* felvételek); **multispektrális** (MS) és **hiperspektrális** (HS) kategóriákba soroljuk.

A **multispektrális felvételek** olyan négy vagy annál több csatornával rendelkező felvételek, amelyek nagy geometriai felbontással készülnek, és csatornáik általában széles spektrális átfogásúak (Juhász 1976). A multispektrális felvételek csatornáinak spektrális átfogása nem törvényszerűen egyenlő, ahogyan az sem feltétel, hogy folyamatos színképet alkossanak. A módszer lényege, hogy adott felszíni jelenségeket, vagy objektumtípusokat a lehető legnagyobb mértékben kiemeljenek a környezeti háttérből (Rádai 1978). A csatornák számának növelése általában a módszer alkalmazhatóságának és a célfeladatok körének növekedésével jár, ugyanakkor a fájlméret rohamos növekedéséhez vezet, így szükség szerint a geometriai felbontás csökkentését vonhatja maga után. Ezért érdemes az optimális terepi – spektrális felbontás kombináció kísérleti beállítása az adott céltérképészeti feladatnak megfelelően (Bakó et al. 2014a). A hullámhosszúság fordítottan arányos az energiával, ezért a nagyobb hullámhosszakon a minimálisan detektálható energiamennyiséghez nagyobb terület szükséges, így a nagyobb hullámhossztartományban a távérzékelt felvételek geometriai felbontása általában lecsökken (Síkhegyi et al. 2001). Ezért tapasztalható egyes multispektrális szenzorok esetében, hogy például a termális csatorna a valósszínes felvételt biztosító csatornák felbontásához képest jelentősen kisebb terepi felbontású, és a hősáv érzékelő képpontjainak fizikai mérete is nagyobb.

A **hiperspektrális távérzékelést** (képalkotó spektrometria) a vizsgált felszínről visszaverődő sugárzás spektrális összetételének vizsgálatára dolgozták ki (Goetz el al. 1985). Az ilyen raszteres képek minden egyes pixeléhez folyamatos spektrumú radiancia értéksorozat tartozik, és a spektrális csatornák egymással érintkező (contiguous) hullámhossz intervallumokat alkotnak (Kardeván 2011). A felvételek spektrális felbontását az egyes csatornák spektrális átfogása, illetve a szélső csatornák spektrális tulajdonsága határozzák meg. Míg az egyes csatornák szélessége a spektrális görbe részletességét, addig a szenzor spektrális átfogása az érzékenységi tartományt határozza meg. A terepi felbontás ebben az esetben is a felmérés geometriai részletességét jelzi, és általában gyengébb a nagyfelbontású multispektrális adatgyűjtéséhez képest, mivel az akár több száz spektrális csatorna rögzítése jelentős feldolgozó és tárhely kapacitást igényel.

2.1.6 A felmérés minőségét meghatározó tényezők

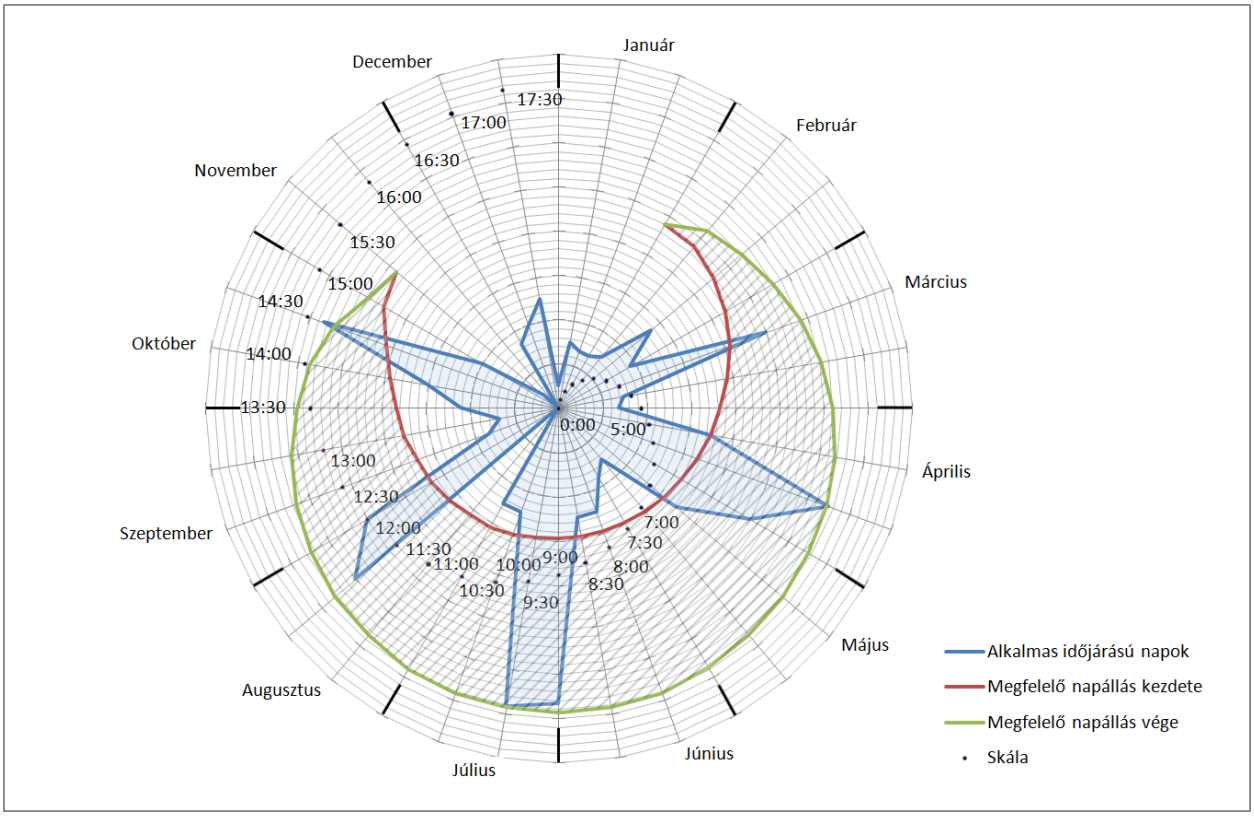
Jó minőségű (geometriailag pontos, részletes, jól kiértékelhető) fotó-térkép csak kiváló minőségű alapképekből hozható létre. A légifényképezés speciális követelményrendszer alapján kerül végrehajtásra. A légifelvétel-térképek szabványszerűen megfelelő időjárási körülmények között készülnek, a legalkalmasabb napállás mellett.

A felvételek minőségét elsősorban a következő tulajdonságok határozzák meg (Bakó 2011b):

- repülési évszak
- repülési napszak
- időjárás (légkör állapota) és légszennyezettség
- inverziós réteg jelenléte
- repülési magasság
- felhőzet
- felhőárnyék
- fény polarizációja
- fényképezés minősége
- szenzor típusa és minősége
- feldolgozás minősége
- perspektivikus torzulás mértéke (fókusztávolság, átfedések, platform elfordulásai)
- geometriai pontosság (kameratest - objektív elrajzolások mértéke)
- átlagos terepi felbontás
- spektrális felbontás
- képdinamika
- radiometriai felbontás

A **megvilágítás** a felvételek minőségét alapvetően meghatározó tényezők egyike. Az igazán jó minőségű termékek tiszta légkört és legalább 30° napállást igényelnek (Borengasser et al. 2007), ahogyan a műholdas eljárásoknál is érdemes a 60°-nál kisebb zenitszögű felvételek használatára törekedni (Kern 2011). A besugárzási viszonyok mellett a különböző évszakokban nem csak a napsugarak beesési szöge változik, de a beérkező energiamennyiség is, a Föld-Nap távolságának változása miatt (Mucsi 2013) ezért a felvételezésre alkalmas napszakokkal rendelkező napok száma korlátozott. A 2. ábra a 2013-as évben légi távérzékelési feladatokhoz rendelkezésre álló időablakokat mutatja be. A rendelkezésre álló jó minőségű passzív optikai légi

felméréshez szükséges 30° napállású időszakot a sraffozott terület jelöli. A megfelelő időjárású, légszennyezettség állapotú és széljárású órák arányát a kék terület szemlélteti.



2. ábra Passzív optikai légi távérzékelésre alkalmas napok aránya 2013 évben (Bakó G. az Országos Meteorológiai Szolgálat adatai alapján)

Ahogyan a példa is mutatja, az ideális körülményekkel jellemezhető órák száma erősen korlátozott. Bizonyos esetekben (például nagy érzékenységű szenzorok esetén) a teljes felhőborítás is megfelelő körülményeket teremthet, amennyiben a szenzor és a felszín közötti légrétegek kellően tiszták és a felhőzet összefüggő állapota, valamint a felhőalap magassága lehetővé teszi az alatta történő térképészeti repülést. Ilyen esetekben a felszíni objektumok árnyékainak kiértékelést zavaró hatása is lecsökken. A megfelelő napszak megválasztása a célfeladattól függ, de egyéb tényezők is befolyásolhatják. Víztestek vizsgálatánál (például hínárállapot vagy homokzátonyok felkutatása) a minél magasabb napállás az ideális, de a hullámzás okozta becsillanások ellehetetleníthetik a passzív optikai felmérést, ezért szélcsendes időszakot kell preferálni. A vízügyi gyakorlatban sokszor kell a fényképezés céljaira kedvezőtlen időjárási viszonyok között is fényképezni (Juhász et al. 1982), például az árvíztetőzés által megszabott rövid időintervallumban. Ekkor nem kell ragaszkodni a legalább 30° napálláshoz. A légköri pára és szennyeződések képfelvételre gyakorolt káros hatásainak összességét *közeghatásnak* nevezzük. A **páratartalom** káros fénytöréseket, torzítást és rossz látási viszonyokat okoz. Csökkenti a felvételek felszíni adattartalmát és lokális geometriai torzításhoz

is vezethet. A **légszennyezettség** jelentősen ronthatja a látási viszonyokat, szóródik a fény a részecskéken, képtorzulást, színtorzulást, élességvesztést okozva.

Az ultraibolya, a látható és a közeli infravörös tartományban az **atmoszférikus szórás** hatása jelentős. A szórásban résztvevő molekulák méretei szerint két csoportot különböztethetünk meg: a **Rayleigh szórás**t a tiszta atmoszférát alkotó gázok okozzák, mert molekuláik átmérője kisebb, mint a látható fény hullámhossza. A Rayleigh féle szórás a kék spektrumban nagyobb, mint a vörös spektrumban és ez okozza az égbolt kék színét (Horváth 1986). Az égbolt kék sugárzása a terep teljes megvilágításában is részt vesz, ezt égfénynek nevezzük. Hatása sokkal jelentősebb a rövidebb hullámhosszokon. A repülőgép alatti légréteg is sugároz légfényt, ennek a sugárzásnak a Rayleigh komponensét az ultraibolya kamerafejeken sárga szűrő alkalmazásával csökkenthetjük. (Hosszú hullámhosszokon és kis repülési magasságokon a hatás általában nem jelentős.)

A levegőben lévő nagyobb részecskék (molekulahalmazok, vízcseppek, füst, por, stb.) a **Mie-féle szórás**t okozzák. Ez a szórás az atmoszféra alsóbb (~ 5000 m-ig) rétegeire korlátozódik. Nem egyenletes, a beeső fény irányához közeli szögek felé nagyobb az intenzitása (Belényesi et al. 2008). A légkör torzító hatásairól általánosan elmondható, hogy az NO_x, CO_2 és O_2 szelektív, míg a páratartalom nem szelektív szórást okoz.

A föld felszínére, vagy éppen a levélfelületre érkező elektromágneses sugárzás egy része visszaverődik (reflektálódik), más része elnyelődik (abszorbeálódik), a levélfelületekre érkezve kis része áthalad (transzmittálódik), más része kisugárzik (emittál), és mindezek aránya a sugárzástól, a felület anyagának típusától és állapotától (pl. nedves, száraz, szennyezett, stb.) függ (Floyd 1996).

A felhők közvetlen kitakarást eredményeznek, ha a repülőgép alatt vannak, és felhőárnyékot, ha magasabban (Juhász et al. 1982). A felhő által beárnyékolt terepfoltra hibás expozíció, részletvesztés, kiértékelési hibát okozó tónus- és megvilágítás különbségek jellemzők.

A hordozóeszköz motorjából, hajtóművéből származó **füstgázok**, **meleg levegő** és **gőzök** elterelésére, elvezetésére, nagy hangsúlyt kell fektetni (Bán 1979), ellenkező esetben üzemanyag- és olajcseppek jelenhetnek meg a véglencsén, vagy a szűrőn (felmarva a réteget), és füst vagy meleg levegő áramolhat a kamerarendszer alatt, erős, sztochasztikus képtorzító hatással.

Amennyiben a hordozóeszköz haladási sebességét vesszük alapul, a tárgytávolság és a kamera mozgási sebességének függvényében változik a leképzett pont sebessége a képérzékelőn.

Amennyiben ez az elmozdulás meghaladja az elemi pixel legkisebb átmérőjének kétszeresét, repülésirányú bemozdulásról, azaz **képvándorlásról** beszélünk, ami jelentősen rontja a vonalélességet (Kraus és Waldhausl 1998). Még nagyobb mértékű káros bemozdulást okoz a felvevőrendszer gyors elfordulása, például a repülőgép orsózó mozgásából következően.

A felvétel **élességét** nem csak a bemozdulások ronthatják. Amennyiben az élesség megfelelő beállítását, vagy a fix hiperfokálisra, vagy végtelenre kalibrált optikai rendszer megfelelő kalibrálását feltételezzük, a kép élességét befolyásoló tényezők a következők:

- az objektív éles rajza,
- a felvételi anyag (film, szenzor) kontúrélessége, síkba fektetése és távolság beállítása,
- a felvevő rendszer tisztasága,
- a felvevő berendezés rázkódása,
- a platform alatt áramló füstgázok és a külső levegőhőmérséklettől eltérő hőmérsékletű gázok,
- a légkör hatásai,
- helyes megvilágítás,
- nagyítás közben előálló élességromlás (pl. átméretezés hatása a kontúrélességre).

Egy kör alakú folt optikai leképzése az élesség szempontjából háromféle lehet: éles, kemény jellegű; éles, lágy jellegű; vagy életlen. Az optikai rendszer leképzési minőségének nem kielégítő, de fontos mértéke a feloldóképesség, amely a kontrasztátviteli függvénnyel írható le (CTF vagy MTF, modulációs transzfer függvény). A moduláció az eredetileg fekete-fehér vonalpárok fényességkülönbségének megváltozott mértékét fejezi ki a kisebb és nagyobb világos-sötét különbségek és a nagyobb részletek különböző világosságfokozatainak visszaadás-vizsgálatán keresztül (Kraus és Waldhausl 1998). A képnadírtól (a kameratengely felszíni döféspontjának a fénykép pixelkoordinátáival leírt helye) mért látószög növekedésével a felvételek minősége általában romlik a tárgytávolság növekedés (az érzékelő és a vizsgált felszín távolságának növekedése, és így a légkörben megtett út hosszának növekedése) miatt (Bácsatyai és Márkus 2001). Emellett a lencsék széle felé általában a lencsehibák is erősödnek. Az egyes felvételek széleinek (különös tekintettel a képsarki részekre) sötétedését **vignettáció**nak nevezzük, amely algoritmusokkal csökkenthető, de a kivilágosított képszéleken csökkenni fog a fotó-térkép dinamikája. Az ilyen felvételek mozaikolásakor hullámokhoz fogható jelenséggel találkozhatunk, amely a kiértékelést is befolyásolhatja. A megfelelő hisztogramegyeztetés eltüntetheti a jelenséget, de célszerűbb megelőzni jó minőségű felvevő berendezések alkalmazásával.

A **képzaj** olyan, a valóságos képet az adott képpontban nem jellemző szín és intenzitás információ, amely a távérzékelő rendszer valamilyen optikai-elektronikai tökéletlensége miatt jön létre. A növekvő képzaj negatívan befolyásolja mind a vonalélességet, mind a színeket, spektrális értékeket, és ezáltal a céltérkép információtartalmát is.

2.1.7 Kamera kalibráció

Ahhoz, hogy egy fényképet geometriailag oly mértékben helyreállítsunk, hogy rajta korrekt méréseket lehessen végezni, először érdemes megismernünk a kamerarendszerre a kép készítésekor érvényes úgynevezett belső tájékozási adatokat (lásd 2.2 fejezet). Ezeket az információkat a kamera nagypontosságú kalibrációjával nyerjük (Bakó 2012c). Mérőképet egyszerű kézikamerával is készíthetünk, amely még nem esett át kalibráción. Ehhez azonban nagyszámú illesztőpont (adott koordinátarendszerben értelmezett, a felvételen biztonságosan azonosítható és pontosan kijelölhető pont) bemérése szükséges. Ezzel szemben a kalibrált kamera (mérőkamera) ismert belső adatait elégséges három külső információval (például mindössze három illesztőpont, vagy tájolási adatok) kiegészíteni, és matematikai értelemben már lehetséges a mérőkép előállítása (Kraus és Waldhausl 1998).

A kamera belső adatainak ismeretében kiküszöbölhetjük, lecsökkenthetjük azokat az elrajzolásokat és kromatikus hibákat, amelyek minden egyes felvételen megközelítőleg azonos módon és mértékben jelentkeznek. Az így megismert függvényekkel bármelyik későbbi felvétel „kamerahibája” helyrehozható, amit az adott műszerrel (kamera-objektív), adott rekeszértéknél készítenek, amíg a berendezést vagy részegységét nem éri olyan külső behatás, ami a belső adatok megváltozásához vezet. A kalibráció végén az optika – váz rendszer elválaszthatatlan egészt képez, és amennyiben a rendszert megbontják, a hitelesítés érvényét veszti. A mérőkamerák építésénél eleve ellenőrzött alkatrészek kerülnek felhasználásra, de a végső kalibráció az optika, a kameramechanika és az érzékelő együttesét vizsgálja. A felvételek belső eredetű geometriai hibáinak túlnyomó részét a lencsék központosítási hibáin és a lencsehibákon kívül a képérzékelő és az optikai tengely merőlegességének hibája okozza. Az elkészült alapfelvételek utólagos helyreállításához meg kell ismernünk a területi elrajzolások mértékét a teljes képfelületre vonatkoztatva.

A kalibrációs jegyzőkönyv alapvető elemei:

- A mérések elvégzésekor beállított rekeszérték (Minden később várhatóan alkalmazni kívánt rekeszértékre érdemes külön elvégezni a teljes kalibrációt.)
- Spektrális mérési tartomány (spektrális érzékenység, azaz a detektor különböző spektrális tartományokban érkező elektromágneses sugárzásra adott intenzitás válasza és szűrőrendszer transzmittanciája). A berendezés alapértelmezett szűrőzésétől eltérő kiegészítőket meg kell említeni, mert ilyen esetben a kalibráció csak a mérésekkor alkalmazott szűrővel érvényes
- Hitelesített képközépponti gyújtótávolság, azaz kamaraállandó (fx, fy)
- Kép méretei pixelben kifejezve
- Az elemi képpont fizikai méretei vagy az érzékelő mérete
- Kalibrációs tárgytávolság (a kalibráció elvégzésekor érvényes élességállítás)
- FC és PP pixelkoordinátái (Cx,Cy)
- Radiális képtorzítás k-értékei
- Tangenciális torzítás P értékei
- Kromatikus aberráció helyreállító értékei (vörös-zöld valamint kék-zöld modell szerint)
- Vignettációs függvény
- Vetítési centrumok és a GPS antenna fáziscentrum elhelyezkedésének leírása

2.2 Fotogrammetria, képfeldolgozás

A légi távérzékelés ma már elképzelhetetlen a fotogrammetria szakszerű alkalmazása nélkül, hiszen a fotogrammetriai munkálatok során válik a távérzékeléssel készült felvétel szabatos, pontos térbeli adattá. Ebben nélkülözhetetlen szerepe van a terepi geodéziai felmérés és/vagy a direkt tájékozás célfelbontást meghaladó minőségű adatainak.

A legáltalánosabban használható térkép az ortofotó, amelynek minden földfelszínt ábrázoló pontja ortogonális vetítésű és térképhelyes. A légi távérzékelés alkalmával exponált felvételekből a későbbi labormunka során differenciális képátalakítással készül el ez a perspektíva- és magasságkülönbség okozta torzításoktól nagyjából mentes termék. Spektrális tulajdonságoktól függetlenül igaz, hogy a frame rendszerű légifelvételekből ortoprojekció (ortorektifikáció, a térmodellre történő levilágítás) segítségével nyerünk szabatos térképet, ortofotót. A bemeneti adatok a digitális képek és azok külső és belső tájékozási elemei, valamint a digitális felületmodell. Utóbbi a kellő mértékben átfedő és ismert adatokkal ellátott légifelvételekből is kinyerhető, ennek pontjaihoz rendeljük hozzá a fényképről származó pixelintenzitást.

A **belső tájékozás** célja az objektív-kameratest elrajzolási hibáinak csökkentése, valamint a kép koordinátarendszerének értelmezése. Mindez a kamera kalibráció során előállított elrajzolási függvényekkel leírt hibák projekciós értékein keresztül valósul meg. Ezek a helyreállítási függvények minden képre azonos módon érvényesek, mert azonos rekeszérték, azonos fókusztávolság és alkatrészek, valamint sérülésmentesség esetén a felmérés összes felvétele azonos kamerahibákkal terhelt. A transzformációs (geometriát helyreállító) egyenletek a képek pixel koordináta-rendszeréről a távérzékelt felvétel koordináta rendszerére történő átmintázást teszik lehetővé (Sheng et al. 2003). Utóbbinak az egyes képeken a kameratengely és a képsík döféspontjában értelmezett képfőpont az origója. A kameratengely nem tökéletesen merőleges a képsíkra, ezért nagyon fontos megismerni a képfőpont ideális és valós helye közötti eltérést a kalibráció egyik elemeként (Willson és Shafer 1993).

Széles körben elfogadott a Brown-Conrady model (Conrady 1919, Brown 1966, 1971), amely leggyakrabban a bal felső pixel középpontjába helyezett origóval számított képi pixel koordinátarendszer alapján írja le a képtorzulásokat.

A radiális torzítás (Δr) a következő képlettel számítható (Retzlaff 2016):

$$\Delta r = r^2 = \sqrt{(x^2 + y^2)} \tag{3}$$

$$x' = x(1 + k_1r^2+k_2r^{4+}k_3r^6) + P_2(r^2+2x^2)+1P_1xy \tag{4}$$

$$y' = y(1 + k_1r^2+k_2r^{4+}k_3r^6) + P_1(r^2+2y^2)+1P_2xy \quad (5)$$

ahol k_i a radiális torzítás együtthatókat, P_i a tangenciális torzítás együtthatókat jelenti.

A transzverzális torzítás a következő egyenlettel számítható:

$$u = c_x + x'f_x + y's \quad (6)$$

$$v = c_y+yf_y \quad (7)$$

ahol:

u és v a vetített kép koordinátái/képfőpont, pixelértékekkel megadott torzítási centrum;
c_x, c_y: az autokollimációs főpont (PP, az objektív optikai tengelyének döféspontja az érzékelő síkján) pixelben kifejezett koordinátái;

x': a vetített kép x irányú koordinátája;

y': a vetített kép y irányú koordinátája;

f_x: a gyújtótávolság pixelben kifejezett x értéke;

f_y: a gyújtótávolság pixelben kifejezett y értéke;

s: elfordulás transzformációs együttható.

Célszerű, ha a fotogrammetriai célból használt fényképezőgépek képfőpontja (FC, fiducial center, az érzékelő geometriai közepe) és az autokollimációs főpontja (PP) minél közelebb vannak egymáshoz az érzékelőn.

$$Fx = fókusztávoság \cdot \frac{érzékelő\ x\ koordináta\ szerinti\ mérete\ pixelekben\ kifejezve}{érzékelő\ \ x\ koordináta\ szerinti\ mérete\ mm-ben\ kifejezve} \quad (8)$$

$$Fy = fókusztávoság\ [mm] \cdot \frac{érzékelő\ y\ koordináta\ mérete\ pixelekben\ kifejezve}{érzékelő\ \ y\ koordináta\ mérete\ mm-ben\ kifejezve} \quad (9)$$

A kalibrációt az egyes csatornákra (adott spektrumokon) külön érdemes elvégezni, mert így a kromatikus aberráció is csökkenthető.

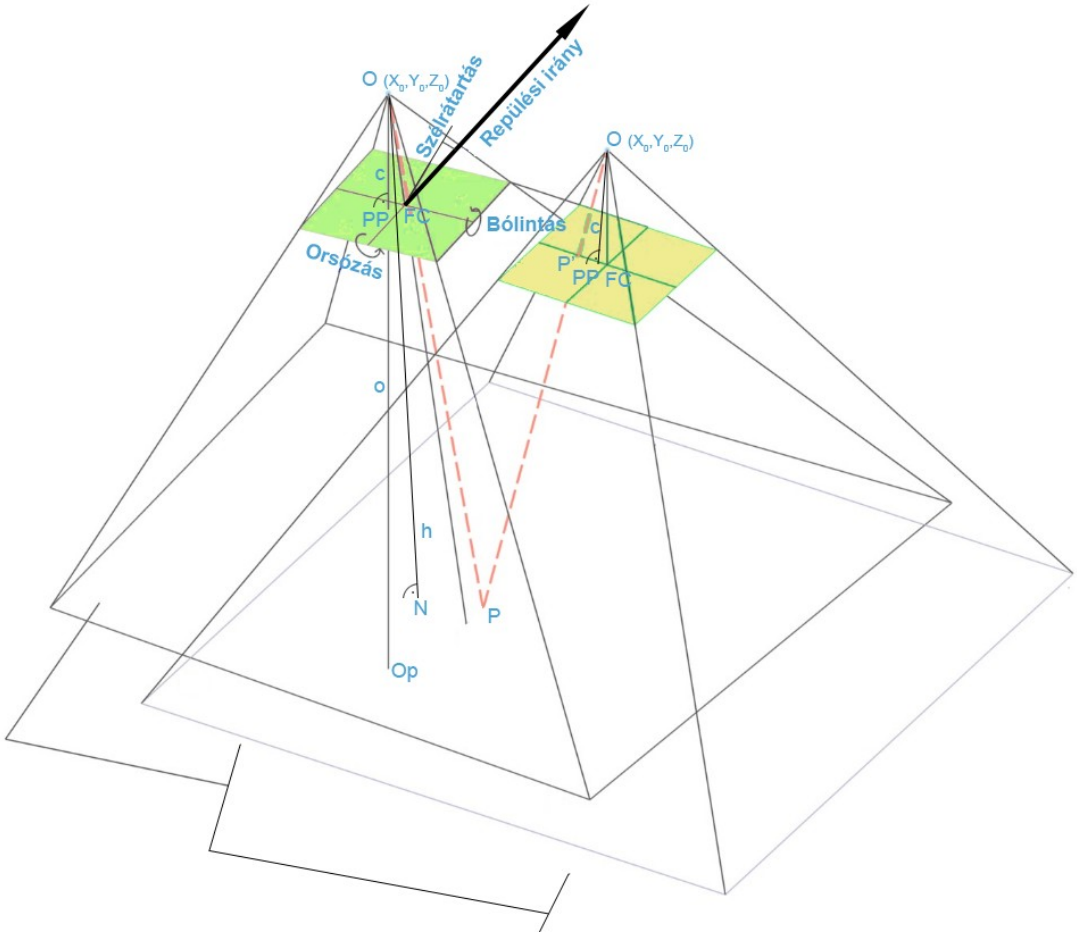
A vignettáció paraméteres eltávolítása a következő függvénnyel oldható meg:

$$VCF_{\lambda;i;j} = \frac{DN_{\lambda,max}}{DN_{\lambda;ij}} \quad (10)$$

ahol VCF a vignettáció korrekciós együttható, λ a hullámhosszúság, i;j a sorok és oszlopok pixelindexei.

A műszereknek bírniuk kell az igénybevételt, a hőmérsékletváltozást, a páratartalom változását és a mechanikai hatásokat anélkül, hogy a kalibrációkor bemért adatokhoz képest változás állna be (Bakó 2012b). A kalibrációt a használat és külső hatások figyelembevételével újra és újra el kell végezni.

A **relatív tájékozás** a felvételeken detektálható azonos felszíni pontokon keresztül húzott homológ egyenesek (vetítési egyenesek) térbeli metszéseinek feltárása, a térmodell előállítása. Az így előállított kapcsolatok lehetővé teszik az egyes felvételek egymáshoz képest értelmezett viszonyának rekonstruálását a fényképezési blokkban (a képek relatív helyzete, 3. ábra), és létrejön a felületmodell, a későbbi rektifikációs folyamat alap térmodellje (Horn 1990).



3. ábra Egy blokk két képkészítési helyének geometriai összefüggései, ahol O a tárgyfelőli vetítési centrum, PP a képfőpont, c a kameraállandó, FC a képközéppont, P a felszíni pont, P' a pont leképzési helye, N a nadír pont, Op a képfőpont által leképzett felszínrész, o az optikai tengely, h a repülési magasság (a vetítési centrum és a felmért felület között értelmezett függőleges szakasz).

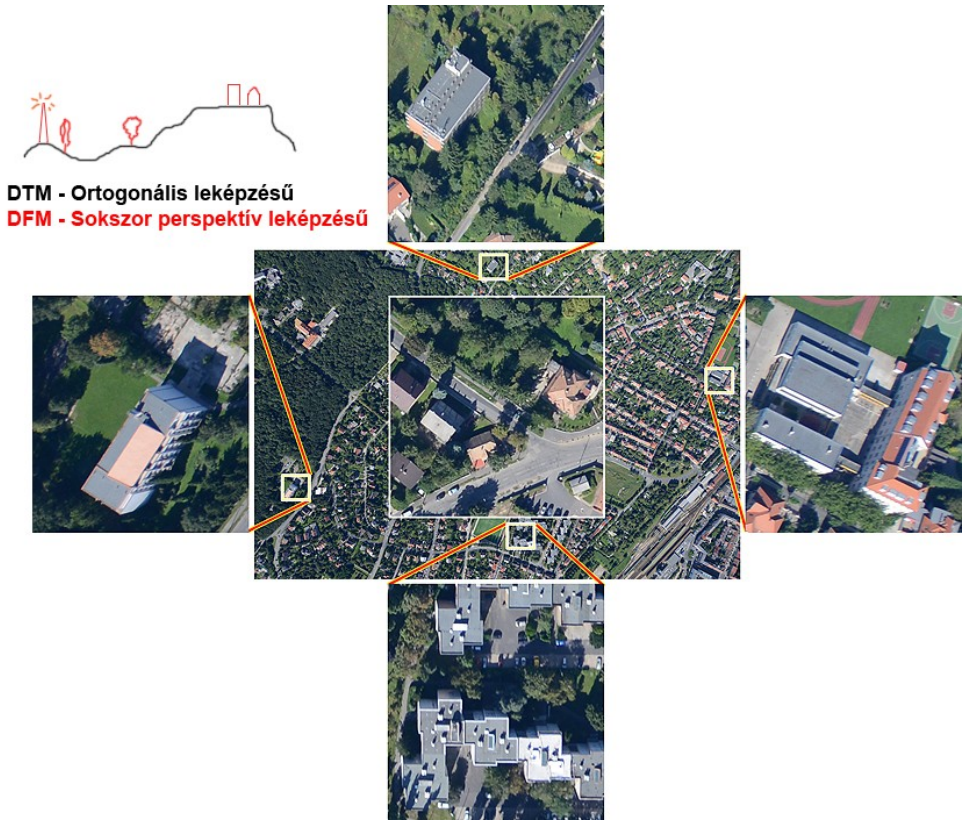
Az **abszolút tájékozás** a felvételezési blokk (beigazított képhalmaz) vetületi rendszerbe illesztése. Ez ismert koordinátájú és magasságú terepi illesztő pontok felvételeken történő megadásával, vagy a felvételekhez a repülőgép fedélzetén rögzített exponáláskori vetítési centrum koordináták, magasság és tájolási adatok (direkt tájékozási adatok) felhasználásával, vagy ezek közös alkalmazásával is történhet (Heipke 1997). A teljes területfedéses légifelvétel sorozat feldolgozására az egy blokkban kezelt sugárnyaláb kiegyenlítéses eljárás a legpontosabb tér fotogrammetriai lehetőség (Bakó et al. 2014a).

Annak érdekében, hogy ezeknek a számítási műveleteknek a részeredményei ne okozzanak egymásra épülő újramintavételezési hibákat, a számítások során keletkező függvény alapján egy közös folyamatban szokás kigenerálni az ortofotókat (Collin et al. 2004). Ezt együttes tájékozásnak nevezzük, és egyszeri, az ortorektifikáció során végbemenő újramintavételezést eredményez. Az újramintázási hibák erősen redukálhatók az egyszeri képátírással, így a felvétel vonalélessége és adathűsége is nagyobb marad, jobban közelíti a bemeneti felvételek minőségét. Az egyes részfolyamatok tehát sorban elvégezhetők és közösen értelmezhetők anélkül, hogy a felvételekből köztes felvételeket kellene átírni, ráadásul többszörösen is lefuttathatók, mert a tájékozási paraméterek közelítő megadása segíti az iterációt. Amennyiben a műveletet nem előre kalibrált mérőkamera felvételein végezzük el, a folyamatban kiszámítható a fókusztávolság és a képfőpont koordinátáinak pontos helye. Ez az ismert paraméterekkel rendelkező mérőkamerák esetében pedig gyors minőségellenőrzési lehetőséget is jelent. Ebből az is következik, hogy amennyiben a felületmodellből adódó torzítás tökéletesen ismert és a közeg (levegő, gázok, gőzök, szmog) torzító hatásai elhanyagolhatók, vagy tökéletesen leírhatók volnának, a kamera kalibráció elvégezhető volna egyetlen repülési blokk feldolgozása során. Ehhez azonban mint látjuk, természetes körülmények között túl sok az ismeretlen. Így általában inkább a laboratóriumban megismert kameraadatok és a légkör hatásainak ismeretében (vagy alacsony magasságból végzett repülési anyagokból történő) felületmodell számítás valósul meg a gyakorlatban. A képen detektált felszíni pont és a kép perspektív centruma közötti térbeli egyenest a kép átfedő párjára vetítjük (Cho et al. 1992). Ez a vetített epipoláris egyenes tartalmazza a másik képen a képpont homológ párját. Az epipoláris szakasz az egyenes képtartományba eső része, amelynek mentén a két kép közötti hasonlóság alapján a szoftver megkeresi a homológ pontot. A keresett pontpárnak az epipoláris szakaszon kellene lennie. Az eltérések a mérőberendezés és a légkör torzító hatásaiból, valamint a felületmodellből erednek, így amennyiben az előbbiek ismertek, a modell kiszámítható.

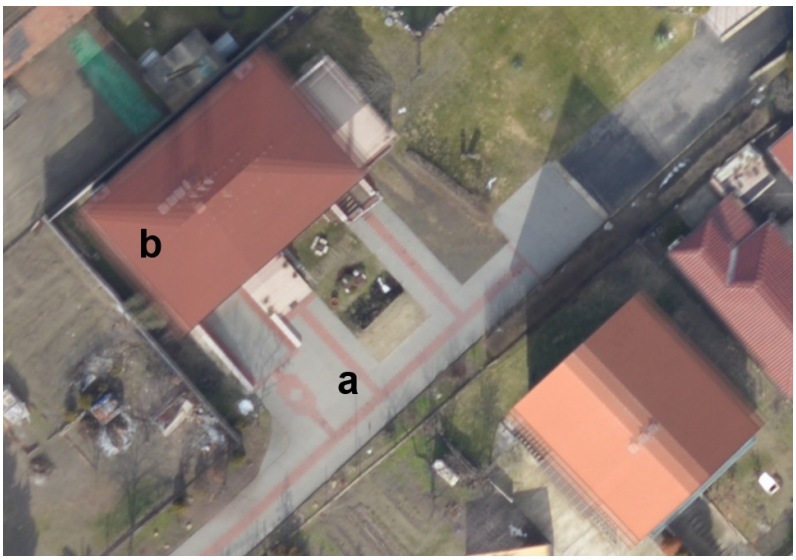
Mindez a teljes blokk összes képpárján végbemegy. Ez lehetővé teszi a térmodellek magas szinten automatizált létrehozását, és az egy felvételen már azonosított illesztőpontoknak az

érintett felvételeken történő automatikus közelítő megjelölését (automatikus irányzás). A fotogrammetriai program minden képen elvégzi az automatikus irányzásokat és ezek eredményeként egy térbeli ponthalmazt határoz meg (Czimber 2001). A ponthalmaz kevésbé megbízható pontjainak szűrésével elkészül a felületmodell, a növényzet és épített objektumok leszűrése pedig lehetőséget ad a domborzatmodell közelítésére is.

Fontos megemlíteni, hogy a távérzékelt centrális vetítésű, tehát perspektivikus képből a terepet ábrázoló részeken perspektív torzulásoktól mentes ortogonális vetítésű térképi felvételen (ortofotón) a kiemelkedő objektumok (pl. fák és épületek) nem mentesek a perspektív torzulástól (4. ábra), ezért sok esetben felülről-oldalról látszanak az ortofotó mozaikon, mint végterméken. Ezt általában nem tekintik hibának térképészeti értelemben (5. ábra), mivel a magas objektumok talppontjait a valós földrajzi koordinátákon jeleníti meg a felvétel (McGlone et al. 1980).



4. ábra az egyes képfelvételek perspektív torzulása csak a nadírban elhanyagolható. A digitális terepmodell (DTM) minden esetben ortogonális vetítésű a szabatos ortofotók esetében, ellenben a digitális felületmodell csak a nagy átfedéssel készült ortofotók esetében lehet ortogonális vetítésű. (Bakó 2014)



5. ábra A hagyományos ortofotók a talaj szinten (domborzat) szabatosan adják vissza az objektumokat (a), de a kiemelkedő objektumok (b) a centrális vetítésből eredően dőlt szögben jelenhetnek meg. Talppontjuk térképhelyes, felső részük azonban kimozdult pozícióban látható, tehát mérésre kevésbé alkalmas. Az ábra a különböző irányból készült ortofotók egymásra vetítésével készült (Bakó - Molnár 2010 Szigethalom).

Minél nagyobb a felvételezési sűrűség (a soron belüli és a repülési sorok közötti képátfedés), annál jobban közelíthető az abszolút ortogonális látvány (6. ábra). Ilyen esetekben a felvételek minden átfedő területe részt vesz a jó minőségű térmodell képzésben, ugyanakkor csak a középső (nadír közeli) felvételterületekből készül a fotómozaik (Bakó et al. 2014a). Ez azért is lényeges, mert a fák és épületek felületmodellben való leírása szükséges ahhoz, hogy ezek az objektumok is ortogonális vetítéssel kerüljenek a felvételekre az ortorektifikáció során.

6. ábra Nagy átfedéssel készült ortofotó mozaik nyári és téli aspektusa. A jobb felső sarokban egy hozzáépítés is megfigyelhető. A felvételeket együtt szemlélve jól látható, hogy a magas objektumok is ortogonális vetítéssel kerültek rögzítésre. Bár az ereszek a helyükön dokumentálhatóak, a módszer hátrányaként említhető, hogy az épületeknek egyetlen talppontja sem látszik a felvételen.

Az **ortofotók kiexportálásához** (újraszámítás utáni raszteres újraírásához, átrácsozáshoz vagy újramintavételezéshez) többféle matematikai módszert választhatunk. Ezeket az 1. melléklet ismerteti.

2.3 A fotogrammetriai munkálatok minőségének ellenőrzése

A raszterállományok pontossága eleve meghatározza a belőlük kiértékelhető vektorgrafikus adatbázisok megbízhatóságát. A téradatok geometriai pontosságának ellenőrzése kizárólag a termék készítésétől független ellenőrzőpont beméréssel mehet végbe (FGDC-STD-007.3-1998/GPA), oly módon, hogy az ellenőrző pontok a fotogrammetriai (vagy egyéb, a termék előállításához szükséges) munkafolyamatban semmilyen szinten nem vehetnek részt (Bakó et al. 2014a). Ez azt jelenti, hogy a fotogrammetriai szoftverekbe még kikapcsolt (inaktív) pontként sem hívhatóak be. Az ellenőrzőpont felvétel és geometriai analízis menetét a 2. melléklet tartalmazza.

2.4 Légi távérzékeléssel készült termékek elemzése

A térképkészítés alapján két kategóriát különböztethetünk meg: eredeti és levezetett (tematikus) térképek. Az eredeti térképek vagy felmérési térképek közé tartoznak a közvetlen megfigyelési adatok, illetve terepi mérés során készült térképek. A felmérési térképek adatállománya elsődleges geometriai adatnyerésből származik (Bartha és Havasi 2011). Ilyenek az ortofotók, a nagy méretarányú, helyszíni felvételen alapuló térképek (talaj- vagy geomorfológiai, geológiai térképek) és az abszolút adatokat tartalmazó térképek, például az időjárásjelző állomások észlelési adatai. A levezetett térképek csoportját azok a térképek alkotják, melyek az eredeti térképek generalizálásával vagy a kiindulási adatok átdolgozásával jönnek létre (Pődör 2010). Ahhoz, hogy egy eredeti térképről információkat gyűjtsünk, adatokat vezessünk le, és tematikus fedvényeket alkossunk, olyan szabályokat kell alkotnunk, amelyek az adatnyerést szabatossá, statisztikailag megbízhatóvá és egységes minőségűvé teszik a vizsgálati területre vonatkozóan. Ez minden esetben kognitív döntéseken alapul, de a kivitelezésben két csoportra osztható: a manuálisan végbemenő, szakértők által elvégzett vizuális interpretációra, azaz a felvételek kézi kiértékelésére; valamint a félautomatikus, vagy teljesen automatizált számítógépes osztályba sorolásra.

Egy képet rendkívül sok szempontból elemezhetünk. A vizuális interpretáció az elemző kognitív és asszociatív képességein alapul. A felvételen tapasztalható alakzatok, méretek, színek és árnyalatok, árnyékok, mintázat és geomorfológia, textúra (szerkezet) alapján kerülnek meghatározásra a felszíni objektumok és azoknak a jelenségeknek a hatásterületei, amelyekre a jelek utalnak. A kiértékelőt a tárgyak egymás közti kapcsolata (asszociáció), a lokáció és egyéb indirekt információk is segítik a foltok azonosításában és típusba sorolásában. Az interpretáció

során az értelmező nem csak magát a felvételt vizsgálja, hanem a rendelkezésre álló adatok alapján minél több információt kíván szerezni. Nem csak ortofotót vizsgál, hanem igyekszik átfogó ismereteket szerezni a területről, az objektumokról, folyamatokról. A vizuális kiértékelés döntéshozási folyamat, a képelemző kutató azonosítja és lokalizálja a terepi foltokat az ortofotón, vektoros térképi fedvényt, digitális térinformatikai adatbázist állít elő a felszínborítási elemek pontos feltérképezésével. Bármilyen részletes állományokkal rendelkezünk, a terepbejárásnak nagyon fontos szerepe van a felszíni elemek azonosításában és ellenőrzésében. A terepbejárások alkalmával érdemes a bejárt útvonalat GPS készülékkel rögzíteni. Így a be nem járt területek utólag gyorsan, egyértelműen és könnyedén ellenőrizhetők, szükség esetén a terepszemle pótolható. A vizuális interpretáció mellett a számítógépes osztályozás is elfogadott kiértékelési módszer. Mindkét lehetőség magában foglalja hibák lehetőségét. Míg az interpretáció nagyban épít a szakérő szubjektív megítélésére, és az egyén fáradtsága, türelme és állapota is befolyásolja a térkép levezetés minőségét, és így a levezetési szabályok menetközben torzulhatnak, addig a számítógépes automatizálást a legerősebben a környezeti hatások okozta intenzitás különbségek torzítják. Az automatizálás elvitathatatlan előnye a kiértékelési szabályok állandósága mellett a gyors adatnyerés és jól ellenőrizhető (reprodukálható) számítási folyamat. Automatizálható az a kiértékelési folyamat, aminek az azonosítási és pontos lehatárolást elősegítő szabályait meg tudjuk fogalmazni, és át tudjuk adni a számítógépnek. Az osztályozás lehet automatikus, amikor a felvétel teljes területét megadott számú foltkategóriába sorolja a számítógép (Bin et al. 2015). Ezzel szemben a tanulóterületes osztályozás lehetőséget biztosít a terepbejáráskor megismert kategóriák azonosítására a felvételen, és az osztályba sorolás ezek jellemző képi tulajdonságai alapján megy végbe (Tuia 2009). Az azonosított növényzeti elem fajtáját, fajösszetételét meghatározzuk, az egyedszámot, biomassza mennyiséget becsüljük (Gyömörey 1986), és a folttípus további előfordulásait keressük a terepen, illetve a felvételen. Amennyiben a terepi elemzésben hasonló adatokkal jellemzett foltok a felvételen hasonló megjelenést mutatnak, a tanulóterületek az adott típusra reprezentatívak. A hasonló megjelenés lehet például textúrabeli, színárnyalati, spektrális, polarizációs és egyéb paraméterek közelítő azonossága, amely tulajdonságok alapján manuálisan, vagy számítógépes elemzéssel az adott felszínborítási kategória leválogatható, feltérképezhető.

Az adott folttípust (objektumtípust, vagy jelenség hatásterületeket) reprezentáló térkép fedvények számának növekedésével a tematikus céltérkép-rendszer olyan adatbázissá növi ki magát, amely térképlapokon kezelhetetlen információmennyiséget jelent a döntéshozók számára. Ezért előtérbe került a digitális térképek térinformatikai rendszerben történő kezelése és elemzése. Az egymással fedésben lévő térképrétegek komplex elemzése során lehetőség van átfedő tulajdonságok alapján meghatározni a felszínborítási kategóriákat és azok határait. A

fedvények egymás feletti értékeivel matematikai műveleteket végeztethetünk, de egyéb, logikai összefüggésekben is lefuttathatunk számítógépes vizsgálatokat, például pufferzónákat generálhatunk, biomassza tömeg és az objektum környezetében található felszínborítási elemek alapján hozhatunk automatizált döntéseket az adott objektum osztályba sorolásáról. Ezek a kognitív besorolási folyamatok olyan bonyolult döntési ágazaton keresztül is megvalósíthatók, amit számítástechnikai eszközök nélkül nem volnánk képesek termelékeny módon elvégezni nagy munkaterületek esetében. A nagyobb felbontás miatt a képelemeket nem érdemes a környezetükből kiragadva és önállóan vizsgálni, hanem célravezetőbb a több pixelből álló, a valós világ elemeit részben, vagy egészben reprezentáló képobjektumokat létrehozni és osztályozni (Túri 2015). Az objektum orientált képelemzés közös alkalmazása háromdimenziós modellel pontosabb kiértékelést tesz lehetővé (Hellesen és Matikainen 2013).

A magas szinten automatizált számítógépes vizsgálat mérsékli a szubjektivitást, és ideális körülmények között gyorsítja a távérzékeléssel nyert állományok kiértékelését. Ugyanakkor döntő feladatot ró az osztályozási paramétereket beállító és az automatikus osztályba sorolást ellenőrző szakértőkre. Ezért kisebb elemzési feladat esetében a számítógéppel végzett osztályozás (az előkészítési és javítási feladatok miatt) legalább olyan időigényes, mint a vizuális interpretáció.

A növényi közösségek dinamikusak és mindig megtalálhatók az adott társulásra kevéssé jellemző fajok is a terepi foltban. Tanulóterületes osztályozási műveleteknél a tanulóterület minimális méretének megválasztásakor figyelembe kell venni a minimál area fizikai méreteit. A vegetációtérképezésnél minimiareálnak (minimál area) nevezzük azt a legkisebb területet, ahol a társulás jellemző fajkészlete még azonosítható (Tuba et al. 2007). Egy terepi folton belül mért két pont hasonlósága nagyobb, mint a folton kívüli bármely ponttal való hasonlósága. Amennyiben ennél kisebb tanulóterületeket is kijelölünk, az a kiértékelési torzítás mértékét és a kiértékelés „zajosságát” növeli. A kijelölhető mintaterület méretének felső határa természetesen a foltméret (Bakó 2013b). Azt pedig már az alapfelvételezés megfelelő részletességének megválasztásakor figyelembe kell venni, hogy hol találkozik a technikai célszerűség a botanikai feladat megoldási lehetőségével. Az ökológiai szempontú vizsgálatoknál nagy a bizonytalanság, a variáció. A bizonytalanság mértéke a felmérés részletességével és pontosságának növelésével csökkenthető. Aspinall és Pearson (1995) három fő komponensre osztja az adatlevezetés hibaforrásait, úgymint az osztályok megfelelő azonosítása, poligonon belüli heterogenitás és a folthatárok pontos azonosítása. A táji egységek feltérképezése, lehatárolása mesterséges besorolás alapján történik, a határvonalak kijelölése a társulások fiziognómiai szerkezetétől, a határvonal szubjektív értékelésétől, a határvonal kijelölési szabályok mesterséges

meghatározásától függ. A határvonal kijelölésére hasonlósági algoritmusokon alapuló függvényeket alkalmazhatunk, amivel jó esetben megtaláljuk a határ legvalószínűbb helyét. A természeti és természet közeli tájban megtalálható folthatárok egy jelentős részét fuzzy vagy átmenetes határvonalakkal kellene leírni, de fuzzy határsávot nem lehet egzakt módon térképezni. A vizuális felismeréshez a növényfajok különböző időszakban várható textúrabeli és színbeli, valamint egyéb morfológiai tulajdonságainak ismerete szükséges. A térinformatikai fedvények térbeli (geometriai) lehatárolási pontosságát és ezáltal a vizsgálati eredmény statisztikai értelemben vett pontosságát elsősorban a nyers alapadatok szabatossága (ortofotó-térkép képminősége és geometriai hibája, helyszíni adatgyűjtés megbízhatósága, kiegészítő vizsgálatok részletessége, stb.) és a levezetett adatok tematikus származtatásának pontossága (légifelvétel-térképek vizuális- vagy osztályozási, esetleg kognitív algoritmusok alapján történő interpretációjának torzítása és hibái; helyszíni adatok bevitelének helyes megadása, stb.) szabják meg. Ezek összességéből adódik az eredményül kapott adatbázis pontossága. Éppen ezért nagyon lényegesek a távérzékelési és botanikai ismeretek.

2.4.1 Élőhely és vegetáció felmérés

A természetvédelem szempontjából lényeges, hogy olyan ismeretek álljanak rendelkezésre, amelyek alapján indokolni tudjuk az adott élőhelyek védelmét. Az élőhelyen mért paraméterekben beállt változások az anomáliák leggyorsabb kimutatását teszik lehetővé. Az élőhelyre sokféle definíció létezik (Bunce et al., 2013). Az élőhely-térképezés szempontjából fajok és környezeti tényezők által meghatározott paraméterek (mikroklíma, vegetáció, talaj, stb.) együtt előforduló kombinációját tekintjük élőhelynek. Az élőhelyek távérzékeléssel legjobban vizsgálható paramétere a vegetáció borítás és összetétel. A vegetációtérképezés nélkülözhetetlen a védelemre érdemes területek kijelöléséhez (Dias et al. 2004), és elengedhetetlen feltétele az átfogó tervezési és tájvédelemi felméréseknek és a környezeti állapot értékelésnek. A vegetációtérképezés célja a társulások állományainak meghatározott léptékű térképen való ábrázolása, amely meghatározott időpillanatban rögzíti a vegetáció struktúráját. A lépték kiválasztása összefüggésben van a vegetációtérképezés céljával.

Magyarországon 1997-ig, a Nemzeti Biodiverzitás-monitorozó Rendszer keretében dolgozták ki az Általános Nemzeti Élőhely-osztályozási Rendszert (Á-NÉR) amely biztosítja az országban folyó monitoring munkák kompatibilitását. Az Á-NÉR létrehozásakor készítői arra törekedtek, hogy teljes körűen lefedje a magyarországi élőhelyeket, általánosan használható legyen, és a degradált élőhelyeket is monitorozhatóvá tegye. Az Á-NÉR általános célú, országos rendszer, helyi és/vagy speciális célú vegetációtérképezésekhez ennél finomabb, a helyi táji specialitásokhoz jobban illeszkedő rendszereket érdemes használni (Bölöni et al. 2007).

A növényzet a környezethatású tényezők általános állapotának biológiai indikátora, a különböző környezeti feltételek leglátványosabb jelzője. A növényzet jelzi az antropogén hatásokat, a növénytársulások megváltozása, a vegetáció szerkezetének módosulása a környezet változásának alapvető jelzői (Morgan et al. 2010). A természetességi térkép például felépíthető egy, a pillanatnyi állapotot rögzítő társulás térkép, indexek, flóragazdagság, növényzeti sokféleség, fitocönológiai természetesség, antropogén és tájidegen növényzet, környezeti stressz tematikájú térképek alkalmazásával, közös elemzésével, és ebben nagy segítséget nyújtanak a nagyléptékű légifelvétel-térképek (Blumenthal et al. 2007). A potenciális vegetáció térképek és aktuális társulás térképek egybevetése fontos természetvédelmi monitoring eszköz.

A potenciális vegetáció térképek segítségével prediktív térképek hozhatók létre a mezőgazdaság és az erdőgazdaságok számára a föld minőségére és a várható termésre vonatkozóan (Trautmann 1966). Az ökológiai szolgáltatások lehető legjobb kiaknázása érdekében meg kell vizsgálni a tájátalakítással járó beruházások előtt a munkaterületek

környezetvédelmi alkalmasságát, a gazdasági előnyöket és hátrányokat. A térinformatikai eszközökre épülő nagy teljesítményű statisztikai technológiák fejlődésével a prediktív élőhely változás modellezés a természetvédelem fontos eszközévé válhat. A környezetinformatikai rendszerek fejlődésével a globális klímamodellek is pontosabbá, célszerűbbé válnak majd (Bakó 2011b). A bioszféra együttes működésének eredménye többek között a klímaszabályozás, a légkör kémiai összetételének szabályozása, és az ún. biogeokémiai ciklusok működtetése, így a vegetáció szerkezetének, összetételének megváltozása közvetlenül is hat a klímára.

Mára azonban elérhetővé és megfizethetővé váltak a rendkívül nagyfelbontású (1-10 cm terepi felbontás-tartomány) légifelvétel-térképek, amelyek újszerű, különösen részletes vegetációtérképezést tesznek lehetővé (Bakó 2010c). Mindez egyrészt a korábban szokásos léptékű, de sokkal pontosabb vegetációs adatbázisok előállítását eredményezi, amikor az eltárolásra kerülő információ mennyisége nem haladja meg a korábbi felmérésekben felvett adatok mennyiségét. Másrészt lehetővé teszi a nagyon nagyléptékű területi információk beszerzését és archiválását. Míg az első esetben az országos és globális modellek pontossága javítható, addig a másik lehetőség a kisebb mintaterületeken lefolytatott vizsgálatok esetében adhat kedvező eredményt. A nagyobb részletességű légifelvétel-térképek nem csupán pontosabb faj- és vegetációs foltazonosítást tesznek lehetővé, de pontosabban képződik le rajtuk a felszíni foltok határvonala is. Amikor a szomszédos vegetáció típusok hasonló fiziognómiát mutatnak, és légifelvételek alapján nem lehet megkülönböztetni és elhatárolni őket, de a céltérképezési feladat megkívánja a felvételüket, érdemes terepi adatgyűjtést, florisztikai vizsgálatot végezni (Pedrotti 2013). Szelvény (transzszekt) mentén egyedi numerikus analízist és adatértékelést kell végezni, hogy a folthatárokat lokalizálni tudjuk (Cornelius és Reynolds 1991).

2.4.2 A terepi mintavétel

Gyakori, hogy a terepi mintavételezést szabályos mintaelem elrendezésben végzik el. A terepen a társulásokat Braun-Blanquet (1964) kombinált becslési módszerével vizsgáljuk, amelynek során az egy mintanégyzetben előforduló fajok minőségét és mennyiségét becslési skála segítségével megállapítjuk, és feljegyezzük (növényszociológiai vagy társulástani felvételt készítünk) (Borhidi 2007). Minden mintaterületen egy, vagy több szelvényt (transzszektet) létesítenek a foltban, vagy például magassági gradiensek mentén, két, vagy több vegetációfolt határzónájára merőlegesen. A szelvény mentén gyakran mikrokvadrátban történik a felvételezés, ahol jelenlét/hiány, vagy százalékos borítás értékeket rögzítenek (Zalatnai 2008). Amennyiben lehetőség van rá, a szelvények külső soraiból 0-10, vagy 0-30 cm mélységű talajmintát vesznek,

illetve az egyes vegetációfoltok területéről 50-70 cm mélységi talajmintát vesznek (Bakó et al. 2008). A talaj fizikai, kémiai paramétereinek megállapításán túl a talajminták szerves és szervetlen kémiai analízise segít feltárni a környezeti állapotértékelés szempontjából releváns anomáliákat is.

A biodiverzitás fontos mérőszám egy terület védelme szempontjából. A növényi biodiverzitás leírható a sokféleséggel (a közösségen belüli fajok számával, a helyi fajgazdagsággal), de vizsgálható a fajok számának változékonyságával a környezeti vagy földrajzi grádiens mentén (Wilson 1988). A biodiverzitás érték növekedése nem minden esetben korrelál a terület természetességével. Bizonyos esetekben az antropogén hatásra degradálódott társulásba benyomuló invazív növények a kedvezőtlen diverzitás (neodiverzitás) növekedését eredményezik (Barthlott et al. 1999).

A degradált élőhelyek átalakítása során törekedni kell a fák elegyarányának az őshonos fajok javára történő eltolására, s mindeközben a lombkorona záródottságát lehetőleg magas értéken kell tartani (Csontos és Tamás 2005). A fajkészlet mellett más szempontok is fontosak, pl. a vegetációfolt természetvédelmi értékessége, a dinamika, tájhasználat és a tájbeli kapcsolatok is (Bölöni et al. 2008). A növényi mezofillum fizikai struktúrája mellett a pigmentek közeli infravörös, vörös és kék fényelnyelési tulajdonságai, zöld visszaverődési hányada, valamint a levélszövet nedvesség és levegőtartalma, a növényi részek alakja és térbeli elhelyezkedése meghatározzák a reflektanciát (Gausman 1977). A növényzettel borított felszín reflektancia tulajdonságait a talajháttérrel együtt határozza meg a vegetáció. A szomszédos vegetációfoltok tulajdonságainak időbeli változása a köztük kialakult határzónák tulajdonságainak (fajösszetétel változás, átalakulás) megváltozásán túl azok elmozdulásával, kiterjedés változásokkal is együtt járhat (Strayer et al. 2003 és Fagan et al. 2003 in Zalatnai 2008).

A lágyszárú vegetáció, illetve a felső lombkoronaszint alá szoruló fajok elemzésénél általában kvadrát és szelvény felvételi módszerrel érdemes eljárni, ügyelve a mintavétel reprezentatív voltára. A felső lombkoronák vizsgálatára a légi távérzékelés jelenti a legmegbízhatóbb megoldást.

2.4.3 Foltdinamika

A társulások foltdinamizmusát, időbeni változatosságát, a társulás napi, évszakos, évenkénti ritmusa mutatja (virágzás, termés, visszahúzódás, legeltetés, bozóttűz, évenkénti eltérések, stb.). Egyes területek esetében érdemes a felvételezést többszöri időpontban elvégezni a pontosabb eredmény érdekében. Így a vegetáció különböző megjelenési formáiban, aszpektusaiban megjelenő növényfajok is detektálhatóak (Tuba et al. 2007). Egyes lágyszárúak például olyan többéves ciklust (periodicitást) mutatnak, amely esetében az egyik évben más felszínrészeken dominánsak, mint a megelőző évben. A távérzékeléssel és terepi munkával támogatott élőhely térképezéshez interdiszciplináris előrehaladásra, közös nyelv kialakítására van szükség a biológusok és távérzékelési szakemberek között. A feladat a helyi flóra ismeretét, a cönológiai preferencia és kategóriarendszer ismeretét, terepi tapasztalatot, légi- és műholdfelvétel-interpretációs gyakorlatot, kartográfiai és térképolvasási ismereteket, az alapadatok megbízhatóságának, főbb paramétereinek és a felmérések körülményeinek beható ismeretét igényi.

2.4.4 Tematikus térképek

A kiértékelési végeredmény rendszerint digitális tematikus fedvényen kerül tárolásra. Természetesen a térképek vizuális megjelenítésénél a klasszikus nyomtatásban is érvényesíthető ábrázolási módszerek alkalmazhatók, úgymint jeltérkép módszer, ponttérkép módszer, felületmódszer, kartogram módszer, kartodiagram módszer, izovonal és mozgásvonalak módszerei (Harkányiné 2005). Az ország minden felszínrészlete valamely település kül- vagy belterületéhez tartozik, ezért a lokális környezetvédelmi kérdések a legtöbb esetben a helyi, önkormányzati szinten kerülnek elő. Fontos, hogy az önkormányzati adatbázisok minden szereplője lehetőleg ugyanazt a térinformatikai rendszert használja – így nem bomlik meg az adatbázis konzisztenciája (Végső 2010). Az adatkonzisztencia mértéke megadja, hogy az adatbázisban vagy az abból származó adatállományokban hogyan és mennyire ellentmondásmentesen valósul meg az adatszerkezetre, az objektumokra, attribútumokra és kapcsolatokra vonatkozó szabályok összessége.

10.14751/SZIE.2017.015

3 ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1 A légi felmérés folyamata

A munkafolyamat a repüléstervezésből, engedélyeztetésből, légi és terepi felvételezésből (légi fotogrammetria, illetve terepi geodéziai és adatgyűjtő mérések), térképkimenet készítésből (mozaikolás, szelvényezés), interpretációból (vektor térképezés, terepbejárás, attribútum adatok feltöltése, terepi ellenőrzés, térképrétegek véglegesítése) és adatbázisba implementálásból áll (3. melléklet).

3.1.1 Repüléstervező szoftver készítése

A repüléstervezéshez a később Interspect légi felmérés tervező néven bevezetett szoftvert alkalmaztam, amit elsősorban a következő képletek implementálásával írtam meg, és amit Boldizsár István vezetett át web-gis (elsősorban OpenLayers 3) alapokra.

A relatív (terep feletti) repülési magasságot a terepre vetülő képkocka szélesség, az érzékelő szélesség és a fókusztávolság arányából származtatom, illetve ellenőrzésképpen a műszerméretarány (az érzékelőre vetülő kép méretaránya) valamint a fókusztávolság szorzatából nyerem vissza.

A műszerméretarány a felmérés célja által megkívánt terepi felbontás és az érzékelő elemi képpontban kifejezett szélessége szorzatának és az érzékelő hosszmértékben kifejezett szélességének hányadosa. Kiszámítható a relatív repülési magasság és a fókusztávolság hányadosaként is. A látószög az érzékelőfél hosszmértékben kifejezett szélességének és a fókusztávolság hányadosának az arcus tangenséből adódik.

A sortávolságot a terepre vetülő képkocka szélességének a felhasználó által megadott oldalirányú átfedéssel csökkentett értékéből származtatom. A terepre korrigált átfedés a domborzatmodell minimális és maximális magasságértékeinek figyelembevételével számítódik.

A fényképezési intervallumot a bázistávolság és arepülési sebesség hányadosából számítja a szoftver. Így a koordináta közeli exponálási mód mellett intervallometrikus expozícióvezérlés is alkalmazható.

A leghosszabb képvándorlás-mentes záridő (ennél hosszabb megvilágítás alkalmazásakor repülésirányú bemozdulás következik be) az elemi képpont méretéből, a relatív repülési magasságból, a fókusztávolságból és a tervezett repülési sebességből adódik. Ennek a repüléstervezéskor történő dokumentálása azért lényeges, mert egyes mérőkamerák nem képesek az aktuális repülési sebesség alapján korlátozni a megvilágítás idejét.

A legkisebb előforduló terepi felbontás az alkalmazott digitális domborzatmodell (DDM) előforduló legkisebb magasságértékének és a fókusztávolságnak a hányadosa, amit az elemi képpont szélességével szorzunk. Így jelezni lehet azokat a felületeket, amelyekre vonatkozóan az elérni kívánt terepi felbontás nem érhető el az adott berendezéssel egy nem terepkövető üzemmódú repülés esetén.

Annak érdekében, hogy a szoftver automatikusan elkészíthesse a repülési tervet, első lépésben beszereztem 421 fényképezőgép, 18 mérőkamera, 7 hiperspektrális képalkotó és 4 LiDAR berendezés releváns adatait. Összekapcsoltam a szoftvert az SRTM (Shuttle Radar Topography) globális háromdimenziós térmodellel a terepkövető repülés elősegítése érdekében, illetve a domborzati jellegű akadályok jelzéséhez, majd összegeztem a nemzetközi és európai jogi környezetnek megfelelően elérhető légtéradatokat, és egységes, globális légtértérképet készítettem, amit Bártfay Bence a megfelelő adatbázisba rendezett. (Utóbbi néhány országra nem elérhető). A tervező alkalmas a megadott kamerarendszer, fókusztávolság vagy kamaraállandó és a kívánt terepi felbontás vagy repülési magasság és átfedések megadása, valamint a munkaterület határainak felrajzolása után kiszámítani a szükséges relatív és abszolút repülési magasságokat (terepkövető és egyenmagasságú üzemmód is választható), sortávolságokat, látószögeket, képkészítési intervallumot, képvándorlás-mentes megengedett hosszúságú záridőkorlátot, leképzett képterületeket és méreteket, az aktív repülési szakaszok hosszúságát, számát, a készítendő felvételek számát, a méretarányt. Ezután exportálhatjuk a képkészítési koordinátákat magassággal a fedélzeti rendszerek számára, a repülési sorokat a repülőgép fedélzeti rendszere számára, és az ideális helyzetre vonatkoztatott terepre vetülő leképzett képterületeket is. Mindemellett az engedélyeztetéshez szükséges dokumentum is exportálható, amely a munkaterület térképén megjelenített képkészítési helyeket és nyomvonalakat, valamint a munkaterület oldalmetszeti képét is tartalmazza (repülési karakterisztika). A terv elmenthető, átszerkeszthető bármely paraméter, vagy a munkaterület határainak, esetleg a repülési irányszög megváltoztatásával.

3.1.2 A repülést megelőző és az azt követő teendők

A szükséges engedélyeket a Légi Közlekedési Hatóság és a Magyar Honvédség, valamint a fényképezett munkaterület tulajdonosa vagy gazdálkodója biztosítja.

A légi felmérést bizonyos esetekben mérőjel kihelyezés előzi meg, de az illesztőpont felvétel a legtöbb esetben természetes objektumok utólagos bemérésével történik a repülést követő 30 napon belül. Az illesztőpontoknak jó elosztásban, elszórtan kell elhelyezkedniük. Illesztőpont nem vehető fel kiemelkedő objektum, éles letörés közelében. A felvételek felbontásának megfelelően olyan földfelszíni objektumra van szükség, amelynek egy csúcsos kiszögellése, vagy centruma pontosan meghatároz egy koordinátapárt, és ahol a rektifikáció (felületmodellre történő ortogonális és torzítás csökkentett képátmintázás) során zavaró domborzati vagy magas objektumokból fakadó ponteltolódás sem várható. Illesztőpontnak kizárólag olyan objektum használható fel, amely a felvételezés óta bolygatatlan, nem mozdulhatott el, a felvételeken előzetesen ellenőrizhető, hogy nem volt takarásban a felvételkészítéskor, változatlansága valószínűsíthető (IS1 szabályzat 2009). A terepi mérések elvégzését az esetek túlnyomó részében Molnár Zsolttal végeztem, de esetenként Eiselt Zoltán, Tolnai Márton, Bártfay Bence és Góber Eszter is részt vettek benne.

3.1.3 Alkalmazott repülőgépek

A vizsgálatok során eleinte Cessna 182 E Skylane, PZL 101A Gawron, Antonov An-2P repülőgép típusokat alkalmaztunk, majd ezeket lassan kiszorította a Piper PA-32 Cherokee Six 300, speciálisan távérzékelési feladatokra átalakított repülőgép, amelynek áramellátása és kameraaknái több, különböző áramfelvételű berendezés egyidejű alkalmazására is lehetőséget kínáltak. A típus eleve erősebb motorral szerelt változat, így folyamatosan, stabilan képes repülni akár 285 km/h terephez viszonyított repülési sebességgel is. A repülőgép alján található két zárható nyílás két mérőkamera rendszer elhelyezését is lehetővé teszi, amelyek szimultán képesek dolgozni. Az oldalsó ablakokon szintén zárható, poli metil-metakrilát nyílások kerültek kialakításra, amelyek további mérőműszerek detektorainak kabintérből történő kihelyezését teszik lehetővé. Ezután a repülőgép elektromos rendszerének átalakítása következett. Segédgenerátor, akkumulátorok kerültek beépítésre, így 12 V és 24 V is rendelkezésre áll a műszerek üzemeltetéséhez. A repülőgép adatait a 4. melléklet tartalmazza.

3.1.4 A precíziós repülések

A repülések végrehajtásának időszakát a vizsgálati cél határozta meg. Annak érdekében, hogy a felmérőrendszerek tervezélséhez szükséges alkotóelemeket megválaszthassam, számos kísérletet végeztem kifejezetten szeles, sőt esős időjárási körülmények között és párás időben. A méréseket biztosító repüléseket GPS technikával navigált merevszárnyú repülőgéppel hajtottuk végre belső, padlólemezi mérőkamera aknából. A kísérleti és a feladatrepülések pilótája túlnyomórészt Arday András volt, az elektronikai és mechanikai szereléseket Molnár Zsolt végezte, a tesztek tervezését, a berendezések üzemeltetését magam végeztem. A kamerák optikai centrumai és a GPS antennák fáziscentruma közötti irányvektorokat bemértük, a tájolókat, orientációs berendezéseket repülések előtt és után újrakalibráljuk. A természeti és természetközeli területek vizsgálatára kidolgozott légi felmérés geometriai pontosságának ellenőrzése számos nehézségbe ütközik. Ezek közül az egyik legjellemzőbb azoknak a mesterséges objektumoknak a hiánya, amelyek ellenőrzőpontot szolgáltatva lehetővé tennék a pontosság analízist. A terepen kihelyezhető mérőjelek használata sokszor korlátokba ütközik, ráadásul számos feladat esetében utólag derül ki, hogy az adott felmérés a módszertan szempontjából lényeges, előremutató vizsgálati anyagnak minősül. Ezért a természetvédelmi légi felmérésekhez tervezett berendezések előzetes tesztelését a legtöbb esetben lakott vagy legalábbis mesterséges objektumokkal sűrűn fedett területeken, máskor erre a célra kialakított tesztmezőn végeztük el. A mérőjelek kihelyezésének gátat szab a nehezen bejárható területek (pl. lápok, mocsarak), a zárt erdőterületek és egyéb nehezen jelölhető területek bemérése. Emellett a gyakorlati felhasználáshoz hasonlóan nagy kiterjedésű területek egységes, jó elosztású, sűrűn kihelyezett mérőjelekkel történő ellátása időigényes és a jelek bolygatlanságát lehetetlen biztosítani. Ilyen esetekben (így a legtöbb releváns kísérlet esetén) a területen felellhető meghatározott sarkú vagy centrumú mesterséges felszíni objektumok bemérése nagyobb biztonságot jelent a repülés előtti mérőjel kihelyezésnél, így az utólagos illesztőpont keresési módszer méréstechnikai és biztonsági szempontból is indokolható.

A természetvédelmi célú felmérések egy jelentős része nem természetes, hanem közigazgatási határokhoz kapcsolódik a térképezési projekteken belül, ezért az esettanulmányok sok esetben közigazgatási területekhez, más esetekben viszont kisvízgyűjtő területekhez köthetőek.

3.2 Mérőkamera kalibráció

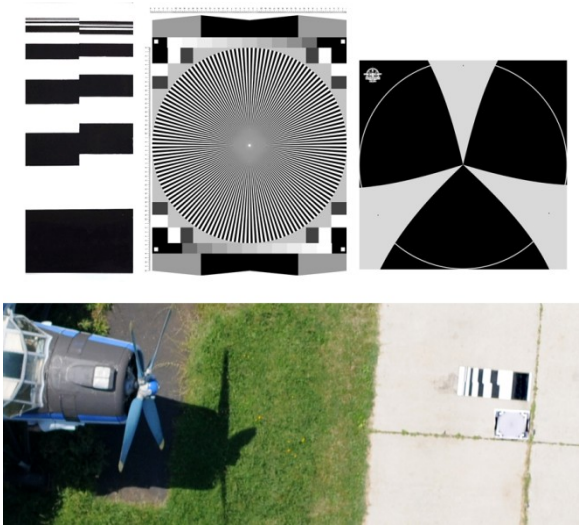
A belső tájékozási elemek közül elsőként a kameraállandót határozzuk meg, ilyenkor az objektív gyártó által megadott fókusztávolságához közeli értéket várunk. Minél nagyobb az eltérés, annál rosszabbak a rendszer geometriai és optikai tulajdonságai. A kameraállandó, vagy kamaraállandó a kép felőli vetítési centrum és a vetítési síkon található képfőpont távolsága. A vetítési centrum az a csomópont, ahol a sugarak egyesülnek, így a nézőpontot is a csomópontokon értelmezzük. A képfőpont ideális esetben a vetítési középpontból a képsíkra állított merőleges egyenes és a képsík metszéspontja. A mérőkamerához tartozó GPS készülék antennájának fáziscentrumában mért koordinátákat a vetítési centrumra számítjuk át. A képfőpont csak ideális esetben található a képközéppontban, ezért képkoordinátáinak megismerése elengedhetetlenül szükséges. A tárgyoldalról a képsíkra merőlegesen érkező, a belépő pupilla közepén áthaladó fősugár útja csak ideális esetben folytatná útját az optikai szimmetriatengelyben. Ehhez képest fénytörések miatt kitér az egyenes objektívtengelyből, és végül az autokollimációs főpontban döfi a képsíkot, azaz a digitális képérzékelő síkját, így ezt tekinthetjük valódi képfőpontnak. A mérőkamerák építésekor törekszünk arra, hogy a képfőpont és a képközéppont távolsága minél kisebb legyen. Ezt magas minőségű optikai elemek felhasználásával érem el. Ennek érdekében több száz fényképezőgép - objektív kombinációt teszteltem, jelentős részüket tesztrepüléssel kiegészítve. A gyorsfelvételezésre alkalmas, magas érzékenységű, széles dinamikai átfogású, adott feladathoz kellően nagy képfelbontású, merőleges érzékelővel rendelkező (megfelelő) fényképezőgép-objektív együttesen megismerjük a belépő és a kilépő pupilla vetítési centrumainak térbeli elhelyezkedését, a belső tájékozás három alapvető értékét: a kamaraállandót és a képfőpont két koordinátáját a képérzékelő elemi képpontjain. A kollimációs hiba nem csak az objektív elrajzolásaiból eredeztethető, a képérzékelő sem tökéletesen merőleges az optikai tengelyre.

A vetítési centrumok, a képfőpont és az autokollimációs főpont helyzetének meghatározása után utóbbit lesz a képkoordináta rendszerünk alappontja. Ezután a képoldali látószög valamint az optikai tengely és a fősugár szakaszai által bezárt szög is leírásra kerül, majd meghatározzuk a radiális optikai elrajzolás értékeit az érzékelőn leképződő képsíkrész négy félátlója mentén. A radiális torzítás mértékét pozitív értékekkel, mikrométerben vagy elemi képpontban adjuk meg az autokollimációs főponthoz (PP vagy PPA: autokollimációs pixel) viszonyítva, a feldolgozószoftvernek megfelelően. Meghatározásra kerül a legjobb szimmetriával rendelkező szimmetria-fősugár is, amely legtöbbször nem egyezik az autokollimációs fősugárral. A szimmetria-fősugár a belépő pupilla közepén, a tárgyfelőli vetítési centrumon halad keresztül, és a képsíkot (a képérzékelőt) a szimmetria-főpontban döfi. Ennek megállapításával az elrajzolási

értékeket újra meg kell adni a szimmetria-főpontra vonatkozólag (jelölése: PPS). A félátlók radiális torzítását tehát immár a szimmetria főponthoz képest adjuk meg.

3.3 A szenzorok kidolgozása

A fényképezőgépek földi, laboratóriumi, majd légi tesztelése 2006-ban vette kezdetét. Számos vezető középformátumú, nagyformátumú és teljes érzékelő felületű kis formátumú fényképezőgépet próbáltam ki, és még több objektívet teszteltem (7. ábra). A tesztek során előnyre tettünk szert a magas áron beszerezhető, akkor modern mérőkamerákhoz képest, amelyeket nagy méretű szenzorokkal szereltek, ami akkor még a dinamika és jel-zaj viszony rovására ment, mert olyan képérzékelőket és optikai rendszereket ismerhettem meg, amelyek felülmúlták a kor népszerű mérőkameráiba épített részelemeket. Így a 2006-2010 közötti időszakban a tesztek tapasztalataira építve kidolgoztam több, repülőgépekbe installálható mérőkamera tervét.

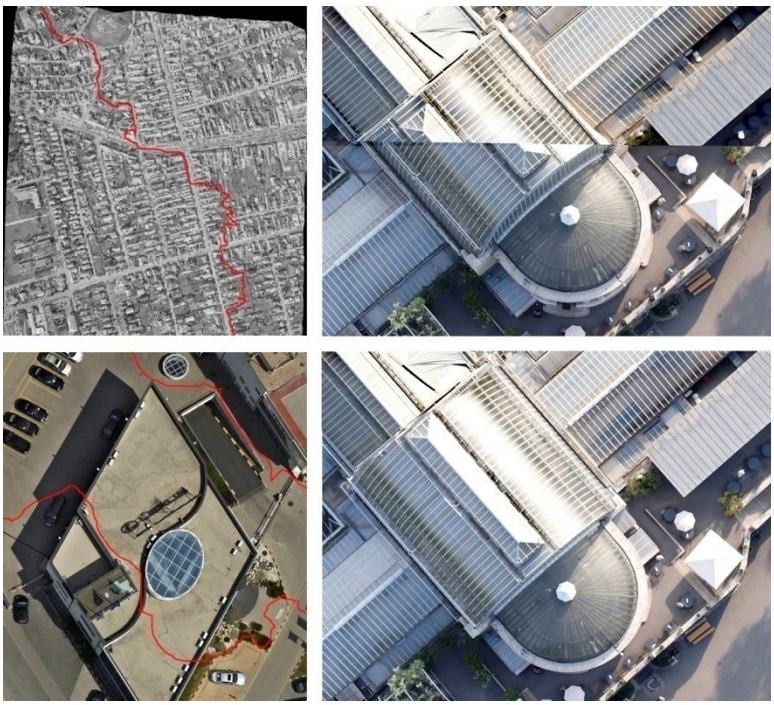


7. ábra Vonalélesség tesztelését és illesztést szolgáló tábláim, valamint a tesztmező egy részlete az Esztergomi Repülőtéren 2007-ben.

Mérőkameráinkat eleinte nagyfelbontású CMOS érzékelőkkel szerelt kameravázakra alapoztam, de előfordult, hogy az infravörös és ultraibolya csatornákat mindössze 10 MP képfelbontású CCD-vel szerelt kamerafejekkel rögzítettük. A minőségi követelmények mellett a kamerafejek idő és parallaxis szinkronizálására kellett nagy hangsúlyt fektetni. A repülési tesztek során is igazolt stabil működés után az időjárásálló burkolatok megtervezését Molnár Zsolttal végeztem el, majd a kalibráció volt a fejlesztések utolsó lépése. Számos változatot építettünk a kamerarendszerekből. Gyakran változtattuk a képérzékelőt a berendezésekben a folyamatos

tesztek alapján. A kiválasztásra került objektíveket szétszereltük, majd a lencséket a hiperfokális élességpontra kalibrálva fixáltuk saját készítésű mechanikai tubusban.

Az első nagy érzékenységű mérőkameránk (később IS 1 munkanevet kapott) egyoptikás rendszer volt, mely lehetővé tette, hogy a benne foglalt, megnövelt kiolvasási sebességű Nikon D3X és a hozzá tartozó átalakított lencserendszer képvándorlás (a haladási sebességből adódó bemozdulás) nélkül készítsen nagy repülési sebességnél átfedő, éles és extrém terepi felbontású felvételeket. A rendszert kiegészítő kamerákkal, MGL Avionics Magnetometer SP-2, SP-5 AHRS-el láttuk el, és igyekeztünk a pozícionálás problémakörére is elektromos szervomotoros megoldást találni. A felvételezési nehézségek leküzdése után a képfeldolgozás problematikájára fókuszáltunk. Az első kísérletben elkészült 1,8 cm terepi felbontású, 1:900 méretarányú ortofotó-mozaik mozaikolása (összeállítása) kihívás volt, mert a hagyományos fotogrammetriai szoftverek más arányokkal dolgoznak. A klasszikus térfotogrammetriai szoftverek (pl. OrthoBASE, Leica Photogrammetry Suite) kisebb terepi felbontású, nagyobb területen átfedő felvételekkel dolgoztak megbízhatóan, ahol az egyes épületek, fák és egyéb magas tereptárgyak csak a legritkább esetben képződtek le két felvételen, de ha így is volt, mindig szerepeltek teljes egészükben egy másik képen. Ezzel szemben a nagy terepi felbontású technológia – amely először tette lehetővé ilyen nagy terepi felbontás és 180 km/h terephez viszonyított repülési sebesség mellett a teljes területfedéses és képvándorlás-mentes lefelé tekintő kameratengelyű légifényképezést – soron belül még csak 60%-ban átfedő felvételezésre volt alkalmas. Így amellett, hogy a kiolvasási sebesség növelésére törekedtem a képfeldolgozás szoftveres fejlesztésével is foglalkoztam. Ez a fejlesztés új, túlnyomórészt nyílt forrású algoritmusok összeszervezését jelentette. A nagy terepi felbontású, kis átfedésű felvételeken az épületek és egyéb kiemelkedő objektumok úgy viselkednek, mint a hagyományos légifelvételeken a meredeken kiemelkedő hegyek. Ezért a vágóvonal vezetést már nem lehet az épületek megkerülésével elvégezni a mozaikolás során (8. ábra).



8. ábra Vágóvonal hagyományos ortofotón és a nagy terepi felbontású felvételeinken

Az IS 1 még hagyományos, a célnak önmagukban még nem megfelelő fényképezőgépeket tartalmazó, kalibrált mérnöki konstrukció volt.

Később a Nikon által felprogramozott szenzorokról átálltunk a kamerarendszert korábban is vezérlő mikroszámítógép vezérelt szenzorokra, így nem csak az exponálást, de a kiolvasást is azonos számítástechnikai egység oldja meg. Korábban a kamerafejek expozíció-szinkronját biztosító analóg vezérlés és a több számítógépegység nagyobb helyet igényelt, így nagyméretű berendezések készültek (pl. IS 4). Ma már megoldható a GPS és az orientáció, valamint a kamera egy számítógéppel történő kiszolgálása. Így bármely elérhető és megfelelően előkészített szenzor, GPS, tájoló vagy kiegészítő berendezés összeépíthető. A vezérlőegységen (korábban Windows, jelenleg Linux operációs rendszer alatt) kizárólag saját fejlesztésű szoftverek futnak. A programozást multiplatformos Python és Java programnyelven oldottuk meg. Az expozícióvezérlés időközökre (intervallometrikus vezérlés), majd koordinátára történő exponálással történt. Az expozíció visszajelző elektromos jel az aktuális kameraállás és helyadatok rögzítését (D-GPS) indukálja. Ezek az adatok utófeldolgozással pontosíthatók (GNSS alapján). Az objektívek véglencséinek védelmére az RGB fejen feloldóképesség és spektrum szempontjából előzetesen tesztelt UV szűrőt alkalmazunk, a multispektrális fejek szűrőzése kerülendő. A lencsék és szűrők spektrális tesztelését nagy spektrális felbontású spektrométerrel (Ocean Optics USB 2000, Flame), illetve Shimadzu spektrofotométerrel, az érzékelő - objektív - szűrő spektrális érzékenységét Shimadzu spektrofotométerrel, majd spektrális LED panellel is teszteltem. A rendszerek energiaellátása a repülőgépről vagy speciális esetekben külön erre a

célra felszerelt akkumulátorról érkezik. Az adattárolás rendszerint külső nagysebességű tárolóegységre történik. Bizonyos adatok (mint például a korrigált pozíció adatok) utólag kerülnek összefűzésre a felvételekkel.

3.4 A precíziós repülések statisztikájának elkészítése

A nagyobb terepi felbontású légifelvételek a klasszikus digitális mérőkamerákhoz képest kisebb képfelbontású, gyors és nagy érzékenységű mérőkamerákkal készülnek, mert a nagy képfelbontású kamerák kiolvasási sebessége nem tenné lehetővé a szükséges soron belüli átfedést. Így a repülés több repülési sorral és kisebb pászta szélességgel megy végbe. Az átfedések és a teljes területfedéses, minél egységesebb felületmodellezésre alkalmat adó felvételek elkészítésének sikerét nagyban meghatározza a repülés pontossága. Ezért először a fotogrammetriai célú repülések pontosságát vizsgáltam meg az Interspect Kft. pilóta vezette precíziós repülései alapján. A fedélzeti gps készülék által a fényképezési szakaszokra rögzített repülési nyomvonalat vetettem össze a repülési tervek szakaszaival. A gps-ből származó rögzített útvonalakat Shp formátumba konvertáltam. Egy, a tervezett aktív fényképezési szakaszok köré létrehozott poligonnal kivágattam a gps által rögzített megvalósult repülési nyomvonalakból az aktív repülési szakaszokat. Az így létrejött sorok egy objektumként szerepeltek, ezért külön vektoregyedekké kellett őket alakítani. Az így létrejött megvalósulási nyomvonal szakasz vektorokhoz hozzárendeltem a repülési terv fájlban szereplő nevüket. 10 x 10 méteres vektorrács került a rétegterjedelemre a tervezett repülési sorokkal párhuzamosan. A rács repülés irányú éleit töröltem, így létrejött egy 10 méterenként elhelyezett vonalsor, ami merőleges a repülési terv soraira. Pontvektort generáltam a tervezett sorok és a repülési sorok metszéspontjaira, majd a pontokat a tervezett szakaszokra merőleges vonalakkal összekötöttem a megvalósult nyomvonalakkal. A tényleges útvonalat a tervezett útvonallal 10 méterenként összekötő szakaszok az eltérések, amelyek hosszúságának abszolút értékét az attribútum táblába számolta a Qgis szoftver, majd ezeket repülési soronként külön shape fájlba írattam, és ebből adatbázis kezelővel készítettem el a statisztikát.

3.5 Kiértékelési torzítás ellenőrzésének menete

A terepi felbontás alapvetően meghatározza a légifelvétel-térkép részletességét és az abból kinyerhető információk levezetési pontosságát. A távérzékelési eljárás előzetesen rosszul megválasztott terepi felbontása kiértékelési torzulásokhoz vezet, így a tematikus térkép fedvény megbízhatósága csökken, a valóságos állapotokhoz képest hibás felszíni adatokkal feltöltött adatbázist kapunk eredményül (Bakó 2010a).

Vizsgálatsorozatot indítottam annak érdekében, hogy megállapítsam, hogy milyen terepi felbontású ortofotó-mozaikot érdemes előállítani adott vizsgálat elvégzéséhez. Légi felvételezést végeztünk különböző kamerarendszerekkel, a vegetációt különböző évszakokban rögzítve. Digitális felvételek készültek 5-50 cm terepi felbontással, 1:2500 – 1:25000 méretarányban, 600 – 930 m terep feletti repülési magasságból, és analóg felvételek is készültek (Hasselblad 500 - KODAK Aerochrome és RC-30, AGFA P 200, M=1:10.000, 1530 m relatív repülési magasság, 7 mikron digitalizálási felbontás) 1500 - 3500 m relatív repülési magassági tartományban. A mintaterületeken megtalálható a Budapest ivóvizének egy részét szolgáltató vízbázis, kaszált terület, felhagyott mezőgazdasági terület, legelők, nagytáblás mezőgazdasági területek, víztestek, tájsebek, erdő és települések belterületei is.

A raszteres rendszerekben a felbontás csökkenése a pixelek által lefedett terepi méretek növekedését eredményezi, ami jelentősen módosítja a kerületre vonatkozó mutatókat és a kerület/terület arányt. Mivel a foltszámot, foltosztály területét, a foltméretet, a foltméret szórását, az össz-szegélyhosszúságot és a közepes szegélyhosszúságot egy rendszerben vizsgáló kísérletek nem mutattak szignifikáns különbséget a kisfelbontási tartományban (Túri 2015), vizsgálataim során a felbontás csökkenésnek kizárólag a foltméret különbségekben megjelenő hatásait vizsgáltam, a töréspont és kerület értékeket pedig a kiértékelők energiaráfordításának elemzésére használtam fel.

A kísérletsorozat beállításánal különös figyelmet fordítottam arra, hogy nagyon fontos a hibátlan topológiájú szerkesztés (Strand 1998), a létrehozott fedvény nem tartalmazhat átfedő poligonokat, vagy olyan felületet, amely nem kerül besorolásra.

A vizsgálat módszerét úgy állítottam be, hogy az elemzők (akik az ELTE TTK · Földrajz- és Földtudományi Intézet Geográfus mesterszakos hallgatói, illetve a SZIE Növénytani és Ökofiziológiai Intézet munkatársai voltak) a lehető legkevesebb járulékos információhoz jussanak hozzá a mintaterülettel kapcsolatban, és mindig csak az adott részletességű felvételt használhassák adatforrásként. Ezt úgy értem el, hogy 5 és 10 cm terepi felbontással felvételeztem

a mintaterületeket, majd ortofotó mozaikot készítettem, amelyet különböző terepi felbontásokkal is exportáltam. Így biztosítani tudtam, hogy a különböző részletességű felvételek azonos körülmények között készültek: a légköri viszonyok, a felszíni objektumok, árnyékok és egyéb paraméterek változatlanok voltak, mert nem különböző magasságokon történő egymást követő átrepülésekből szereztem be a felvételeket, hanem egy adott, nagy terepi felbontású ortofotó-mozaik felbontását redukáltam. Az „azonos körülmények" (azonos kamerarendszer, azonos légköri viszonyok, hőmérséklet és felvételi álláspontok, stb.) biztosítása tehát a nagyfelbontású fotómozaikok digitális, kisebb (diszkért) felbontás értékeken történő újramintavételezésével (köbös konvolúciót alkalmaztam) volt elérhető.

A különböző terepi felbontású verziókat a kiértékelők nem láthatták előzetesen, és először mindig csak a legkisebb felbontású felvételt elemezhették. Amikor az adott felbontású felvétel kiértékelése végbement, akkor került átadásra az egyel nagyobb terepi felbontású változat, így elkerülhető, hogy a nagyobb részletességű állomány információtartalmát kihasználva az elemzők olyan döntéseket hozzanak, amiket pusztán az adott felbontású felvétel értékelésekor nem lettek volna képesek meghozni. Az eredményül kapott felszínborítási térképeket összehasonlítottam. Arra azonban fel kell hívni a figyelmet, hogy ez a képméret redukálási módszer olyan kisebb felbontású légifelvétel-térképeket eredményez, amelyeknek a képi minősége lényegesen jobb a nagy magasságból fényképezhető légifelvétel-térképekénél. Ezért vizsgálati eredményeim azt mutatják meg, hogy mely felbontás-tartománynál kisebb felbontás-értékeken vált biztosan pontatlanná az adott felszínborítási kategória kiértékelése. Ellenőrzésképpen a halásztelki mintaterületen ismételt felvételezést és vegetációs időszakon kívüli felszínborítás térképezést is végeztem, és ennek kiértékelését is elvégeztettem a jelentkezőkkel.

Összehasonlítottam a vizuális interpretációval nyert tematikus felszínborítási térképek vektorállományainak egyes felszínborítási kategóriák esetében mutatkozó különbségeit. A vizsgálatok főleg ökológiai és a mikroklíma szempontjából lényeges felszínborítási kategóriákra vonatkoztak, de a topográfiai és környezetvédelmi települési tervezési feladatok nagy részét is kielégítenék. Így olyan többcélú adatbázis mintakategóriáinak ellenőrzésére törekedtem, amely sokféle gazdálkodási és kutatási ágazat számára lehet hasznos. A kiértékelés végeztével terepbejárást, helyszíni ellenőrzést is végeztem, de a kiértékelők előzetesen sohasem jártak a munkaterületeken. Az első vizsgálat a 10 – 50 cm terepi felbontás-tartomány gyors ellenőrzésére irányult egy nagy kiterjedésű vízbázis felszínborítás vizsgálatán keresztül. Itt 2 és 6 cm terepi felbontású felvételek, valamint az utólag elvégzett terepbejárás is segítette, hogy az adatokat megfelelően értékelhessem (5. melléklet).

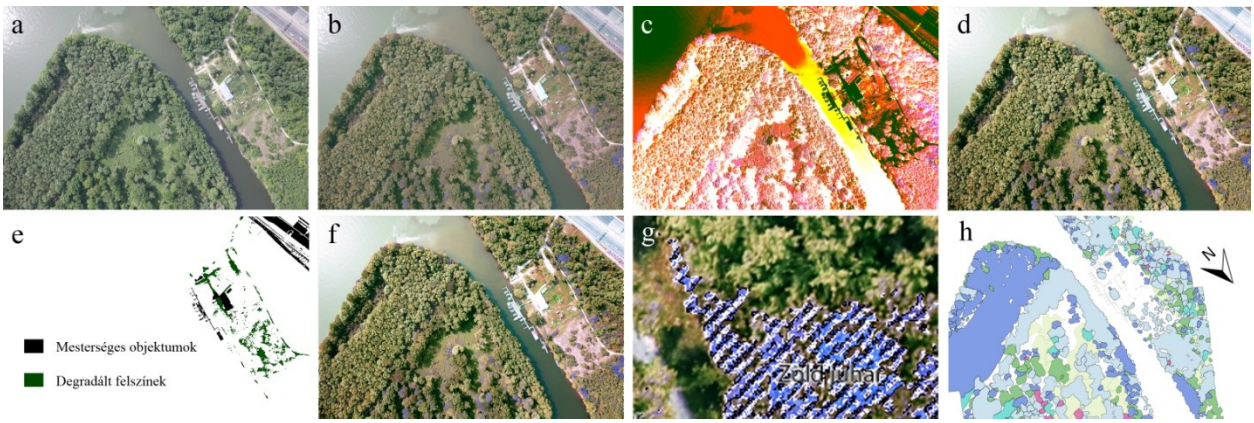
A 10 cm terepi felbontású fotó-térképek interpretációjával nyert vektoros állományt vettem viszonyítási alapnak, és ehhez hasonlítottam a fotó-térképből generált kisebb terepi felbontású (20 és 50 cm) légifelvétel-térképek vizuális kiértékelése alapján nyert vektoros állományait. A minimális térképezett terepi folt méretét 1 m^2-ben, a legkeskenyebb térképezett elem szélességét pedig 0,5 méterben határoztam meg.

3.6 A felvételek kiértékelésének felgyorsítása

Az előfeldolgozás során az osztályozási raszter → vektor művelet intenzitás feltételeit készítjük elő, azok bizonytalanságait tüntetjük el. Különböző műveleteket hajtunk végre, amelyek a felvétel egészén kiemelik az adott felszínborítási kategóriát a háttérből, vagy megszüntetik a vizsgált kategóriák változatos megjelenését. Mindezt a felvétel árnyalatgazdagságának és színrészletességének csökkentésével, árnyalatterjedelmének növelésével, képvékonyítással érjük el. A vizuális iterációkkal beállított előfeldolgozáson átesett, diszkrét pixel intenzitás értékekből felépülő, átmenet- és textúra mentes kép automatizált szoftveres feldolgozása már nem rejt annyi hibalehetőséget. A raszterből → vektor számítás is gyorsabban végbemegy, mint egy árnyalatgazdag, változatos kép esetében.

Az előfeldolgozás első lépéseként kivágunk néhány kellően reprezentatív fotótérkép részletet, amelyen gyorsabban kikísérletezhető a teljes mozaikra vonatkozó legcélszerűbb eljárás. A szoftveres kiértékelés során a nagyobb területfedésű és a munkaterületeken gazdálkodók számára fontosabb kategóriák gyors és biztos lehatárolására igyekeztünk módszert kidolgozni. Ezt úgy valósítottuk meg, hogy először vizuálisan követhető képátalakító szoftverek segítségével, majd saját algoritmusok alapján olyan irányba toltuk el az egyes kategóriák színárnyalatait, kontrasztját és egyéb raszteres képi paramétereit a georeferált állományon, amik ezután egy megfelelően beállított osztályozással már térinformatikai értelemben is hasznosítható állományokat eredményeztek. A felszínborítási kategóriák elkülönítését nem egy lépésben végezzük. A sziklagyepek és a fák által borított felületek elkülönítéséhez például a legtöbb esetben először olyan erős kontrasztemelést alkalmazunk, ahol a határértékek már csak néhány szín elkülönítését teszik lehetővé. Ekkor két-három szín fejezi ki a sziklagyepeket, lágyszárúakkal borított felszíneket, valamint a dolomitfelszíneket, és a fennmaradó színek a fákkal, cserjékkel borított részeket reprezentálják. Ezután osztályozással megkapjuk a két típus pontos vektoros fedvényét. A karrok leválogatásánál első lépésben a valósszínes légifelvétel mindhárom csatornáján monokróm színátmenet-térképet készítünk, így három kategóriára osztjuk a munkaterületet: karrok, növényzettel borított felszínek és árnyékok. Fafajok borítását

nem lehet pontosan lehatárolni pusztán spektrális alapú osztályozás segítségével, így ebben az esetben a pusztán spektrális alapú osztályozó algoritmusok végleg csődöt mondanak. Viszont a textúra (nagy felbontású felvételek esetén működik) és színárnyalatok (széles, legalább 100 nm spektrális átfogású csatornák esetén) segítségével történő osztályozáskombináció jó megközelítésű, gyors eredmény elérését teszi lehetővé. A művelet megvilágítási tulajdonságoktól és a szétválasztani kívánt felső lombkoronaszinti fajoktól is függ, de általában a telítettség emelésével kezdődik, így az élénkebb színárnyalatú részek világosabbak lesznek. Amennyire lehetséges, a színerősséget is emeljük, így még erősebb kontrasztot kapunk például a világos (kőris) és sötétebb (tölgy) részek között. Végül „keményítés" jellegű kontrasztemeléssel zöld színárnyalatokat kap a kőrissel fedett felület, a kék szín kiemelése után a felvétel „keménységét", kontrasztját fokozva, és az így kapott kék színű részeket vektorizálva a vitális tölgyekre jellemző felületeket kapunk. Az osztályozási folyamat után vizuális ellenőrzés következik, és ahol manuális korrekció szükséges, ott ki kell javítani a vektoros réteget. Végül terepi ellenőrzés igazolja vissza a vektorgrafikus térképréteg pontosságát. A módszert korábban részletesen ismertettük: (Bakó és Gulyás 2013). A 9. ábra a Háros-félsziget fás szárú vegetációjának elemzésén keresztül mutatja be a folyamatot.



9. ábra A Háros-félsziget felső lombkoronaszinti faegyedeinek és facsopoprtjainak feltérképezése

A 9. ábra a. jelű változata az eredeti ortofotót, a b. jelű a zöld juharra jellemző árnyalatok színerősségének megnövelése, majd lila színnel történő egyeztetése utáni állapotot mutatja be, a c. és e. jelű a mesterséges és degradált felszínek leválogatását, a d. jelű a fajok további árnyalását, az f. a lila árnyalatait felvett területek árnyalatainak egyesítését, a g. a szelekció minőségét, a h. pedig a térképezési eredményt szemlélteti. A szelekció minőségén sokat javít a háromdimenziós felületmodell bevonása és a megfelelő sugárral futtatott alakzat összevonó - egyszerűsítő algoritmus is.

3.7 A vizuális interpretáció és a félautomatikus osztályozás összehasonlítása

A vizuális interpretáció és a félautomatikus számítógépes kiértékelési metódust a 2010.10.11-én, a vörösiszap-katasztrófa közvetlen hatásterületésről fényképezett színes ortofotó-mozaikon hasonlítottam össze (Bakó et al. 2015). Az előfeldolgozás során (6. melléklet) a képeken a vörösiszapnak megfelelő árnyalatú részeket kiemeltem, amellyel előkészítettem a képeket a vörösiszappal fedett területek jobb szegmentálásához. Ehhez a következő képszűrési eljárásokat használtam: A raszterállományra jellemző színek szelektív alakítása során a vörös komponens esetében a magenta és a cián értékek emelése mellett a vörös csökkentésével, a sárga komponens esetében a cián erősítésével, a magenta és a sárga csökkentésével, a zöld és a cián komponens esetében a cián, a magenta és a sárga színek radikális csökkentésével, a kék és a magenta komponens esetében a sárga erősítésével értem el az iszap kiemelését a környezetétől. Mindezt úgy, hogy a környező területekre jellemző egyéb felszínborítási kategóriák egymásba olvadjanak. Az ortofotó mozaik élénkségét, a színek intenzitását radikálisan emeltem, a színárnyalatokat egyeztettük. A szűrési folyamatba Kirisics Judit, az ELTE hallgatója is bekapcsolódott, és komoly érdemeket szerzett, különösen az utófeldolgozás, az MMU alatti foltok kiszűrése tekintetében. A telítettség emelése után már olyan raszterállományhoz jutottunk, amelyen az iszappal fedett foltok markánsan elkülönültek a környezetüktől. Az eredmény fokozása érdekében a kék csatorna hisztogramját 0,01 értékre módosítottuk. Ezzel a lépéssel raszteres előfeldolgozási eljárásokkal végeztünk. Az osztályozás ENVI 4.8-as szoftver használatával történt, felügyelt osztályozástípusra esett a választás. Kétféle tanulóterületet definiáltunk: a vörösiszap által fedett és az elöntés által nem érintett területek kerültek az ENVI-ben Regions of Interest (ROIs)-nek nevezett eszközzel kijelölésre. A Minimum Distance módszer optimálisnak ígérkezett, hiszen az elöntési területek jól elkülönülnek, a távolság alapú módszer megalapozott, gyors és megbízható eredményt vártunk tőle. Itt a döntés alapja az, hogy az ismeretlen pixel mekkora távolságra van minden tematikus osztály mintái alapján számított osztályátlagoktól, vagyis a kérdéses n-dimenziós pont milyen messze esik az osztályok súlypontjától. Az algoritmus megvizsgálja, hogy az egyes pixelek melyik tanulóterület csatornánkénti átlagához esnek legközelebb. Az eredményként kapott raszterfájlban már homogén értékeket befoglaló foltok vannak, a pixelek csupán kétféle értéket vehetnek fel. Az utófeldolgozás során szűrtük ki a túlságosan kisméretű foltokat, ezeket az őket befoglaló nagyobb foltba olvasztottuk. Az MMU (minimal mapping unit) 10 pixel átmérőjűnek választott érték volt. Így a vektorizálás során egy már generalizált, kevesebb töréspontot tartalmazó, kisebb fájlméretű, ezáltal könnyebben kezelhető állomány jön létre. A vektorizálás végeztével egy darab, poligon típusú shapefile-unk keletkezett. A vektortérképet manuálisan át kell nézni, és

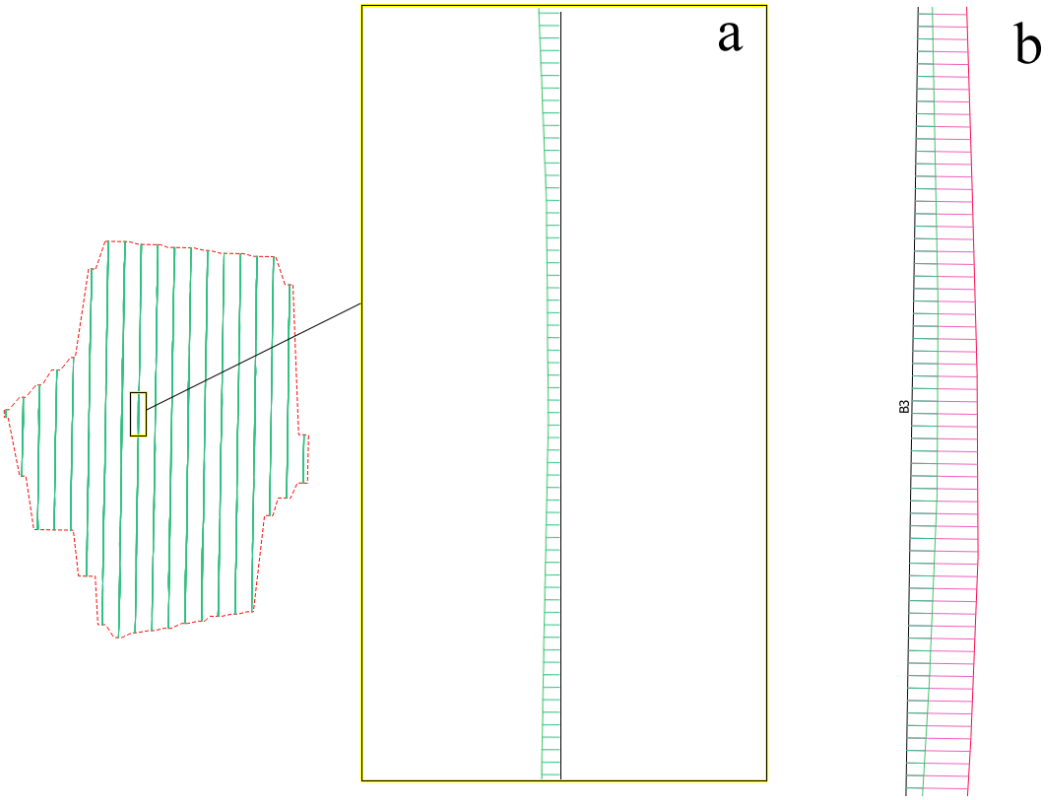
ahol szükséges, javítani kell (például lombkorona által kitakart területek esetében). Az eredményeket a 4. 6. 2 felyezet tartalmaza.

10.14751/SZIE.2017.015

4 EREDMÉNYEK

4.1 A precíziós repülések statisztikai eredményei

A tervezett és megvalósult nyomvonalak között 10 méterenként felvett merőleges eltérés egyenesek megfelelőnek bizonyultak, mert a repülőgép sebessége, tehetetlensége nem tesz lehetővé jelentős kitérést és visszatérést ennél rövidebb szakaszokon a precíziós repüléseknél (10. ábra).



10. ábra A megvalósult (zöld színezésű) repülési nyomvonalak a tervezett (fekete) szakaszokhoz képest, 10 méterenként vizsgálva, valamint egy másik repülési napon tapasztalható megvalósult nyomvonalak (rózsaszín jelöléssel).

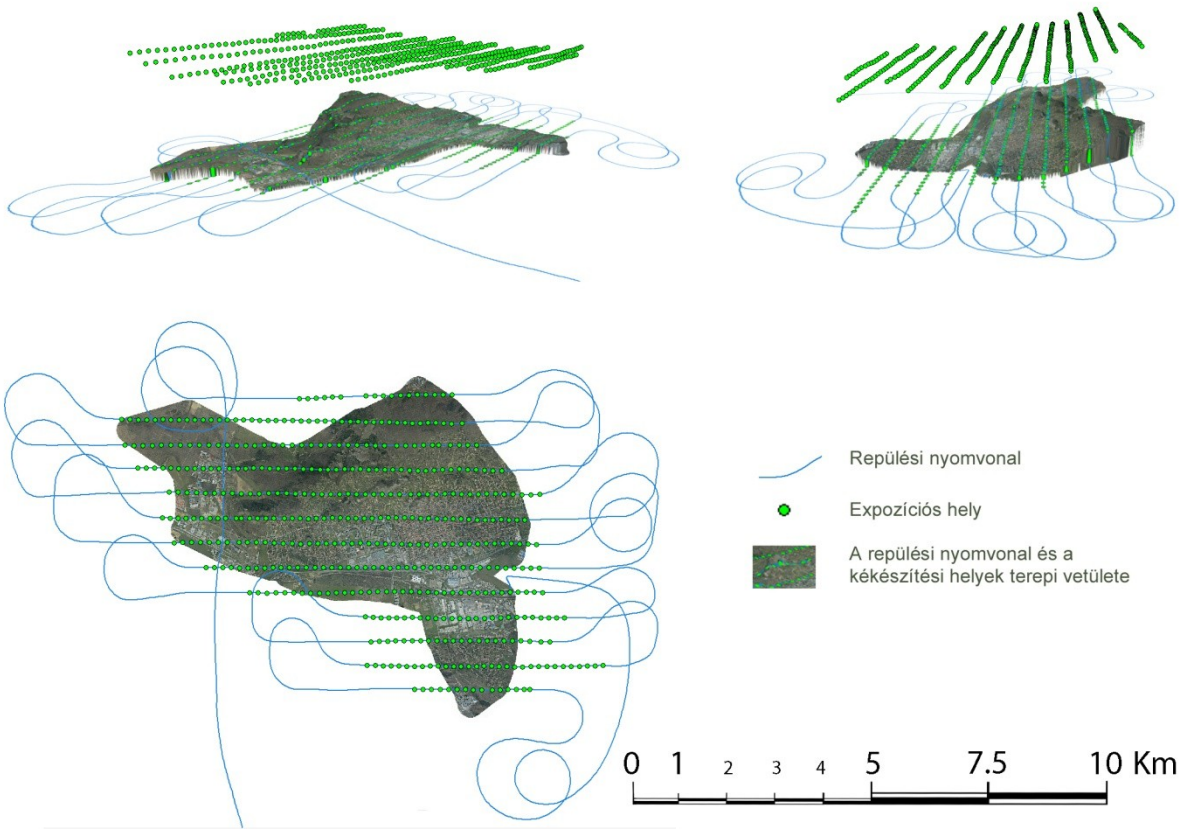
A gyakorlatban a tervezett aktív (képkészítési) szakaszoktól való átlagos síkrajzi eltérés 11,24 méter volt, és egyetlen esetben sem fordult elő 87,53 méternél nagyobb elsodródás. Ez figyelemre méltó amellett, hogy a felvételek kameratengelyének függőlegeshez közeli állapota mindvégig biztosított volt. A 300 m terep feletti magasság alatt végrehajtott (általában teszt célú) repülések átlagosan 8,23 m eltérést mutatnak, és 51,50 m a maximális előforduló távolság a tervezett nyomvonaltól. A 480 és 580 m relatív repülési magassági tartományban végrehajtott repülések vizsgálata átlagosan 9,14 m eltérést adott, és a legnagyobb előforduló távolság 40,33 m volt. 600 és 800 m terep feletti magasságban lezajló precíziós repülések esetében 9,40 m

átlagos eltérést tapasztaltam a tervezett és a végrehajtott repülési szakaszok között, míg a legnagyobb eltérés 65,09 m volt, ami egy rendkívül turbulens időjárási viszonyok között végrehajtott repülésben adódott. 800 - 1000 m relatív repülési magasság tartományban átlagosan 8,80 m az eltérés, és 49,39 m a legnagyobb eltérés a hagyományos (megfelelő időjárási viszonyok között elvégzett) munkák esetében. 1300 - 1500 m repülési magasságok között 12,45 m átlagos eltérést és 82,51 m legnagyobb mellérepülést tapasztaltam. 1600 és 2500 m relatív repülési magassági tartományban átlagosan 11,87 m távolságban repültünk a tervezett nyomvonalaktól, és 86,35 m maximális eltérés adódott. A 2500 és 3200 m terep feletti repülési magasságok között végrehajtott munkák folyamán átlagosan 13,16 méter volt a mellérepülés és 76,48 m legnagyobb elsodródás fordult elő.

Amikor az időjárás szempontjából is megvizsgáltam az aktív repülési szakaszokat, 2010. június - 2016. június időszakban a megfelelő légköri viszonyok között repült szakaszokra átlagban 8,34 m eltérés adódik és 82,51 méter maximális eltávolodás fordult elő. Ezzel szemben a turbulens körülmények között repült szakaszok eltérés átlaga 12,00 méter, a legnagyobb kicsúszás pedig 87,53 m.

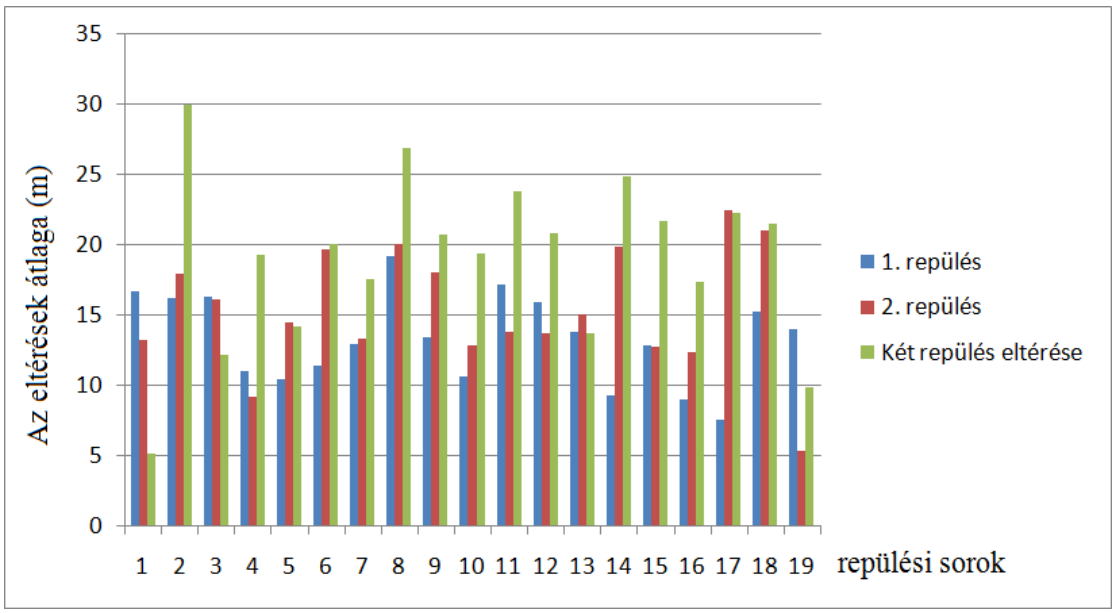
Az eredmények igazolták, hogy az Interspect Kft. belső szabályzatában a korábban ARGOS Stúdióból származó repülési tapasztalatok alapján 2009-ben meghatározott paraméterek (IS1 2009) betarthatóak. Eszerint a repülési tervben szereplő repülési soroktól 400 m alatti relatív repülési magasság esetén maximálisan 60 métert, 400 és 800 m között 75 métert, 800 méter felett 100 métert lehet csak eltérni (Interspect belső szabályzat 2009).

A számos felmérésből egy konkrét esetet kiemelve az 1000 m relatív repülési magasságon végrehajtott Budaörs város teljes közigazgatási területét 10 cm terepi felbontással megörökítő ortofotó-térkép repülésére 2013. április 17-én, 11:45 és 12:41 között került sor enyhén turbulens, de még megfelelő légköri körülmények között (11. ábra). Az 56 perc alatt elvégzett repülés alatt a 13 (7,5 - 2,6 km hosszúság közötti) repülési soron átlagosan 10,00 m vízszintes eltérést tapasztaltam, a legnagyobb elcsúszás 49,38 méter volt a tervezett repülési sortól. Ahogyan a 11. ábrán is megfigyelhető, bár az egyes nyomvonalak olyan sorokat követnek, amelyek távolságait azonos abszolút repülési magasságra terveztem, a repülési sorok egymáshoz viszonyított magassága a terepviszonyokat követi.



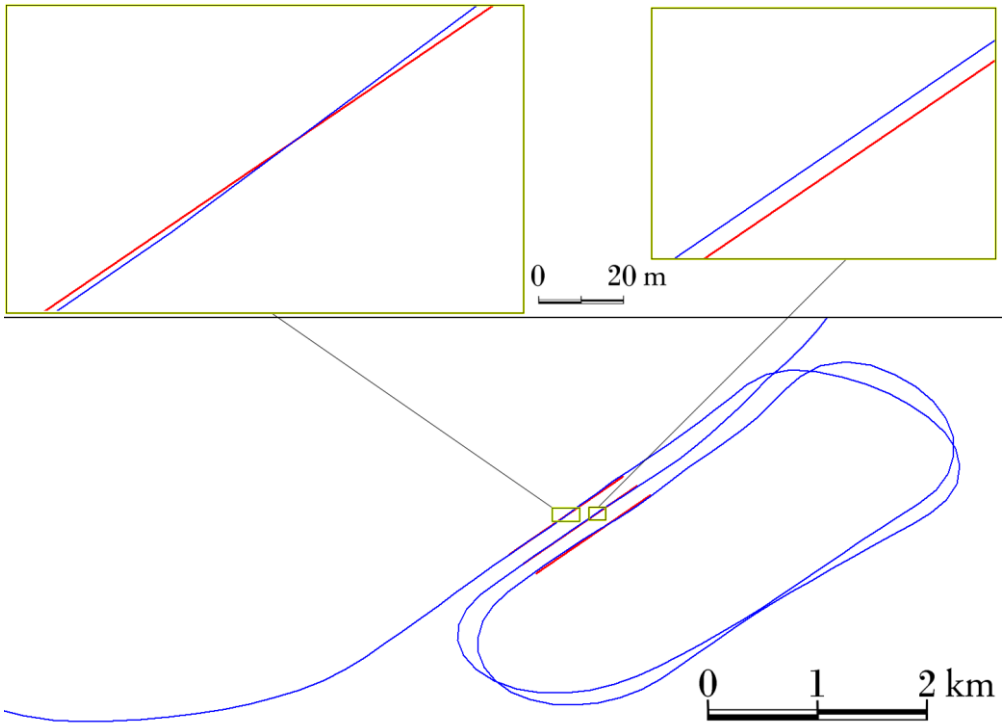
11. ábra Budaörs ortofotó térképe a felmérésből származó felületmodellből levezetett terepmodellen három dimenzióban szemléltetve, a képkészítési helyek és a terepre vetített repülési nyomvonal feltüntetésével

Egy másik példát kiemelve érdemesnek tartottam egy rendkívül turbulens körülmények között lezajlott repülés megismétlését. A másnap elvégzett felmérés során az előzőnél is jelentősebb légmozgást tapasztaltunk, így elkészítettem ennek a Kaposvár teljes közigazgatási területét felmérő két repülésnek (10. ábra) az egyesített statisztikáját. Az első alkalommal átlagosan 13,35, maximum 50,7 méterrel sodródtunk el a tervezett repülési soroktól, míg a második alkalommal az eltérés átlaga 15,36 m és a legnagyobb elsodródás 68,66 méter volt. Egymáshoz képest a két megvalósult repülés nyomvonalai 19,15 méter eltérést mutattak átlagban, és 97,61 méterrel távolodtak el egymástól (12. ábra).



12. ábra Kaposvár két egymást követő napon, 1674 m relatív repülési magasságban végigfényképezett légi felmérési sorainak tervezett repülési soroktól, illetve egymástól való átlagos eltérései. A 19 repülési sort mindkét alkalommal az átlagosnál jelentősen rosszabb időjárási körülmények között teljesítettük.

Az esemény ellenkezőjére is lehet példát hozni. Ideális körülmények között végzett tesztrepülés során (13. ábra) természetesen az eltérés értékek még jobban leszoríthatók (1. táblázat).



13. ábra A repülési terv három repülési sorának elhelyezkedése a megvalósult nyomvonalon

1. táblázat Három repülési sorból álló 740 m terep feletti repülési magasságban végrehajtott tesztrepülés során a repülési terv nyomvonalaitól rögzített eltérések

	Laterális síkrajzi eltérés		**Soron belüli eltérés** (sebesség ingadozás)			**Magassági eltérés**	
Repülési sor	Eltérések átlaga	Maximális eltérés	Bázistávolság	Eltérések átlaga	Maximális eltérés	Eltérések átlaga	Maximális eltérés
1	8,03 m	10,74 m	100 m	0,71 m	1,42 m	14,88 m	19,14 m
2	9,87 m	12,33 m	100 m	1,29 m	2,58 m	18,00 m	24,12 m
3	4,91 m	6,91 m	100 m	0,42 m	0,58 m	5,59 m	8,09 m
Átlag	**7,60 m**	**9,99 m**	**100 m**	**0,81 m**	**1,53 m**	**12,82 m**	**17,12 m**

A felszínhez viszonyított repülési sebesség a szél irányától és erősségétől is függ, ezért azt az adott sorra történő rárepülés közben választjuk meg.

A 2009 - 2016 időszakban végrehajtott légi távérzékelési célú repülések 80%-át 178 – 229 km/h sebesség tartományban hajtottuk végre. A soron belüli sebességingadozás nagyon kiszámíthatatlan, de a koordinátapárra történő exponálás az ebből eredő hibát kiszűri.

Érdemes megemlíteni, hogy rendkívül tapasztalt, de precíziós repülésben nem jártas pilótával is végeztünk egy kísérleti repülést, amelynek során 240 m síkrajzi eltérést is tapasztaltunk, de ennél jóval nagyobb problémát jelentett, hogy amikor a tervezett szakaszokat jól tartotta a repülőgép, a padlólemez nagyrészt 30-60^{o} kitérésben volt, ami lehetetlenné teszi a kameratengely elfordulás kompenzációt.

Zalaegerszeg 2740 m terep feletti repülési magasságra tervezett, 9 db 16,5 km hosszúságú repülési sorból álló repülésekor magassági értelemben átlagosan 10,77 métert tértünk el a tervezett soroktól, és 33,75 m volt a legnagyobb előforduló magasságeltérés. A felmérést Cessna 182 típusú felsőszárnyas repülőgéppel teljesítettük.

Kaposvár 19 db 1674 m relatív repülési magasságra tervezett repülési sorától átlagosan 6,96 métert tértünk el függőlegesen és 26,13 m függőleges eltérés is előfordult. Itt a középső tíz repülési sor hosszúsága 20 km volt, míg a szélső sorok átlagosan 6 km hosszúságúak voltak (10. ábra). Ezt a felmérést Pa 32 alsószárnyas repülőgéppel végeztük el.

A változatlan időjárási körülmények között, különböző repülési magasságon várható magasságtartást ellenőrizhetjük a 2012. január 31-én lezajlott veszprémi légi felméréssel, azzal a

megkötéssel, hogy a légmozgás a magassággal és a felszíni tulajdonságokkal is változik. Ez a repülés három magasságon zajlott, mert a belvárost 7 cm, a belterületet 10 cm, míg a külterületet 20 cm terepi felbontással fényképeztem, de az átfedő részek is minden esetben felvételezésre kerültek. A 870 m relatív repülési magasságra tervezett négy 700 m hosszúságú sorból álló belvárosi repülés átlagosan 20,39 m magassági eltérést mutatott, de 26,78 méternél nagyobb függőleges eltérés nem fordult elő. Az 1640 méter relatív repülési magasságra tervezett, nyolc 7,5 km hosszúságú repülési sorból álló belterületi felvételezést 9,94 méter átlagos magassági eltéréssel teljesítettük, és a legnagyobb előforduló magasságkülönbség 75,00 m volt a tervezett repülési magasság és a gps által rögzített nyomvonal között. A 2870 m terep feletti magasságra megtervezett, a teljes közigazgatási területet lefedő légi felvételezés 12 repülési sorát (10 - 19 km hosszúságú szakaszok) átlagosan 13,25 m vertikális pontossággal követtük, de 55,90 m magassági eltérés is előfordult. A repülést egy felszállásból valósítottuk meg, Veszprém teljes közigazgatási területét 11:23-12:20 között, Veszprém belterület 12:21-13:00 és Veszprém óvárosát 13:06-13:15 között repültük le, Cessna 182 típusú repülőgéppel.

4.1.1 Magasság tartás ember vezette repülőgépen

Az előre megadott tengerszint feletti magasság tartásában a felmérési feladatok hat éves átlagában 25 méteren belüli eltérés tartható. A szolgáltatásunkban tapasztalható legnagyobb eltérés 82 méter volt, és ez 2000 m tervezett repülési magasság esetén következett be. A korábbi elméleti anyagokra alapozott szabályozás, miszerint „törekedni kell arra, hogy a tervezett repülési soroktól való függőleges eltérés ne haladja meg a 10 métert” módosítanám egy egyértelmű, ugyanakkor megengedőbb, ezáltal betartható és számon kérhető határértékkel: a tervezett repülési soroktól való függőleges eltérések átlaga nem haladhatja meg a 25 métert.

4.1.2 Kameradőlések

A felmérések során előforduló kameradőlések vizsgálata érdekében a legrosszabb paramétereket nyújtó és egyben a legrosszabb időjárási körülmények között lezajlott felmérés adatait vettem alapul, ami egyébként fotogrammetriai feldolgozás és a végtermék geometriai felbontása tekintetében (HCEa = 1,13 pixel) is kiváló eredményt adott. A vizsgálatot a kamera tájolási adataira, valamint a fotogrammetriai munkafolyamatból származó pontosított értékek vizsgálatára építettem. Az orsózás maximumai -8,02° és +12,38° voltak, de a felvételeknek csak a 0,26 százaléka (4 felvétel) esetében tapasztaltam 10° fölötti orsózást, ugyanakkor a felvételek

13,35 százaléka (1535 felvételből 205 kép) ω elfordulása volt 5° fölötti értékű. Eközben a bólintás legnagyobb hibája -0,80° és +0,94° voltak. Ez a Pa 32 repülőgép repülési karakterisztikájának és felépítésének is köszönhető. A szélrátartás esetében -2,95° és +4,08° maximális értékeket tapasztaltam, amelynél egy másik repülésben tapasztaltam rosszabb értékeket (-10,16° és + 10,41°), de az orsózás és bólintás ott az előzőhöz képest kisebb kitérést mutatott. Bár ennél rosszabb értékeket más repüléseink esetében sem tapasztaltunk, bekértük pilóta nélküli légijárművekkel dolgozó kutatók és cégek felvételeit, és ezekre is elvégeztük az elsősorban fotogrammetriai számításokon alapuló vizsgálatot. Mindezt annak érdekében, hogy széles körben elfogadható javaslat készülhessen a még megengedhető eltérések határértékeire vonatkozóan.

4.2 A repülési paraméterekkel szemben támasztott elvárások megfogalmazása

A 2010 - 2016. június időszakban végrehajtott légi távérzékelési projektek precíziós repüléseinek elemzésével, valamint a szakirodalmi áttekintés és a saját, az ARGOS alapokra építő szabályzatunk revideálásával megfogalmaztam a merevszárnyú repülőgépes légi felmérésekkel szemben támasztott alapvető követelményeket (2. táblázat). A követelmények összegzésekor törekedni kellett arra, hogy a számos felmérési mód és berendezés szempontjából alkalmazható legyen, így a határértékek nem szigorúak, könnyen betarthatók. Az értékek biztosítják a megfelelően és megfelelő eszközökkel végrehajtott fotogrammetriai célú repülés sikerét, ugyanakkor nem zárják ki a költséghatékony alternatív technológiákkal dolgozó felhasználókat sem. Ezért nem kizárólag az Interspect munkáit feltáró kimutatásaim alapján dolgoztam ki őket, hanem számos szolgáltatóval egyeztetve, mintaanyagokat bekérve, iterációs úton készítettem el. Mindemellett kizártam azokat a lehetőségeket, amelyek a precíziós repülések végrehajtását kockáztatják.

2. táblázat A tér fotogrammetriai célú repülésekkel szemben támasztott alapvető elvárások

		Térképészeti célú légi felmérés (hetekig, hónapokig kihasználható időablakok/napszakok állnak rendelkezésre)	**Konkrét időponthoz kötött légi felmérés** (Néhány nap alatt, vagy egy adott időpontban teljesítendő)
Felhőzet		Kizárólag felhőtlen időben, vagy csak teljes felhőborítás esetén a felhőalap alatt hajtható végre	Amennyiben a felhőalap magassága lehetővé teszi a felmérést, végrehajtható
Maximális szélsebesség a munkamagasságon	Sorirányú	60 km/h	60 km/h
	Nem sorirányú	50 km/h	60 km/h
Minimális napállás		30°	20°
Megengedett képvándorlás		0 pixel	1,5 pixel
Kameratengely dőlés		Átlag: <4°	Maximum: < 10° Átlag: <8°

Síkrajzi eltérés a tervezett soroktól	Hrel: 0 - 400 m	Maximum: 60 m	Maximum: 60 m
	Hrel: 400 - 800 m	Maximum: 75 m	Maximum: 75 m
	Hrel: 800 - 10 000 m	Maximum: 100 m	Maximum: 100 m
Vertikális eltérés a tervezett repülési soroktól		Az eltérések átlaga nem haladhatja meg a 25 métert	Az eltérések átlaga nem haladhatja meg a 25 métert
Soron belüli magasságingadozás		A tervezett repülési magasság ±2,5%-ánál nem lehet nagyobb	A tervezett repülési magasság ±4 %-ánál nem lehet nagyobb
Bólintás irányú szögeltérés		$\varphi < 2^{o}$	$\varphi < 5^{o}$
Orsóirányú szögeltérés		$\omega < 5^{o}$ de a felvételek 0,5%-ának lehet 10^{o} eltérésnél nagyobb hibája és a felvételek 15%-ának lehet 5^{o} eltérésnél nagyobb hibája	$\omega < 5^{o}$ de a felvételek 0,5%-ának lehet 10^{o} eltérésnél nagyobb hibája és a felvételek 15%-ának lehet 5^{o} eltérésnél nagyobb hibája
Szélrátartás		56 -80 % soron belüli átfedés esetén: $<\pm 7^{o}$ 80 - 98 % soron belüli átfedés esetén $<\pm 12^{o}$	$<\pm 20^{o}$
Soron belüli átfedés		56 - 98 %	56 - 98 %
Sorok közötti átfedés		>25% és domborzattól függ	>25% és domborzattól függ
Formátum		Nyers, TIF, vagy bizonyos esetekben JPEG 12 (100)	Nyers, TIF, vagy bizonyos esetekben JPEG 12 (100)
Radiometriai felbontás		Csatornánként minimum 8 bit	Csatornánként minimum 8 bit

A táblázatban szereplő 30^{o}-nál, illetve 20^{o}-nál magasabb napállású időszakok leolvasásához az Országos Meteorológiai Szolgálat adatai alapján diagramot készítettem (7. melléklet).

4.3 A mérőkamera előállítás eredményei

4.3.1 Kiegészítő megoldások a felhasznált alkatrészek elemzésében

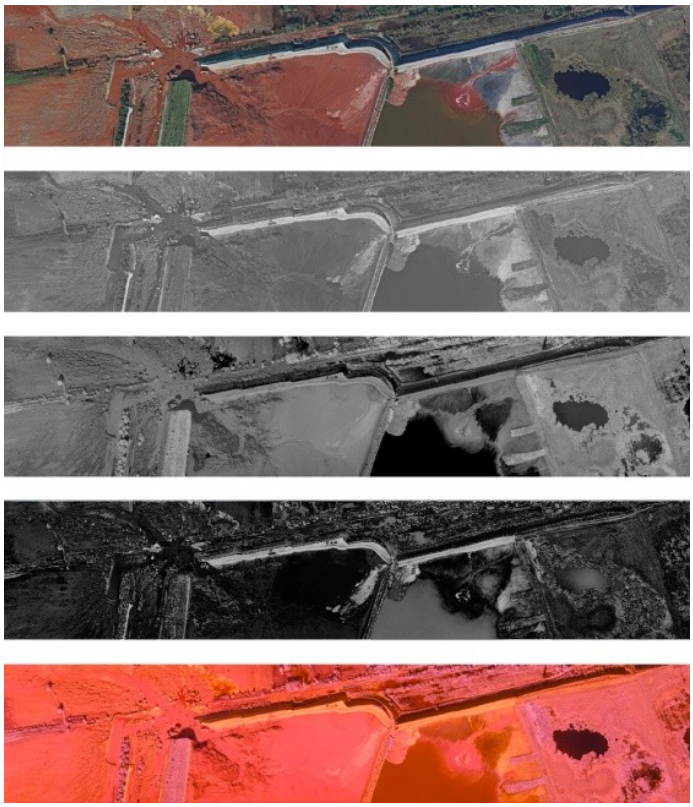
Bevezettem a kamerarendszereinkhez alkalmazott optikai alkatrészek spektrális - geometriai kombinált ellenőrzését. A geometriai elrajzolás vizsgálthoz hasonlóan adott rekeszértékre, de immár adott hullámhosszakra vonatkozólag, radiális és tangenciális, valamint területre súlyozott átlagos felbontás értékekkel határozom meg a kamerarendszer spektrum-feloldás és elrajzolás függését. Ez a művelet tapasztalataim szerint az előre várható eredményeket produkálja a különböző bevonatok, az üveg és egyéb alkotóelemek függvényében, ugyanakkor mégis hasznos, mert segítségével fény derül a legkisebb egyedi lencsehibákra és a káros reflexiókat okozó felületek jelenlétére is.

4.3.2 Kivitelezés és tapasztalatok

A terveket először részegységekben valósítottuk meg, majd az első elkészült digitális mérőkamera rendszerrel 2009. szeptember 2-án, az esti órákban gyenge megvilágítási viszonyok között 5 repülési soron lefényképeztem a Fővárosi Állat- és Növénykertet. A 272 felvétel elkészítése után beszereztem és teszteltem az akkor népszerű fotogrammetriai szoftverek egy részét, majd beállítottam a feldolgozási folyamatot, és három hónap feldolgozási idővel előállítottuk (Bakó, Molnár és Eiselt, lásd Köszönetnyilvánítás) az 1,8 cm terepi felbontású ortofotó térképét. A feldolgozási folyamat során sikerült olyan módszertant kidolgoznom, amelyel az extrém nagy felbontású ortofotók is jó minőségben (egységes képi világ, vágási és hisztogram egyeztetési hiba nélkül, folytonos képként) mozaikolhatók. A megoldás a pontos geometrián, azaz a szabatos ortorektifikáción, a jó képminőségű felvételeken és a nagy átfedéseken alapul. A 2010-ben megvásárolható fotogrammetriai szoftverekben még nem elérhető algoritmusokat használtunk, amelyek azóta számos fotogrammetriai szoftverben is megjelentek (például 123D Catch, Agisoft Photoscan, Enwaii, Geomatica, PhotoModeler, Pix4D, PixProcessing, Python Photogrammetry Toolbox, REDcatch, VisualSFM).

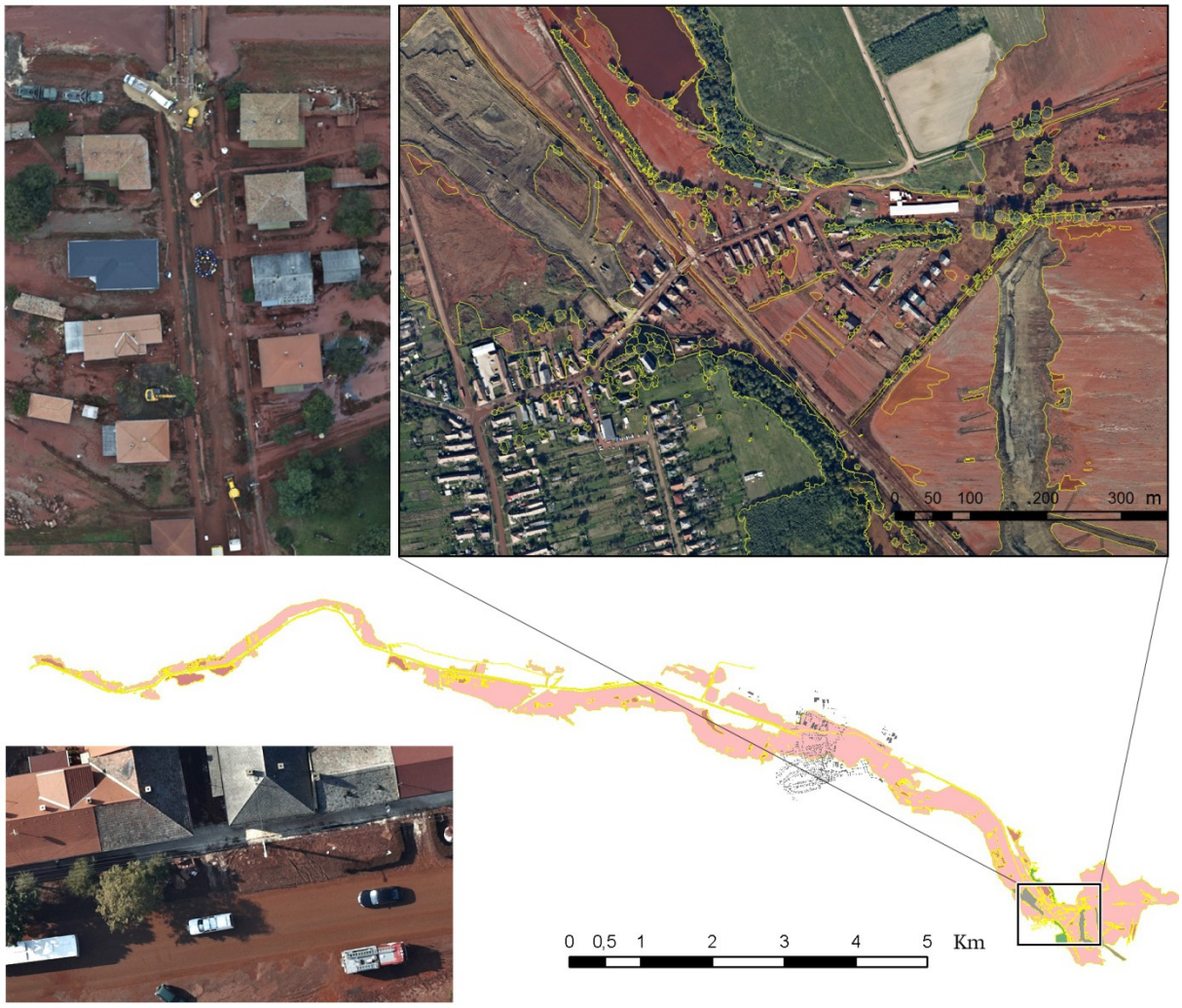
A fejlesztés a korábban felsorolt igények és az IS 1-nél tapasztalt nehézségek alapján folytatódott. A méret- és tömegcsökkentés, valamint a dinamikus, nagyfelbontású légifelvétel-térképezés volt az Interspect IS 2 rendszer készítésekor az elsődleges koncepció. Bár az IS 2 rendszerhez már cseppálló burkolatot terveztem, amelyet Molnár Zsolt készített el, az első kalibrált kamerarendszerünkhöz hasonlóan egy, a környezeti hatások (például magas páratartalom) által veszélyeztetett, csak állandó műszaki felügyelet és folyamatos ellenőrzés mellett üzemeltethető mérőkameráról van szó. Ez a rendszer nem koordinátapárra exponált, a központi vezérlőrendszerén futó intervallométeres vezérlőszoftver alapján fényképezett, ezért a

repülési sorok elején be kellett állítani a szükséges paramétereket (záridő és intervallum), miután a fényképész a pilótával egyeztette az aktuális sebességet, ami az oda-vissza repült soroknál a szélerősség és szélirány függvényében változott. A sorok végén végrehajtott forduló közben a felvételeket a kamera visszajátszotta, így a szükséges átfedés megléte azonnal ellenőrizhető volt, és az is látszott a gyorsan lepergetett képsorozaton, amennyiben felhő, vagy felhőárnyék került egy, vagy több felvételre. A fényképész feladatkört minden esetben én láttam el, ezért nincsen tapasztalat azzal kapcsolatban, hogy a megoldások kellő komfortérzetet és biztonságos kezelést nyújtanának más légifényképész számára is. Ennél a berendezésnél teszteltük először a digitális multispektrális felvételezést az Interspect mérőkamerák esetében. Az első multispektrális tesztrepülések 2010. október 6-án és 11-én, a váratlan és sajnálatos vörösiszap-katasztrófa közvetlen hatásterületének lerepülései lettek, mert ekkor volt felkészítve az első multispektrális tesztre egy Cessna 182 repülőgépünk (14. ábra).



14. ábra Az Interspect IS 2 ortofotó-mozaikjának RGB csatornái, színes és közeli infravörös csatornái, illetve CIR kompozit felvétele a kolontári vörösiszap tározóról.

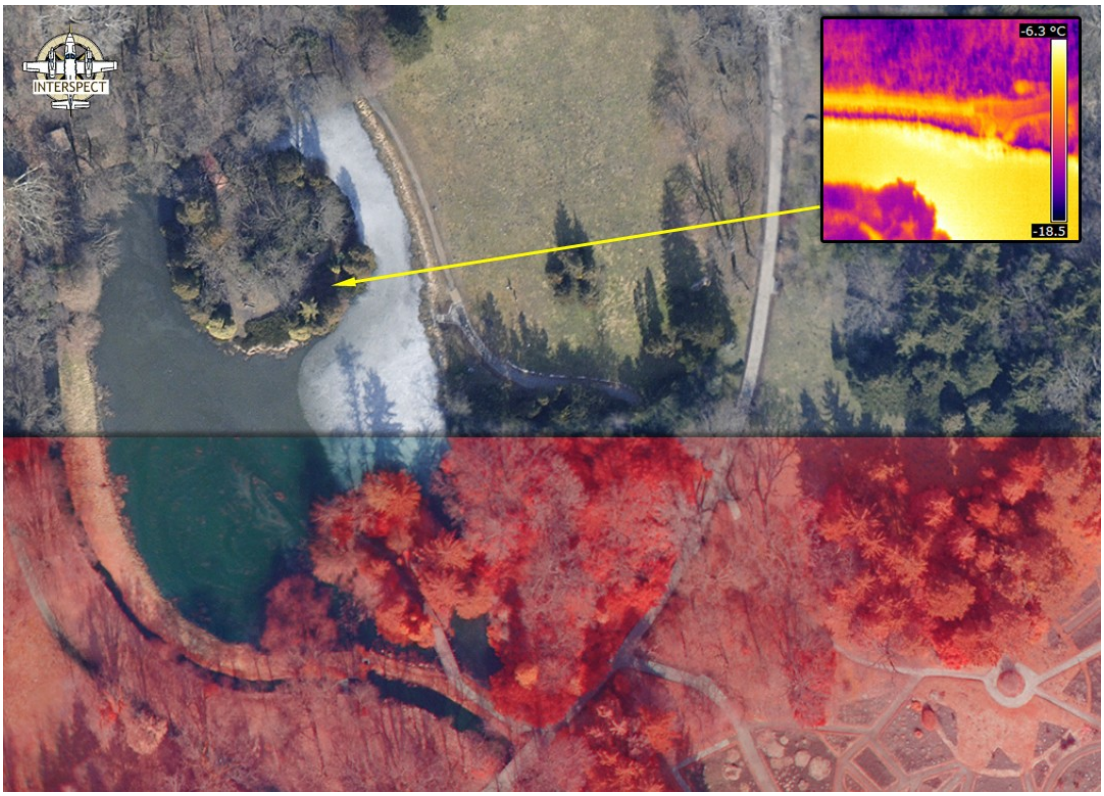
Később negyvennél is több nagy területet lefedő légifelvétel-térképet készítettünk megrendelésre ezzel a mérőkamerával. A jó színvisszaadású, széles dinamikai átfogású, részletgazdag térképeken becsültek vízminőséget (VITUKI), készült belőlük belvíztérkép, erdőgazdálkodási, vegetációtérképezési adatbázis (Gulyás 2011), és nagy pontossággal felmértük a vörösiszap-katasztrófa elöntési területét és 300 km^2 környezetét (15. ábra) (Bakó et al. 2015).



15. ábra Az elkészült ortofotó-térkép részletei és a belőle levezetett 20 cm részletességű elöntés térkép

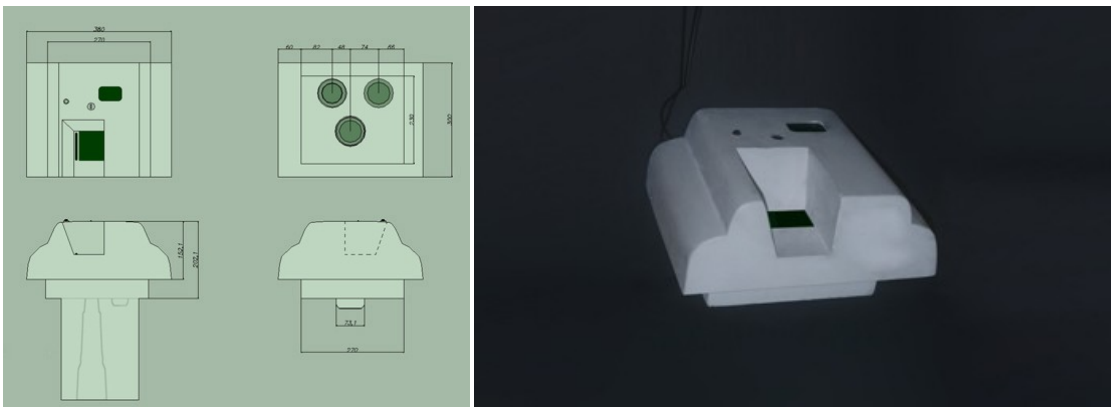
A fejlesztés következő állomása az Interspect IS 3 digitális multispektrális mérőkamera (16-17. ábrák) kifejlesztése volt. Az Interspect laboratóriumában nagysebességű kamerafejek egybeépítésével megalkotott gyorsfelvételező eszköz akár 1/8000 másodperces expozícióra is képes, másodpercenként 5-7 felvételt készít (Bakó et al. 2014b). Érzékenysége és gyorsasága lehetővé teszi, hogy a zenittől mért 75° napállásig akár fél cm terepi felbontással térképezzük fel az elektromágneses spektrum látható tartományában a földfelszínt. Tiszta időben ezt a felbontást akár 800 méteres terep feletti magasságból is elérhetjük, párás időben alacsonyabbról célszerű felvételeket készíteni. Mindehhez csak az objektívek cseréjére van szükség. A felvételezés gyenge megvilágítási viszonyok között (a zenittől számított 75°-nál nagyobb napállás esetén) is kivitelezhető, így most először arra is mód nyílik, hogy abban az időszakban végezzük el a felmérést, amikor például a költő vízimadarak többsége a fészkén tartózkodik, vagy valamilyen más, egy adott időszakhoz kötött jelenséget szeretnénk rögzíteni. Újdonság, hogy a felvételezés borult időben is jó minőséggel elvégezhető. Az eljárás kifejezetten párás, sőt bizonyos megkötésekkel esős időben is működik. A kameratest immár vízhatlan és porvédett volt. A

műszer adatait a 8. melléklet tartalmazza. Ahogyan a 14. és 16. ábrák Cir kompozitjai közötti minőségen megfigyelhető, az IS3-nál (17. ábra) már sikerült a színes infravörös KODAK légifilm színvilágát és információtartalmát reprodukálnunk. A berendezés a három érzékelőről összesen hat csatornát olvas ki, amelyek közül háromnak variálható a szűrőzése.



16. ábra Az Interspect IS 3 mérőkamerával a Vácrátóti Arborétumról készült ortofotó-mozaik színes (R,G,B) és CIR (Nir,R,G) csatornái, valamint a légi fotogrammetriai repülést megelőző éjszaka egy Flir hőkamera segítségével készített hőtérkép részlete (Bakó - Molnár - Feldhoffer).

A burkolat oldalsó részén elhelyezkedő számítógép és egy külön hardver szerepe az lett volna, hogy összefűzze az így elkészült, csatornánként 14 bites felvételeket a tájolási és helymeghatározási adatokkal, de végül az utófeldolgozás mellett döntöttünk. Ekkor még a fedélzeti számítástechnikai kapacitás csökkentése jelentős tömeg és méretcsökkentést tett lehetővé.



17. Interspect IS 3 az első magyar gyártmányú digitális multispektrális mérőkamera

2011. március 3-án ortofotó-térkép előállítására alkalmas alacsony, nagysebességű felvételezést végeztünk a Veresegyházi Medvefarm fölött 0,5 cm terepi felbontással (18. ábra).

18. ábra Az első fél cm terepi felbontású felvételek részlete, amelyek 200 km/h repülési sebességnél készültek

Továbbra is a felhasználó egyetemekkel és intézetekkel egyeztetve folytattuk a műszer képességnövelését. Az IS 3 legnagyobb előnye, kis mérete (370-720 x 300 x 210 mm) ekkor már korlátozó tényezővé vált. A csatornaszám növelése, valamint a további terepi felbontás növekedés iránt támasztott igények új konstrukció elkészítését sürgették. Az IS 4 (19. ábra) nagyobb méretű (388 x 310 x 464 mm), akár 16 nagyfelbontású csatornát rögzítő mérőműszer,

amelyekből 12 csatorna spektrális érzékenysége variálható a standard RGB és nagy átfogású közeli infravörös csatornák megtartásával.

A készülék moduláris jellegét egyfelől a spektrális csatornaszám növelési lehetőség, másfelől pedig az adja, hogy több egyede közös rendszerré építve felbontás kiterjesztést is lehetővé tesz. Így a kamera képfelbontása 185 megapixelig igazoltan megnövelhető (8. melléklet), bár ilyen modifikációt a gyakorlatban sohasem alkalmaztunk, és a megfelelő szerkezeti tartóelem sem készült el hozzá, 60 MP CCD kamerák összehangolásával a képösszeolvasztás bizonyos domborzati limitációk vagy tárgytávolság arány megtartás mellett működik (20. ábra).

19. ábra Interspect IS 4 MS II digitális multispektrális mérőkamera alulról nézve, illetve a Piper PA-32 *Cherokee Six repülőgép légifotó aknájába rögzítve*

A mérőkamerákhoz élő képet biztosító videó kamera is párhuzamosítható, amelynek látószöge a mérőkamera látószögével összehangolható. A másik célszerű megoldás, hogy az élő képet biztosító videó kamera látószöge nagyobb a mérőkameráénál, és a képmezőben egy téglalappal jelöljük a mérőkamera által is érzékelt képterületet. Így idejekorán észlelhető, ha felhőfoszlányok felé tartunk, vagy egy felhő árnyéka borítja a következő képkészítési helyet. Ilyenkor a helyszín elmenthető, és az adott koordinátákra a repülési sor végén, vagy a teljes munkaterület lerepülése után is vissza lehet térni a felhőzet megváltozásával. Az élő videó felvételt biztosító kamera előre - lefelé is tekinthet. A berendezés repülőgépen belüli elhelyezkedését az 9. melléklet szemlélteti.

20. ábra Két RGB kamerafej moduláris elrendezésével megnövelhető a mérőkamera transzverzális látószöge és képfelbontása.

A mérőkamerák által a képkészítési hely optikai centrumára vonatkozóan eltárolt x, y koordináták, a magasság adat és az ω, φ, κ dőlésszögek, valamint a releváns fényképezési paraméterek a fotogrammetriai képfeldolgozás szempontjából hasznos információk.

4.3.3 A soron belüli átfedés biztosítása

Minden háromdimenziós fotogrammetriai eljárás szempontjából meghatározó a felvételek átfedése. Egyesek a 66% soron belüli és a 20% sorok közötti átfedést tartják ideálisnak (Lato et al. 2012). Az átfedést a kamerák kiolvasási sebessége biztosítja adott magasságon és repülési sebesség mellet. Az IS 4 MS II kamerarendszer képes a 4 felvétel / másodperc képrögzítési sebességet 8 másodpercig fenntartani, de a képi tartalomtól függően ezt még további pufferelési idő követheti. A 3,3 felvétel / másodperc képrögzítési sebességet 7 másodpercig tudja tartani pufferelés nélkül is, így azonnal ráfordulhatunk a következő repülési sorra. Az objektum orientált képelemzés közös alkalmazása háromdimenziós modellel pontosabb kiértékelést tesz lehetővé (Hellesen és Matikainen 2013), ezért fontosnak ítéltem meg a jó minőségű háromdimenziós kiértékelést elősegítő 65%-os soron belüli átfedési határ elérését.

A 3,3 felvétel / másodperces képrögzítés minden körülmények között működött 7 másodpercig, ami repülésirányban 400 m hosszúságú felület befényképezését teszi lehetővé 206

km/h földfeletti repülési sebességgel, és a térfotogrammetriai eljáráshoz biztonsággal elegendő 65% soron belüli átfedéssel. Mindezt a számítások és a tesztrepülések eredményei is igazolták. Számításaim alapján a 25% soron belüli átfedés 500 m repülési magasságban akár 2200 km/h földfeletti haladási sebességnél is biztosítható volna, amennyiben elérhető volna ilyen sebességű platform (3. táblázat).

A 2. táblázat a 3,33 kép/másodperces képkészítési sebességgel felmérhető repülésirányú úthosszakat tartalmazza a háromdimenziós fotogrammetriai feldolgozást biztosító, illetve a kétdimenziós georeferálást elősegítő átfedésekre vonatkoztatva, a terepi felbontás függvényében, f=50 mm objektívek esetén. (A kezdetben alkalmazott 10 MP NIR és UV kamerafejek esetében az RGB fej 50 mm fókusztávolságú és az MS fejek 33 mm fókusztávolságú objektívvel történő felszerelése esetén.)

3. táblázat A terepi felbontás az elemi képponton leképzett felszínrészlet szélességét fejezi ki, Hrel a relatív (felszínhez viszonyított) repülési magasság, v65% – a 65% soron belüli átfedéshez szükséges földhöz viszonyított repülési sebesség, Δs65% – 65% soron belüli átfedéssel képtorlódás nélkül befényképezhető úthossz, v25% soron belüli átfedéshez szükséges földhöz viszonyított repülési sebesség, Δs25% –25% soron belüli átfedéssel képtorlódás nélkül befényképezhető úthossz.

Terepi felbontás (cm)	Hrel (m)	$v_{65\%}$ (km/h)	$\Delta s_{65\%}$ (m)	$v_{25\%}$ (km/h)	$\Delta s_{25\%}$ (m)
0,5	50	103	200	220	430
1	100	206	400	440	860
5	500	1030	2000	2208	4300
10	1000	2060	4000	4416	8600
20	2000	4120	8000	8832	17200
30	3000	6180	12000	13248	25800

Kiszámítható, hogy a gazdaságos 100-300 km/h repülési sebességgel, 0,5 cm terepi felbontás esetén csupán 200 m hosszúságú szakasz fényképezhető 65% soron belüli átfedéssel és 430 m hosszúságú 25% soron belüli átfedéssel. Ez azonban vízimadarak fészkelő helyeinek, lápok és egyéb védett természeti területek, egyes parkok és nevezetességek befényképezéséhez elegendő.

1 cm terepi felbontás esetén 400 m hosszúságú repülésirányú szakasz képezhető le 65% soron belüli átfedéssel és 900 m hosszúságú terület térképezhető fel 25% soron belüli átfedéssel, a könnyű és közepes repülőgépekkel gazdaságos 180 km/h földfeletti sebességgel.

A 2 cm terepi felbontású felvételezés folyamatos, képtorlódás mentes felvételezést biztosít 180 km/h földfeletti repülési sebességnél, így a repülési sorok hosszú kilométereken át tarthatók ennél a felbontásnál. A repülési sorok hosszának ebben az esetben már csak a munkaterület nagysága, a felmérés jellege és a platform hatótávolsága szab határokat. Ezért a 2 cm terepi felbontású légi felmérés akár több száz km hosszúságú repülési sorok esetében is tartható, ami előnyös a vízfolyások és egyéb vonalas létesítmények, például az út- és vasúthálózat felmérésénél. Amennyiben viszont rövidebb (néhány km hosszúságú) szakaszokat veszünk fel, több repülési sorral, úgy a nagy terepi felbontású felületmodell készítésnek kedvezünk. 20° napállásnál 288 km/h terep feletti repülési sebességig végezhetjük mindezt képvándorlás-mentesen.

4.3.4 Képvándorlás-mentes felvételezés

Az IS 4 MS II. kamerarendszerrel végzett kísérletek esetében képstabilizátort (FMC-t, azaz mechanikai képvándorlás kompenzáló berendezést, vagy TDI digitális képvándorlás kompenzálás) nem alkalmaztunk. A tesztek során a felvételek élességét utólag nem javítjuk. A rezgésekből adódó hibák elkerülése érdekében csillapítást és 1/800 sec-nál gyorsabb záridőket alkalmazunk. Ezért az Interspect Control Pro 1.2 szoftverben letiltásra kerültek az 1/800 sec-nál hosszabb záridők.

A képvándorlás modellezhető, kiszámítható (Atashgah és Malaek 2012), így következtetni tudtam az adott sebességhez és távolsághoz tartozó legrövidebb képvándorlás-mentes záridőre (S) is.

$$S = \frac{\frac{v}{m}}{p} \tag{11}$$

S – Leghosszabb megengedhető záridő,

v – Repülési sebesség,

m – Műszer méretarány (a relatív repülési magasság és a kamaraállandó hányadosa),

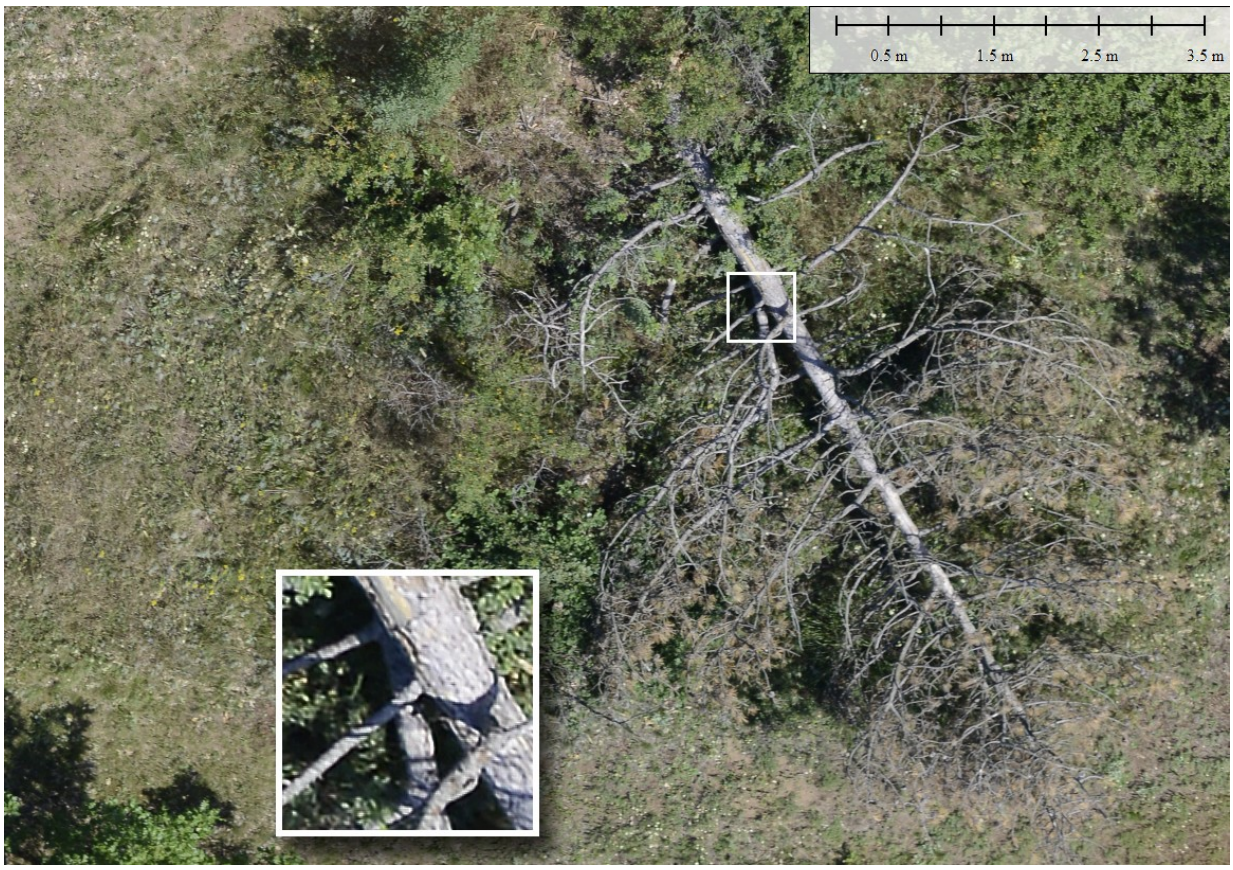
p – Az elemi képpont mérete.

Az elméleti értékeket a tesztrepülések maradéktalanul igazolták (21-22. ábrák).

Kiszámítottam, hogy adott repülési magasságon, adott zársebességnél milyen repülési sebességig nem lép fel lineáris képvándorlás:

$$v = \mathrm{p} * \mathrm{m} * \mathrm{s} \tag{12}$$

Az ideális megvilágítási viszonyok között általában még alkalmazható 1/8000 és a teljes felhőborítás mellett is alkalmazható 1/4000 záridőkre vonatkozó értékeket a 4. táblázat tartalmazza.



21. ábra kidőlt feketefenyő (Pinus nigra) 0,5 cm terepi felbontású ortofotó-térkép részletén az RGB csatornákon

22. ábra 0,5 cm terepi felbontású ortofotó mozaik kicsinyített részlete. A kiemelt részleten két felvételt egyesítő vágóvonal is áthalad.

4. táblázat Az 50 mm alapobjektívvel szerelt (27° repülésirányú, 40° transzverzális látószög) IS4 MS II mérőkamerára kiszámított legnagyobb képvándorlás mentes földhöz viszonyított repülési sebesség adott repülési magasságokon, adott záridőkkel.

Terepi felbontás (cm)	**Hrel** (m)	**m**	**M**	**$v_{1/8000}$** (km/h)	**$v_{1/4000}$** (km/h)
0,5	50	1:1000	1:250	141	70
1	100	1:2000	1:500	282	141
2	200	1:4000	1:1000	563	282
3	300	1:6000	1:1500	845	423
4	400	1:8000	1:2000	1127	563
5	500	1:10000	1:2500	1409	704
10	1000	1:20000	1:5000	2817	1409
20	2000	1:40000	1:10000	5635	2817
30	3000	1:60000	1:15000	8452	4226

Terepi felbontás – Egy elemi képegység által leképzett felszínrészlet szélessége

Hrel – Terep feletti repülési magasság

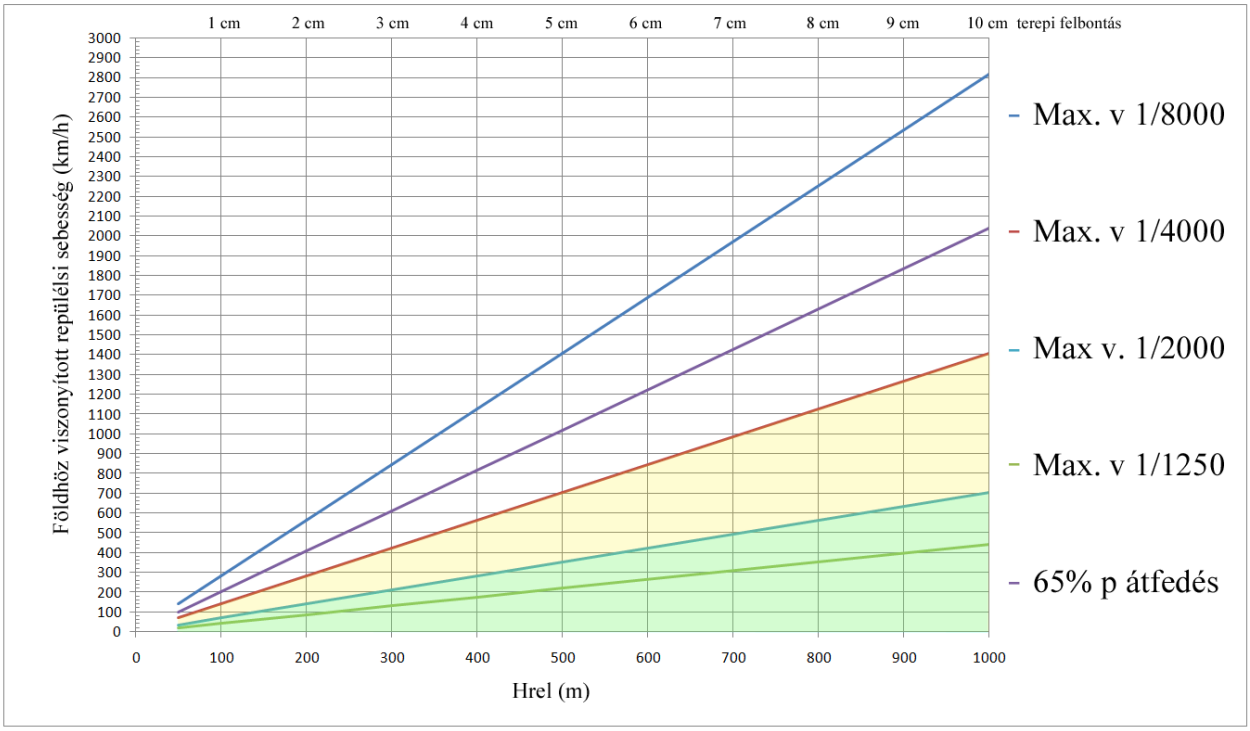
m – Műszer méretarány

M - Nyomtatási méretarány 300 dpi esetén

$v_{1/8000}$ - Leggyorsabb repülési sebesség 1/8000 sec záridőnél

$v_{1/4000}$ - Leggyorsabb repülési sebesség 1/4000 sec záridőnél

A nagy részletességű távérzékelés azonban csak az egyik vonulata a kísérletnek. A légi felmérésekben hagyományosnak tekinthető 5 – 30 cm terepi felbontású légi felméréseknél a kamerarendszer gyorsfelmérést tesz lehetővé. A kamera érzékenysége lehetővé teszi, hogy borult időben (teljes felhőborítottság mellett) világos, jól interpretálható képeket készítsünk 1/4000 sec záridő mellett is. Így elméletileg mindössze 500 m terep feletti repülési magasságból akár 700 km/h repülési sebességgel is világos, részletgazdag és éles felvételek készíthetők a felhőzet alól. Megfelelő időjárási körülmények között (felhőzet mentes időjárásnál, nyári időszakban, a déli órákban) 1/8000 sec záridő esetén is elkészíthetők a részletgazdag, jól exponált felvételek. Ebben az estben már 1400 km/h elméleti repülési sebesség is megengedett lenne 500 m terep feletti repülési magasságban az éles, 5 cm terepi felbontású felvételek elkészítéséhez. Sajnos ilyen nagy repülési sebességnél nem tudtuk tesztelni a kamerarendszert, de 67 m átlagos repülési magasságból 0,6 cm terepi felbontás esetén a képvándorlás nagyjából 190 km/h-nál jelentkezik, ami arányaiban megfelel az 500 m, 1400 km/h értéknek, és a repülőgépes kísérlet igazolni látszik a számított értékeket (23. ábra).



23. ábra Az 1/8000, 1/4000, 1/2000 és 1/1250 sec záridőknél készített felvételekhez tartozó képvándorlás mentes repülési magasságok és repülési sebességek az IS 4 MS II esetében. A sárga diagramterület 20° napállásnál, a zöld diagramterület pedig a passzív optikai adatgyűjtés számára extrém alacsony megvilágításnál is megengedi a jó minőségű felvételezést.

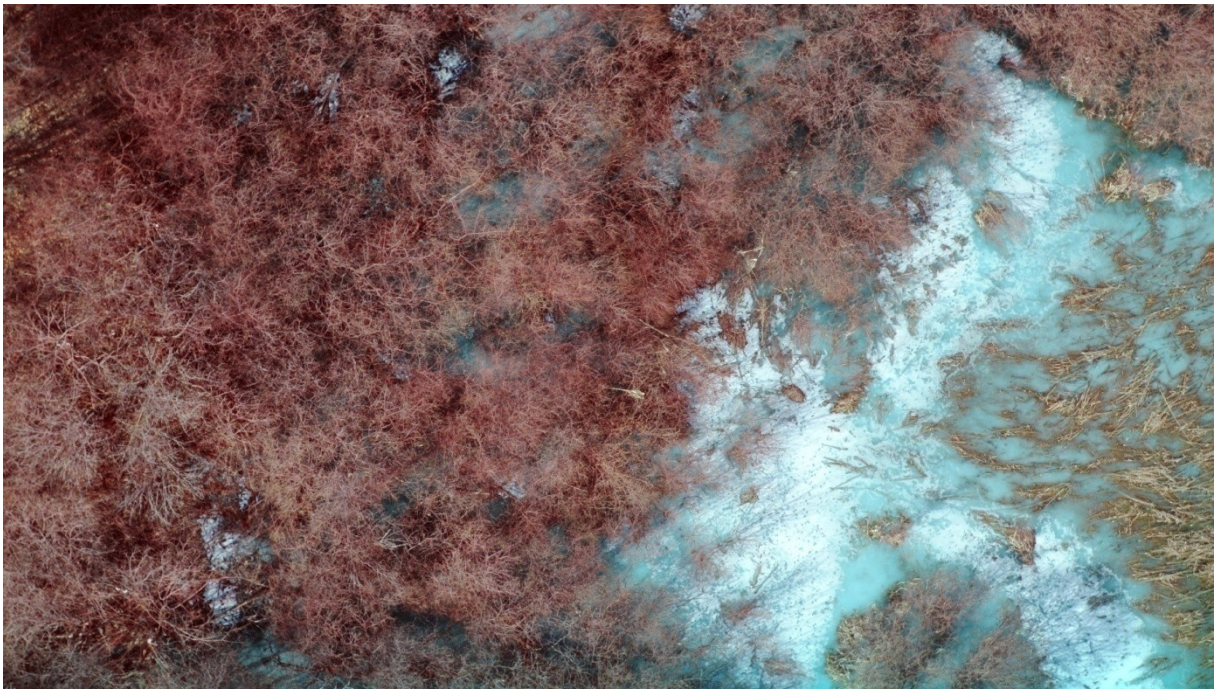
A hagyományos léptékű, 10 cm terepi felbontású felmérést az általam a gyakorlatban alkalmazott leghosszabb záridővel (1/1250 sec) is 440 km/h repülési sebességig gyorsíthatnánk, a képminőség romlása nélkül. A gyakorinak mondható 1/4000 sec záridővel 1409 km/h repülési sebességgel is elvégezhetnénk ezt a felvételezést képvándorlás nélkül, így belátható, hogy a modern, nagy érzékenységű mérőkamerák kisebb léptékben még nagyobb elméleti sebességet engednek meg. A polgári repülésben a gyakorlatban 800 km/h munkasebesség elérését biztosító platform igénybevétele még reális, tehát a hagyományos léptékű légi felmérések négyszer rövidebb idő alatt váltak elvégezhetővé.

4.3.5 Multispektrális csatornák geometriai összehangolása

Ahogyan az IS 4 SCMC esetében is látható, az összetett berendezések fejlesztése előtt már modellezhető a várható működésük. Vannak azonban olyan feltételezések, amelyek csak tesztsorozatok elvégzése és kritikai kiértékelése után válnak igazolhatóvá. Ilyen volt a multispektrális rendszerek (IS 3, IS 4) különböző spektrális csatornáinak illesztési kérdése. A csatornák pixel alatti pontosságú illesztése gyakorlattá vált, amikor a szakirodalom és kézi kamerákkal elvégzett kísérletek alapján azt az állítást fogalmaztam meg, hogy a párhuzamos

kameratengelyű, kalibrált, kis parallaxis távolságú, nagysebességű kamerafejek 0,2 milliszekundum pontossággal szimultán történő exponálása 150 m tárgytávolság (relatív repülési magasság) fölött a centrális vetítés ellenére pixel alatti pontosságú csatornailleszkedést eredményez.

A módszer beigazolódott (24. ábra), így a több fényutas multispektrális mérőkamerák készítése rutinná vált. A 10. melléklet egy könnyen elemezhető kompozit párt mutat be.



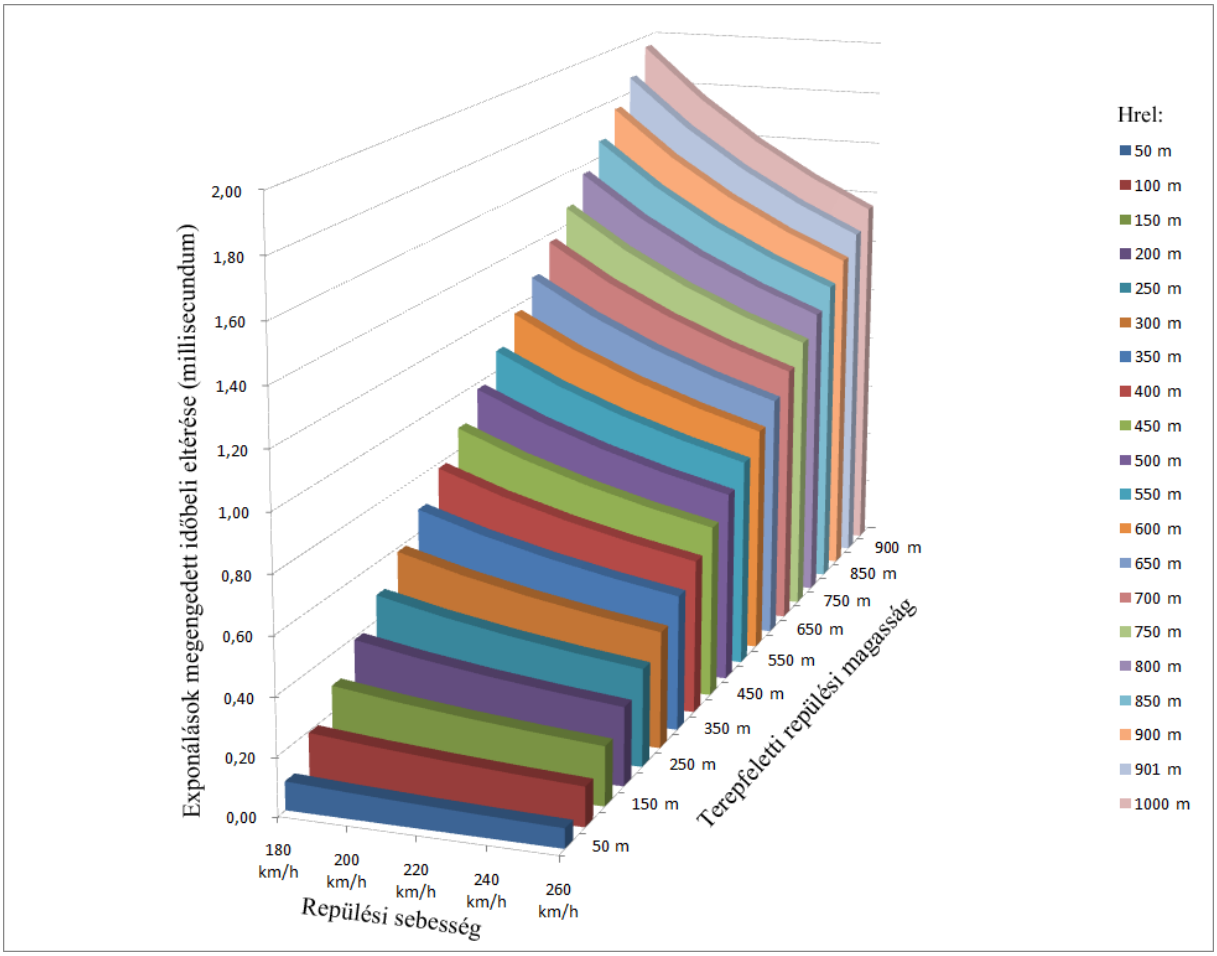
24. ábra Jeges vízzel borított ruderális terület 0,5 cm terepi felbontású multispektrális ortofotó-mozaik színes-infravörös kompozit részletén. A 190 m relatív repülési magasságból 180 km/h földfeletti repülési sebességel készült felvétel közeli infravörös és RGB csatornáit eltérő kamerafej készíti. A kompozit a 720 – 1100 nm (750 nm: 75%) közeli infravörös, 600 – 670 nm vörös és 500-570 nm zöld csatornákból épül fel.

Amennyiben a parallaxis távolságot minimalizáljuk, a multispektrális eljárás geometriai szétcsúszásának bekövetkezése számítható:

$$l = \frac{p \cdot 3{,}6 \cdot m}{v \cdot 1000} \tag{13}$$

ahol l a pixelelcsúszás mértékét meghaladó expozíciós idő különbség milliszekundumban kifejezve, p az elemi képpont repülésirányú szélessége µ-ben kifejezve, m a műszer méretarány, v a földhöz viszonyított repülési sebesség km/h-ban kifejezve.

A repülési sebesség, a tárgytávolság (relatív repülési magasság) és a több objektíves multispektrális képrögzítés korlátainak összefüggését a 25. ábra szemlélteti az IS 4 tulajdonságain keresztül.



25. ábra Az INTERSPECT IS 4 MS II mérőkamera csatornáinak pixelelcsúszás nélküli képrögzítése a felszínhez viszonyított repülési sebesség és a relatív repülési magasság függvényében, 41° repülésirányra merőleges, 27° repülésirányú látószög esetén. Az y tengely a kamerafejek egymáshoz viszonyított megengedett exponálási időeltérését fejezi ki milliszekundumban.

4.3.6 A fotogrammetriai labormunka automatizálhatósága

Bár a fotogrammetriai feldolgozás egyes elemeit nem tudjuk a számítógépre bízni, tapasztalataink szerint az átfedés növelése a geometria pontosságát, ezáltal a mozaikolási hibák csökkenését eredményezi. A 80% feletti soron belüli és 40% feletti sorok közötti átfedésű felvételek feldolgozása a számítógép munkafolyamatainak megnövekedését, ugyanakkor a manuális munkafolyamatok lecsökkenését eredményezi. Ezért a jelenlegi kihívást a 95% soron belüli átfedésű, pontosabb felületmodell generálást elősegítő eljárás kidolgozása jelenti. Ehhez elsősorban a kamerarendszer és a repüléstechnika fejlődése vezet el.

A központi kameravezérléshez és szenzorszinkronhoz tartozó fejlesztések a következő lépésekből állnak:

- Hardvertesztelés, folyamatos anyagbeszerzési útkeresés és a rendelkezésre álló részegységekkel kapcsolatos ismeretek aktualizálása
- Szoftverkészítés
- Kalibráció
  - Műszergeometriai és parallaxis jellegű kalibrációk
  - Optika-kameratest kalibrációk (belső adatok leírása)
  - Rendszer szintű műszeregység kalibrációk
- Tesztrepülések
- Időbélyeg kalibráció és hardvertesztelés
- Utófeldolgozó asztali szoftver készítése
- Navigációs eszközök kalibrálási protokolljának és automata kalibrációs megoldások, illetve finomhangolási protokollok beállítása
- Fotogrammetriai ellenőrzés (a direkt tájékozás és a terepi illesztőpontokkal végbemenő feldolgozásból adódó külső adatok összehasonlítása)
- Felmérési módszertan és alkalmazási limitációk leírása.

4.4 Egy komplex penta mérőkamera tervezése

Jelenleg a nagy terepi felbontású multispektrális eljárás kezdeteihez hasonló stádiumban van a légköri korrekció elvégzéséhez szükséges csatornák beiktatása: tudjuk, hogy más szenzorok esetében bizonyítottan működik, és az integrálás módszere is ki van dolgozva, de a módszert hasznosító, tesztelésre alkalmas berendezés finanszírozási okokból még nem épült meg.

A légköri korrekcióhoz történő szenzoron belüli adatgyűjtéshez a MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer) szenzor csatornáit vehetjük alapul, mint kipróbált adatforrást. A Terra és Aqua műholdak fedélzetén üzemelő 36 spektrális csatornát rögzítő szenzorok együttesen 1 – 2 naponta befényképezik a teljes Földet.

A felhők automatizált leválogatásához egy 0,620 – 0,670 μm tartományú csatorna szükséges és tulajdonságaik a 8,400 – 8,700 μm csatorna bevonásával árnyalhatók. A légköri aeroszolok meghatározásához a 0,841 – 0,876 μm tartomány nyújt segítséget, míg a légköri vízgőz a 0,890 – 0,920 μm, 0,931 – 0,941 μm, 0,915 – 0,965 μm, 1,360 – 1,390 μm, 6,535 – 6,895 μm és a 7,175 – 7,475 μm csatornák indexeiből számítható. A felszíni hőmérséklet a 3,660 – 3,840 μm 3,929 – 3,989 μm 3,929 – 3,989 μm, 4,020 – 4,080 μm, 10,780 – 11,280 μm és a 11,770 – 12,270 csatornák indexeiből közelíthető, míg a légköri hőmérséklet a 4,433 – 4,498 és 4,482 – 4,549 μm csatornákéból. A légkör ózontartalmáról a 9,580 – 9,880 μm csatorna szolgáltat információt, ám ez kis magasságon elhanyagolható. A hőmérsékleti profilok számítása a 13,185 – 13,485 μm, 13,485 – 13,785 μm, 13,785 – 14,085 μm, 14,085 –14,385 μm csatornákat veszi igénybe. Egydiódás vagy kisfelbontású szenzor esetén ezek az adatok valós időben hozzákapcsolhatók a mérőkamera nagyfelbontású csatornáiból kiolvasott képfájlokhoz.

A kombinált mérőberendezések alkalmazására számos példát látunk (Kemper és Vasel 2016). Két, három fajta távérzékelési eszköz szimultán (egy platformról és egy időben történő) alkalmazására is sor kerülhet, de a gyakorlatban az ilyen kombinált munkavégzés még kevéssé terjedt el, aminek okai a nagy adatmennyiségben, valamint a platformok korlátozott befogadóképességében és a berendezések méreteiben és egymástól független tervezésében keresendők. Ezért fejlesztést kezdeményeztem a minél kisebb tárterületet foglaló, minél hasznosabb adatokat egy komplex berendezéssel beszerző metódusok irányában.

Sikerült olyan kamerarendszert létrehozni, amellyel rezgés és elmozdulás kompenzáció nélkül subpixeles terepi felbontás érhető el akár 200 km/h repülési sebesség mellett is, és ez a részletesség multispektrális üzemmódban is megvalósítható. Mindezt a kísérleteim is igazolják a

356 - 1100 nm tartományra vonatkozóan. A kidolgozott berendezéseknek köszönhetően képesek vagyunk merevszárnyú repülőgép fedélzetéről vagy szárnya alól, nagy magasságból fotogrammetriai módszerekkel feldolgozható extrém nagy terepi felbontású felvételeket készíteni. Ez a technológia lehetővé teszi a madártelepek, a gyepek és egyéb nagy léptékben nehezen, és csak lassú terepi felméréssel feltérképezhető egységek gyorstérképészeti felmérését.

Ugyanezek a mérőkamera rendszerek más felhasználásban, klasszikus léptékű térképezés esetén nagy kiterjedésű munkaterületek gyorsfelmérését teszik lehetővé, ami kedvező a céltérkép minősége, a repülés végrehajtás költségeinek csökkentése és a feldolgozás, illetve a kiértékelő munka idejének csökkentése tekintetében is. A kamerarendszer a légi felméréseknél hagyományosnak tekinthető 5 – 30 cm terepi felbontás esetén nagysebességű repülőgépből is éles és részletgazdag felvételeket készít. Sajnos 370 km/h terephez viszonyított repülési sebességet meghaladó kísérleteket nem tudtunk elvégezni, de számításaink szerint 500 m terep feletti repülési magasságból akár 1400 km/h repülési sebesség esetén is éles felvételek készíthetők, így a felvevő berendezés szempontjából biztosíthatónak látjuk a 1000 – 10 000 m relatív repülési magasságból történő felmérések 800 km/h repülési sebességgel történő megvalósítását a gyakorlatban. Ráadásul a jó minőségű felvételek akár borult időben is elkészíthetők ennél a sebességnél is, amennyiben a felhőalap magassága ezt lehetővé teszi.

Az elkészült mérőberendezéseken túl lehetővé vált olyan összetett berendezések tervezése, amelyek nagyságrendekkel gazdaságosabbá és részletesebbé teszik a felméréseket. Különböző típusú adatgyűjtési módokból összetett légi távérzékelési eljárást dolgoztam ki, amelynek műszaki megvalósítása, fejlesztése jelenleg is folyamatban van. A módszer térképészeti pontosságát, valamint a vegetációs és egyéb, UV, R, G, B, NIR csatornákkal operáló indexek kiszámítását a nagyfelbontású (50 MP) multispektrális csatornák biztosítják, míg a spektroszkópia a felvételek közepén a felszínről visszaverődő sugárzás spektrális összetételének vizsgálatára ad lehetőséget.

Ezáltal a teljes munkaterületre vonatkozóan transzszektek jönnek létre, amelyek vektorgrafikus adatot képeznek le, metaadatként tárolva az adott felszínrészlet spektrális reflektancia görbéjét (11. melléklet). Így a végfelhasználó bármely térinformatikai alkalmazásban könnyen megnyitható és egyértelműen értelmezhető, minimális hardverigényű anyagot kap, amelynek térbeli pontossága jóval felülmúlja a klasszikus hiperspektrális szenzorok adatainak térképi pontosságát, ugyanakkor spektrálisan értelmezhetővé teszi a felszínelemeket. Az így előállított mérőkamera-rendszerrel 1 – 25 cm terepi felbontásban, nagyjából a terepi felbontás 1,5-szörösének megfelelő átlagos geometriai pontossággal (a módszertan betartása

mellett a legrosszabb esetben a terepi felbontás 1,7-szeres átlagos geometriai pontossággal), a repülési sortávolságnak megfelelő repülésirányra merőleges távolságonként, és 50 m repülésirányú távolságonként, 1 fokos látószögben 190 nm – 2500 nm spektrális átfogással, 1 nm lépésközzel tudunk adatokat rögzíteni. A 200 km/h földfelszínhez viszonyított repülési sebességnél 90% fölötti soron belüli képalkotási átfedést lehetővé tevő nagy érzékenységű és gyors kiolvasású, nagyfelbontású (50 MP) kamerafejek penta elrendezése (lefelé és négy irányban oldalra lefelé tekintő) a nagyfelbontású penta térkamerák térvisszaadási lehetőségével és a korábbi kísérleti digitális mérőkameráinkra jellemző gyenge megvilágítási viszonyok között is minőségi képrögzítés lehetőségével egészítik ki a rendszert. Ezáltal szimultán beszerezhető a légi LiDAR berendezések által csak több repülési sorral (kis pászta szélesség) és kisebb relatív repülési magasságon elkészíthető felületmodell (összemérhető pontossággal és részletességgel), a hiperspektrális eszközök által biztosított spektrális reflektancia adatsor egy kezelhető változata és a nagy részletességű felszínborítás adatbázis előállítását megalapozó ortofotó. A függőleges kameratengelyű felvételek nagy átfedéséből következik, hogy az ortofotó-mozaik ortogonalitása (felső nézőpontja) javul a térrészek nadír közeli ábrázolása miatt, tehát a magas objektumok perspektív torzulása eliminálódik, miközben azok oldalról-felülről is megtekinthetők a ferde tengelyű mozaikokon.

Mivel a többféle adatgyűjtés egyetlen repüléssel megvalósítható, a projektek költséghatékonyan végezhetők a hagyományos komplex eljárásokhoz képest. Annak, hogy egy időpontban kerülnek rögzítésre a különböző adatok a gyors kiértékelés szempontjából szintén nagy jelentősége van. Amennyiben ugyanis a napállás folyamatos változásától befolyásolt árnyékok, a légszennyezettség és páratartalom területi eloszlása és egyéb, a felvételezés kimenetét befolyásoló paraméterek megváltoznak a különböző, ám egymásra épülő, azonos területre beszerzett adattípusok elkészítése között, károsan befolyásolja a kiértékelést. Ez a tematikus térképezési végtermék minőségének rovására megy, valamint nagyságrendekkel meghosszabbítja a kiértékelés idejét. Az új berendezés javítja a magas szintű automatizált adatlevezetés lehetőségét. Tapasztalataink szerint egy ilyen komplex adatforrás a klasszikus mérőkamerás felméréshez képest legalább 50% kiértékelési időráfordítás csökkenést eredményez, miközben a magas költségű klasszikus hiperspektrális légi távérzékelés, a légi LiDAR felmérés és a nagyléptékű fotogrammetriai felmérés költségeit redukálja le egy egyszeri, repülőgépes fotogrammetriai felmérés költségére.

A spektrometria olyan további előnyével is számolni lehet, amely szintén nagyságrendekkel gyorsabbá és pontosabbá teszi a feldolgozást, mivel az adott nagyfelbontású raszteres formájú felvételekhez tartozó vektorgrafikus formában eltárolt spektrális adat

kiegészítés a légköri korrekció automatikus számítási mechanizmusát teszi lehetővé. Így a légkör hatásai által időnként erősen befolyásolt felvételek helyett korrigált intenzitásértékű ortofotókból állhat össze a kiértékelés alapanyagául szolgáló ortofotó-mozaik.

Az oldalra lefelé tekintő felvételekből (szintén tér fotogrammetriai ortorektifikációs eljárással) előálló madártávlati ortofotók (pl. 11. melléklet) segítségével a felszíni objektumok nem csak felülről, de oldalról felülről is szemlélhetővé válnak, ezzel is segítve az elemzőket a bizonytalan szituációkban, különösen azokban az esetekben, amikor az automatikus számítógépes elemzés eredményét ellenőrzik. Ez a terepre való utólagos kiszállások számát is csökkentheti.

A felmérés pontosságát és a fotogrammetriai feldolgozás idejét csökkenti a direkt tájékozás. Mivel a kamera belső navigációs és tájolási rendszere minden egyes kép optikai centrumának adatait rögzíti (koordinátapár, magasság, három elfordulási szög, északkal bezárt irányszög, gyorsulás), az ortofotó terepi jelenlét nélkül is elkészíthető. Az ilyen külső adatok alapján, általában automatikusan előállított, előzetes állomány pontossága korlátozott, de a direkt tájékozási adatok egyrészt kiküszöbölik a relatív tájékozás egy nagyon időigényes folyamatát (ezzel napokat, ezres nagyságrendű képszám esetén egy-két hetet spórolhatunk a feldolgozásnál), másrészt pontosabb iterációt tesznek lehetővé, tehát kihatással vannak a végtermék geometriai pontosságára is. Ezen kívül az ilyen előzetesen kiexportált ortofotó-mozaik gyorsítja a terepi illesztőpont gyűjtést azáltal, hogy tervezhetővé teszi a felvételen látható illesztésre alkalmas helyek felkeresését, és terepi eszközre feltöltve gyors tájékozódást, megközelítés tervezést tesz lehetővé, nem beszélve arról, hogy kiküszöböli a tévesen felmért, a felvételeken valójában kitakarás vagy egyéb hatás miatt nem látható pontok bemérését (Bakó et al. 2014).

A háromdimenziós térmodell elsősorban az automatikus céltérképészeti elemzést hivatott segíteni. A felületmodell és a kétdimenziós fotogrammetriai termékek közös számítógépes elemzése lehetővé teszi az automatikus döntéshozást olyan esetekben, amikor a kétdimenziós ortofotó-mozaik spektrális, textúrabeli és egyéb információi ehhez önmagukban nem elégségesek. Például egy hasonló vizuális, spektrális és textúrabeli tulajdonságokkal rendelkező épülettető és térburkolat különválasztásában a felületmodell szerepe megkérdőjelezhetetlen. Ez fordítva is igaz, mert számos alakzat beazonosítása nem lehetséges csupán a térmodell használatával, így a képi információk és a spektrális adatok is nélkülözhetetlenek. A rendszer felvételeit a 11. melléklet szemlélteti a Háros-félsziget légi felmérésén keresztül. Az általunk korábban létrehozott repülőgép fedélzeti mérőberendezések operatív felhasználásnak eredményei és a szolgáltatásaink tapasztalatai alapján megtervezett új berendezés terveink szerint alkalmas lesz a Magyarországon jelentkező légi felmérési feladattípusok jelentős részének ellátására,

kielégíti az elmúlt hét évben tapasztalt megrendelői igények nagy részét. Az eszköz a kifejlesztésével együtt negyed annyiba kerül, mint a legolcsóbb digitális mérőkamera, és nagyjából hatod annyiba, mint a legolcsóbb repülőgép fedélzeti LiDAR berendezés vagy repülőgép fedélzeti hiperspektrális képalkotó szenzor.

A technológia gazdaságosan elvégezhető rutinná fejleszthet számos olyan speciális, már bizonyított jelentőségű térképezési eljárást, amit korábban a magas költségek miatt csak kutatási projektek fedezetével, vizsgálati körülmények között lehetett elvégezni. Így a madárpopulációk monitoringjára kidolgozott módszer (Bakó et al. 2014) is több alkalommal elvégezhető gazdaságosan, ezért pontosabb képet kaphatunk a kolóniák állapotáról.

A berendezés automatikusan befényképezi a munkaterületet, amennyiben a platform (például merevszárnyú repülőgép, 12-14. melléklet) keresztülrepül a tervezett fényképezési helyeken egy adott síkrajzi és magassági pontosságon belül. Az adott koordináták közelében készülő felvételek azonos rekeszértékkel készülnek, a záridő a repülési sebesség függvényében a fénymérésen alapul, de sohasem éri el a képvándorlást megengedő értéket. TDI vagy FMC használata nem indokolt. A rekeszérték állandósága fotogrammetriai feldolgozás szempontjából előnyös egy blokkon belül, mert a blendeméret változása befolyással van a belső tájékozási adatokra. Így a felvételezési folyamat elvben a műszerfalon elhelyezett vezérlőpanelről is elindítható. Rendszerindítás után a berendezés várja az első adatrögzítési lokációt, majd a következőt, egészen a leállításáig, ami szintén történhet a légijármű műszerfaláról. Így a felmérés már nem feltétlenül igényel légifényképészt (kamera operátort), és a vezérlési megoldás később akár pilóta nélküli (UAV) távérzékelésnél is alkalmazható. Az összes felvétel elkészültekor nem törvényszerű a rendszer automatikus leállása, mert a szoftver a felmérést áttekintve pótlási és ellenőrzési lehetőségeket kínál. Amennyiben a repülőgép az adott koordinátapár és/vagy a magasságértékhez képest az előre megadott határértéknél nagyobb távolságban haladt el, úgy a vezérlőrendszer jelzi a hibát a pilóta számára, és mutatja a kihagyott képkészítési helyet a kijelzőn, egyszerűsített térképháttérrel. A kijelző nem csupán a lefényképezett és a lefényképezésre váró pontok térképi indikátora. A kamerarendszert kiegészítő élőkép (a pilóta számára kisméretű monitoron megjelenítve) lehetővé teszi a repülőgép elé- és alátekintést, így a pilóta vagy segítője idejében észlelni tudja a kamera alá érkező felhőt, felhőfoszlányokat, és a kameravezérlő szoftverben azonnal jelölni tudja térképen egy markerrel azokat a képkészítési helyeket, amelyeknek későbbi megismétlése ajánlott. Ide a teljes területfedéses felvételezés végén visszatérhet, és a pótló felvételt/felvételeket leszállás nélkül elkészítheti, amennyiben a felhőzet elvándorolt. Ezzel szintén költségmegtakarítást jelent.

4.5 Megoldás a légi távérzékeléssel készített anyagokkal szemben támasztott új követelményekre

Az Interspect Kft. feladatai és az ajánlatkérésekből tapasztalt, a hagyományos eljárásokon túlmutató igények többek között:

1. az objektumok talppontjainak jobb detektálására; 2. az ereszekhez hasonló terep feletti objektumok egzakt módon történő térképezésére; 3. a közlekedési táblák, közvagyon elemek és tűzcsapok jobb felismerhetőségére; 4. a vegetáció pontosabb szerkezeti elemzésére és 5. a felszínborítás pontosabb geometriai meghatározására, valamint 6. a spektrális adatok értelmezhető és könnyen megnyitható tárolására vonatkoztak. A 2009-ben elkezdett mérőkamera fejlesztést az ezekre a kérésekre adott gyakorlati válaszok és nem utolsó sorban a természetvédelmi adatgyűjtés speciális igényei indukálták. Ezekre a kiemelt példákra a következő megoldásokat találtam:

1. problémakörre adott válaszok - A madártávlati (ferde kameratengelyű) ortofotó mozaik bevezetése perspektíva torzítás mentes megoldást jelentett a problémára. Korábban volt rá példa, hogy egyes kiértékelők a mozaikolatlan ortofotók periférikus területein keresték ki a fák és az épületek oldalsó-felülső nézeteit, ez azonban a felvételek nagy számából és ilyen módon nehéz térinformatikai kezelhetőségéből adódón nem bizonyult követhető gyakorlatnak. Amennyiben ferde tengelyű mozaikon biztosítjuk ezt a betekintést, a nagy képszám már nem jelent problémát, és mivel a mozaik a felvételek középső területeiből áll össze, a képszéli torzítások nem nehezítik a kiértékelést.

2. problémakörre adott válaszok - A nagy átfedés által nyújtott ortogonális nézőpont biztosítja az ereszek és lombkoronák felülnézeti mérethelyes ábrázolását és pontos térbeli vetítését. Ilyen módon a terepből kimagasló objektumok tetejének a kis átfedésű (50 - 70% soron belüli átfedés és <25% sorok közötti átfedés) ortofotókból készült mozaikokon tapasztalható „csúszkálása” is megszűnt.

3. problémakörre adott válaszok - A felülről-oldalról megvalósítható betekintés lehetősége, illetve a nagy terepi felbontás lehetővé teszi a kisméretű, ugyanakkor magassági kiterjedésében jelentős objektumok azonosítását és lokalizálását. Természetesen a felmérési időszak optimális megválasztása továbbra is lényeges eleme a sikeres felmérésnek.

4. problémakörre adott válaszok - A felső lombkorona méretének és szerkezetének elemzését a négy irányba tekintő és a függőleges kameratengelyű szimultán képkészítés részletesebbé és pontosabbá teszi. Az adott pontot leképző átfedő felvételek és a pontot leíró

háromszögelések száma megnövekszik, a kitakarás mértéke jelentősen csökken. A nagy távolságból perspektivikusan betekintő képalkotók olyan helyekről is képesek információt gyűjteni, ami a kizárólag függőleges kameratengelyű módszerrel nem kivitelezhető. Az elemzés elősegítése érdekében bővítettem a határozást segítő képgyűjteményt (példák: 15. melléklet).

4. és az 5. problémakörre adott válaszok - A nagy spektrális, terepi és radiometriai felbontás eredményeként sokkal pontosabb és részletesebb vegetáció térképek állíthatók elő, mint az egyes klasszikus távérzékelési eljárásokból származó termékek esetében. Az eljárás a pontszerű terepi cönológiai vizsgálatokkal készíthető elő, azonban olyan térbeli pontosságot biztosít, amit a kizárólag terepi és kis részletességű távérzékelési eljárások alkalmazása nem tesz lehetővé. A felmérés pontossága szintén a klasszikus cönológia módszerével ellenőrizhető.

6. problémakörre adott válaszok - A részletes rácshálón elhelyezkedő (koordinátapárra exponált), az elektromágneses spektrum tág tartományát folyamatos színképpel, részletes spektrális frekvenciával leíró egy képpontos mintavételezési egységek bárki számára elérhető elemzést tesznek lehetővé. A színképhez kapcsolt intenzitásértékeket tartalmazó Shape formátumú termék bármilyen opensource vagy üzleti térinformatikai szoftverrel használható.

4.6 A terepi felbontás hatása a kiértékelési torzításra

A berendezések rendelkezésre állása önmagában még nem biztosíték a céltérképek pontosságára vonatkozóan. A módszertani útmutatóknak tartalmazniuk kell a megfelelő felmérési paraméterek megválasztásához szükséges alapokat, amelyeket a vizsgálatok feltártak.

A vizsgálatok érdekes torzítási és hibalehetőségekre hívták fel a figyelmet. Az 50 cm terepi felbontású ortofotó-térképek kiválóan alkalmazhatók topográfiai térképezésre és a lakott területek nagyobb épületeinek lehatárolására. Amikor viszont nagy részletességű, összetett ökológiai modellekhez szeretnénk pontos adatokat szolgáltatni, a 40 cm, vagy annál kisebb terepi felbontású felvételekből nyerhető térbeli adatbázisok nem szolgáltatnak kellő mennyiségű információt. Az épületek és mesterséges objektumok által lefedett felületek összegének tekintetében megállapítható, hogy félrevezető eredményt nyújthatnak a 10-30 cm terepi felbontásnál kisebb részletességű távérzékelt állományokból nyert adatok. A diszkrét terepi felbontási értékek esetén végzett vizsgálat alapján is jól megfigyelhető, hogy minél nagyobb földfelszíni terület képződik le egy pixelen, az ember alkotta objektumok (épületek, vízügyi műtárgyak és egyéb építmények) annál jobban belemosódnak a környezetükbe. A vizsgált kategóriák esetében mintaterülettől függetlenül hasonló eredményre jutottam. Az eredmények hasonlóan alakultak analóg és digitális légi fényképek esetében is.

4.6.1 A szubjektív hatás értékelése

A vizsgálat elvégzését követően ugyancsak a halásztelki vízbázison található mintaterületnek egy részterületére egy többszereplős adatsort is elkészítettünk. Miután a kiértékelést befejeztem, a terepi ellenőrzést követően az ELTE végzős geográfus Msc hallgatóinak is átadtam elemzése a felvételeket. Velük 10 m, 2 m, 1 m, 50 cm, 20 cm, 10 cm felbontású változatokat értékeltettem ki a megadott sorrendben, ellenőrzött körülmények között (26. ábra). Az elemzés paramétereit a módszertani fejezet írja le részletesen.

26. ábra A különböző felbontás-redukción átesett állományok igazolják, hogy a terepi felbontás alapvetően meghatározza az azonosítás pontosságát és az elemzés statisztikai adatait, geometriáját. A 10,2,1 m és 50, 20, 10 cm terepi felbontású ortofotó változatokon elkészített vektorgrafikus térképek láthatóak a 10 cm terepi felbontású ortofotó-mozaik részletére vetítve.

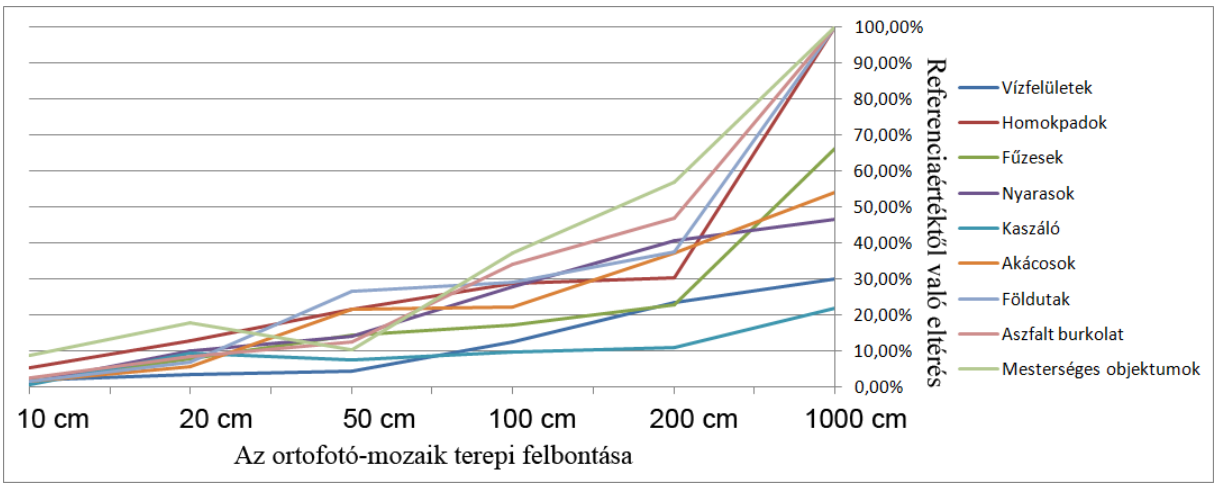
A vizsgálat általános tanulsága, hogy a felszínt borító objektumok térképezése során az egyes felszínborítási kategóriákra vonatkozóan meg kell határozni a készítendő légifelvétel-térkép alapképeinek az elemzés pontos elvégzése szempontjából kívánt terepi felbontását és egyéb minőségi paramétereit. Ennek érdekében segédletet hoztam létre (16. melléklet). Az elemezni kívánt jelenség, objektum, élőhely szerint kell megválasztani a felvételezés felbontását, amennyiben ez lehetséges, azaz a gazdasági szempontok is megengedik. Egy-egy felszínborítási kategória esetében létezik karakterisztikus méret (terület vagy szélesség), amit figyelembe kell venni elemezhetőség szempontjából. A kérdés tehát az, hogy mely objektumot, jelenséget, vagy élőlény csoportot szeretnénk térben vizsgálni, és ehhez kell megválasztani a megfelelő távérzékelési eljárást és megtervezni annak paramétereit.

A 5. táblázat tartalmazza a felszínborítási kategóriák által megkívánt ajánlott minimális terepi felbontás értékeket valósszínes és közeli infravörös csatornával kiegészített valósszínes állományok esetében.

5. táblázat Különböző szakterületek számára lényeges felszínborítás térképek elkészítéséhez szükséges felvételek minimális terepi felbontása

Felszínborítási kategória	**A feladatra megfelelő legkisebb terepi felbontású légifelvétel-térkép**
Lakott belterületek nagypontosságú lehatárolása	1 m
Épülettömbök, közepes méretű lakóházak pontos meghatározása	0,5 m
Kis méretű (1-3 m átmérő) épített objektumok észlelése és lokalizálása	5-10 cm
Épületek közötti zöldfelületek, árokpartok, mezőgazdasági táblák közötti mezsgyék, gyomos sávok lokalizálása	20 cm
Épületek közötti zöldfelületek, árokpartok, mezőgazdasági táblák közötti mezsgyék, gyomos sávok feltérképezése	15 cm
Közutak, vasút és egyéb vonalas létesítmények felmérése	20 cm
Környezetvédelmi szempontú kisléptékű ökológiai vizsgálatok és élőhely felmérések	0,5 – 20 cm
Illegális hulladék elhelyezés mértékének meghatározására és térbeli jellemzése	10 cm
Tájsebek, földes kopárok feltérképezése	20 cm
Markánsabb földutak feltérképezése	20 cm
Földutak, tömörödött talajszerkezetű kopár felszínek feltérképezése	10 cm
Mikroklíma modellekhez készülő tematikus térképek	10 cm
Tematikus élőhely-térképezés a vadgazdálkodás részére	5-10 cm
Fafajok elterjedésének térképezése (élőhely térképezéssel)	5-10 cm
Füves élőhelyek felmérése	3 - 7 cm
Mezőgazdasági feladatokhoz, precíziós mezőgazdasági műveletek megtervezéséhez készülő felmérés	20 cm
Erdőgazdaságok számára	5-10 cm

A többszereplős adatsorban elvégzett elemzés eredményei megerősítették a korábbi tapasztalataimat (27. ábra). A vizsgálat részletes eredményeit a 16. melléklet tartalmazza.



27. ábra A diagram a különböző felszínborítási kategóriák kiértékelési torzításának növekedését szemlélteti a terepi felbontás csökkenésének függvényében.

Például a nyílt vízfelületek interpretációja során folyamparti környezetben (Halásztelki vízbázis mintaterület, ahol árnyékot vető galériaerdő, bokorfűzes, homokpadok és kopárok váltakoznak a vízparton) a hét térképész - geográfus kiértékelő által interpretált valósszínes ortofotó-térképek elemzésében 10 m terepi felbontásnál átlagosan 43% hiba adódott a felületek besorolásában, míg 2 m terepi felbontásnál 30% és 10 cm terepi felbontásnál csak 6 %. A gyakorlott interpretátorok 1-3% felületi hiba között dolgoztak 10 cm terepi felbontásnál.

A több elemző bevonásával elvégzett vizsgálat is megerősítette, hogy az árnyékok okozta folthatár eltolódás az erdőszegélyeken a gyakorlott kiértékelők esetében már 20 cm terepi felbontásnál lecsökken, vagy megszűnik, de 10 cm terepi felbontásnál biztonsággal, jól kezelhető. 50 cm terepi felbontásnál kisebb részletesség esetén a gyakorlott interpretátor sem tudja minden esetben elkerülni az árnyékok megtévesztő hatásából fakadó folthatár tévesztést a kiemelkedő objektumok szélén. Az eredmények igazolták a korábbi vizsgálataimat.

4.6.2 A vizuális interpretáció és a félautomatikus számítógépes kiértékelés összehasonlításának eredményei

A vörösiszap-elöntés hatásterületének vizsgálatakor a 20 cm terepi felbontású RGB ortofotó-mozaik vizuális interpretációja 5 944 262 m^2 elöntött területet mutatott ki. Ehhez képest a számítógépes osztályozás 158 469 m^2 eltérést mutatott, ami 2,67% az elöntött területekre vonatkozóan. Ez a különbség elsősorban a fák lombkoronájának kitakaró hatásából adódik, amit az osztályozási folyamat nem orvosolt, míg a vizuális interpretáció figyelembe vette a fák és árnyékok alatti elöntési állapotokat is. A részben automatizálható osztályozás - bár csökkenti az elemzést terhelő szubjektív hatásokat – kivonja az elöntött területből a fás szárú növények lombkoronája vagy árnyéka által kitakart területeket. Ugyanezt a jelenséget tapasztaltam azokon a területeken, ahol a lúgos iszap semlegesítésére használt gipsz az iszapba mosódott. Ezért az elöntött területen az elöntést letakaró fákat, árnyékokat és egyéb tévesen besorolt foltokat (pl. az iszap árnyalatához hasonló háztetők) ellenőrzéskor hozzá kellett rendelnem a területhez, vagy kivonni az elöntési területet reprezentáló poligonból. Olyan lankás területek is vannak, amelyeknél a vizuális interpretáció során nem vettük figyelembe az iszapra utaló nyomokat, az elöntés okozta levonulás során „megfestett” növényzetet. Ez az elemző szubjektivitásának tudható be. (A vizuális interpretációt egymástól függetlenül ketten is elvégeztük.) Az algoritmus azonban ezeket a külső területeket is „észlelte”, így az elemző által figyelmen kívül hagyott elöntési területek is lehatárolásra kerültek. Amennyiben az összes elöntött terület (legnagyobb elöntéshatár) detektálása a cél, kijelenthető, hogy ebben az esetben az osztályozás pontosabb eredményt adott. Az osztályozás kevésbé szubjektív, pontossága a teljes nyílt munkaterületen egységes, amennyiben a fényképezés közben a megvilágítás nem változott és a felvétel mentes a felhőárnyékoktól. A vizuális interpretáció során nem tudjuk olyan pontosan megkülönböztetni a színárnyalatokat, ezért a pontosság területenként változó.

Az osztályozás és a vizuális interpretáció közötti különbségeket pontosabban ellenőrizni tudtuk azoknak a térszíneknek az esetében, amelyeknél az iszapár levonulása óta nem változott meg az elöntés kiterjedése a felvételkészítésig. Ezek a területek általában meredekebb letörésekkel, a domborzattal hozhatóak összefüggésbe, és jól érzékeltetik a két módszer közötti különbségeket. Egy ilyen 66 345 m^2-es mintaterületen a vizuális interpretáció 32 630 m^2-nyi elöntött területet határolt le, míg a képszegmentálás 32 647 m^2-t, ahol a 17 m^2-nyi különbség 0,05 %-ot jelent (Bakó et al. 2015).

4.7 Állati populációk és a vegetáció felmérése, mint környezeti indikátorok

A fontos fészkelő és táplálkozó helyekről készített nagyfelbontású (0,5-3 cm terepi felbontás) ortofotó-térképeket nem csak állományfelmérésre tudjuk használni. Az állatok megjelenése vagy eltűnése egy adott területről semmiképpen sem a véletlen műve. Egyes fajok érzékenyek, mások jól alkalmazkodnak a külső hatásokhoz. Gondot jelent, hogy sok esetben csak évek múltán érezhető a hatása egy-egy emberi tevékenységnek, így nem lehetséges a tervezési fázisban értékelni a károkozás mértékét. A madarak egy ideig el tudják viselni az antropogén hatást, vagy annyira ragaszkodnak a költőterülethez, hogy annak drasztikus megváltozása esetén is megpróbálnak az előző évi területen fészkelni akkor, ha egyáltalán nincs a közvetlen közelben másik megfelelő terület. Viszont az élőhely megváltozása miatt előfordulhat, hogy nem képesek olyan számban fiókákat nevelni, hogy az a természetes elhullást tartósan pótolni tudja, ezért ha lassú ütemben is, de idővel az adott faj nagy valószínűséggel el fog tűnni a területről. Ilyen esetekben létfontosságú lehet az adott területen a pontos állománynagyság évről-évre történő összehasonlítása. A felmérés lehetőséget kínál az élőhely és az egyedszám monitoringjára is. Amennyiben az adott időszakot reprezentáló, több időpontban ismételt felvételeken tapasztalható egyedszám átlaga érzékelhető eltérést mutat az előző év/évek hasonló módon vizsgált kolónianagyságához képest, akkor érdemes ellenőrizni, hogy mi a változás oka. Meg kell vizsgálni az elmúlt évek beavatkozásait, a felszínborítás változását, a környező potenciális szennyező forrásokban bekövetkezett változást és más fajok viselkedésében beállt változásokat is. A változás sokszor nem értelmezhető terepi szemrevételezéssel, így a légifelvétel-térkép ennek kimutatását és értékelését is elősegítheti. Ilyen felmérés esetén esélyünk van arra, hogy sokkal jobban megismerjük egyes fajok élőhely igényét, és jobb természetvédelmi terveket tudjunk készíteni, nagyobb súlyú indoklással alátámasztva azt a döntéshozók számára.

Egy másik lehetséges felhasználási területe az ilyen fajta passzív távérzékelésnek a madarak megjelenéséből vagy eltűnéséből adódó indikátor szerep. Egy-egy madárcsoportnak vagy madárfajnak speciális táplálkozási igénye van. Sok esetben a táplálékkínálatot az adott terület vízminősége és szennyezettsége befolyásolja. Ezért a táplálékspecialisták jelenlétéből vagy megfogyatkozásából akár egy esetleges szennyezés is észlelhető, hasonlóan a vegetáció és a talajjelek nyújtotta szennyezés térképezési lehetőségre. Az állatfajok jelenlétét, mint jelző módszert használó elemzés természetesen csak a nagy (0,5 - 3 cm) terepi felbontású ortofotó-térképek esetében alkalmazható. A növényzet változását könnyebben nyomon követhetjük, mert kisebb terepi felbontás mellett is elemezhető, másrészt az egyedek nem helyváltoztatók. Amíg 20 cm terepi felbontásnál még túlnyomórészt társulások vizsgálhatók, az 1 - 15 cm terepi felbontás

tartományban már a fás szárú egyedek is térképezhetők és a lágyszárúak foltelrendeződését is aprólékosan elemezhetjük.

Bizonyos esetekben állatfajok előfordulását is valószínűsíthetjük, például a fülemülesitke (*Acrocephalus melanopogon*) kifejezetten kedveli az öreg nádasokat. Nagy kiterjedésű nádasoknál a földfelszínről nem lehet megmondani, hogy hol találhatók a faj számára optimális öreg nádfoltok. Ezért nem is becsülhető, hogy hány pár költhet a területen. Amennyiben tudjuk, hogy mi a kapcsolat adott állatfaj megjelenése vagy eltűnése és az élőhely minősége és változása között akkor már az amatőr ornitológusok által gyűjtött adatok is felhasználhatók az élőhely-térképezésben. Így sokkal nagyobb terület fedhető le, mintha kizárólag a hivatásos természetvédelmi szakemberek adatait fogadnánk el. Persze ahhoz, hogy ezeket a kapcsolatokat felfedezzük, sok terepen eltöltött idő és légifelvétel elemzés szükséges. Végeredményként azonban gyorsabban felfedezhetjük és megszüntethetjük az esetleges veszélyeztető tényezőket.

4.7.1 Vegetáció felmérés

A modern vegetációtérképezés egyik alapeszköze a légi felvételezéssel (valamilyen légi távérzékelési módszerrel) készülő digitális térképállomány. Ennek terepi felmérésekkel együttesen történő kiértékelésével létrehozható a geometriailag és a foltazonosítás szempontjából is pontos tematikus növényállomány-térkép. Egyszerre térkép és adatbázis, ahol a növényállomány-foltokhoz minőségi és mennyiségi információkat rendelünk. A távérzékeléssel felvételezett, fotogrammetriai módszerekkel georeferált képanyagon a munkaterületet a növényállomány-foltoknak megfelelő geometriájú poligonokra bontjuk, és az egyes poligonokat a területre jellemző vegetációtípusokba soroljuk. Amennyiben a térinformatikai adatbázis részletessége, adatstruktúrája megengedi, és a későbbiekben a felhasználás során szükség lehet rá, az abszolút borítási adatok közelítő értékeit is érdemes feltüntetni az egyes poligonokra vonatkozóan. Az egyes poligonokhoz az adott feladathoz optimalizálva nagyon sokféle információ hozzárendelhető. Egy területet többféle tematika szerint, különböző szinteken is elemezhetünk. A lehatárolható terepi foltok jól elkülöníthető vegetációdarabok, amelyeket a távérzékelt állományon biztonságosan el tudunk különíteni egymástól. Pontosan lehatárolásra kerülnek, és a helyszíni felvételezés során ellenőrizve, azonosítva őket, ismert tulajdonságokat rendelünk hozzájuk. Ilyen a vegetációtípus meghatározása, a domináns (uralkodó) faj megnevezése, amely determinálja a társulás architektúráját, a szubdomináns és kísérő fajok leírása, amelyek jellemzők a közösségre. A térinformatikai szoftverek esetében a járulékos fajok adatainak felvételére is lehetőség van az adott foltokhoz.

Az általam alkalmazott vegetációtérképezési eljárás első lépése a légi felmérés volt, ezt követte a geodéziai felméréssel egybekötött terepi mintavétel. A laboratóriumi fotogrammetriai munkálatok után a felvételek elemzése ismételt terepbejárással folytatódott. Az előosztályozás során vizuális képmanipulációval értem el, hogy a felvételeken egy adott felszínborítási kategória egy adott intenzitásértékkel szerepeljen, majd az így nyert raszteres állományt automatikusan vektorizáltattam a számítógéppel. A foltmeghatározást és az ellenőrzést is a terepi jelenlét biztosította.

A felméréskori állapot tematikus térképezése után megvizsgáltam a munkaterületekről fellelhető idősoros adatokat is. Mivel az archív légifelvételek topológiai értelemben pontosak még akkor is jól használhatók, amennyiben a kalibrációs adataik beszerzése lehetetlenné vált. A korabeli függőleges kameratengelyű (lefelé tekintő) légifelvételeket ortorektifikálva, a felszínborítást róluk interpretálva kinyerhetjük az egykor jellemző terepi vegetációfoltok térbeli helyzetét. A felvételek kis felbontása és sok esetben pankromatikus volta miatt a meghatározható felsznborítási kategóriák száma korlátozott, de rendelkezésre állás esetén a foltokhoz hozzárendelhetjük a régi terepi felvételezések információit. Jelenleg ez a módszer a leghatékonyabb megoldás közelmúltba visszatekintő retrospektív vegetációtérképezésre. Ezen kívül felhasználhatók még levéltári írásos emlékek, botanikai közlemények és a XIX. századtól fellelhető florisztikai leírások, a tájhasználatot, korabeli mikroklíma viszonyokat és az emberi jelenlét mértékét, életközösségeket dokumentáló források és régi térképek. Az 1800-as éveket megelőzően gyakran dokumentálták úgy a határokat, hogy egy jellegzetes fát, vagy növénycsoportot jegyeztek le, mint meghatározó tájékozódási elemet. A katonai térképezés komoly segítséget jelent annak ellenőrzésére, hogy adott területet milyen felszíni formák és növényzet jellemezték a térképezés időszakában. Számos esetben kiderült, hogy a természetes, ősi állapotúnak vélt gyep, vagy erdőfolt néhány évszázada még megművelt terület volt.

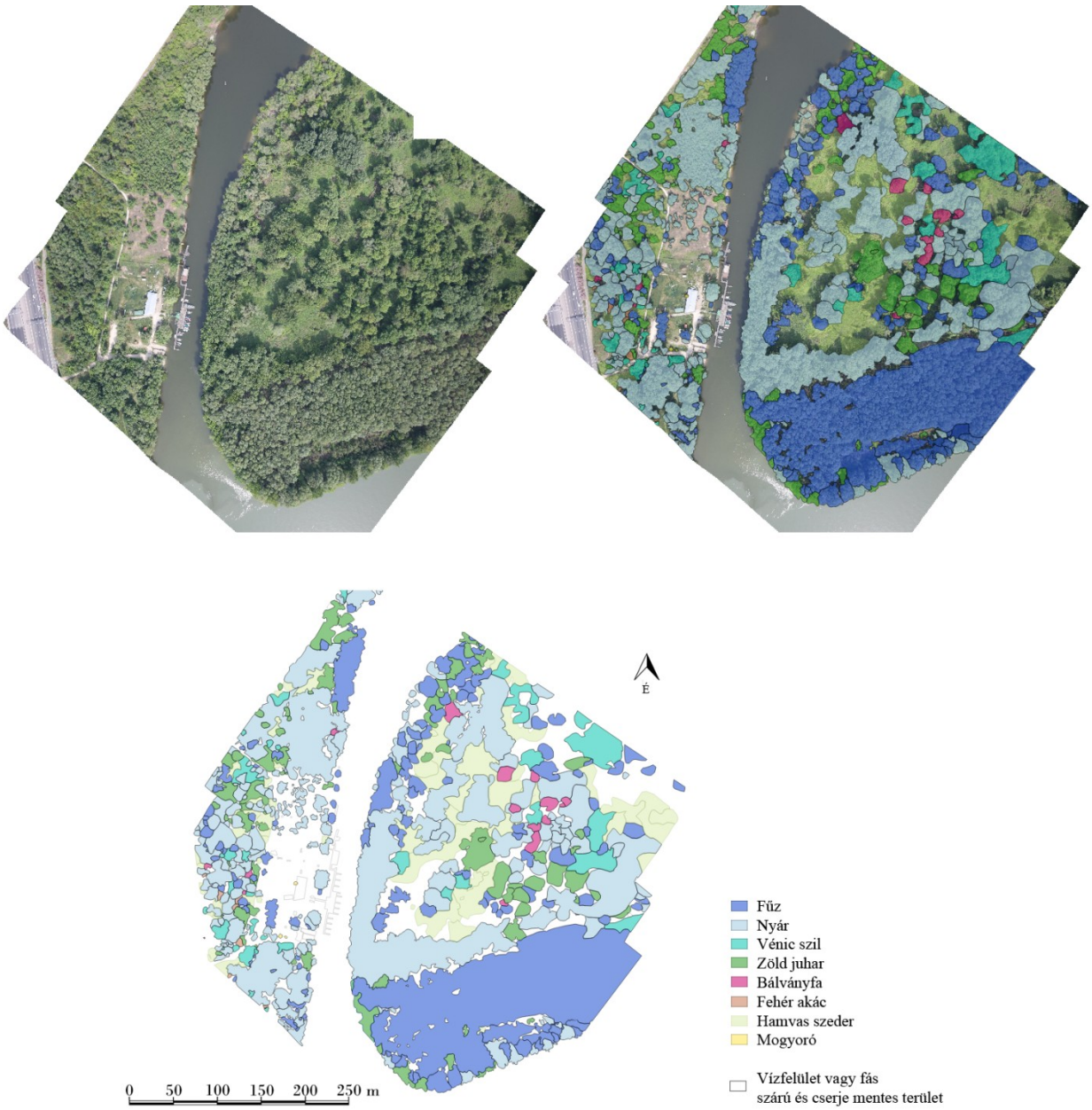
4.7.1.1 Háros-félszigeti mintaterület

Az új kamerarendszerhez szükséges teszteket a Háros-félsziget légi felmérése során végeztem el 5 cm terepi felbontással. Elsősorban a felső lombkoronaszintben jelenlévő egyedek feltérképezése volt a célom. A bemutatott komplex felmérési eljárást alkalmaztam (11. melléklet), tehát oldalról-felülről készült ortofotók és háromdimenziós modell is a rendelkezésemre áll. Az ortofotókat először terepi felmérés nélkül, a direkt tájékozásra hagyatkozva állítottam elő. Az így elért két méteres pontosságot a Háros-félsziget körül geodéziai GPS mérésekkel gyűjtött illesztőpontok segítségével a félsziget belső területeire

vonatkozóan is sikerült 5-20 cm síkrajzi pontosságúra növelni. A nagy pontosság és a legalább 80%-os repülésirányú átfedés lehetővé tette, hogy a koratavasszal (2016.04.23-án) és télen (2016.11.29-én) négy repülési soron elvégzett felvételezés ortofotóit vizsgálva a fák azonosítása és a lombkoronák körülrajzolása függőleges betekintéssel mehessen végbe. A teljes területet az 50 megapixeles penta elrendezésű mérőkamerával fényképeztem, így minden térrész felülről és négy irányból vizsgálható bármilyen térinformatikai szoftverben. A kiértékelést előzetes terepbejárás nélkül hajtottam végre. A terepi ellenőrzéskor azt tapasztaltam, hogy a nyár és fűz egyedek felső lombkoronaszinti azonosításában nem fordult elő tévesztés. (Sem a *Populusok*, sem a *Salixok* fajainak különválogatása nem volt cél.) Három mintaterületet jelöltem ki (28. ábra).

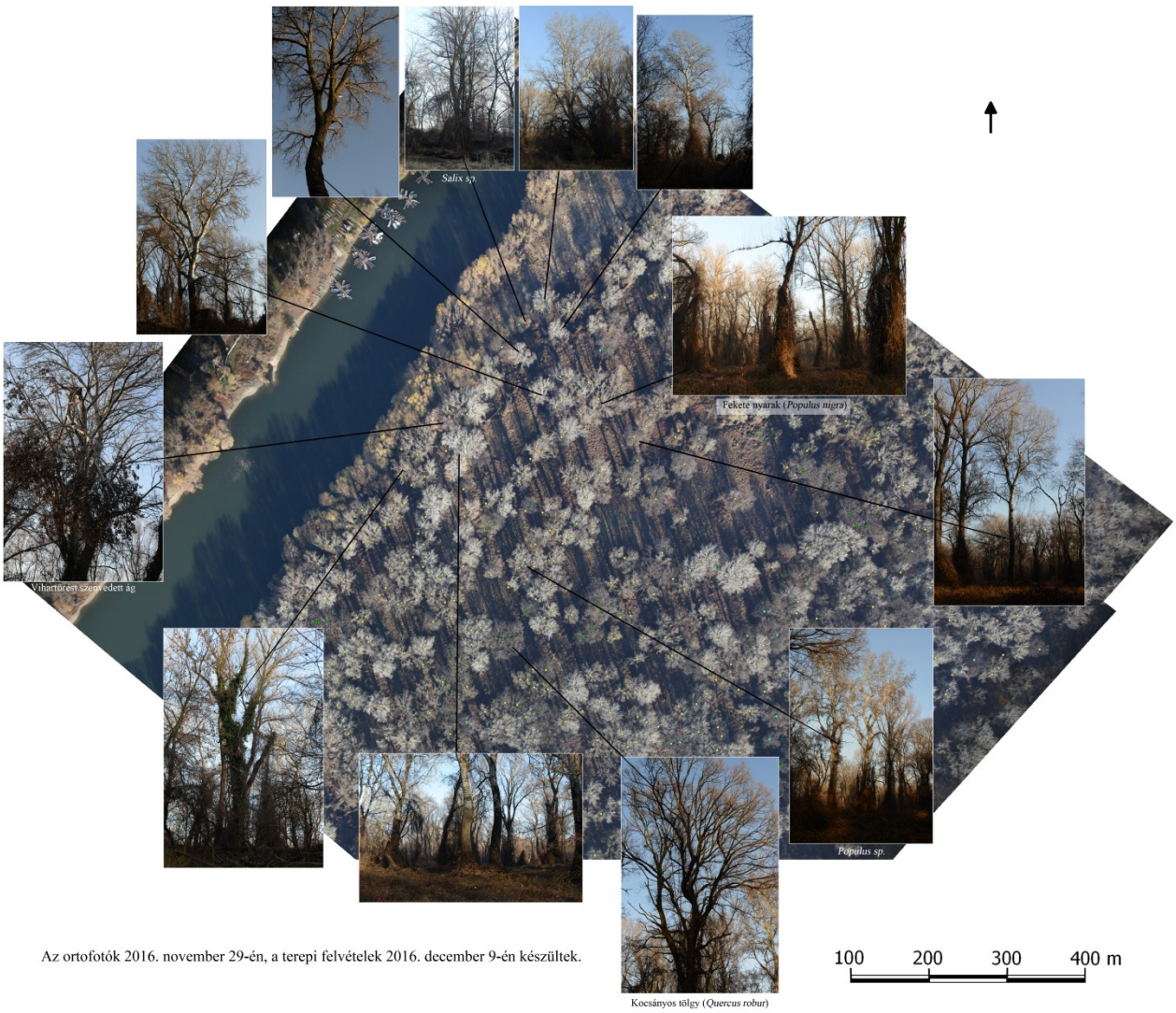
28. ábra A Háros-félszigetről készített ortofotók és a mintaterületek

Az első és a második mintaterület esetében a kiértékelést mással is elvégeztettem, az elemzési hibák feltárása érdekében. Az első mintaterületen (29. ábra) a zöld juhar (*Acer negundo*) és a vénic szil (*Ulmus laevis*) utólag a terepen került meghatározásra, de fentről észlelhető (nem lombkorona alá szorult) egyedeit jól soroltam be. A bálványfa (*Ailanthus altissima*) egyedek azonosítása is sikeres volt még a terepi jelenlét előtt is. A fehér akác (*Robinia pseudoacacia*) és a mogyoró (*Corylus avellana*) ismeretlen komplexet alkotott mielőtt a helyszínen fel nem vettem az adatbázisba. Ebben a vizsgálatban a rendelkezésre álló spektroszkópiás adatokat nem alkalmaztam a fajok azonosításához. A terepi adatgyűjtést a Mecsekerdő Zrt. munkatársaival végeztem el az M0 híd melletti ártéren, amelynek során fényképes adatbázist készítettem a későbbi meghatározás elősegítése érdekében (15. melléklet).



29. ábra A Háros-félsziget délnyugati csúcsának felső lombkoronaszintjét és nyílt területeinek fásszárú növényzetét bemutató felmérés részlete

A másik két mintaterületen a terepi felvételezést a Duna Ipoly Nemzeti Park munkatársai segítségével végeztem el és itt is elkészítettem a GPS-es és fényképes dokumentációt (30. ábra).



30. ábra Az ábrán látható ortofotók 2016. 11. 29-én, a terepi felvételek 2016. decemberében készültek.

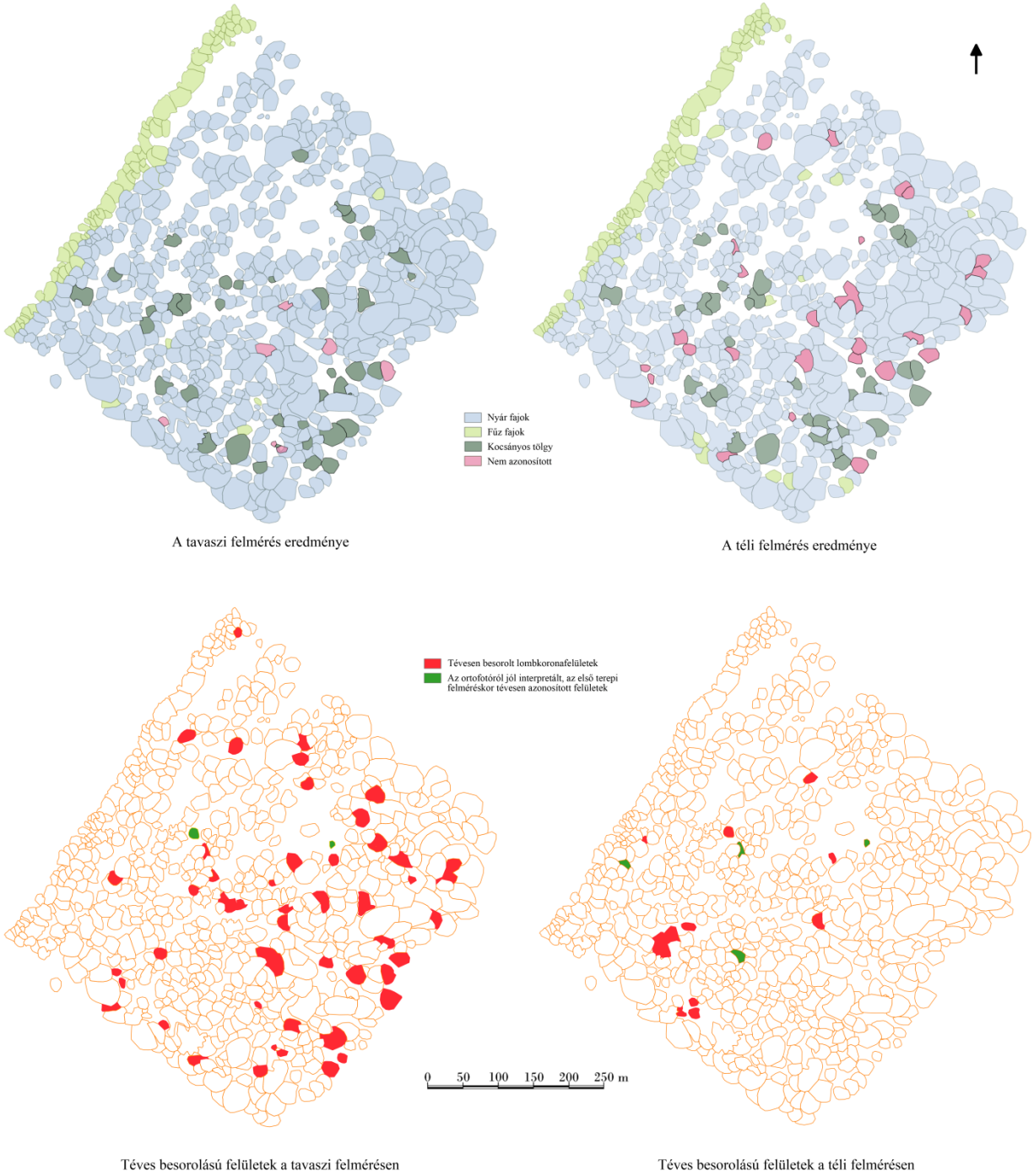
Ez a diplomamunkám (Bakó 2010b) során készített ortogonális fás szárú határozókulcs kiegészítésének tekinthető, amely segédlet a légifelvételekről és egyéb távérzékelt állományokról történő növény, illetve társulás határozást hivatott elősegíteni. A fényképes útmutató folyamatosan bővül, kiadását tervezzük.

A félszigeten belül kijelölt második, a belső erdőrezervátum szempontjából reprezentatív mintaterület 25,46 hektáros (17. melléklet). Az ortofotó kiértékelést követő terepi ellenőrzésre 2016. decemberében került sor. Az itt regisztrált fák 34,9%-a fűz, 57,5 %-a nyár, 4,4 %-a kocsányos tölgy. A mintaterületen megtalálható fás szárú egyedek 3,2 %-a a felsoroltaktól eltérő, így a mintaterület vizsgálata elsősorban a nyarak, fűzek és a kocsányos tölgy egymástól történő elkülönítésének és feltérképezésének nagyfelbontású légi felméréses módszerét hivatott ellenőrizni.

Ennek a mintaterületnek a teljes felületére vonatkoztatva 5,0% volt a tavaszi RGB ortofotóról történő felső lombkoronaszinti kiértékelés hibája, mert 1,28 ha lombkoronák által borított felület került téves besorolásra. A mintaterületen megtalálhatók kisebb tisztások is, ezért a felmérés megbízhatóságát célszerű a lombbal borított felületet alapul véve is megadni. Amennyiben kizárólag az ágszerkezettel fedett területre vonatkoztatjuk, 7,3% hibát állapítottam meg. A mintaterület 0,1%-án az ortofotó pontosabb eredményt biztosított a terepbejárásnál, és ezt egy, az ezekre a területekre megismételt terepi adatgyűjtés tisztázta. Ilyen eset a különösen nehezen megközelíthető területeken, valamint a terepen nem látható felső lobkoronaszerkezetek esetében fordult elő.

Bár a tenyészidőszakbeli légi felmérés általában a felső lombkoronaszint térképezésén keresztül ad képet az erdő állapotáról, azt is megvizsgáltam, hány fatörzset lehet lokalizálni a lombos felvételeken. A tavaszi felmérés esetében az 5 cm terepi felbontású RGB ortofotó a törzsek 86,9%-át tárta fel a háros-félszigeti mintaterületen.

A téli ortofotók vizsgálata jobb eredményt nyújtott ezen a mintaterületen a tavaszi felvételek kiértékelésénél (31.ábra). A Háros-félsziget belsejében található mintaterület teljes felületére vonatkoztatva 0,8% volt az RGB ortofotóról történő felső lombkoronaszinti kiértékelés hibája a terepi validáláshoz képest. Amennyiben kizárólag az ágszerkezettel fedett területre vonatkoztatjuk, 1,1% hibát állapítottam meg. A mintaterület 0,3%-án az ortofotó pontosabb eredményt biztosított a hosszadalmas terepbejárásnál. Ez az eredmény számottevően meghaladja a tavaszi felvételekből levezetett felső lombkoronatérkép pontosságát. Az 5 cm terepi felbontású téli RGB ortofotó a törzsek 84,6%-át tárta fel a háros-félszigeti mintaterületen, ami gyengébb eredmény a tavaszi lombokban gazdag felvételhez képest.



31. ábra A félsziget belsejében található mintaterület tavaszi és téli ortofotóiból levezetett folttérképei, valamint a terepi validálás során tapasztalt eltérések.

A módszer megbízhatóságának ellenőrzése érdekében a téli ortofotó kiértékelését megismételtettem egy olyan elemzővel, aki sohasem járt a helyszínen és korábban nem találkozott a felvételekkel. Elmondtam, milyen textúra, színezet és egyéb bélyegek alapján soroltam be a fákat az általam elvégzett interpretáció során, és ezeknek az elveknek a mentén olyan független kiértékelés ment végbe, amely a háros-félszigeti belső mintaterület teljes felületére vonatkoztatva 2,2% kiértékelés hibát eredményezett. Amennyiben kizárólag az

ágszerkezettel fedett területre vonatkoztattam, 3,5 % hibát tapasztaltam. A terület 0,5%-án az ortofotó pontosította a terepi vizsgálatot. Ez esetben az elemző 43,9%-al több törzset vélt felfedezni a felvételeken a terepen felvett adatokhoz képest. A két kiértékelés összehasonlításakor a nyarak térképi síkra vetített lombkorona felületének összesítésében 9,1 %, a tölgyek lombkorona felület összegeiben 1,5 %, az összes vetületi lombkorona felületben 9,2% eltérés mutatkozott a két azonos felvételsorozaton alapuló elemzés között, a mintaterület méretéhez viszonyítva. Az első felmérésben tölggyel borított treület nagyságához képest az ismétlés 24,2 % eltérést mutatott, ami annak tudható be, hogy a második elemző nem járt a helyszínen, és nem kapta meg a terepi jegyzőkönyveket, ezen felül az is közrejátszik, hogy a sorozat eltérő perspektívájú ortofotóin rajzolta meg az egyes egyedek ágszerkezeteinek körvonalát.

Egy harmadik, 2,7 hektáros mintaterületet is kijelöltem a félsziget északkeleti, invazív fafajokkal fertőzött területén. Itt is azt tapasztaltam, hogy a bálványfa teljes bizonyossággal lokalizálható és a téli felvételen egyértelműen elkülöníthetők a platánfélék (*Platanaceae*), a veresgyűrű som (*Cornus sanguinea*), a kökényszilva (*Prunus spinosa*), a bálványfa és a japánkeserűfű (*Fallopia japonica*) a nyaras, fűzes, vénic sziles erdőtől, még alászorult lombállapotban is. A tavaszi felvételen ehhez képest a som, a kökényszilva és a japánkeserűfű nem volt elkülöníthető. A zöld juhart (*Acer negundo*), a hegyi juhart (*Acer pseudoplatanus*), a kislevelű hársat (*Tilia cordata*), a vénic szilt, a mezei juhart (*Acer campestre*) és az amerikai kőriseket (*Fraxinus pennsylvanica*) egy kategóriaként lehetett meghatározni. Egy, a Szent István Egyetem Botanikus kertjében végzett felmérésem kimutatta, hogy a korai juhar (*Acer platanoides*) tavaszi felvételezéssel ugyancsak 5 cm terepi felbontású RGB légi felméréssel elkülöníthető a kocsányos-tölgyestől, nyarasoktól és hársaktól.

A vizsgálatnak nem volt célja adatokat közölni az alsó és középső lombkoronaszint fás szárú vegetációjáról, az aljnövényzettel sem foglalkozik. Ezek vizsgálata az ismertetett módszerrel nem kivitelezhető a félsziget belsejében található mintaterületre vonatkozóan. A felső lombkorona vizsgálat eredménye azonban a módszer alkalmasságát igazolja. A téli (lombszegény) felvételek a vizsgált területen, a vizsgált fajok esetében rendkívül kedvezőek a felső lombkoronaszint vizsgálatához. Érdekes módon a lombos időszakban a fák törzse jobban elválasztható a környezetétől a felvételeken, mint a téli időszakban.

A leírt módszerrel 5 óra terepi, majd ezt követő 6 óra labor emberórával interpretálható egy 25 hektáros terület. Ez a gyakorlatban nagyjából 5 ha / emberóra terepi és 4 ha / emberóra labor munkát jelent. Ez a részletesség és pontosság az időráfordítás mellett is megfelelővé teszi a

módszert kisebb rezervátumok, parkok és erdők felmérésére. Amennyiben egy középhegységnyi területre kell elvégezni a vizsgálatot, a félautomatikus módszerek alkalmazása szükséges. A nagyobb mértékű és többféle felszínborítási kategóriára kiterjedő automatizálást a jó minőségű és pontos geometriájú légifelvétel-térképek (ortofotó-mozaikok) teszik lehetővé. Amennyiben az éles és jó képminőségű digitális felvételek legalább 80 % soron belüli átfedéssel, nagyobb sebességű repülőgép fedélzetéről készülnek el, és gondosan ortorektifikáljuk őket, rövidebb idő alatt nagyobb területek felmérése végezhető el, vagy a kisebb munkaterület esetében sűrűbben ismételhető a vizsgálat a manuális interpretálás minőségének megőrzésével.

Előfordult néhány jellegzetes hiba, amelyekre érdemes felhívni a figyelmet. Míg a nyár fajok ágrendszere világos megjelenésű, szálas szerkezetű, addig a kocsányos tölgy ágrendszere az eltérő mintázatán túl, sötét színéről ismerhető fel. Egy esetben előfordult, hogy a környezeténél jóval magasabb nyárfa árnyékot vetett egy közepes méretű nyáregyedre, így annak ágai sötéten jelentkeztek az ortofotón (32. ábra). Mivel az ágak elrendeződése is hasonlított a tölgyekéhez, és a színe is megközelítőleg azonos volt, először tévesen soroltam be. A tévedésre a tavaszi felvétel, illetve a terepi ellenőrzés hívta fel a figyelmem.

32. ábra A nyíllal jelölt nyár egyed a magasabb fa árnyékában tölgyhöz hasonló árnyalattal jelent meg az ortofotón

A felmérés során a fotogrammetriai eljárásban keletkező háromdimenziós pontfelhőből (18. melléklet) bizonyos megkötésekkel kinyerhető a felső lombkoronaszinti egyedek lombtérfogata, lombátmérője, lombkerülete, magassága, a faj, vagy legalább a család. Ezek az adatok a terepi minősítésnél pontosíthatók (33. ábra). A multispektrális csatornákról információt nyerünk az egyedek vízellátottságáról, ökofiziológiai állapotáról. A terepi vizsgálat során az adatsor kiegészíthető a törzskerülettel és egyéb, légi felméréssel nem beszerezhető adatokkal.

33. ábra A folttérkép átváltható a lombkoronatérfogatot kifejező ponttérképre, vagy kartodiagramra is, a terepi és légi adatgyűjtéssel rögzített információkat a metaadatbázis tartalmazza.

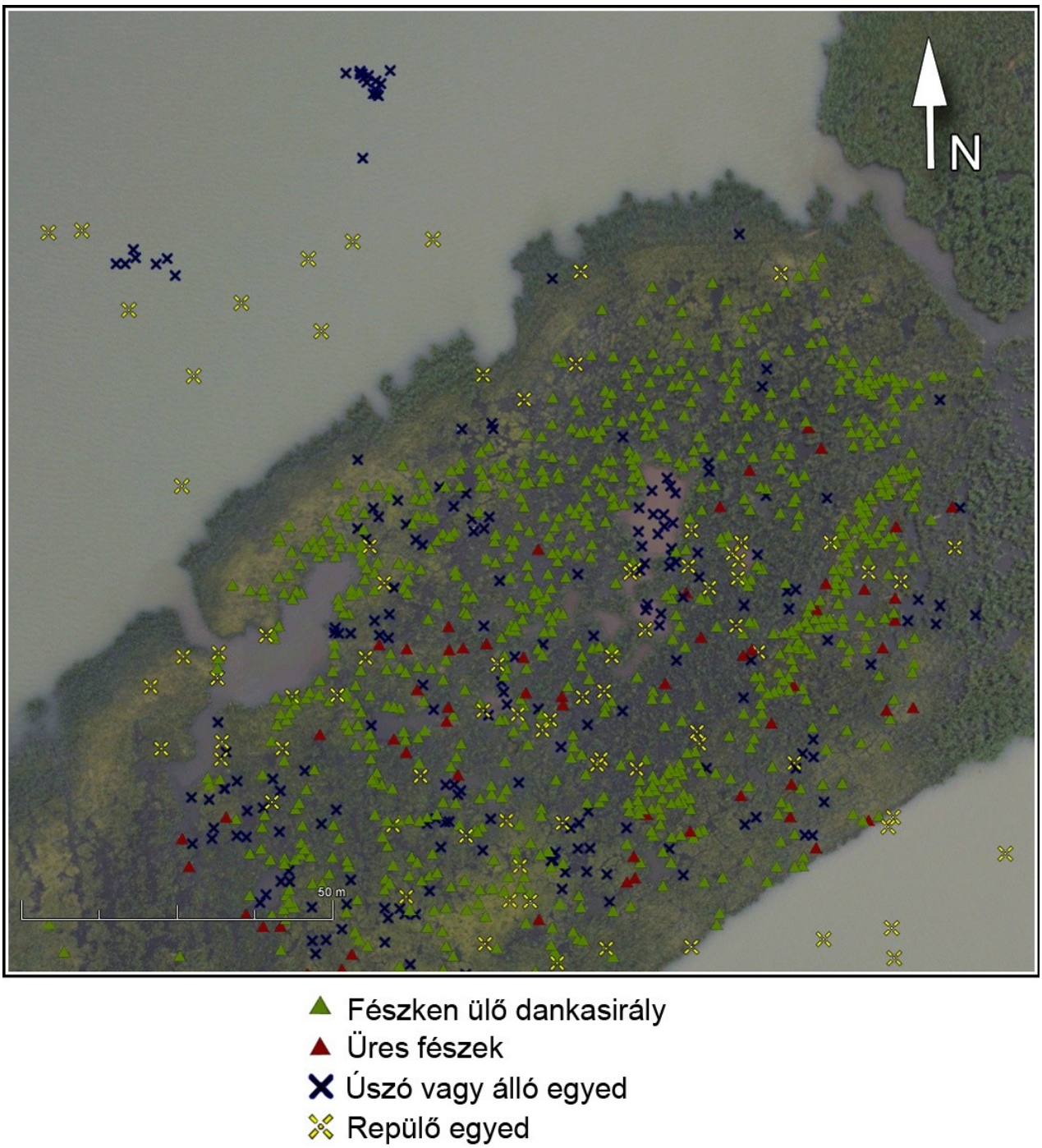
Az időről időre ismételt felmérés kimutatja az egészséges egyedek számában, borításában és faji összetételében beállt változásokat. Lokalizálni lehet egyes tájidegen növényfajok elterjedését (Bakó 2015b).

A generalista tájidegen fajok előrenyomulásának megállítása közben vigyázni kell arra, hogy ne okozzunk további károkat. Például nyílt tájsebek létrehozásával, mivel az invazív populáció már átvehette az őshonos növényzet rejtekhely szerepét és védelemre érdemes állatoknak adhat otthont. A felmérés eredményeként a felvonulási útvonalak és beavatkozási ütemek jól tervezhetőek. A felmérés során is kerülni kell a zavarást, és ebből a szempontból is előnyös a téli, költési időszakon, fészekfoglaláson kívül eső november-decemberi felmérés.

4.7.2 Természetvédelmi indikátorok térbeli elemzése

A képek felbontása és minősége lehetővé teszi bizonyos madárfajok meghatározását, és az is meghatározható, hogy pontosan hány fészek található egy nyílt területen elhelyezkedő kolóniában (Bakó et al. 2014b), azok hol helyezkednek el és hány fióka van a kitakarás mentes fészkekben. A 800 méter terep feletti magasságból történő pár perces megfigyelés nem jár zavarással, nincs szükség napokig tartó jelenlétre. Ha a területre valamilyen ok miatt mégis be kell menni, pontosan tudjuk előre, hogy melyik fészket hol kell keresni a koordináták alapján, így a beavatkozásokkal járó zavarás is minimalizálható. További előnye a felvételeknek, hogy utólag bármikor vizsgálhatók, az esetleges tévesztések felülbírálhatók. A madarak elkülönítése terepen sokszor nehéz, főként rossz fényviszonyok között messziről, amikor egy egyed egy pillanatra tűnik föl. Ilyenkor még egy gyakorlott ornitológus is téveszthet. A légifelvétel-térképről az egyedszám is pontosabban megállapítható, lecsökkenthető az alul vagy felülbecslés mértéke. Az azonos napszakban, egymást követő napokon történő ismétlés tovább javítja az egyedszám megítélésének pontosságát.

A nádszigetek (34. ábra) és felső lombkoronaszintben elhelyezkedő költőtelepek (35. ábra) elemzése nem csak a szigorúan vett élőhelyről ad információt, de a tág értelemben vett környezet fontos indikátora. A legalább három ismétlésben (különböző napokon) vizsgált költőtelepek éves ismétlésben történő elemzése kimutatja, amennyiben az adott populáció táplálékszerző területén, vagy a zavarásmentességhez szükséges puffer zónában olyan környezeti probléma (zavarás, szennyezés, vadászat, élőhely-változás, stb.) lép fel, amely az egyedszám megváltozását indukálja. Így a vizsgálati területen érvényesülő folyamatok jelezhetnek a védett területen kívülről eredő hatásokat. Ezzel akár a közeli, emberek által lakott területen beállt olyan változások is kimutathatók, amelyeket a városökológiai elemzés sem feltétlenül mutat ki, és amelyek hosszú távon az ott élők számára is károsak.



34. ábra Dankasirályok (Chroicocephalus ridibundus) számlálásához készült ortofotó-mozaik részlete. A Velencei-tó egyik nádszigetét ábrázoló, gyenge megvilágítási körülmények között IS 4 mérőkamerával fényképezett 0,5 cm terepi felbontású ortofotó alapján készült el a dankasirály egyedeket megjelenítő tematikus térképfedvény (Bakó et al. 2014).

35. ábra Kárókatona (Phalacrocorax carbo) és szürke gém (Ardea cinerea) költőtelepek részletei a fiókák és felnőtt egyedek számlálására szolgáló ortofotó mozaikokból (Bakó et al. 2014).

4.7.3 Árvízmodellezés költséghatékonyan beszerzett téradatokkal

A módszer költséghatékony megoldást jelent az olyan természeti katasztrófák várható hatásainak előrejelzéséhez és megelőzéséhez, mint amilyenek az árvizek, sárlavinák és csapadékvíz elvezetési anomáliákhoz köthető káresemények. Ennek igazolására tesztfelmérést végeztünk a Dunakanyarban, amelynek eredményei egyértelműen rávilágítottak arra, hogy a hidrodinamikai folyami árvízmodellek téradatainak leghatékonyabb beszerzési eszköze a repülőgépes légi felmérés, terepi lézerszkenneres adatgyűjtéssel kiegészítve, ott, ahol a vegetáció sűrűsége azt indokolja.

4.7.4 Belvízfelmérés költséghatékonyan beszerzett téradatokkal

Az ismertetett eszközökkel az árvízmodellezéshez hasonlóan lehetőség van a belvíz tetőzéskori felmérésére, illetve a belvízkockázati térképek gazdaságos és pontos térmodell inputjának beszerzésére is. A kisvízgyűjtőre lehullott csapadék mennyiségének (h) és a talaj vízáteresztő képességének ismeretében (α1) a belvíz-veszélyeztetettség előre jelezhető légi távérzékelési adatok segítségével. A lejtésviszonyok a távérzékeléssel és fotogrammetriai feldolgozással előállított modellből levezethetők (α2), ahogyan a talaj növényfedettség szerint is

besorolható az ortofotó alapján (α3). A konkrét hidrometeorológiai helyzetben kiszámítható a fajlagos lefolyás hozama (q, [m3/ha/idő]):

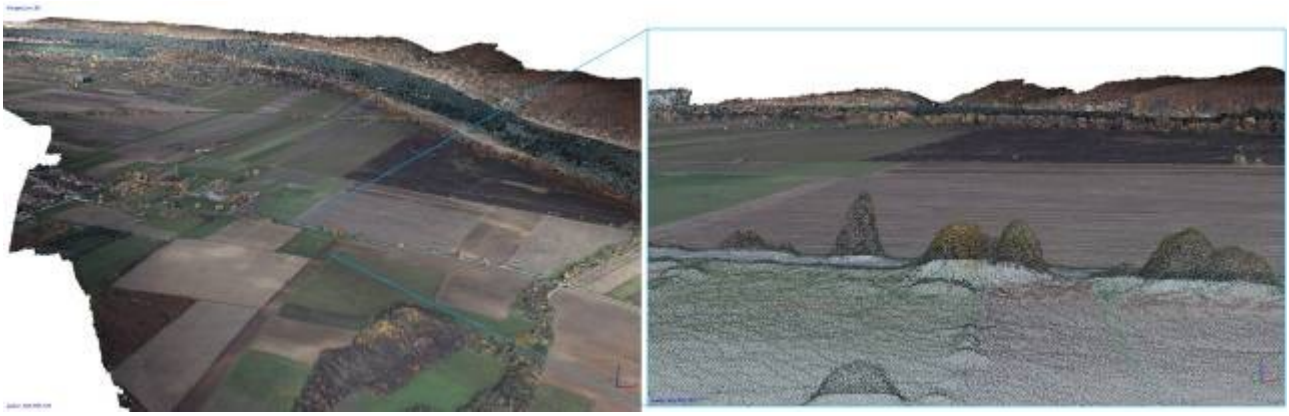
$$q = 10(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)h \qquad (15)$$

A képlet jelentősen leegyszerűsített (Pálfai 1988), nem számol például a talajvízből csatornába szivárgó, talajból felfakadó, árvízből eredő és az öntözővízből származó vízzel, valamint a párolgással, de mindez az adott környezeti adottságok alapján kiegészítendő, pl. az EXPRE (Excess Water Prediction = belvíz-előrejelzés) modell alapján (Forgóné 2000). Az eredményül kapott, adott területegységre jutó vízmennyiség alapján és a fotogrammetriai eljárással készült digitális felületmodellből előállított domborzatmodell segítségével a síkrajzi elöntés térkép is elkészíthető. Amennyiben a vízmennyiségből (q) kivonjuk a térmodell legalsó szintvonalai közé eső térfogatot (V1), majd így teszünk V2 ... Vn esetében is, a vízmennyiség eloszlása kiszámítható, mert amikor q mennyisége legjobban közelíti a 0 értéket, az utoljára kivont szintvonal a síkrajzi elöntést reprezentáló poligonok határvonala (36. ábra).

36. ábra Az ismertetett eljáráson alapuló, az Interspect Kft. munkatársai által írt szoftver kimutatja a belvízzel veszélyeztetett zónákat adott mezőgazdasági táblán. A vizsgálat részletessége és megbízhatósága az inputoktól, így a közvetlen vízgyűjtőterületről rendelkezésre álló domborzat és felületmodell pontosságától és részletességétől függ. A vizsgálat többféle csapadék variációra elkészíthető. Az ábrán az Alföldre lefuttatott teszt egyik parcellára vonatkozó eredménye látható, amelyben csupán a 30 m részletességű SRTM (globális modell) segítségével végeztünk egy tesztet.A kék zónák mutatják a veszélyeztetett területeket. Nagygyfelbontású felméréssel a vizsgálat árnyalható.

4.7.5 Távközlési tornyok tájba történő optimális kihelyezése

A távközlési tornyok telepítése költség és esztétikai szempontokat is figyelembe vevő optimalizálást, előzetes szimulációt igényel. A tájban történő tervezés, a környezetvédelmi szemlélet és a gazdaságos beruházás tervezés megköveteli a távközlési bázisállomások optimális létesítési helyének kiválasztását és ennek érdekében a legmodernebb adatgyűjtési és modellezési módszerek alkalmazását. Egy 2015 novemberében az Invitellel és az Antenna Hungáriával elvégzett kísérlet során úgy találtam, hogy a bázisállomások tájban történő optimális elhelyezésének megtervezésére a repülőgépes légi fotogrammetriai felmérés szolgáltatja a leggazdaságosabb alapadatokat (37. ábra). Az alkalmas telepítési helyeket a domborzati és beépítési, valamint növényzeti viszonyokat figyelembevéve alkotott modell segítségével kijelölt, az adott területet optimálisan lefedő tornyok számát a jogi lehetőségek is befolyásolják, így összetett térinformatikai alapú, környezet specifikus modellezési eljárást dolgoztam ki (Bakó 2016). Mivel a háromdimenziós domborzati és vegetációs adatok felbontása határozza meg a modell celláinak méretét, nagyfelbontású repülőgépes adatgyűjtéssel oldjuk meg a problémát. A kísérletek során kialakított eljárás 15 cm terepi felbontású, 25 cm pontosságú ortofotó-mozaikot és 0,4-2 m részletességű, de 40 cm abszolút pontosságú modellt szolgáltat.



37. ábra az egyszerűsített háromdimenziós modell, amelyet a hullámhosszonként lefutatott lefedettség modellezésnél alkalmazunk

A módszer azonban nem csak új telepítés esetén hasznos. Amennyiben például valamilyen oknál fogva kiesik egy bázisállomás, a minőség nem csak az adott helyen, de a környezetében működő cellák területén is romlik, mert ezeknek olyan területen is át kell venniük a részleges szolgáltatást, ahova tervezetten már nem alkalmasak minőséget produkálni. Éppen ezért az eljárás nagyon fontos lehet a kiváltó állomás helyének megtervezésében is.

A módszer figyelembe veszi a növényzet zavaró hatását, számol a berendezések kihelyezési magasságával, a domborzati viszonyokkal, a vegetációval és épített objektumokkal, a Föld görbületével, Fresnel zónákkal, a jelerősség veszteséggel és az adott hullámhosszaknak

megfelelő terjedési sajátosságokkal. Az 19. melléklet bemutatja egy szimulált bázisállomás hatókörzetét a 2015. november 11-én megvalósult repülésből származó térmodellen.

4.7.6 Közigazgatási térinformatikai rendszerek raszteres fedvényei

Az ortofotók egységes térképpé alakítása (mozaikolása) kiküszöböli a felvételek szélén fellépő perspektivikus geometriai torzítást, viszont elveszítjük vele azt a lehetőséget, hogy az adott pontot több ortofotón, tehát több képkészítési szögből megnézhessük. Ugyanakkor a fotómozaik kezelése, kiértékelése nagyságrendekkel egyszerűbb és gyorsabb. Amennyiben a felmérés penta mérőkamerával készül, rendelkezésre állhatnak a terület függőleges kameratengelyű (felülnézeti) ortofotó mozaikja mellett a négy irányból készült ferde kameratengelyű (madártávlati) ortofotó mozaikok is (38. ábra).

38. ábra A madártávlati ortofotó oldalról - felülről is lehetővé teszi a betekintést. A térinformatikai rendszerben rendszerint úgy jelenik meg, mint a külön rétegként kezelt eltérő időpontú ortofotók. (Budapest XII. kerület ortofotó térképéhez tartozó madártávlati fedvények két irányú részlete - Interspect, Bakó - Molnár - Glöckner)

Ez esetben úgy tudjuk öt pontból szemlélni az adott felszíni objektumot (felülről és négy oldalról), hogy a képszéli perspektív hatások nem jelentkeznek. Ráadásul a ferde tengelyű felvételek is ortofotók és minden egyes pixel koordinátája ismert. Érdemes megemlíteni, hogy a függőleges kameratengelyű ortofotóhoz képest ezen felvételek ortogonálisra merőleges felmérési síkja nem a tengerszinttel, hanem a felvételezési irányra merőleges síkkal egyezik meg.

A közigazgatásban nem csak a madártávlati ortofotó fedvények jelentenek előnyt, de a függőleges képtengelyű felvételekből létrehozható pontfelhőhöz képest, a több képállásból készült felvétel segítségével jóval részletesebb és pontosabb háromdimenziós felületmodell

hozható létre. A magassági fedvényből terepi minősítéssel a domborzati fedvény is elkészíthető. Ez a komplex adatbázis települések, településrészek, de akár kisvízgyűjtők csapadékvíz elvezetési modelljeinek az alapjául is szolgálhat. A vízrendezési modelleken túl számos feladat optimális megoldását kísérletezhetjük ki, tervezhetjük meg a rendszer segítségével. Ellenőrizhetők a szélcsatornák, modellezhető, hogy miként változik a széljárás tervezett nagyberuházások megvalósulásakor, és egyéb városökológiai jelenségek is vizsgálhatók. Említést érdemel az ortofotók klasszikus városüzemeltetési, építésügyi szerepe is, mint például a jogi állapotok összevetése a felvételezéskor a természetben tapasztalható állapotokkal. A közszolgálati alkalmazásokat nagyon hosszan lehetne sorolni, a Légi fényképezés a gazdálkodásban és a közszolgáltatásban című könyvben foglaltam össze ezeket (Bakó 2014).

4.8 Következtetések

A leírt módszerek ismertetett felhasználási lehetőségeit saját operatív eredményekben számos alkalommal igazoltam. A gyakorlatban 105 alkalommal készítettem (fényképezés, feldolgozás) nagyfelbontású ortofotó-mozaikot független szervezet számára az ismertetett berendezésekkel. 24 alkalommal adtam át háromdimenziós modellt, két alkalommal vezényeltem le domborzatmodell levezetését a felületmodellből települési méretben. Az ortofotó három alkalommal a többirányú madártávlati ortofotó-mozaikokkal kiegészítve készült el.

Az ismertetett vizsgálatok és gyakorlati alkalmazás alapján megállapítható, hogy egyes felszínelemzési paraméterek nagy pontossággal térképezhetők az ismertetett módszerrel. Ilyenek például a felső lombkoronaszint térképezés, a vízimadár költőtelep monitoring, a távközlési tornyok kihelyezésének modellezéséhez, valamint a hidrodinamikai modellezéshez alapanyagot szolgáltató háromdimenziós felmérés, vagy a felszínborítás vizsgálat, amelyek idősoros kivitelezésben környezetvédelmi és természetvédelmi indikátor szerepet tölthetnek be.

4.9 Új tudományos eredmények

1. Kimutattam a terepi felbontás és a kiértékelési pontosság összefüggéseit néhány hazánkban kiemelt fontosságú, illetve gyakori felszínborítási kategória esetében és segédletet készítettem a gazdaságos terepi felbontás megválasztásához az ezen kategóriákat érintő légi felmérések megtervezéséhez.

2. Kidolgoztam egy gyorsfelmérési eljárást, megterveztem az ezt lehetővé tevő berendezéseket, amelyek alkalmasságát a felmérési gyakorlatban igazoltam.

3. Kidolgoztam egy extrém nagy terepi felbontású távérzékelési eljárást, amely megkönnyíti a társulás fragmentumok eddiginél finomabb azonosítását. Kidolgoztam az eljáráson alapuló nagyfelbontású repülőgépes vegetációtérképezési módszert.

4. Új módszert dolgoztam ki speciálisan vízimadár populációk felmérésére, amelyhez terveim alapján sikerrel kifejlesztettük az eljárás műszeres hátterét, amit sikerrel teszteltem és publikáltam. Javaslatot tettem az eljárás természetvédelmi indikátorként történő bevezetésére.

5. Kidolgoztam egy légi felméréstervező szoftver matematikai alapjait. A szoftver gyors és biztonságosabb repülési tervkészítést és dokumentálást tesz lehetővé. 2015 június óta már a gyakorlatban is ezzel dolgozunk.

6. Elvégeztem a pilóta vezette precíziós repülések statisztikai értékelését, valamint sok ezer ortofotó tájolási adatainak értékelését, és az eredmények alapján javaslatot tettem a precíziós repülésekre vonatkozó követelmények átgondolására.

7. Ellenőriztem a vizuális interpretációnál fellépő szubjektív hatás torzítását, javaslatot tettem a módszer finomítására. Egybevetettem a félautomatikus osztályozás és a vizuális interpretáció hatásfokát. Rámutattam a félautomatikus osztályozás pontatlanságaira és előnyeire. Előosztályozási módszert dolgoztam ki felszínborítási kategóriák és vegetációfoltok nagy terepi felbontású (0,5 - 10 cm) ortofotó-mozaikról történő gyors elkülönítéséhez és feltérképezéséhez.

8. Megterveztem egy olyan komplex mérőberendezést, amely alkalmas ökológiai és vegetációs paraméterek elemzéséhez szükséges nagy spektrális, térbeli és radiometriai felbontású mérések elvégzéséhez, amely ugyanakkor háromdimenziós elemzések anyagainak előállítására is alkalmas. Ellenőriztem, elemeztem az új berendezések és eljárások alkalmazhatóságát a természetvédelem, a környezetvédelem, a közszolgáltatás, az árvíz- és belvíz modellezés, illetve a távközlés területén.

5 KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A komplex légi távérzékelési berendezés megépítése, befejezése hatékony és gazdaságos eszközt biztosítana a természetvédelmi és közigazgatási elemzések és monitoring tevékenység támogatására. Az új, szárny alá szerelhető eszköz bármely merevszárnyú platformra adaptálható volna, így a jelenleg forgalomban lévő mérőkamerákhoz képest szélesebb körben alkalmazható.

Érdemesnek látom vizuális kiértékelő szoftver elkészítését, amely kijelölt képfelületen valós időben bemutatja az egyes paraméter beállító lehetőségek (elsősorban potméterek, csuszkák) értékváltoztatásainak hatásait a felvételeken. A könnyen kezelhető, ugyanakkor a kiértékelő és elemző szoftverek eszköztárát vizualizálva alkalmazó program szélesebb körök számára értelmezhetővé tenné a félautomatikus információkinyerést és elősegítené az interdiszciplináris kutatómunkát.

A nyílt területen és felső lombkoronaszintben költő vízimadarak populációinak felmérésére érdemes volna a zavarásmentes repülőgépes módszert bevezetni az alacsonyrepüléses sárkányrepülőgépes, helikopteres és egyéb módszerek helyett. Érdemes volna a módszert kipróbálni kisemlősök (pl. földikutya) és nyílt területen nagyvadak létszámbecslésére és a gradáció vizsgálatára is. A módszer az epidemiológiai vektorok megismerését is elősegítheti, elsősorban a növényzet tekintetében. Érdemes volna a viharkárok, a balvíz és árvíz állapot rögzítésében alkalmazni, valamint a hidrodinamikai modellek egyik fontos inputjául szolgáló domborzat és felületmodellek beszerzésére alkalmazni, ahol azt a vegetáció hiánya, vagy gyér állapota lehetővé teszi. Érdemes volna nagy részletességű felületmodellt előállítani a távközlési tornyok, bázisállomások optimális tájadottságokhoz történő tervezéséhez.

Érdemes volna a domináns növényfajok állományjellegű azonosítását, vegetáció-típusok, társulások és növényfajok légifelvételekről történő határozását elősegítő útmutató készítését folytatni, még több fajra kiterjeszteni és akár lágyszárú vegetációfolt-típusokra is kiegészíteni azt.

Érdemes összegezni a települések, nemzeti parkok, felügyelőségek és egyéb területi felügyelők, gazdálkodók számára releváns, légi távérzékeléssel és terepi mintavétellel beszerezhető információkra épülő környezetinformatikai rendszerek elemeit, a komplex adatbázisok megalkotása, valamint az optimális, kevesebb, gazdaságos repülés során több információt szolgáltató adatgyűjtési stratégiák bevezetése érdekében.

6 ÖSSZEFOGLALÁS

A doktori (Phd) értekezés egy tíz éves munka eredményeit tárgyalja a szakmai előzmények bemutatása után. Egyes környezetvédelmi és a természetvédelmi vizsgálatokat, valamint a beavatkozásokat megelőző tervezést támogató légi távérzékeléses adatgyűjtés legnagyobb kihívásának vizsgálatával feltártam a legújabb követelményeket, a felhasználók által támasztott összetett igényeket. A felmerülő kérdésekre és problémákra műszaki és módszertani válaszokat kerestem, amelyeket kísérleti, repülőgép fedélzeti mérőkamera rendszerek kidolgozásával oldottam meg. Mindehhez elkészítettem az elmúlt hat év pilóta vezette precíziós repüléseinek statisztikai értékelését, valamint sok ezer ortofotó tájolási adatainak elemzését, és az eredmények alapján javaslatot tettem a precíziós repülésekre vonatkozó követelmények átgondolására. Kidolgoztam egy légi felméréstervező szoftver matematikai alapjait.

Úgy tapasztaltam, hogy amennyiben rövidebb idő alatt tudunk repülőgépes adatgyűjtést végrehajtani az adott felmérési területen, a tematikus elemzés megbízhatósága növekszik. Így a nagysebességű repülőgépes távérzékelés érdekében növeltem a mérőkamerák sebességét, elértem, hogy a szükséges átfedések megmaradjanak és az alacsony, gyors haladás ellenére se jelentkezzen képvándorlás. A felvevő berendezések megtervezésén túl módszertant dolgoztam ki az ilyen felmérések elvégzésére. A légi fényképezéseket magam hajtottam végre, a fotogrammetriai munkálatokat és a kiértékelést én, vagy az általam vezényelt csoport végezte el. A gazdaságos módszert több ízben teszteltem települési környezetvédelmi problémák modellezésénél, térinformatikai feladatokhoz, valamint árvíz előrejelzési és belvíz kockázati térképek elkészítéséhez. Mindemellett kidolgoztam egy nagy terepi felbontású eljárást (0,5 - 3 cm, 220 km/h - 800 km/h), amely az 5 - 10 cm terepi felbontású ortofotókhoz képest jóval pontosabb, részletesebb, bővebb adattartalommal rendelkezik, és ezáltal szélesebb a felhasználók köre is. A módszert teszteltem vízimadár populációk létszámbecsléséhez, felső lombkoronaszinti vegetációtérképezéshez, és a fás szárú vegetáció sűrű háromdimenziós pontfelhővel történő elemzéséhez. Kimutattam a terepi felbontás és a kiértékelési pontosság összefüggéseit. Ellenőriztem a vizuális interpretációnál fellépő szubjektív hatás torzítását, javaslatot tettem a módszer finomítására, kidolgoztam egy fél-automatikus előosztályozási módszert. Megterveztem egy olyan komplex mérőberendezést, amely alkalmas ökológiai és vegetációs paraméterek elemzéséhez szükséges nagy spektrális, térbeli és radiometriai felbontású mérések elvégzéséhez, amely ugyanakkor háromdimenziós elemzések anyagainak előállítására is alkalmas.

10.14751/SZIE.2017.015

7 SUMMARY

The doctoral (PhD) dissertation will present the professional antecedents, then proceed to discuss the results of ten years of work. By evaluating the greatest challenge to data gathering done via aerial remote sensing, which is used to support certain environmental and conservation studies, as well as pre-intervention planning, I have determined the newest requirements and a complex set of user needs. I attempted to find technical and methodological solutions to arising questions and issues. This process culminated in the development of unique and experimental onboard measuring camera systems for use on aircraft. I have also done a statistical evaluation of precision flying performed by manned aircraft in the past six years and analyzed the orientation data of several thousand orthophotos. Based on the results of these studies, I have prepared recommendations for rethinking the requirements for precision flying. I have developed the mathematical foundations for aerial survey planning software. My findings have shown that when the aerial data gathering for a given survey area can be completed in a shorter amount of time, the reliability of thematic analysis increases. Accordingly, I increased the speed of the measurement cameras used for high-speed aerial remote sensing, with the result that the necessary overlaps were still present and the picture remained stable despite the low, fast flight. In addition to designing the recording equipment, I developed a methodology for carrying out such surveys. I performed the aerial photography myself, while the photogrammetric work and the evaluation was performed by me or by my group. When modeling environmental problems, I tested the economical method a number of times for GIS tasks.

Furthermore, I developed a procedure for achieving high surface resolution (0.5 - 3 cm GSD, 220 km/h - 800 km/h), which provides much more accurate, detailed and higher content data compared to traditional (5 to 10 cm GSD) orthophotos, thus allowing for a wider range of users. I tested this method on waterfowl population estimates, upper canopy vegetation mapping and dense 3-dimensional point cloud analysis of woody vegetation. I demonstrated the correlations between surface resolution and evaluation precision. I tested the distortions occurring due to the subjectivity of visual interpretation, and provided recommendations for further refining the method, developing a semi-automated method of pre-classification. I designed a complex measuring equipment which is able to provide the high spectral, spatial and radiometric resolutions necessary for the analysis of ecological and vegetation parameters, but is also capable of providing material for 3-dimensional analyses.

8 IRODALOMJEGYZÉK

ASPINALL R.J. és PEARSON D.M. (1995): Describing and managing uncertainty of categorical maps in GIS, in innovations in gis, fisher p. 71-83 Taylor and Francis, London

ATASHGAH, A. és MALAEK S. M. (2012): Prediction of aerial-image motion blurs due to the flying vehicle dynamics and camera characteristics in a virtual environment. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering 227(7):1055-1067

BABOO S., DEVI M. R. (2010): An Analysis of Different Resampling Methods in Coimbatore, District, Global Journal of Computer Science and Technology Vol. 10 Issue 15 (Ver. 1.0) December 2010 p. 61-66

BÁCSATYAI L., MÁRKUS I. (2001): Fotogrammetria és távérzékelés Tankönyvpótló segédlet az erdőmérnök hallgatók részére Kézirat, NYME Sopron, 215 p.

BAKÓ G. - KOVÁCS G. - MOLNÁR ZS. - KIRISICS J.- GÓBER E., AMBRUSD A. (2015): The developement of red mud flood environmental information system and the methodology for the spatial analysis of the degraded area, Acta Geographica Debrecina Landscape and Environment - Volume 9. Issue 1. 1-11. p.

BAKÓ G. (2010a): Multispektrális felvételek alapján készülő tematikus térképek minősége, a terepi felbontás és a képminőség függvényében - Tájökológiai Lapok 8 (3): 1–00 (2010) 507-522 p.

Bakó G. (2010b): Nagyfelbontású légifényképezés alkalmazása a települési szintű környezetvédelemben és a természetvédelemben, Diplomadolgozat, Szent István Egyetem, Gödöllő 94 p.

BAKÓ G. (2010c): Igen nagyfelbontású légifelvétel-mozaikok készítése kis- és középformátumú digitális fényképezőgépekkel - Geodézia és kartográfia 2010/6 LXII. évfolyam 21 - 29, 49 p.

BAKÓ G. (2011a): Archív légifelvételek digitalizálása, RS&GIS - 2011 / 1. 65-83 p.

BAKÓ G. (2011b): Távérzékelt állományok minőségét befolyásoló tényezők - Távérzékelési technológiák és térinformatika online 2011. április 58-71 p.

BAKÓ G. (2012a): Fotogrammetria és távérzékelés a legújabb digitális mérőkamerákkal, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság XIII. Földmérő Találkozójának kiadványa 2012. május, pp. 25-27

BAKÓ G. (2012): A légi fotogrammetria kezdetei Magyarországon 1916 – 1925 – Távérzékelési technológiák és térinformatika online 2012. november 47-55 p.

BAKÓ G. (2012c): A távérzékelés, a fotogrammetria, a térképészet és a térinformatika együttesének alkalmazása és csoportunk hazai eredményeinek bemutatása, A VI. Magyar Földrajzi Konferencia, Tanulmánykötete (Szerk: Nyári Diána), Szegedi Tudományegyetem Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, ISBN 978-963-306-175-6, 1108-1114 p.

BAKÓ G. (2012b): Mérőkamerák kalibrációja – Fotómozaik, 2012. június, XV. évfolyam 6. szám, 34-37 p.

BAKÓ G. (2012d): Photogrammetry and Remote Sensing with the Latest Digital Aerial Cameras 2012. május 10-13., 13th Conference on Geodesy, Kolozsvár - Cluj 1-4 p.

BAKÓ G. (2013a): Nagysebességű repülőgépes távérzékelés és hozzá kapcsolódó adatfeldolgozási módszerek In. LÓKI J. (Szerk.) (2013): Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában IV. - Térinformatikai konferencia és szakkiállítás kiadványa, Debrecen, 2013. 59-66 p.

BAKÓ G. (2013b): Vegetációtérképezés nagyfelbontású valósszínes- és multispektrális légifelvételek alapján, KITAIBELIA XVIII. évf. 1-2. szám Debrecen 2013 152–160. p.

BAKÓ G. (2014): Légi fényképezés a gazdálkodásban és a közszolgáltatásban, Arial Photogrammetry in Economy and Public Services, tankönyv, Budapest, Corvinus Egyetem, 126 p. (E-Government Tanulmányok XL.) ISBN 978-963-9753-27-3

BAKÓ G. (2015a): UAV és RPAS technológia a légi távérzékelésben - elemző tanulmány, Magyar Földtani és Geofizikai Intézet, Budapest 1-80. p.

BAKÓ G. (2015b): Az özönnövények feltérképezése a beavatkozás megtervezéséhez és precíziós kivitelezéséhez In: CSISZÁR Á., KORDA M. (Szerk.) (2015): Rosalia kézikönyvek 3, pp. 17-25.

BAKÓ G. (2016): Lefedettség modellezés távközlési tornyok kihelyezésének, tájban történő elhelyezésének tervezéséhez, légi felmérésből származó téradatok segítségével. Tájökológiai Lapok 14(2): 117-134.

BAKÓ G., EISELT Z., KOVÁCS E., LICSKÓ B., HORVÁTH M., BÁLINT Á. (2008): An Environmental Study By High Resolution Remote Sensing - 2008. november 17. - 14th Workshop On Energy And Environment pp. 15.

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

BAKÓ G., MOLNÁR ZS., GÓBER E. (2014a): Városi térinformatikai és döntéstámogató rendszerek raszter fedvényei – A legutóbbi időszak települési ortofotó felméréseinek tapasztalatai Magyarországon – Tájökológiai lapok 12 (2): p. 285–305.

BAKÓ G., TOLNAI M., TAKÁCS Á. (2014b): Introduction and Testing of a Monitoring and Colony-Mapping Method for Waterbird Populations That Uses High-Speed and Ultra-Detailed Aerial Remote Sensing, Sensors, 14:12828-12846.

BALÁZSIK V. (2010): Távérzékelés 1, Nyugat-magyarországi Egyetem http: http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0027_FOT1/ch01s02.html Lekérdezés időpontja: 2016.06.13.

BÁN I. (1979): Agrofotogrammetria és alkalmazása a mező- és erdőgazdálkodásban, Akadémiai Kiadó, Budapest p. 99-102

BÁN I., BÁDER B. (1968): A légi fényképek felhasználása erdőrendezési munkák során, Az Erdő 18: 356-362. p.

BARTHA G., HAVASI I. (2011): Térinformatikai alapismeretek, Térkép fogalma, méretaránya, tartalma és osztályozása, Miskolci Egyetem Földtudományi Kar, http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0033_SCORM_MFGGT6002/adatok.html Lekérdezés időpontja: 2016.07.16.

BARTHLOTT W., BIEDINGER N., BRAUN G., FEIG F., KIER G., MUTKE J. (1999): Terminological and methodological analysis of the global biodiversity. Acta Bot Fennica 162:103–110

BELÉNYESI M., KRISTÓF D., NEIDERT D. (2008): Távérzékelés a környezetgazdálkodásban Gyakorlatok, Szent István Egyetem, Környezet- és Tájgazdálkodási Intézet, Gödöllő, pp. 15

BERK, A., ANDERSON, G.P., ACHARYA, P.K., HOKE, M.L., CHETWYND, J.H., BERNSTEIN, L.S., SHETTLE, E.P., MATTHEW, M.W., ADLER-GOLDEN, S.M., (2003): MODTRAN4 Version 3, Revision 1, User's Manual, Air Force Research Laboratory, Hanscom AFB, Bedford, MA, U.S.A.

BERKE J., KELEMEN D., KOZMA-BOGNÁR V., MAGYAR M., NAGY T., SZABÓ J., TEMESI T. (2010): Digitális képfeldolgozás és alkalmazásai, Kvark Számítástechnika ISBN 978-963-06-7825-4.

BIAN, L., R. BUTLER (1999): Comparing Effects of Aggregation Methos on Statistical and Spatial Properties of Simulated Spatial Data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing , 65 (1), 73-84

BIN Y., CHUNXIANG C., YING X., XIAOWEN L. (2015): Automatic Classification of Remote Sensing Images Using Multiple Classifier Systems, Mathematical Problems in Engineering Volume 2015, Article ID 954086, 10 p. http://dx.doi.org/10.1155/2015/954086

BLUMENTHAL, D. M., BOOTH, D. T., COX, S. E., FERRIER, C. E. (2007): Large-scale aerial images capture details of invasive plant populations. Rangeland Ecology and Management 60:532-528.

BOOTH D., COX S. (2006): ery-large scale aerial photography for rangeland monitoring. Geocarto International 21:27-34.

BORENGASSER M., HUNGATE W. S., WATKINS R. (2007): Hyperspectral Remote Sensing: Principles and Applications, CRC Press

BORHIDI A. (2007): Magyarország növénytársulásai, Akadémiai Kiadó, http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tkt/magyarorszag/adatok.html Lekérdezés időpontja: 2016.07.24.

BÖLÖNI J., MOLNÁR ZS., BIRÓ M., HORVÁTH F. (2008): Distribution of the (semi-natural habitats in Hungary II. Woodlands and shrublands. Acta Botanica Hungarica 50(Suppl.): pp. 107-148.

BÖLÖNI J., MOLNÁR ZS., KUN A., BIRÓ M. (2007): Általános Nemzeti Élőhely-osztályozási Rendszer Á-NÉR2007, Vácrátót 2007

BRAUN-BLANQUET J. (1964) Pflanzensoziologie. Springer, Berlin/Wien/New York

BROWN D.C. (1966): Decentering Distortion of Lenses. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 32, 444-462. p.

BROWN D.C. (1971): Close-range camera calibration. Photogrammetric Engineering, 37, 854-866 p.

BUNCE R. G. H., BOGERS M. M. B., EVANS D., HALADA L., JONGMAN R. H. G., MUCHER C. A., BAUCH B., BLUST G., PARR T. W., OLSVIG-WHITTAKER L. (2013): The significance of habitats as indicators of biodiversity and their links to species. Ecological Indicators, 33. 19-25. 10.1016/j.ecolind.2012.07.014

CHANDER G., MARKHAM B. (2003): Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges, IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing, VOL. 41, NO. 11, november 2003 in MUCSI L. (2013): Műholdas távérzékelés: Elmélet és gyakorlat, SZTE Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék

CHANDER, G., HELDER D. L, MARKHAM B. L., DEWALD J. D., KAITA E., THOME K. J., MICIJEVIC E., RUGGLES T. A. (2004): Landsat-5 TM Reflective-Band Absolute Radiometric Calibration, IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing, Vol. 42, No. 12, December 2004

CHO W., SCHENK T., MADANI M., (1992): Resampling digital imagery to epipolar geometry. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 29(B3), pp. 404-408.

COLLIN H., CHENGQUAN H., LIMIN Y., BRUCE W., MICHAEL C. (2004): Development of a 2001 National Land-Cover Database for the United States, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 7: 829-840

CONRADY A. E. (1919): Decentering lens systems. Monthly notices of the Royal Astronomical Society, 79, 384-390 p.

CORNELIUS J. M. , REYNOLDS J. F. (1991): On determining the statistical significance of discontinuities within ordered ecological data. Ecology 72:2057–2070

CZIMBER K. (2001): Geoinformatika – elektronikus jegyzet http://geo.emk.nyme.hu/17854.html?&L=1&id=17854&type=0 Lekérdezés időpontja: 2016.04.21.

CSATHÓ A. I. (2009): A mezsgyék természetvédelmi jelentősége és védelmük időszerűsége, Természetvédelmi Közlemények 15, pp. 171-181, 2009

CSONTOS P., TAMÁS J. (2005): Tájidegen fajok által meghatározott spontán erdősödő területek növényzetének vizsgálata, Kanitzia 13: 69-79. Szombathely, 2005

DAILY G. C., SÖDERQVIST T., ANIYAR S., ARROW K., DASGUPTA P., EHRLICH P. R., FOLKE C., JANSSON A. M., JANSSON B. O., KAUTSKY N., LEVIN S., LUBCHENCO J., MÄLER K. G., SIMPSON D., STARRETT D., TILMAN D., WALKER B. (2000): The Value of Nature and the Nature of Value, Science 21 Jul 2000: Vol. 289, Issue 5478, pp. 395-396 DOI: 10.1126/science.289.5478.395

DELI ZS. (2010): A légi hiperspektrális távérzékelés, 4.4 A hiperspektrális távérzékelés alkalmazási területei, Szakdolgozat, Földtudományi Alapszak Térképész-Geoinformatikus Szakirány, Eötvös Loránd Tudományegyetem Földrajz- és Földtudomány Intézet Térképtudományi és Geoinformatikai Tanszék Budapest, pp. 28.

DIAS E., ELIAS R.B., NUNES V. (2004): Vegetation mapping and nature conservation: a case study in Terceira Island (Azores), Biodiversity & Conservation 13(8) pp. 1519-1539.

DOMOKOS GY.NÉ (1984): Fotogrammetria és távérzékelés, Budapesti Műszaki Egyetem, Budapest pp. 64.

ERDAS: Field Guide kézikönyv pp. 282-290.

FAGAN W.F., FORTIN M.-J., SOYKAN C. (2003): Integrating edge detection and dynamic modeling in quantitative analysis of ecological boundaries. Bioscience 53 (8):730-738. In ZALATNAI M. (2008): Alföldi gyeptársulások határainak szerkezete és kapcsolata edafikus háttértényezıkkel, Ph.D. értekezés, Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Kar, Ökológiai Tanszék pp. 10.

FGDC-STD-007.3-1998 Federal Geographic Data Committee, Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy Appendix 3-A. Accuracy Statistics (normative) p. 13-14 https://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/chapter3 Lekérdezés időpontja: 2015.10.23.

FGDC-STD-007.3-1998/GPA: Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy, Federal Geographic Data Committee Secretariat c/o U.S. Geological Survey 590 National Center Reston, Virginia

FLOYD S. F. (1996): Remote Sensing : Principles and Interpretations, Wavwland Press Inc. Los Angeles 494 p.

FORGÓNÉ N. M. (2000): Belvízkár elhárító rendszerek fejlesztésének mezigazdasági megalapozása földrajzi információs rendszerrel, Doktori értekezés, Szent István Egyetem, Gödöllő, pp. 62.

GAUSMAN H. W. (1977): Remote Sensing of Environment In Hobbs R. J., és Mooney H. A. (1990): Remote Sensing of Biosphere Functioning, Springer-Verlag New York Inc.

GEARHART G. A. L. (2011): Comparison of very large scale aerial imagery to ground-based rangeland monitoring methods in the northern mixed prairie, Dissertation, North Dakota State University, 2011, 122 pages; 3479505

GIAN-RETO W., POST E., CONVEY P., MENZEL A., PARMESAN C., BEEBEE T. J. C., FROMENTIN J-M., HOEGH-GULDBERG O., BAIRLEIN F. (2002): Ecological responses to recent climate change, Nature 416, 389-395 (28 March 2002) Doi:10.1038/416389a

GOETZ A.F.H., VANE G., SOLOMON J. E., ROCK B.N. (1985): Imaging Spectrometry for Earth Remote Sensing, Science 7 June 1985, Vol. 228 no. 4704 pp. 1147-1153.

GULYÁS G. (2011): Vegetáció térképezés és mikroklíma elemzés nagy felbontású légifelvételek segítségével, RS&GIS - 2011 / 1. pp. 5-33.

GYÖMÖREY A. (1986): Tavak, tározók és hullámterek növényzetének térképezése légifelvételek alapján, Vízgazdálkodási Tudományos Kutatóközpont, Vízrajzi Intézet, Budapest

HALLA A., LOUISA J., LAMB D. (2003): Characterising and mapping vineyard canopy using high-spatial-resolution aerial multispectral images - Computers & Geosciences, Volume 29, Issue 7, August 2003, Pages 813–822

HARKÁNYINÉ SZ. ZS. (2005): Térképek a környezetvédelemben, SZIE, Gödöllő, 2005

HARTMUT Z. (1997): Comparing the photogrammetric performance of film-based aerial camerasand digital cameras, Photogrammetric Week '97'D. Fritsch & D. Hobbie, Eds.,Wichmann Verlag, Heidelberg, 1997 49-61 p.

HEIPKE C. (1997): Automation of interior, relative, and absolute orientation, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 52:1-19 p.

HELLESEN, T., MATIKAINEN L. (2013): An Object-Based Approach for Mapping Shrub and Tree Cover on Grassland Habitats by Use of LiDAR and CIR Orthoimages. *Remote Sens.* 2013, *5*, 558-583.

HOEKSTRA J. M., BOUCHER T. M., RICKETTS T. H., ROBERTS C. (2005): Confronting a biome crisis: global disparities of habitat loss and protection, Ecology Letters Volume 8, Issue 1 January 2005 Pages 23–29 p.

HONKAVAARA E., MARKELIN L. (2007): Radiometric Performance of Digital Image Data Collection - A Comparison of ADS40/DMC/UltraCam and EmergeDSS, Photogrammetric Week '07 Wichmann Verlag, Heidelberg, 117-129 p.

HORN B. K. P. (1990): Relative orientation, International Journal of Computer Vision January 1990, Vol. 4, I. 1, pp 59–78

HORVÁTH G. (1986): Az Avogadro-szám meghatározása az égbolt kék színéből. A fény szóródása, Fizikai szemle XXXVI. 6. 1986 június p 214 - 227.

INDIANA PHOTOGRAMMETRIC MAPPING SPECIFICATIONS AND SERVICES MANUAL (2013): Indiana Department of Transportation Land & Aerial Survey Office (LASO) Photogrammetric Mapping Specifications and Services Manual November 8, 2013

IS1 (2009): IS1. A nagy terepi felbontású légifelvétel-térképezés szabályzata, Budapest 2009

JÄÄSKELÄINEN E., MANNINEN T., TAMMINEN J., LAINE M. (2016): An Aerosol Optical Depth time series 1982-2014 for atmospheric correction based on OMI and TOMS Aerosol Index, Atmos. Meas. Tech. Discuss., doi:10.5194 2016-180 p.

JUHÁSZ E. (1976): Többszínsávos légifényképezés vízszennyezés felderítésére, Vízügyi közlemények, Budapest, 1976. 1. füzet, p. 139-148.

JUHÁSZ E., MAREK M., STANISZLÁV T., THURNAY B. (1982): Vízügyi Légifényképezési útmutató, pp. 32

KALIFORNIAI LÉGI FELMÉRÉSI SZABÁLYZAT (2006): California Department of Transportation Caltrans • Surveys Manual Photogrammetry Surveys September 2006

KARDEVÁN P. (2011): Hiperspektrális technológia, RS&GIS - 1(1):54 - 64.

KELCEY J., LUCIEER A. (2012): Sensor correction and radiometric calibration of a 6-band multispectral imaging sensor for uav remote sensing, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B1, 2012 XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia

KEMPER G., VASEL R. (2016): Multi sensor and platforms setups for various airborne applications, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLI-B1, 211-215 p.

KERN A. (2011): NDVI vegetációs index előállítása távérzékelt AVHRR és MODIS adatok alapján, Doktori értekezés, Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar 38 p.

KRAUS K., WALDHAUSL P. (1998): Fotogrammetria, Bécsi Műszaki Egyetem Fotogrammetria Tanszék, Tertia kiadó, Budapest 379 p.

KUECHLYA H. U., KYBAA C. C. M., RUHTZB T., LINDEMANNB C., WOLTERA C., FISCHERB J., HÖLKERA F. (2012): Aerial survey and spatial analysis of sources of light pollution in Berlin, Germany, Remote Sensing of Environment Volume 126, November 2012, Pages 39–50

KUNG O., STRECHA C., BEYELER A., ZUFFEREY J-C., FLOREANO D., FUA P., GERVAIX F. (2011): The Accuracy Of Automatic Photogrammetric Techniques On Ultra-Light Uav Imagery, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-1/C22 UAV-g 2011

L1 SZABÁLYZAT (1977): L1 Szabályzat a mérőkamerás légifényképezések megrendelésére, előkészítésére, vizsgálatára és szolgáltatására

LATO M.J. BEVAN G., FERGUSSON M. (2012): Gigapixel Imaging and Photogrammetry: Development of a New Long Range Remote Imaging Technique. *Remote Sens.*2012, *4*, 3006-3021.

LEE, T., és KAUFMAN, Y. J. (1986). Non-Lambertian effects on remote sensing of surface reflectance and vegetation index. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-24(5), 699–708.

LICSKÓ B. (2005): A Paksi Atomerőmű hűtővizének a Dunában történő elkeveredés-vizsgálata légi termovíziós mérésekkel. Céltól a megvalósulásig tudományos konferencia kiadványa (MTA Pécsi TB, Paksi Atomerőmű, MMA 2005. 11. 9-11.)

MARKELIN L. ÉS HONKAVAARA E. (2004): Procedures for radiometric quality control of scanned CIR images. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 35(B1) 249-254

MARX V. (2013): Biology: The big challenges of big data, Nature 498, 255–260 (13 June 2013) doi:10.1038/498255a

MCGLONE C., MIKHAIL E., BETHEL J. (1980): Manual of photogrammetry (1980), pp. 1-1168.

MCKINNEYA M. L., LOCKWOOD J. L. (1999): Biotic homogenization: a few winners replacing many losers in the next mass extinction, Trends in Ecology & Evolution Vol. 14, Issue 11, 1 November 1999, p. 450–453

MOLNÁR ZS., HORVÁTH F., KERTÉSZ M., KUN A.: (1998): A vegetáció térképezésének objektivitása. Kitaibelia 3: 307 -308.

MORGAN J. L., GERGEL S. E., COOPS N. C. (2010): Aerial Photography: A Rapidly Evolving Tool for Ecological Management, BioScience (2010): 60 (1): 47-59. doi: 10.1525/bio.2010.60.1.9

MUCSI L. (2013): Műholdas távérzékelés: Elmélet és gyakorlat, SZTE Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék

MUCSI L., TOBAK Z., LEEUWEN B., SZATMÁRI J., KOVÁCS F. (2008): Analyses of spatial and temporal changes of the urban environment using multi- and hyperspectral data. - Remote Sensing –New Challenges of High Resolution - EARSeL Symposium 2008. Bochum

pp. 275-286. ISBN 978-3-925143-79-3 http://www.earsel.org/workshops/HighRes2008/Artikel/33_Mucsi.pdf Elérés: 2016.07.11.

MULLA D. J. (2013): Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps. Biosystems Eng. 114, p. 358–371

MYEONG S., NOWAK D. J., HOPKINS P. F., BROCK R. H. (2001): Urban cover mapping using digital, high-spatial resolution aerial imagery - Urban Ecosystems, 5(4): pp 243-256

NADAL M. E., BARNES P. Y. (1999): Near Infrared 45 ° /0 ° Reflectance Factor of Pressed Polytetrafluoroethylene (PTFE) Powder, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Volume 104, Number 2, March – April 1999

PAINTER T. H., DOZIER J. (2004): The SAGE Handbook of Remote Sensing p. 218

PÁLFAI I. (1988): Belvízhidrológia. Hidrológiai Közlöny 68. ÉVF. 6. 329 P.

PEDROTTI F. (2013): Plant and Vegetation Mapping, Springer-Verlag Berlin Heidelberg p. 294

PIPER CHEROKEE SIX INFORMATION MANUAL (1973): Handbook Pa-32-300 a Piper Aircraft Corporation Publication Department 761 559, 1973 július

POLI D., TOUTIN T. (2012): Review of developments in geometric modelling for high resolution satellite pushbroom sensors, The Photogrammetric Record, Special Issue: IAN Dowman Retirement Symposium Volume 27, Issue 137, pp. 58–73, March 2012, Version of Record online: 9 FEB 2012 DOI: 10.1111/j.1477-9730.2011.00665.x

PŐDÖR A. (2010): Kartográfia + Webmapping 1., A térképek tartalma és jellege, Nyugat-magyarországi Egyetem http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0027_KAR1/index.html Lekérdezés időpontja: 2016.07.16.

RÁDAI Ö. (1978): Légifotó-értelmezés a vízügyi gyakorlatban, 4.2.5.1 A jel-háttér viszony, Vízügyi Műszaki Gazdasági Tájékoztató 106. sz. Vízügyi Dokumentációs és Továbbképző Intézet, Budapest, p. 130.

RAHMAN H., DEDIEU G. (1994): SMAC: a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum, International Journal of Remote Sensing, Volume 15, Issue 1, 1994

RETZLAFF R. (2016): On the Potential of Small UAS for Multispectral Remote Sensing in Large-Scale Agricultural and Archaeological Applications, Doktori értekezés, Trier p. 77-80.

ROSE R. A., BYLER D., EASTMAN J. R., FLEISHMAN E., GELLER G., GOETZ S., GUILD L., HAMILTON H., HANSEN M., HEADLEY R., HEWSON J., HORNING N., KAPLIN B. A., LAPORTE N., LEIDNER A., LEIMGRUBER P., MORISETTE J., MUSINSKY J., PINTEA L., PRADOS A., RADELOFF V. C., ROWEN M., SAATCHI S., SCHILL S., TABOR K., TURNER W., VODACEK A., VOGELMANN J., WEGMANN M., WILKIE D.,

WILSON C. (2015): Ten ways remote sensing can contribute to conservation, Conservation Biology 29(2):350-359

RUPNIK E., NEX F., TOSCHI I., REMONDINO F. (2015): Aerial multi-camera systems: Accuracy and block triangulation issues, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Volume 101, March 2015, 233–246 p.

SCHENK A., HUNZIKER M., KIENAST F. (2007): Factors influencing the acceptance of nature conservation measures — A qualitative study in Switzerland, Journal of Environmental Management 83(1): 66-79

SCHOWENGERDT R. A. (2006): Remote Sensing: Models and methods for image processing, Academic Press

SCHUUR E. A. G., ABBOTT B. (2011): Climate change: High risk of permafrost thaw, Nature 480, 32–33 (01 December 2011) doi:10.1038/480032a

SHENG Y., GONG P., BIGING G. S. (2003): True Orthoimage Production for Forested Areas from Large-Scale Aerial Photographs, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Number 3(8):259-266

SÍKHEGYI F., TISZA A., UNGER Z., RÁDAI Ö., LICSKÓ B., TAMÁS J., SZERK: NÉMETH T. (2001): II. A légifényképek és űrfelvételek készítésével kapcsolatos elméleti alapok, Kármentesítési útmutató 3, Útmutató a felszin alatti vizeket és a földtani közeget károsító területhasználatok és szennyezőforrások távérzékelési módszerekkel történő számbavételéhez, Környezetvédelemi Minisztérium, 2001 http: http://www.kvvm.hu/szakmai/karmentes/kiadvanyok/karmutmutato3/karmutm3-1.htm

SPECIFICATION FOR AERIAL SURVEY PHOTOGRAPHY, CANADA, 1982: Interdepartmental Committee on Air Surveys p. 5.

SPILIOTOPOULOS M., LOUKAS A., MYLOPOULOS N., TOULIOS L., STANCALIE G. (2014): Investigation of spatial relationships between crop coefficients and specific ground based vegetation indices for Karla watershed, Greece, Published in SPIE Proceedings Vol. 9229: Second International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2014)

STRAND E. J. (1998): Shapefiles Shape GIS Data Transfer Standards, GIS World, Vol. 11, No. 5, pp. 28.

STRAYER D.L., POWER M.E., FAGAN W.F.S., PICKETT T.A., BELNAP J. (2003): A classification of ecological boundaries. Bioscience 53 (8): 723-729. In ZALATNAI M. (2008): Alföldi gyeptársulások határainak szerkezete és kapcsolata edafikus háttértényezőkkel, Ph.D. értekezés, Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Kar, Ökológiai Tanszék

SUÁREZ J. C., ONTIVEROSA C., SMITH S., SNAPE S. (2005): Use of airborne LiDAR and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry - Computers & Geosciences, Volume 31, Issue 2, March 2005, Pages 253–262

SZALAY D. K. (2014): Távérzékelésre és spektroszkópiára alapozott őszi búza fajtaazonosító eljárás, Doktori (Ph.D.) értekezés Szent István egyetem, Gödöllő

TEMPELMANN U, BÖRNER A-, CHAPLIN B., HINSKEN L., MYKHALEVYCH B., MILLER S., RECKE U., REULKE R., UEBBING R. (2000): Photogrammetric software for the lh systems ADS40 airborne digital sensor, International archives of Photogrammetry and Remote Sensing Vol. 33, Part B2, Amsterdam, Netherlands, pp. 552-559.

TÍMÁR G., MOLNÁR G. (2013): Térképi vetületek és alapfelületek, Eötvös Loránd Tudományegyetem

TOBAK Z. (2013): A városi felszín vizsgálata nagy térbeli és spektrális felbontású légifelvételek felhasználásával, Doktori (PhD) értekezés, Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Kar Földtudományok Doktori Iskola Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, p. 11

TRAUTMANN W. (1966): Erlauterungen zur Karte der potentiellen nat€urlichen Vegetation der Bundesrepublik Deutschland 1:200,000. Blatt 85 Minden. Schriftenr Vegetationsk 1:1–137

TUBA Z., SZERDAHELYI T., ENGLONER A., NAGY J., (szerk.) (2007): Botanika III., 1.5. Mintavételi egységek nagysága egy adott társulás állományban, Nemzeti Tankönyvkiadó Zrt., p. 578.

TUIA D., RATLE F., PACIFICI F., KANEVSKI M. F., EMERY W. J. (2009): Active Learning Methods for Remote Sensing Image Classification, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.47 , I.7 p. 2218 - 2232

TÚRI Z. K. (2015): A tájszerkezet geoinformatikai módszereinek elemzése alföldi mintaterületeken, PhD értekezés, Debrenceni Egyetem, Földtudományi Doktori Iskola

VARGA ZS. (2016): Különböző felbontású légi- és űrfelvételek pontosságvizsgálata geodéziai referencia mérések alapján, Egyetemi doktori (PhD) értekezés, Debreceni Egyetem Természettudományi Doktori Tanács Földtudományok Doktori Iskola Debrecen, 146 p.

VÉGSŐ F. (2010): Térinformatikai alkalmazások 6., Önkormányzati térinformatikai alkalmazások, Nyugat-magyarországi Egyetem

VERMOTE E., TANRÉ D., DEUZÉ J.L., HERMAN M., MORCRETTE J.J. (1997): Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S), Users Guide.

VERŐNÉ WOJTASZEK M. (2010): Fotointerpretáció és távérzékelés 5., Távérzékeléssel szerzett adatok számítógépes kiértékelése, Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai

Kar, http: http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0027_FOI5/ch01s02.html Lekérdezés időpontja: 2016.06.20.

WILLIAMS E. T. (1966): State Guides for Assessing Forest Land and Timber, Uneted States Department of Agriculture Forest Service, p. 1056-1061

WILLSON R. G., SHAFER S. A. (1993): What is the Center of the Image? Avionics Laboratory, Wright Research and Development Center, Avionics Laboratory, Wright Research and Development Center, Aeronautical Systems Division (AFSC), U.S. Air Force, WrightPatterson AFB, New York

WILSON E. O. (1988): Biodiversity, National Academy Press, Washington D. C. National Academy of Sciences, pp. 408.

WULDER M. A., WHITE J. C., COGGINS S., ORTLEPP S. M., COOPS N. C., HEATH J., MORAA B. (2012): Digital high spatial resolution aerial imagery to support forest health monitoring: the mountain pine beetle context, Journal of Applied Remote Sensing 062527-1 Vol. 6, 2012 pp. 1-10

YALCIN G., SELCUK O. (2014): 3D City Modelling with Oblique Photogrammetry Method, Procedia Technology Volume 19, 2015, Pages 424-431, 8th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2014, 9-10 October 2014, Tirgu Mures

ZALATNAI M. (2008): Alföldi gyeptársulások határainak szerkezete és kapcsolata edafikus háttértényezőkkel, Ph.D. értekezés, Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Kar, Ökológiai Tanszék

ZHANG C., ELAKSHER A. (2012): An Unmanned Aerial Vehicle-Based Imaging System for 3D Measurement of Unpaved Road Surface Distresses, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering Volume 27, Issue 2, February 2012 118–129 p.

ZHANG J., (2010):, Multi-source remote sensing data fusion: status and trends, International Journal of Image and Data Fusion, 1(1), 5–24.

10.14751/SZIE.2017.015

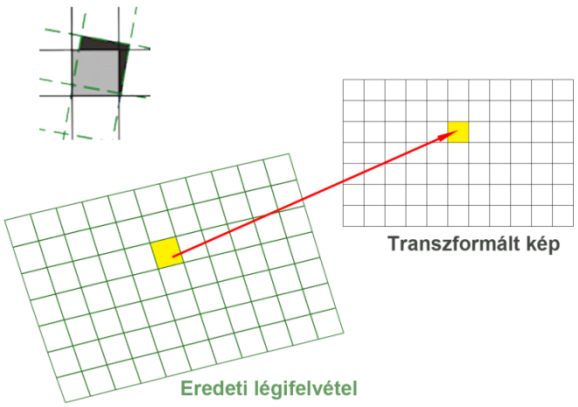
9 FÜGGELÉK

10.14751/SZIE.2017.015

1. melléklet

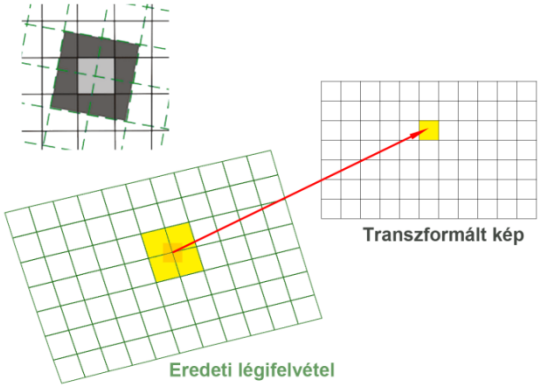
Újramintavételezési metódusok

A **legközelebbi szomszéd** (nearest neighbour) interpoláció az eredeti ponthoz legközelebb található pixel intenzitás értékével tölti fel a célpixelt (Wojtaszek 2010). Bár a számítási kapacitás igénye alacsony, a pixel akár fél pixel mérettel is eltolódhat, ami ráadásul az egyeneseken „recés" hatást kelt. Szintén lényeges probléma, hogy a kiinduló kép egyes pixelei duplázódhatnak, mások elveszhetnek.



A legközelebbi szomszéd módszerének elve

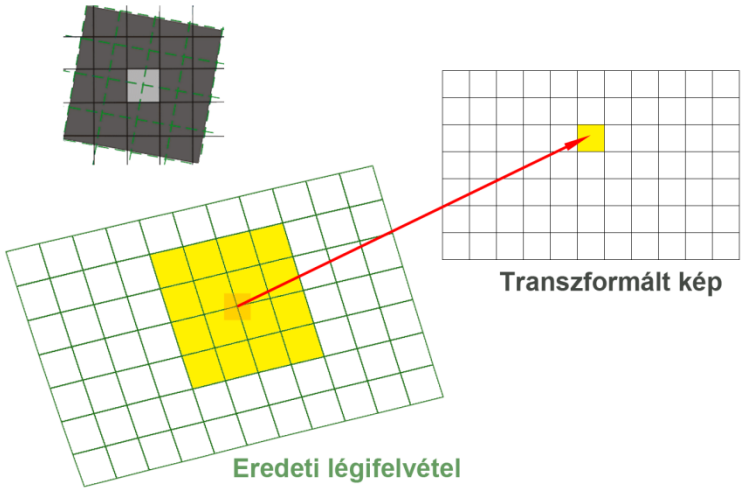
A **bilineáris transzformáció** (bilinear interpolation) során a célpixel értékét a szoftver a transzformált koordinátákhoz legközelebb eső négy kiinduló pixelből számítja (Bian and Butler, 1999). A visszatranszformálást követően a négy szomszédos pixelérték alapján két lineáris interpolációval történik a hozzárendelés. Bár a térbeli elcsúszások nem jelentkeznek olyan mértékben, mint a legközelebbi szomszéd módszernél, és az egyenesek éle is természetes hatású marad, a kiindulási kép kontrasztja csökken.



A bilineáris transzformáció elve

A **köbös konvolúcis újramintavételezés** (cubic convolution vagy kétváltozós, harmadfokú polinomok módszere) a transzformált koordinátákhoz legközelebb eső 4x4-es pixel csoport értékeiből (tizenhat pixel értékei) számítja a kimeneti pixel intenzitás értékét (Baboo és

Devi 2010). A kimeneti pixelértékek átlaga és szórása közelebb áll az eredetiekéhez. Az újramintavételezési eredmény pixeleinek intenzitás értékei és a kép geometriája is jobban közelíti a eredeti kép tartalmát, ugyanakkor az elemi képpont értékek módosulása itt sem küszöbölhető ki. A konvolúciós eljárás lényege az, hogy az újramintavételezett kép pixelrács-hálóját az eredeti képre helyezi, és az eredménypixelek értékét az eredeti pixelértékeknek a területtel súlyozott átlagaként határozza meg (Tímár és Molnár 2013).



A köbös konvolúció elve

A **kettős köbös spline** (bicubic spline) módszer a deffiniált pontokban (GCP) a görbéhez való teljesen pontos illeszkedést eredményez, kiküszöbölve minden ingadozását, ami a többi módszer esetében kialakulhat, ugyanakkor az így kiküszöbölt torzítás az illesztő pontoktól távoli területeken érvényesülhet (Erdas: Field Guide kézikönyv).

2. melléklet

Az eredeti távérzékelt térképi állományok pontossági analízise

Az ellenőrzőpontok kijelöléséhez szabályos raszter hálózatot kell generálni a munkaterületre, amelynek sarokpontjai képezik az ellenőrzőpontok ideális elhelyezkedését. Ezeken a helyszíneken azonban nem minden esetben lehet geodéziai mérést végezni (például egy tóra vagy elzárt területre esik a pont ideális eloszlás szerinti helye), ráadásul a térképen – aminek geometriai pontosságát ellenőrizni szeretnénk – nem biztos, hogy ezeken a helyeken találunk a terepen könnyen beazonosítható és a térképen is jól látható, határozott sarokponttal, vagy jól bemérhető középponttal rendelkező földfelszíni objektumot. Ezért a raszter hálózatból adódó ideális pontfelvételi helyekhez legközelebb eső, pontosan bemérhető földfelszíni objektumokat alkalmazzuk. 1 km^2-nél nagyobb munkaterület esetében legalább 15 ellenőrző pont felvétele javasolt. A Légi Térképészeti és Távérzékelési Egyesület Szakmai Bizottsága 25 km^2 nagyságú egybefüggő munkaterület esetében legalább 40 ellenőrző pont felvételét javasolja, szintén arányos eloszlásban. Amennyiben az alkalmazott légi felmérési technológia a munkaterület szélein nem biztosít a belső részekkel azonos minőségű terméket, ott a szélső, csökkent geometriai minőségű terület pontatlanságát is jelezni kell. Az ellenőrző pontok hibája nem lehet nagyobb 5 centiméternél, és célszerű a termék terepi felbontás értékénél legalább négyszer pontosabb ellenőrzőpontokat alkalmazni. A jó minőségű geodéziai GPS készülékek, RTK korrekcióval, megfelelő ionoszféra állapot és ideális terepmorfológia mellett általában 2,5 cm síkrajzi és 12 cm magassági eltérésen belül használhatóak Magyarországon, így a nagy terepi felbontású termékektől operatív körülmények között nem várható el 2 pixel relatív hibánál jobb geometria (Bakó et al. 2014a). Az ellenőrző pontok pontossága a legegyszerűbben ismételt beméréssel ellenőrizhető. Ez megvalósítható másik napon történő újraméréssel, vagy például két különböző berendezésparkot alkalmazó GNSS szolgáltatás igénybevételével történő ismételt méréssel is.

Az ortofotón lokalizálható pont és a terepi helye közötti síkrajzi eltérés a négyzetes közép eltérés négyzetgyökének (RMSE, Root Mean Square Error) értékeként is megadható. Ez az x és y komponensekre a következő egyenlettel számolható:

$$RMSE\ X = \sqrt{\frac{|X_1 - x_1| + |X_n - x_n|}{n}} \qquad RMSE\ Y = \sqrt{\frac{|Y_1 - y_1| + |Y_n - y_n|}{n}}$$

ahol RMSE X az x irányú átlagos négyzetes hiba gyöke, X a terepen többször bemért ellenőrzőpont X koordinátáinak átlaga, x az ortofotón lokalizált pont x koordinátája, n pedig az ellenőrzőpontok elemszáma.

Amennyiben az adatsor nem az ellenőrzőpontok koordinátáinak rendezésével készül el, hanem egy térinformatikai szoftver vonalzó eszközével mérjük le a horizontális távolságot a megnyitott ellenőrzőpont vektor és a raszteres terméken látható helye között, a képlet így módosul:

$$RMSE\ h = \sqrt{\frac{E_1 + E_n}{n}}$$

ahol ***RMSE h*** a síkrajzi hiba, E a vektorgrafikus ellenőrzőpont és az ellenőrzésre kijelölt raszteres terméken megtalálható pont távolsága, n az ellenőrzőpontok száma.

Ebben az esetben is kiemelt figyelmet kell fordítanunk a magas kontrasztú mérési helyek (pl. fehér és sárga útburkolati jelek) túlsugárzására, a pontos mérés gyakorlati kivitelezésére.

A magassági modellen lokalizálható pont és terepi helyén mért tengerszintfeletti magasság közötti magassági eltérés szintén megadható a négyzetes közép eltérés négyzetgyökeként:

$$RMSE\ Z = \sqrt{\frac{|Z_1 - z_1| + |Z_n - z_n|}{n}}$$

ahol RMSE Z az átlagos négyzetes magassági hiba gyöke, Z a terepen többször bemért ellenőrzőpont magassági adatainak átlaga, z az ortofotón lokalizált pont magassági adata, n pedig az ellenőrzőpontok elemszáma.

A **horizontális maradék ellentmondás** (RMSE h) a következő képlettel számítható:

$$RMSE\ h = \sqrt{RMSE\ Y^2 + RMSE\ X^2}$$

Nemzetközileg elfogadott, és hazánkban is bizonyítást nyert, hogy a CE95 alkalmas eljárás a digitális ortofotók vízszintes koordinátáinak pontossági vizsgálatára (Varga 2016). A horizontális maradék ellentmondás megbízhatósága 95% konfidencia szinten:

$$\text{CE95} = RMSE\ h \cdot 1{,}7308 = 1{,}7308 \sqrt{RMSE\ Y^2 + RMSE\ X^2}$$

A vertikális maradék ellentmondás (RMSE v) megegyezik a RMSE Z értékével.

Megbízhatóság$_h$ 95% konfidencia szinten a következő módon számolható:

$$RMSE\ v(95) = RMSE\ v \cdot 1{,}96$$

Fontos közölni a síkrajzi átlaghibát (Average Horizontal Circular Error), amely a következő képlettel írható le:

$$\mathrm{HCE_a} = \frac{\sqrt{|X_1 - x_1| \cdot |Y_1 - y_1|} \cdot \sqrt{|X_n - x_n| \cdot |Y_n - y_n|}}{\mathrm{n}}$$

Az egyes ellenőrzési helyek síkrajzi hibája a következő képlettel számítható ki az x és y irányú komponensek ismeretében:

$$\mathrm{HCE_n} = \sqrt{|X_n - x_n| \cdot |Y_n - y_n|}$$

A térkép legnagyobb feltárt síkrajzi hibája az ellenőrzési helyekre az előző képlettel kiszámított értékek közül a legnagyobb.

Amennyiben az adatsor nem az ellenőrzőpontok koordinátáinak rendezésével készül el, hanem egy térinformatikai szoftver vonalzó eszközével mérjük le a horizontális távolságot a következő képlet alkalmazható:

$$HCEa = \frac{E_1 + E_n}{n}$$

ahol E a vektorgrafikus ellenőrzőpont és az ellenőrzésre kijelölt raszteres terméken megtalálható pont távolsága, n pedig az ellenőrzőpontok száma.

A maximális síkrajzi eltérés a legnagyobb előforduló horizontális hibát adja meg. Jele: HCEmax.

A magassági értelemben vett átlagos hiba jele VEa, és a következő módon számítható ki:

$$\mathrm{VEa} = \frac{|Z_1 - z_1| + |Z_n - z_n|}{n}$$

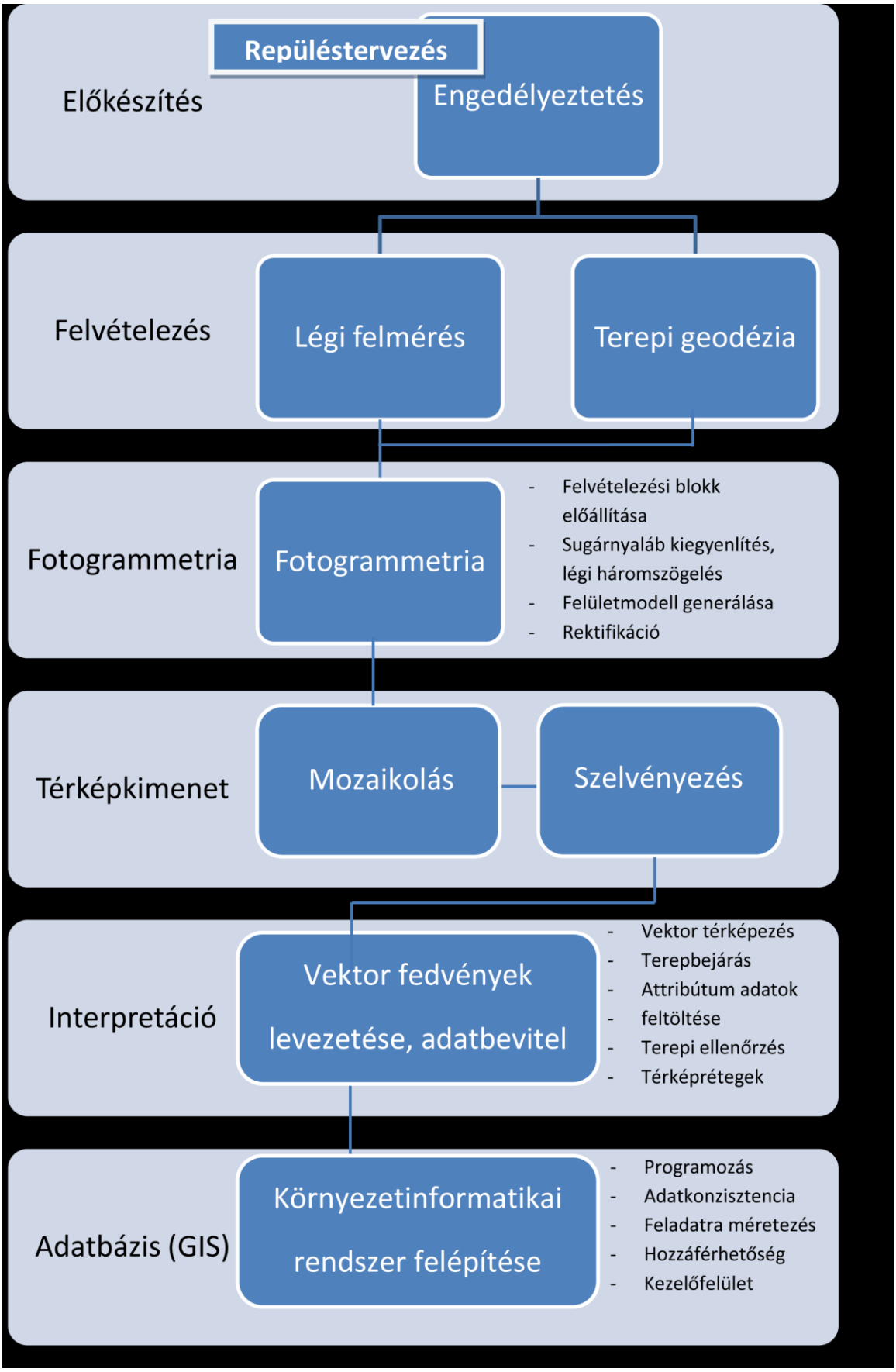
A maximális magassági eltérés (VEmax) a háromdimenziós modellben előforduló legnagyobb vertikális hiba.

A jegyzőkönyvben meg kell még adni az ellenőrzőpontok számát, az ellenőrzőpontok sűrűségét és a szabályos eloszlást ábrával is alátámasztva, a munkaterület méreteit, valamint az ellenőrzőpontok bemérésének módját és azok becsülhető megbízhatóságát. Célszerű megadni az adatsort, amely tartalmazza az eltérések adatait.

10.14751/SZIE.2017.015

3. melléklet

A légi távérzékelési munkafolyamat



4. melléklet

Piper Pa 32 Cherokee Six fontosabb adatai

Repülőgép típus	Piper PA-32 Cherokee Six 300	
Méretek	**Hosszúság:**	8,40 m
	Magasság:	2,40 m
	Szárnyfesztávolság:	10,00 m
Szárnyfelület		16,21 m^2
Sebesség	**Átesési sebesség**	35 m/s
	Max speed:	285 km/h
	Leggyakrabban alkalmazott felmérési sebesség	180 - 260 km/h
	Gazdaságos sebesség	225 km/h
	Emelkedési sebesség	5 m/s
Hatótávolság	**Póttartályokkal (minimális hasznos terhelés és maximális üzemanyag feltöltés esetén)**	1361 km
	Maximális terhelés mellett	1100 km
Repülési magasság	**Maximális repülési magasság**	4950 m
	Felmérési munkamagasság	500 - 3200 m
Terhelhetőség	**Üres tömeg**	827 kg
	Maximális felszálló tömeg	1250 kg
Személyzet		1-3 fő
Kabin méretei	**Hosszúság**	3,02 m
	Legnagyobb szélesség	1,24 m
	Legnagyobb magasság	1,23 m
Műszeraknák	2 padlólemez akna: 210 * 360 mm és 190 x 34 mm, 3 oldalsó nyílás: 2 130 x 150 mm és egy 940 x 800 mm	
A felmérő eszközökhöz rendelkezésre álló energiaforrások		1.44 kW 24 V DC 12 V DC

A vizsgálataink során leggyakrabban alkalmazott Piper Pa 32 Cherokee Six alsószárnyas elrendezésű egymotoros repülőgép fontosabb adatai (Piper Cherokee Six Information Manual 1973 és saját tapasztalatok alapján).

10.14751/SZIE.2017.015

5. melléklet

A halásztelki mintaterület adatai m^2-ben kifejezve

Adott terepi felbontás esetén a halásztelki mintaterületen lehatárolható felszínborítási kategóriák által fedett felszíni terület mérete négyzetméterben kifejezve

Felszínborítási kategória neve	10 cm / 1 pixel	20 cm / 1 pixel	50 cm / 1 pixel
1. Épülettel fedett felület	1.151,37	887,46	539,64
2. Aszfalt vagy beton burkolat	13.967,98	16.484,36	18.580,93
3. Földút	31.175,64	21.406,16	11.652,45
4. Kopár Földfelszín	11.609,42	13.990,63	29.729,88
5. Illegális hulladéklerakó	2.553,43	198,05	-
6. Táblás mezőgazdasági területek	209.737,55	369.045,93	377.890,14
7. Tábla közti gyomos sáv	35.893,61	3.957,75	-
8. Kaszált rét	249.787,11	228.492,65	224.721,85
9. Legelő	236.909,98	107.240,48	87.019,24
10. Felhagyott mezőgazdasági t.	90.076,10	69.340,78	48.737,24
11. Rét	2.310,95	485,07	170,73
12. Nedves rét	36.589,41	28.398,04	28.217,61
13. Gát gyeppel, gyepszőnyeg lejtős területen	37.445,66	46.722,48	68.681,94
14. Lombos fák és facsoportok lombkoronája által fedett terület	668.777,49	694.084,67	690.983,92
15/1. Fűzfafélék	5.242,57	9.241,21	12.680,40
15/2. Fehér akác (galériaerdőn kívül)	313.538,58	300.807,57	311.406,92
15/3. Lepényfa	44,71	106,91	-
15/4. Közönséges dió	9,94	13,71	-
15/5. Különböző nyárfák lombja által fedett terület	22.214,99	24.689,82	27.691,68
15/6. Galériaerdő	333.941,09	331.183,63	317.674,59
15/6/1. Ebből vízparti nyaras füzes	309.909,82	308.611,12	-
15/6/2. Fehér akácos a galériaerdőben	24.031,27	22.572,51	-
16. Bebokrosodó cserjés	70.343,90	71.906,59	77.747,47
16/1. Keskenylevelű ezüstfa	35.693,59	37.128,95	31.114,11
16/2. Galagonya	842,80	610,61	203,33
17. Vízparti kopárok	6.903,46	3.719,99	12.893,11

10.14751/SZIE.2017.015

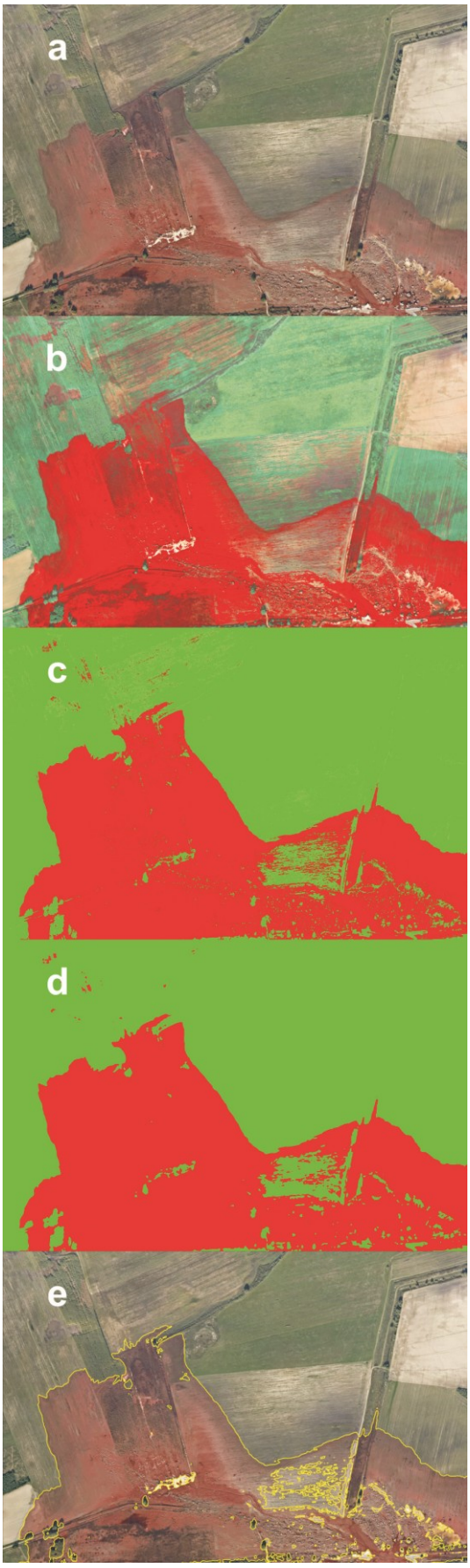
Adott terepi felbontás esetén a halásztelki mintaterületen légifelvétel-mozaikja alapján lehatárolható néhány felszínborítási kategória által lefedett egybefüggő területek száma, és a legkisebb egybefüggő földfelszíni folt területe négyzetméterben kifejezve

Felszínborítási kategória neve	10 cm / 1 pixel		20 cm / 1 pixel		50 cm / 1 pixel	
	db	m^2	db	m^2	db	m^2
Épülettel fedett felület	40	3,54	18	1,00	4	53,24
Aszfalt vagy beton	54	1,00	12	52,76	5	71,98
Földút	36	1,00	11	43,51	3	854,79
Kopár földfelszín	50	5,84	14	17,38	8	14,39
Illegális hulladéklerakó	10	18,47	2	57,98	0	0
Mezőgazdasági táblák	36	137,81	6	10.182,28	4	8.537,58
Tábla közti gyomos sáv	15	1,00	4	405,27	0	0
Kaszált rét	25	1,00	15	78,19	8	146
Legelő	15	251.5 ,30	9	54,91	5	16,22
Rét	12	5,47	5	7,02	2	10,72
Nedves rét	13	12,90	5	454,43	4	1.144,04
Lombos fák vegyesen	91	1,96	21	16,88	16	20,24
Fűzfafélék	19	16,12	2	2.402,06	1	12.680,4
Fehér akác a galériaerdőn kívül	46	11,34	18	22,51	13	189,06
Lepényfa	2	15,90	1	106,91	?	?
Közönséges dió	1	9,94	1	13,71	?	?
Galériaerdő	12	20,39	4	106,91	3	62,64
Bebokrosodó cserjés	40	2,69	15	103,89	8	1.528,09
Keskenylevelű ezüstfa	253	1,19	135	4,82	34	10,6
Galagonya	36	1,00	13	12,06	3	30,36
Különböző nyár fajták	31	3,71	25	34,29	8	240,44
Vízparti kopárok	13	1,00	7	539,06	5	824,86

10.14751/SZIE.2017.015

6. melléklet

Az osztályozási folyamat lépései a 2010.10.11-i ortofotó részletén



a - RGB ortofotó

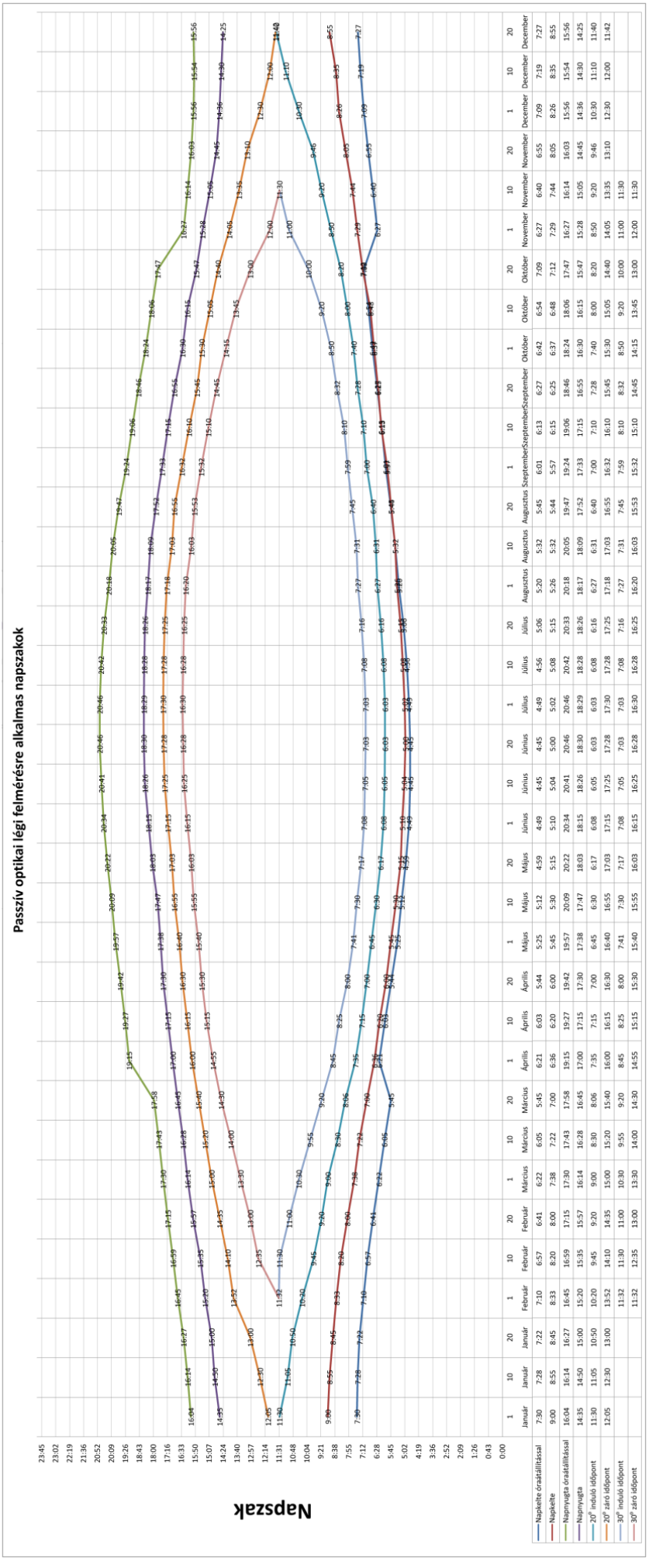
b - Előfeldolgozás

c - Tanulóterületes osztályozás eredménye

d - Zajszűrés eredménye

e - A vektorizálás eredménye

7. melléklet



Az alkalmas napszakokat ábrázoló diagram

(Bakó G. az Országos Meteorológiai Szolgálat adatai alapján).

8. melléklet

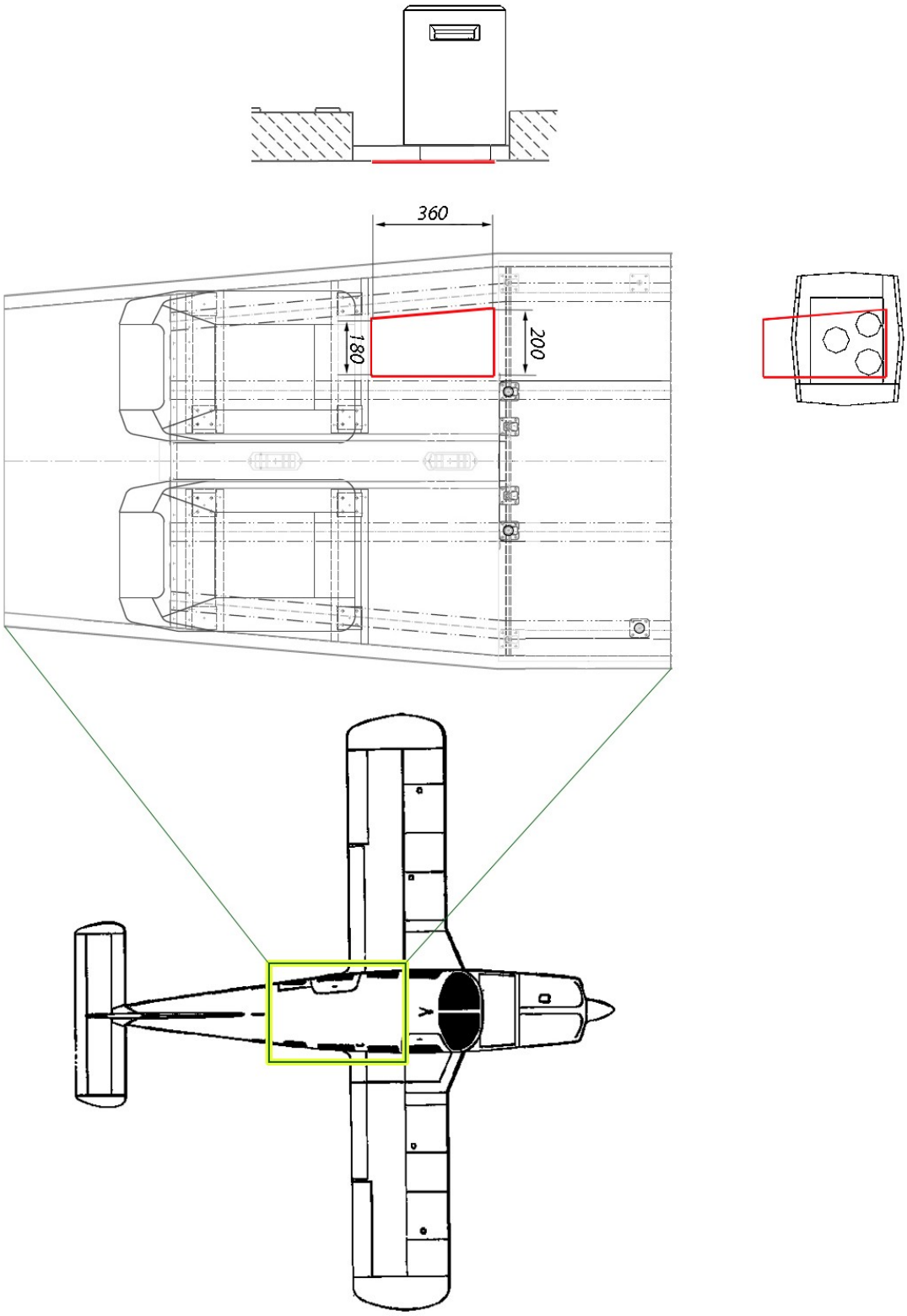
Az IS mérőkamera sorozat fontosabb adatai

Típus	**INTERSPECT IS 3**	**INTERSPECT IS 4 MS I**	**INTERSPECT IS 4 MS II**	**INTERSPECT IS 4 SCMC**
Besorolás	multispektrális mérőkamera	multispektrális mérőkamera	multispektrális mérőkamera	moduláris fotogrammetriai mérőkamera
Tervezési cél	Az első magyar digitális multispektrális mérőkamera	Nagy terepi felbontás elérése	Extrém nagy terepi felbontás elérése	Nagy kiterjedésű területek gyors felmérése
Terepi felbontás	1 - 100 cm	1 - 100 cm	0,5 - 100 cm	4 - 50 cm
RGB képfelbontás	6040 × 4032 pixel (24 MP)	7354 x 4898 pixel (36 MP)	7354 x 4898 pixel (36 MP)	(8984 x 6732) 60,5 MP * 5 15811 x 11713 pixel (185 MP)
MS képfelbontás	(3872 x 2592) 10 MP	6016 x 4000 pixel (24 MP)	7354 x 4898 pixel (36 MP) (eleinte 3872 x 2592)	-
Képpont m.	6 μm	5 μm	4,89 μm	6 μm
Csatornák	6	6	6	3
Csatornák spektruma	R; G; B; NIR-1; NIR-2; 425 –1180 nm	UV; R; G; B; NIR-1; NIR-2 356 –1150 nm	UV; R; G; B; NIR-1; NIR-2 356 –1150 nm	RGB 425 - 670 nm
Radiometriai felbontás	14 bit	14 bit	14 bit	14 bit
Szenzor	CCD	CMOS	CMOS és CCD	CCD
Kiolvasás	Nagysebességű 5-7 f/se (2 f/sec ∞)	Nagysebességű 4 f/sec és 2 (f/sec ∞)	Nagysebességű 5-7 f/se (3 f/sec ∞)	Nagyfelbontású (1,7 fp/s)
Méretek	370 x 300 x 210 mm	388 x 310 x 470 mm	388 x 310 x 464 mm	520 x 410 x 310 mm
Min. záridő	1/4000	1/8000	1/8000	1/4000
Tömeg	12 kg	46 kg	74 kg	80 kg
Teszteredmé-nyek	Szolgáltatásba bevont kamerarendszer	Tesztrepüléseken átesett, szolgáltatásba bevont kamerarendszer	Tesztrepüléseken átesett, szolgáltatásba bevont kamerarendszer	Csak terv formájában létező, részegységeiben tesztelt kamerarendszer

10.14751/SZIE.2017.015

9. melléklet

Az IS4 elhelyezkedése a Piper Pa 32 Cherokee Six repülőgépben

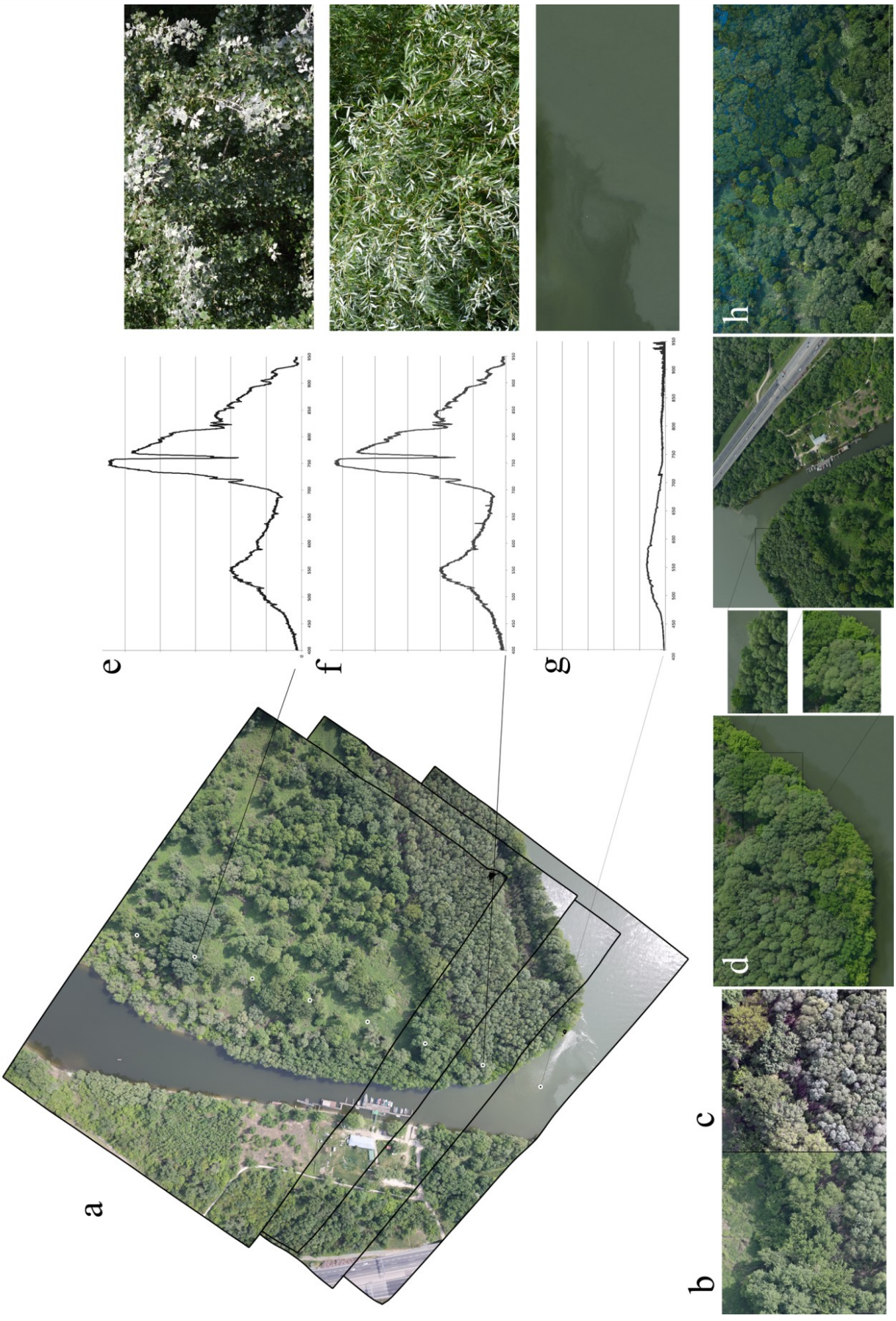


10. melléklet

0,5 cm terepi felbontású Interspect IS 3 multispektrális ortofotó kicsinyített RGB és CIR kompozitjának részlete. A színes infravörös felvételen a klorofiltartalom alapján könnyebben elkülöníthetőek a kátrány és mohafoltok (Bakó 2012d).

11. melléklet

A kísérleti kamerarendszer felvételei

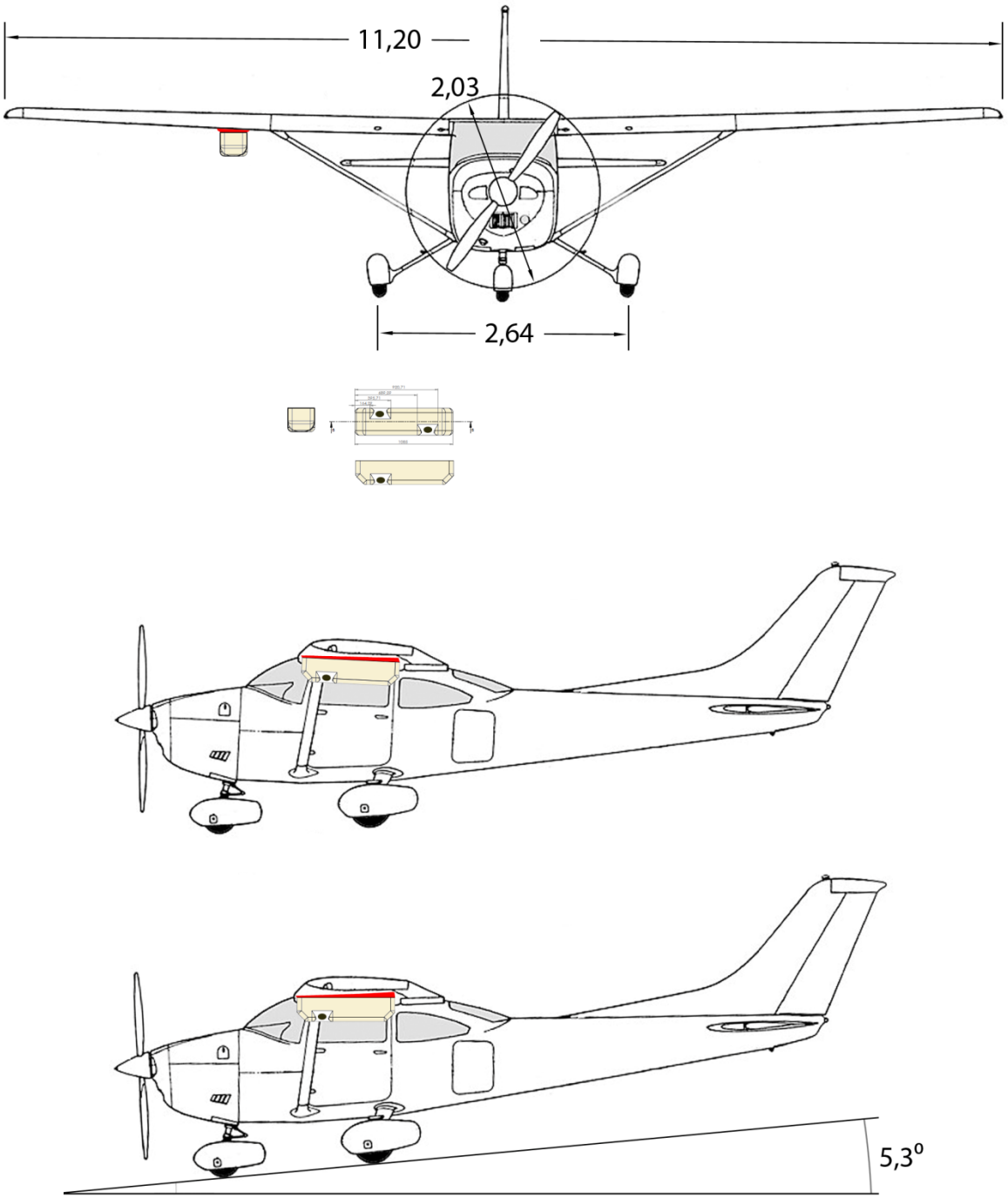


Az a. jelű ábra a négy ortofotó a képkészítési blokkból, a b. jelű a közegkorrekció előtti, a c. a közegkorrekció utáni felvételrészletet szemlélteti, a d. a madártávlati ortofotó mozaik részleteit mutatja két irányból, az e. a nyár, az f. a fűz, a g. a vízfelület spektrális görbéjét jeleníti meg az adott képkészítési helyek alapján, helyszíni vagy közeli légi fényképen bemutatva a felületet. A h. jelű ábra a

10.14751/SZIE.2017.015

12. melléklet

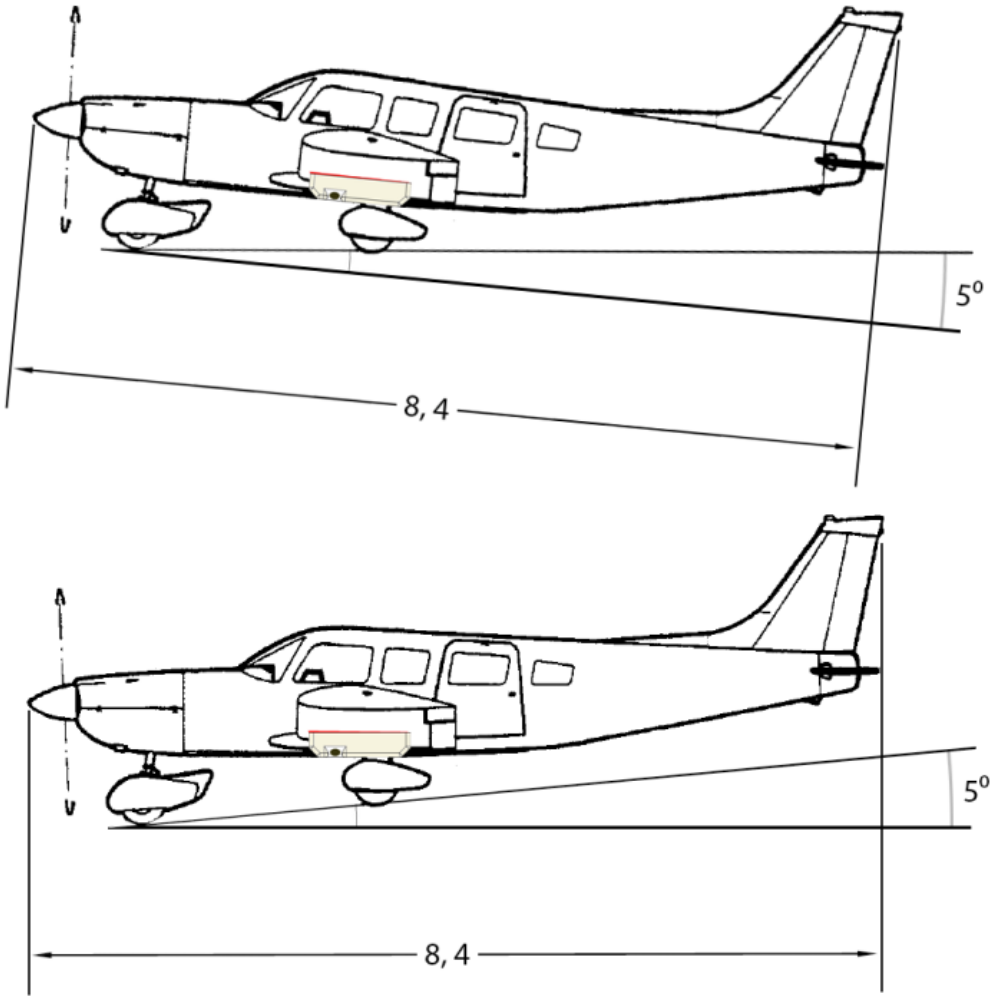
Az IS5 felfüggesztési terve Cessna 182 repülőgép esetén



10.14751/SZIE.2017.015

13. melléklet

Az IS5 felfüggesztési terve Piper Pa 32 Cherokee Six esetén

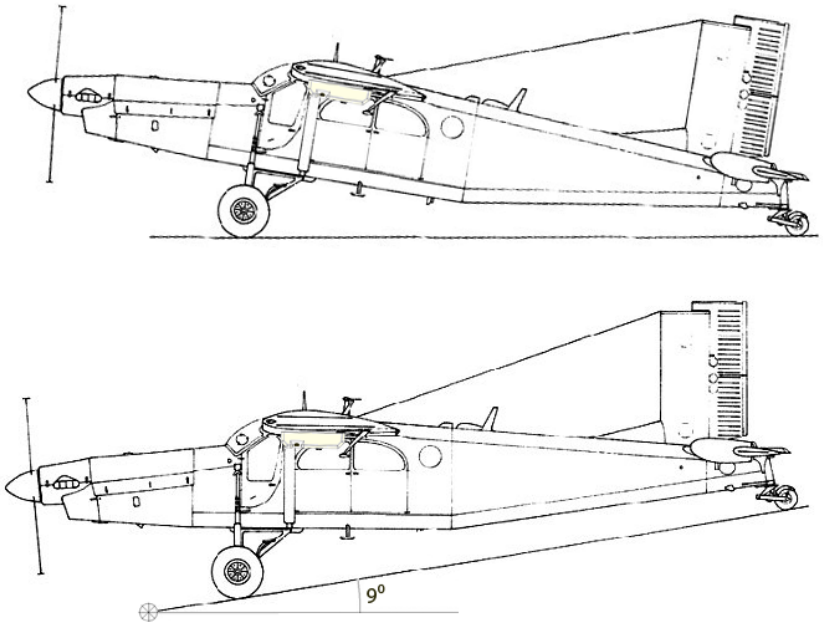


Interspect IS5 repülőgép fedélzeti adatgyűjtő rendszer elhelyezése Pa 32 alsószárnyas repülőgépen

10.14751/SZIE.2017.015

14. melléklet

Az IS5 felfüggesztési terve Pilatus PC-6 Turbo Porter esetén



10.14751/SZIE.2017.015

15. melléklet

Néhány terepi és légi részlet a Háros-félsziget 1. mintaterületén

Nyárfák az ortofotón és a terepen közel azonos időpontban

Hamvas szeder (Rubus caesius) terepen és az ortofotón

Vénic szil (Ulmus laevis) terepen és az ortofotón

Zöld juhar (Acer negundo) a terepen és az ortofotón

Zöld juhar és nyár egyedek a félsziget déli csúcsánál

10.14751/SZIE.2017.015

16. melléklet

Légifelvétel kiértékelési segédlet
a felmérés terepi felbontásának helyes megválasztásához

A felmérés paramétereinek megválasztása alapvetően befolyásolja a céltérkép elkészítésének sikerét, megbízhatóságát. Ezért már a tervezési periódusban tisztáznunk kell a légi felmérés céljait. A repüléstervezés során a következő alapvető információkra van szükségünk:

- A szükséges terepi felbontás (a felmérés részletessége)
- A szükséges spektrális felbontás
- A munkaterület helye, alakja és nagysága
- A fényképezés optimális elvégzésének időszaka

A felsorolt információk birtokában a repüléstervezés elvégezhető, a megfelelő berendezések megválaszthatóak. Ugyanakkor a feladat megtervezése előtt érdemes egyeztetni a kiértékelési célt a gazdaságos és biztonságos paraméterválasztás elősegítése érdekében. Jelen segédlet az RGB (valósszínes) felvételek terepi felbontásának megválasztásában nyújt segítséget néhány kiemelt felszínborítási kategória esetében:

a) Épületek között előforduló zöldfelületek
b) Mesterséges objektumokkal, burkolattal lefedett talaj
c) Földutak és egyéb tömörödött csupasz talajfoltok
d) Tájsebek, laza talajszerkezetű földes kopárok
e) Hulladékkal borított felszínek
f) Mezőgazdasági monokultúrák és mezsgyéik
g) Árnyékperemek torzító hatása
h) Vegetáció felmérés
i) Kaszálók
j) Nyílt vízfelületek
k) Folyami homokpadok, folyóparti kopárok

a. Épületek közötti zöldfelületek

Az épületek közötti zöldfelületeket, kopárokat és egyéb, kis-, vagy keskeny területeket lefedő kategóriákat hibásan szilárd burkolattal és épülettel lefedett talaj kategóriába soroljuk a kis felbontású felvételek elemzése során. Pedig az ilyen felszínek területösszege jelentős lehet és ökológiai, mikroklíma, gázcsere folyamatok szempontjából is érdemes megismernünk őket. A spektrális felbontás növelésével, például közeli infravörös felvételek szimultán alkalmazásával a kiértékelési hiba (ha a felbontás azt megengedi) elkerülhető, de a kiértékelés pontossága a terepi felbontással itt is csökken, nagyjából 20 cm-nél kisebb terepi felbontású légifelvételek esetében statisztikai értelemben jelentősen torzul a vizsgálatok eredményeként nyert adatbázis.

b. Mesterséges objektumok és talajlefedettség

A kisebb mesterséges objektumok talajfedése is félreinterpretálható. A vonalas létesítmények gyakran meglepően jól kivehetők olyan felvételek esetében is, amikor a terepi felbontásból adódóan ezt már nem várnánk. Ökológiai szempontból azonban időnként szükséges a talajlefedettség mértékének megállapítása, és ilyenkor nem csupán a vonalas létesítmények helye és futása, de azok területfedése is lényeges. Az aszfaltozott, vagy beton burkolattal lefedett utak, terek, gyárudvarok esetében több elemzéstorzítási lehetőség adódhat, hiszen annál a terepi felbontásnál, ahol a vonalas létesítmények szélessége már kisebb, mint a legkisebb térképezett vonalas elem szélessége, ez a felszínborítási kategória nem térképezhető. Ügyelnünk kell arra, hogy a vonalas létesítmények arányosan, a valódi szélességükből adódó, megfelelő területtel jelentkezzenek környezetvédelmi, felszínborítás elemzés során. A kisméretű (2-3 m átmérőjű) épületek és épített objektumok interpretációjának felbontás okozta torzításait a következő táblázat foglalja össze, 9 felmérő adatainak elemzése alapján:

Kisebb építmények, műszaki létesítmények interpretációs torzítása az ortofotó-mozaik terepi felbontásának függvényében

Terepi felbontás	A felületi hibák átlaga	A gyakorlott kiértékelők átlagos felületi hibája
10 000 cm	Nem észlelhető	Nem észlelhető
200 cm	76,5 %	57,1 %
100 cm	43,4 %	37,3 %
50 cm	42,1 %	10,6 %
20 cm	34,2 %	18,1 %
10 cm	18,7 %	8,9 %

A kisméretű épületek digitalizálásához érdemes 10 cm terepi felbontású, vagy annál részletesebb ortofotót alkalmazni.

A következő táblázatban közölt aszfaltozott felületekre vonatkozó statisztika esetében meg kell említeni, hogy a vizsgált vízbázison nem csak szabványos szélességű autóutak találhatóak, nagyrészt keskenyebb burkolatok fordulnak elő. A területen megtalálható műszaki létesítmények mérete is alulmarad a lakóingatlanokhoz képest.

Terepi felbontás	A felületi hibák átlaga	A gyakorlott kiértékelők átlagos felületi hibája
10 000 cm	Nem észlelhető	Nem észlelhető
200 cm	73,5 %	46,9 %
100 cm	64,9 %	34,1 %
50 cm	18,5 %	12,5 %
20 cm	19,0 %	8,5 %
10 cm	8,9 %	2,6 %

A műutak elemzése 20 cm-nél nagyobb terepi felbontású felvételek esetében is kellő pontossággal megvalósítható. A táblázatban közölt adatok pontosságát az útburkolat fölé nyúló lombkoronák is torzították.

A lombkoronák kitakarását figyelmen kívül hagyó és azt becsléssel figyelembe vevő módszer.

c. Földutak, tömörödött talajfelszínű kopárok

A burkolt utak vizsgálatával párhuzamosan vizsgáltuk a földutakat, az ösvényeket és azokat a földes kopárokat, ahol a talaj szerkezete a felszínen erősen tömörödött volt, nem kedvezve a csapadék beszivárgásnak és egyéb folyamatoknak. Azért választottuk így a felszínborítási kategóriát, hogy egy ökológiai szempontokat előtérbe helyező vizsgálat során is értékes térbeli adatot nyújtson a tematikus kiértékelési térkép. (Például evaporáció számítása, hidrológiai viszonyok elemzése, stb.). Megfigyelhető, hogy amíg az aszfalttal burkolt autóutak szélessége ritkán csökken 3 m alá – és ezért az észlelhetőség eléggé meghatározott – addig a földutak és ösvények esetében – a nagyon változó szélesség miatt – lineárisan csökkent az észlelt és lehatárolt felületek területösszege a kiértékelt raszterállomány felbontásának csökkentésével.

Megfigyelhető, hogy a keskeny és időszakos földutak 20 cm terepi felbontásnál válnak megbízhatóan detektálhatóvá, és 10 cm terepi felbontásnál pontosan lehatárolhatóvá.

Földutak és kopár ösvények interpretációs torzítása az ortofotó-mozaik terepi felbontásának függvényében

Terepi felbontás	A felületi hibák átlaga	A gyakorlott kiértékelők átlagos felületi hibája
10 000 cm	Nem észlelhető	Nem észlelhető
200 cm	208,0 %	37,7 %
100 cm	191 %	25,3 %
50 cm	38,5 %	26,7 %
20 cm	29,3 %	6,9 %
10 cm	19,4 %	1,6 %

Földutak 40 és 10 cm terepi felbontású ortofotó részletén

d. Tájsebek, földes kopárok

A tájsebek, az előző kategóriánál lazább talajszerkezetű földes kopárok, olyan talajfoltok, amelyeket nem fednek növények, és a humuszréteg jelentős része eltűnt a felszínről. A 10 – 50 cm felbontású légifelvételek esetében minél kisebb felbontású fotó-mozaikból nyertük a felszínborítási térképet, annál nagyobb felszíneket soroltunk ebbe a kategóriába. Ennek az az oka, hogy a viszonylag sűrűn elhelyezkedő, de a térszínt még nem totálisan elfedő lágyszárú növények egyre kevésbé látszanak a felbontás csökkenésével. A kevert pixelek színe pedig gyakran a kopár földfelszín színe felé tolódik el 20 – 50 cm terepi felbontás-tartományban, még akkor is, ha a felszínrészletet 50%-nál jobban uralja a növényzet. Érdekes, hogy amennyiben tovább csökkentjük a felbontást, a jelenség megfordul: 50 – 100 cm terepi felbontás között a kisebb (2 m – 60 m átmérőjű) földes kopárok észlelhetősége romlani kezd, és a vegetációval borított területek arányát növeljük velük tévesen.

Illegális crossverseny okozta tájsebek Érd külterületén, löszös, humuszos homoktalajon. A meghonosodó növényzet aranyvessző, fehér akác és keskenylevelű ezüstfa.

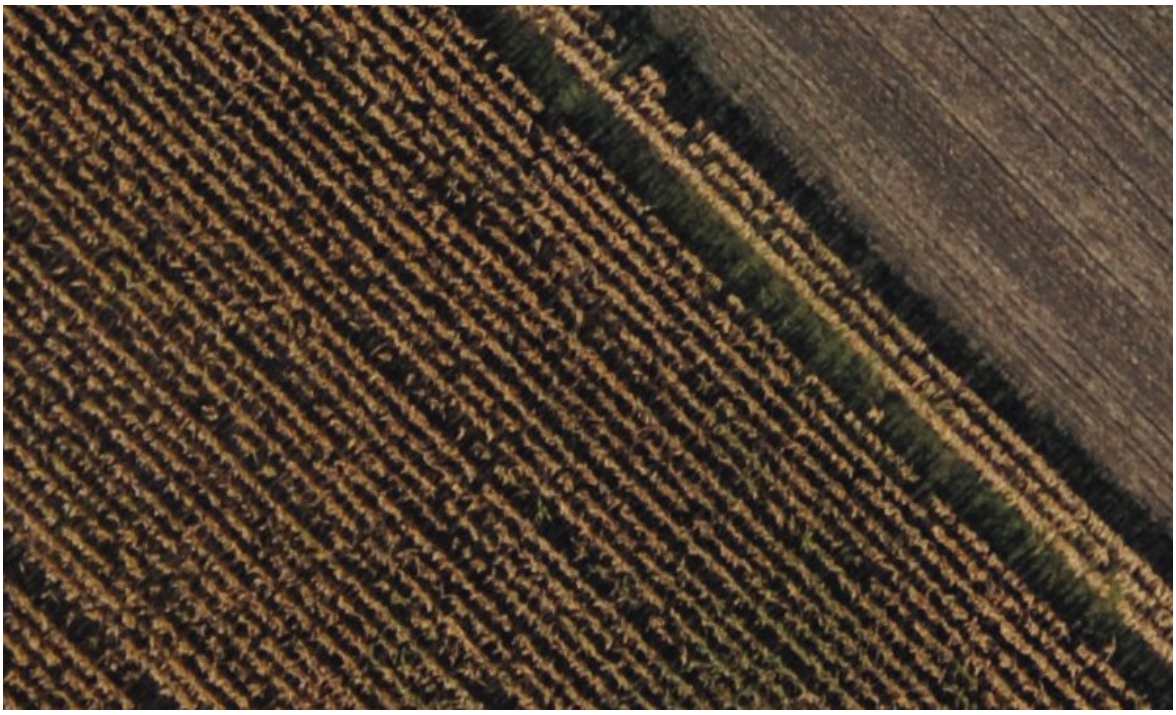
e. Illegális hulladék elhelyezéssel sújtott terepi foltok

A hulladékkal sűrűn borított, hulladékkupacokkal fedett felszíni foltok észlelésével és lehatárolásával kapcsolatban egyértelműen megállapítható, hogy a pontos meghatározás és terület lehatárolás 50 cm terepi felbontású felvételek esetében már nem lehetséges. A 0,5 – 20 m átmérőjű illegális hulladéklerakók pontos helye és területe légifelvétel-térképek elemzésével csak 20 centiméternél nagyobb terepi felbontású légifelvételek alapján határozható meg igazán pontosan. Ennél kisebb felbontású alapfelvételek esetén a kiértékelés statisztikailag hibás eredményhez vezet. A 20 – 50 cm terepi felbontású felvételekről interpretált hulladékhalmok mérete, és a becsült elszállítandó térfogat minden esetben lényegesen alulmúlta a természetbeni állapotokat.

Illegálisan elhelyezett hulladékkupacok a halásztelki vízbázis hidrogeológiai „A” övezetében (Bakó G. 2008)

f. Mezőgazdasági területek és mezsgyéik

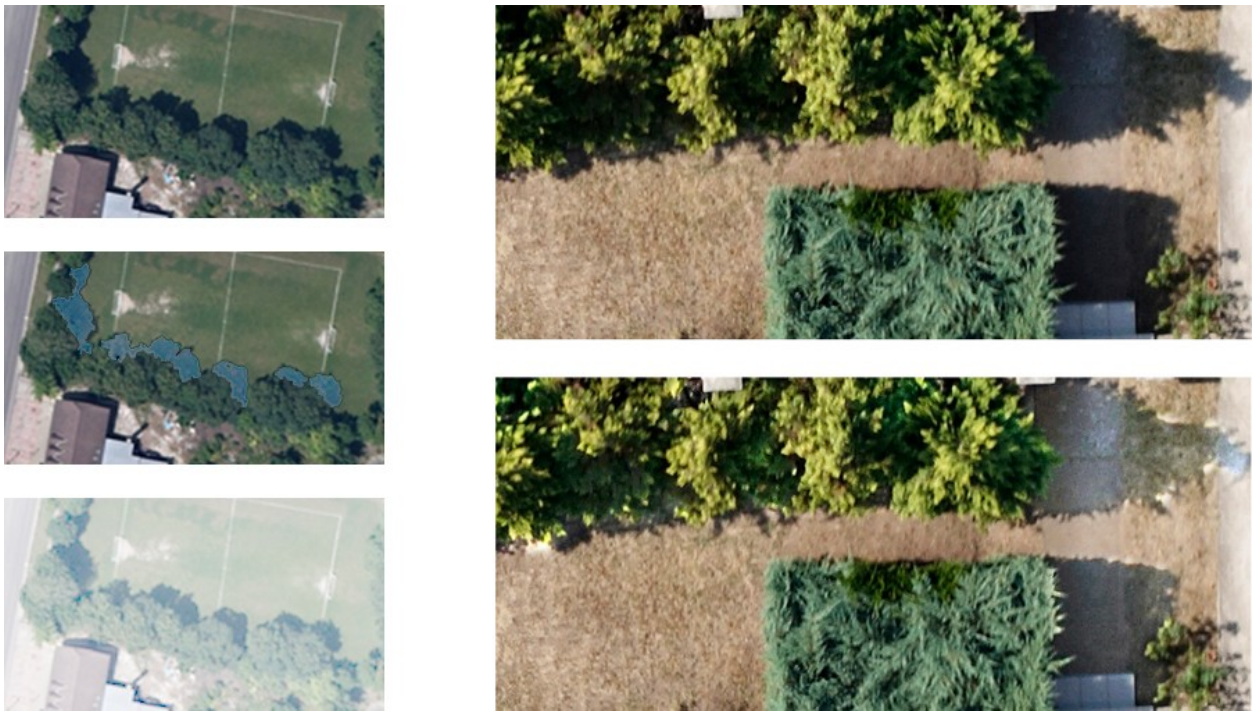
A táblás mezőgazdasági művelés által érintett területek a kisfelbontású légifelvétel-térképekből vizuális interpretációval előállított tematikus térképeken kevésbé összetett módon jelennek meg, mint a részletesebb légifelvétel-térképek elemzésével készített térképeken. Ennek oka, hogy a táblák közötti gyomos sáv és a gazdasági utak, rosszabb esetben a fasorok is a mezőgazdasági táblák területét növelik. Pedig ezek a kisebb ökológiai folyosók meghatározóak az élővilág szempontjából. A gyomos sávok eltűnése a mezei élettérben élő apróvadfajaink (fácán, fogoly, mezei nyúl) állomány csökkenését eredményezi. A mezsgyék felmérésére egyre nagyobb igény mutatkozik. A légifelvételek elemzésekor a táblák közötti gyomos sáv és a kisebb gyalogutak észlelhetőségének csökkenésével (20 cm terepi felbontás alatt) növekszik a hibásan a táblákhoz sorolt terület mérete, 50 cm terepi felbontásnál kisebb felbontás esetében már a kisebb fa- és bokorcsoportok is a táblák területét növelik.



Kukoricatábla (Bakó G. 2010)

g. Árnyékok

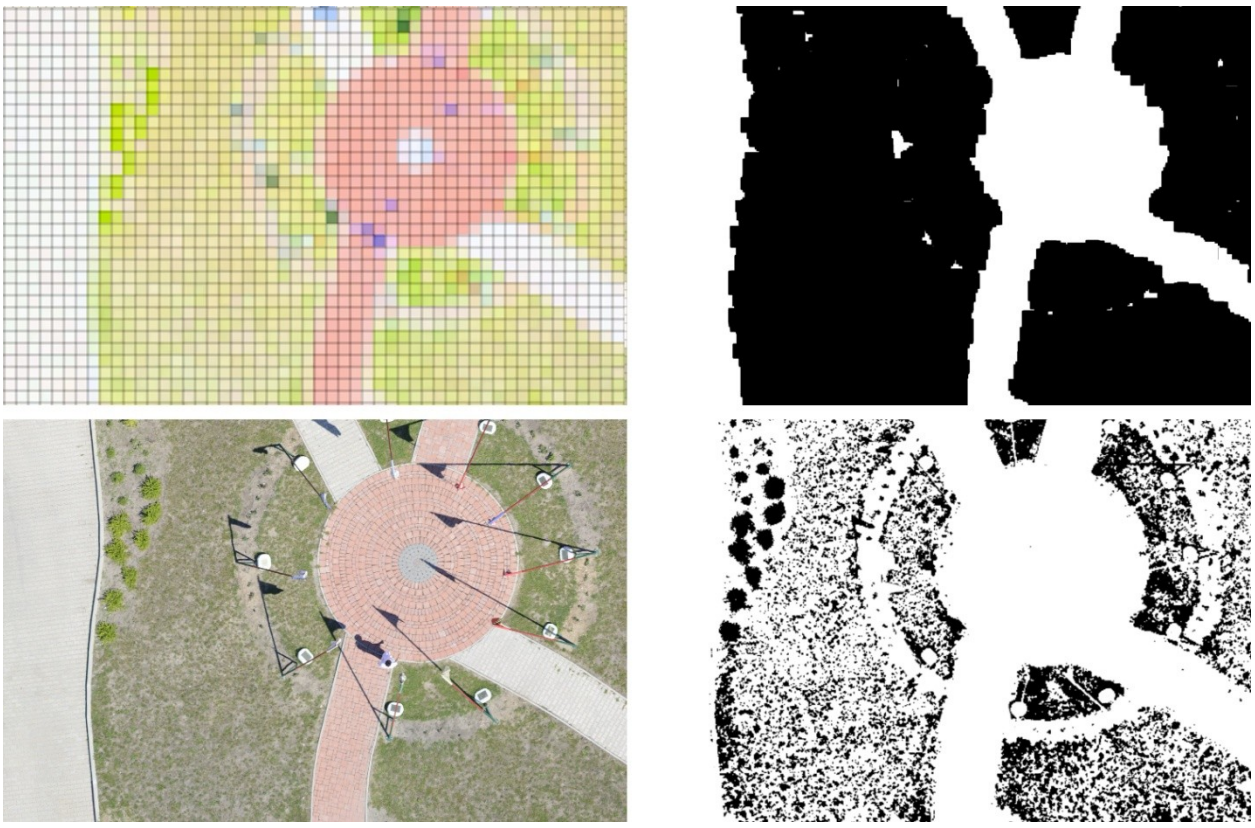
A kisebb területet lefedő, szegmentáltan elhelyezkedő, magas felszínborítási elemek lehatárolásában az egyik legnagyobb hibaforrást az árnyékok jelentik. A nedves, helyenként vízzel elárasztott rétek és a kaszálók területét tévesen csökkentheti a környező facsoportok területének javára a fák árnyéka. 50 cm terepi felbontásnál és annál kisebb felbontású felvételek esetén ez a hibalehetőség nehezebben szűrhető ki, bár az infraszínes felvételek alkalmazásával a vizenyős területek és az árnyékos részek lehatárolása egyértelműbbé válik. 20 cm terepi felbontásnál nagyobb felbontású légifelvétel-térképek esetében az árnyékok könnyen felismerhetőek, ezért hatásuk már kevésbé jelentkezik az eredményben.



Az árnyékokolt területekből történő adatnyerési lehetőséget a távérzékelt adat terepi felbontása és a felvétel dinamikája, helyes exponáltsága határozzák meg. Minél több és minél nagyobb információtartalmú pixelen képződik le az árnyék miatt alulexponált folt, annál több esélyünk van az információ visszanyerésre. Ez általában az „árnyékolt terület" felszínborítási kategória külön osztályba sorolása után oldható meg. A bal oldali felvétel egy 15 cm terepi felbontású, míg a jobb oldali egy 0,5 cm terepi felbontású RGB ortofotó részlete.

h. Vegetációtérképezés

A fák lombkoronája által fedett területek meghatározása 10, 20 és 50 cm terepi felbontású légifelvételek alapján egyaránt jól kivitelezhető, de a lombkorona borítottság aránya nagyon megnövekszik a valósághoz képest az ennél kisebb terepi felbontású légi- és űrfelvételekről interpretált felszínborítási térképeken, ezért a természetvédelmi célú vizsgálatok során érdemes nagyfelbontású felvételekből gyűjteni a térbeli információkat. Összefüggő erdőterületek esetében a kisfelbontású űrfelvételek hibája azért nem vezet nagyobb tévedésekhez, mert a kisebb facsoportokat és erdősávokat jogi értelemben nem tekintik valódi erdőknek, ugyanakkor a tisztásokat és keskenyebb irtásokat is az erdőterülethez interpretálják, ami a másik irányba mozdítja a statisztikai adatokat. Amennyiben ökológiai, vagy erdőgazdálkodási szempontból értékeljük a helyzetet, sokszor az 50 cm terepi felbontásnál nagyobb részletességű fotó-térképekre van szükség. A nagyfelbontású légifelvételek lehetővé teszik a fás szárú növényfajok elterjedésének vizsgálatát. Úgy találtuk, hogy a 10 cm közeli terepi felbontás-tartományban nagyon pontos fajmeghatározás végezhető fák esetében. Itt már a szín, textúra, méret és morfológiabeli különbségek is jelentkeznek az egyes fafajok között. Bizonyos fajokat teljes biztonsággal el lehetett különíteni a mintaterületeken. A facsoportok lehatárolása tekintetében elmondható, hogy a felbontás csökkenésével – 20 cm terepi felbontástól – jelentősen leromlott a fajazonosítás és a lehatárolás pontossága is, és a sokcsatornás eljárások is csak csekély mértékben pontosították az eredményeket. A faji azonosítást csak a legritkább esetben könnyítik meg a nagy spektrális felbontású, de kisebb terepi részletességű állományok. Nagyfelbontású, multispektrális felvételek esetében a közeli infravörös csatornák közvetett módon azért segíthetnek a feladat elvégzésében, mert kiegészítő információkkal látják el az elemzőt (biomassza tömeg, levelek nedvességtartalma, stb.), aki így indirekt módon, asszociatív következtetéseket vonhat le. A multispektrális felvételeknek a levélszerkezet, szín- és textúrabeli eltérésekhez képest a faji szintű vegetációtérképezésben kevésbé vesszük hasznát. Ellenben különböző ökológiai indexekkel, mennyiségi és növényegészségre vonatkozó információkkal egészítik ki vizsgálatainkat.



20 cm és 0,5 cm terepi felbontású ortofotó részletek és vegetáció borítás elemzésük eredménye. A 0,5 cm terepi felbontású felvétel nagyjából 4 cm terepi felbontásúra van kicsinyítve jelen bemutatásban, míg a 20 cm terepi felbontású változat méretét növeltük az összehasonlíthatóság érdekében.A kis felbontású felvételből származó térkép alapján történő gázcsere, illetve evapotranspiráció mértékének felülbecslése egyértelmű.

A felvételezési időpont nagyon lényeges a vegetációtérképezés szempontjából. Egyes növényfajok bizonyos időszakban (pl. virágzáskor, vagy vegetációs időszakon kívül egyes felső lombkoronaszint alatti fás szárúak, sarjak) jobban megfigyelhetőek a légifelvétel-térképeken.

Időbeli eltérés

A két hónap különbséggel készült légifelvétel-térképek kiértékelésében 10 cm terepi felbontás esetén nem mutatkozott jelentős különbség. Nem voltak jelentős eltérések a lehatárolt területek méretében sem. 30 cm-re csökkentett terepi felbontású változatok összevetésénél már jelentkeztek eltérések a fás szárú növények esetében, de ezeket a különbségeket nem az alapfelvételek készítési ideje, hanem a kis felbontású légifelvétel-térképeken történő azonosítás problémái okozták. Megállapítható, hogy a valóságban változatlan alapterületű és az évszakkal sem változó megjelenésű felszínborítási kategóriák interpretációja (a felvételek minőségi tulajdonságait, geometriáját figyelembe véve) megfelelően pontos abban az esetben, ha lombtakarás nem akadályozza a felvételek interpretációját. Amennyiben egy vizsgált kategória észlelhetősége, elkülöníthetősége megváltozik a felvételezési időpontok között, úgy kis felbontásnál jelentős eltéréseket mutat az interpretáció eredménye. Így például a vadgesztenye (*Aesculus hippocastanum*) 10 cm terepi felbontású légifelvételekről történő interpretációjakor nem tapasztaltunk jelentős kiértékelési különbségeket a 2008. július 2-án és szeptember 2-án készített fotó-térképek esetében. 20 cm terepi felbontásnál az aknázó moly előrehaladott kártétele miatt a szeptemberi felvételről interpretált állomány pontossága nagyobb volt. A barnás elszíneződés kiemelte a vadgesztenye egyedeket a környezetükből, így kisebb felbontásnál jobb eredménnyel térképeztük a fajt a szeptemberi, mint a júliusi felvételek esetében, ahol a textúrája és színe nem választja el markánsan a többi fás szárú lombkoronájától. Azt azonban érdemes megemlíteni, hogy a kategóriának megfelelőbb, 10 cm terepi felbontású júliusi fotó-térkép elemzése a 20 cm terepi felbontású szeptemberi fotótérkép elemzésénél így is lényegesen pontosabb volt.

A halásztelki vízbázis 2008 július 2-án és 2010. március 31-én. A felvételezési időszak megválasztása alapvetően befolyásolja a kiértékelési lehetőségeket

Fűz, illetve nyár egyedek és facsoportok térképezése

A fűzfacsoportok és önálló egyedek interpretációs torzítása az ortofotó-mozaik terepi felbontásának függvényében vegetációtérképezési gyakorlattal nem rendelkező kiértékelők esetében

Terepi felbontás	A felületi hibák átlaga	A vegetációtérképezésben jártas kiértékelők átlagos felületi hibája
10 000 cm	70,4 %	66,5 %
200 cm	36,9 %	23,1 %
100 cm	38,5 %	17,3 %
50 cm	35,0 %	14,6 %
20 cm	33,2 %	8,0 %
10 cm	25,1%	1,7 %

A nyárcsoportok és egyedek interpretációs torzítása az ortofotó-mozaik terepi felbontásának függvényében vegetációtérképezési gyakorlattal nem rendelkező kiértékelők esetében

Terepi felbontás	A felületi hibák átlaga	A vegetációtérképezésben jártas kiértékelők átlagos felületi hibája
10 000 cm	90,8 %	46,8 %
200 cm	52,1 %	40,9 %
100 cm	44,8 %	27,8 %
50 cm	42,8 %	14,2 %
20 cm	30,2 %	10,2 %
10 cm	29,0%	1,3 %

A vegetációtérképezésben jártas kiértékelők 10 cm terepi felbontás felett nagy biztonsággal képesek a két felszínborítási kategóriát megkülönböztetni és lehatárolni, és még 20 cm terepi felbontásnál is csupán 10 % alatti torzítás tapasztalható. A Duna menti mintaterület elemzése során egyértelművé vált, hogy a botanikai ismeretekkel nem rendelkező térképészeti, geoinformatikai képzettséggel rendelkező elemzők nem tudják nagy biztonsággal lehatárolni a fűzfa és nyárfa csoportokat, még akkor sem, ha a fenológiai állapot és a fényképezési időszak ideális a két, egyébként nagyon eltérő képet mutató folttípus elkülönítésére. A felület hibájának átlagait a következő táblázat tartalmazza.

Fehér akác (*Robinia pseudoacacia)* ültetvények és egyedek

Az akácültetvények feltérképezése 20 cm terepi felbontástól elvégezhető, viszont amennyiben egy erdőterület akácfertőzöttségére vagyunk kíváncsik, sok esetben 7 cm terepi felbontású felmérés szükséges:

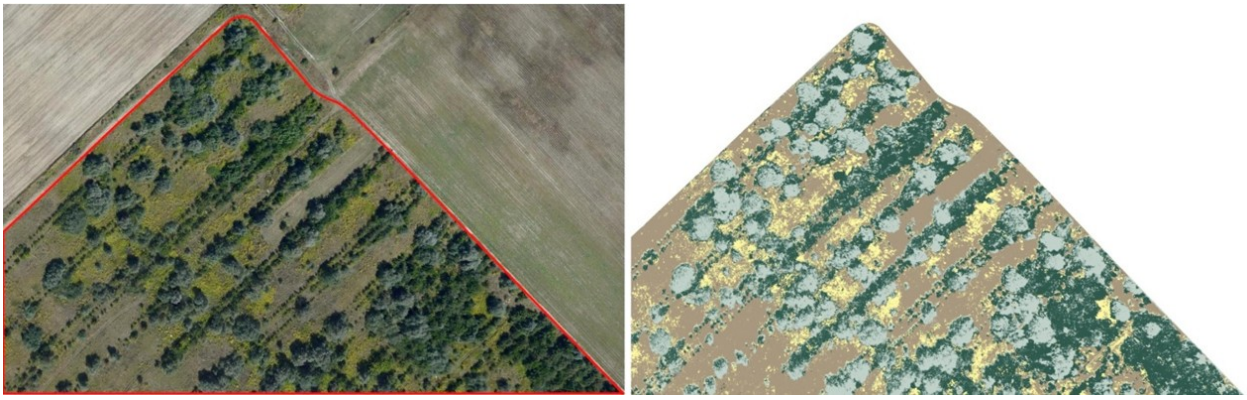
Az akácosok és akác egyedek interpretációs torzítása az ortofotó-mozaik terepi felbontásának függvényében

Terepi felbontás	A felületi hibák átlaga	A vegetációtérképezésben jártas kiértékelők átlagos felületi hibája
10 000 cm	83,1 %	54,3 %
200 cm	43,5 %	37,2 %
100 cm	21,2 %	22,4 %
50 cm	28,0 %	21,8 %
20 cm	2,2 %	5,9 %
10 cm	1,8 %	1,6 %

Fehér akác csoport július 2-án és március 31-én.

Keskenylevelű ezüstfa (*Elaeagnus angustifolia*)

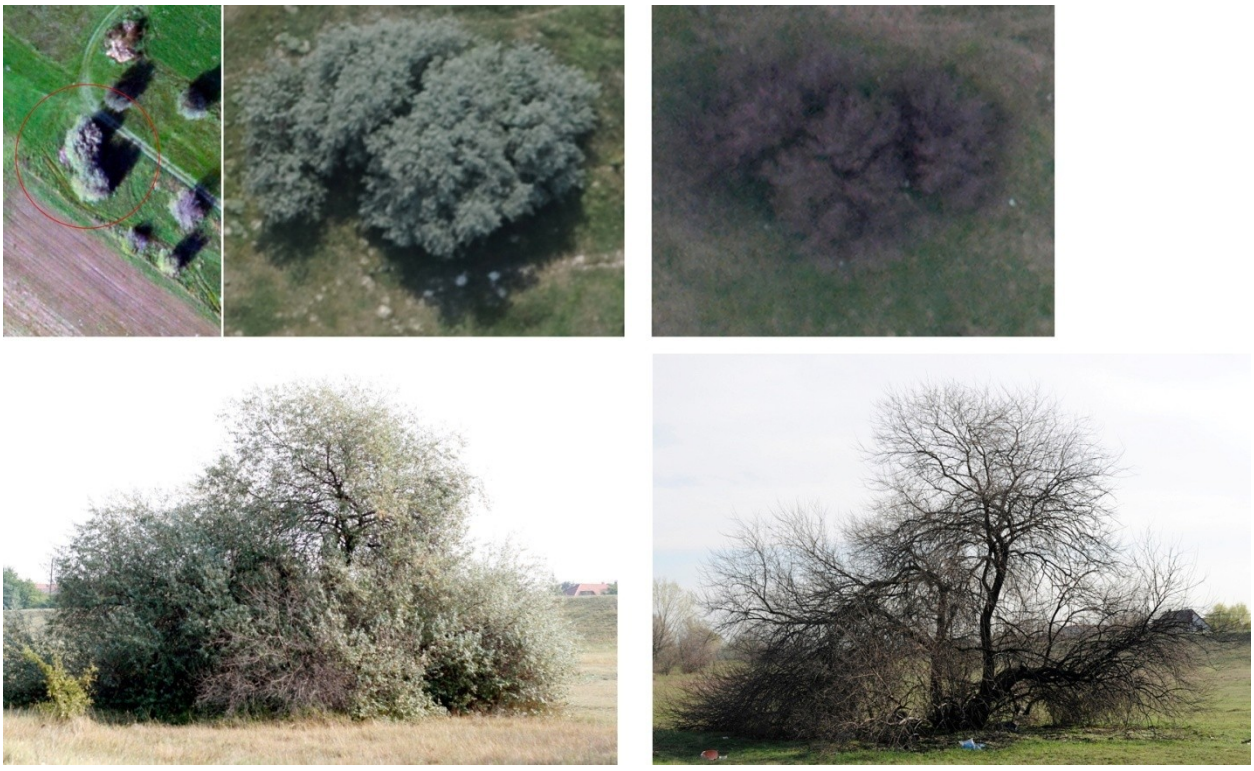
A keskenylevelű ezüstára jellemző szín és textúra jelek biztonságos elkülönítése 14 cm terepi felbontáson megvalósítható, de a téli időszakban legalább 6 cm terepi felbontású ortofotó szükséges az elemzéshez.



Keskenylevelű ezüstfa, illetve aranyvessző háromdimenziós felületmodell és ortofotó-mozaik közös elemzésével térképezve (Bakó 2015b).

Azonos egyedek szabad térállásban, nyári időszakban (2008.07.02.) és ősz elején (2008.09.02.)

Az előző egyedek márciusban (2014.03.29.)



Ugyanaz az egyed júliusban és március végén fényképezve

Aranyvesszőfajok (*Solidago sp*.)

Az aranyvessző fajokkal fertőzött foltok távérzékeléses feltérképezéséhez virágzáskor legalább 35 cm terepi felbontású felvételezés szükséges, más időszakban 10 cm terepi felbontású ortofotóra van szükség.

Mirigyes bálványfa (*Ailanthus altissima*)

A bálványfa-fertőzöttség RGB távérzékeléses feltérképezése 7 cm terepi felbontású ortofotó-mozaik felhasználásával realizálható, de 5 cm terepi felbontástól válik igazán pontossá (Bakó 2015b).

Ugyan az a bálványfa egyed a terepen és a Háros-félszigetről 2016.04.23-án készült függőleges kameratengelyű ortofotó részletén.

i. Kaszálók

A kaszált füves területek elemzésénél a 100 - 10 cm terepi felbontás-tartomány javasolható, a kategóriát jellemzően határoló további felszínborítási típusok függvényében. A kísérlet elvégzésében a kaszálókat aszfalt útburkolat, földutak és erdőültetvények határolták.

A kaszálók interpretációs torzítása az ortofotó-mozaik terepi felbontásának függvényében

Terepi felbontás	A felületi hibák átlaga	A gyakorlott kiértékelők átlagos felületi hibája
10 000 cm	42,5 %	21,9 %
200 cm	28,7 %	11,0 %
100 cm	28,3 %	9,7 %
50 cm	11,3 %	7,5 %
20 cm	11,1 %	9,4 %
10 cm	7,2%	0,9 %

Kaszált terület a hullámtérben. 10 cm terepi felbontásnál a földutak is jól térképezhetőek. A felvétel alsó részén akácültetvény látható.

j. Nyílt vízfelületek

A nyílt vízfelületek interpretációs torzítása az ortofotó-mozaik terepi felbontásának függvényében a különböző elemzők által elvégzett vizsgálatban a következő eredményt adta:

Terepi felbontás	A felületi hibák átlaga	A gyakorlott kiértékelők átlagos felületi hibája
10 000 cm	42,7 %	30,1 %
200 cm	30,2 %	23,5 %
100 cm	26,3 %	12,5 %
50 cm	9,51 %	4,6 %
20 cm	7,2 %	3,6 %
10 cm	6,0 %	2,0 %

Ahogy a különböző geográfus és térképész szakterületről érkező elemző eredményeiből tapasztaltuk, a nyílt vízfelületek, víztestek interpretációja 50 cm terepi felbontásig megbízhatóan megoldható. Ez természetesen csak akkor igaz, amennyiben nem sűrű vegetáció alatti, vagy keskeny (pl. patakok), kis kiterjedésű vízfelületekről, mocsaras, lápos területről van szó.

Víztest lehatárolásának egyértelmű és bonyolultabb esete

k. Folyami homokpadok és folyóparti kopárok

A dunai homokpadok és parti kopárok elemzése során a hét interpretátor felületi hibájának átlagai alapján 10 cm terepi felbontású, vagy annál részletesebb felmérés javasolható:

A homokpadok és folyóparti kopárok interpretációs torzítása az ortofotó-mozaik terepi felbontásának függvényében

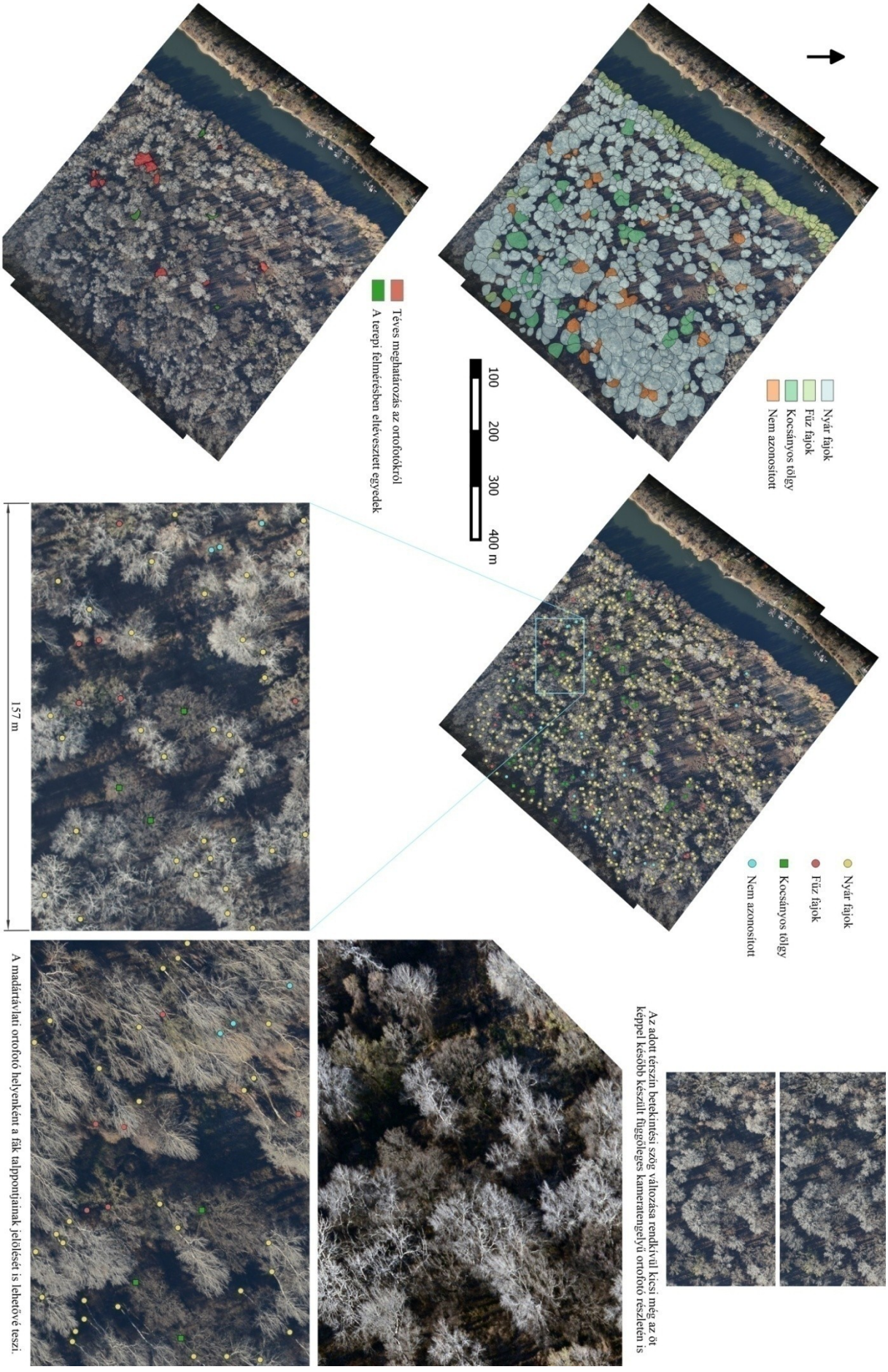
Terepi felbontás	A felületi hibák átlaga	A gyakorlott kiértékelők átlagos felületi hibája
10 000 cm	nem észlelhető	nem észlelhető
200 cm	39,8 %	30,5 %
100 cm	38,1 %	28,9 %
50 cm	31,2 %	21,8 %
20 cm	22,5 %	12,9 %
10 cm	15,7 %	5,4 %

A homokpadok és a folyó határa 10 m (bal oldali ábra), illetve 10 cm (jobb oldali ábra) terepi felbontású ortofotóról elemezve (sárga határolóvonal). A vegetációfoltokat tartalmazó határolóvonalak is feltüntetésre kerültek.

10.14751/SZIE.2017.015

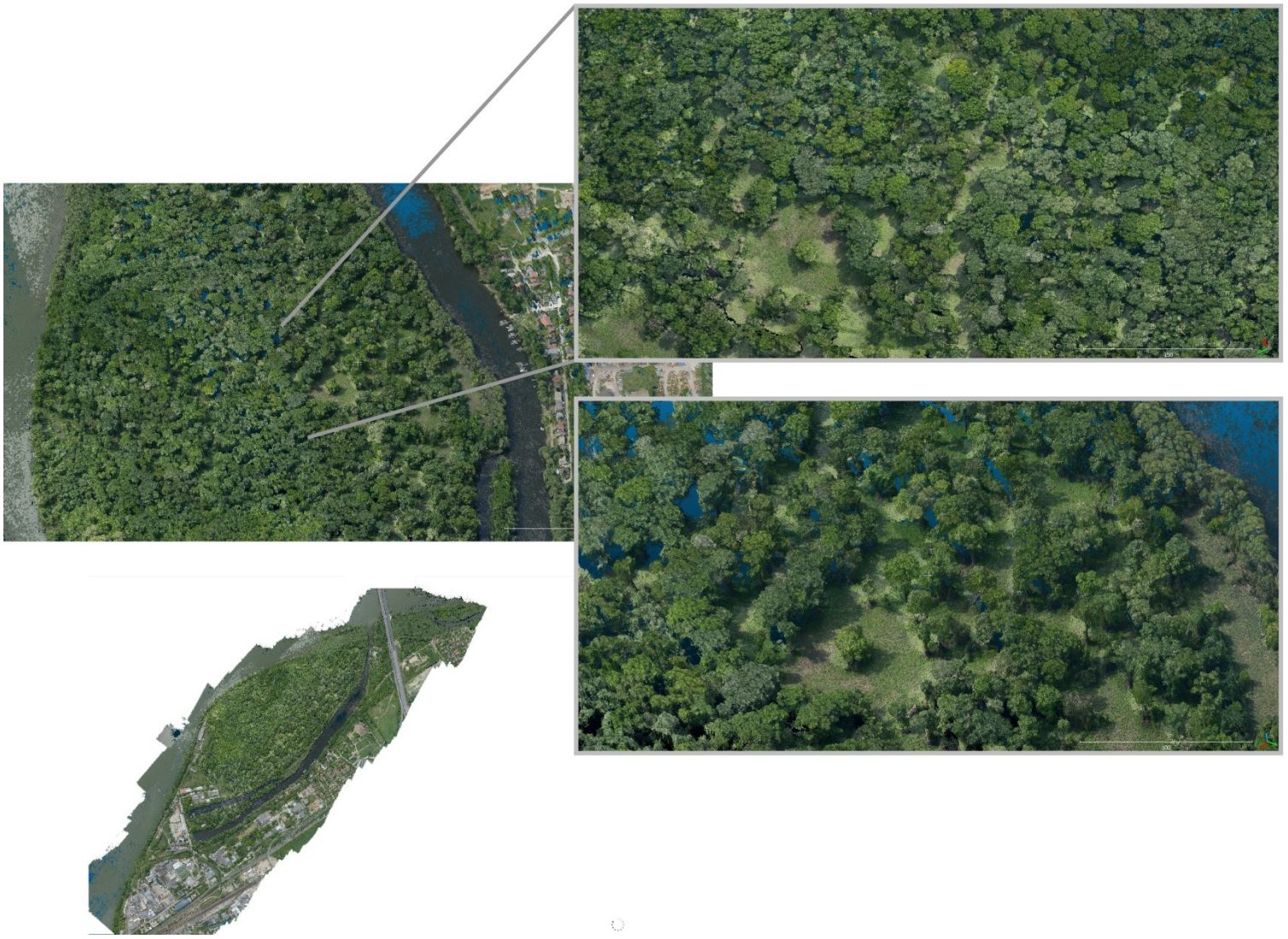
17. melléklet

A Háros-sziget téli lombkorona térképezése a 2. mintaterületen



18. melléklet

A Háros-félsziget fotogrammetriai módszerrel előállított háromdimenziós lombkorona térképe

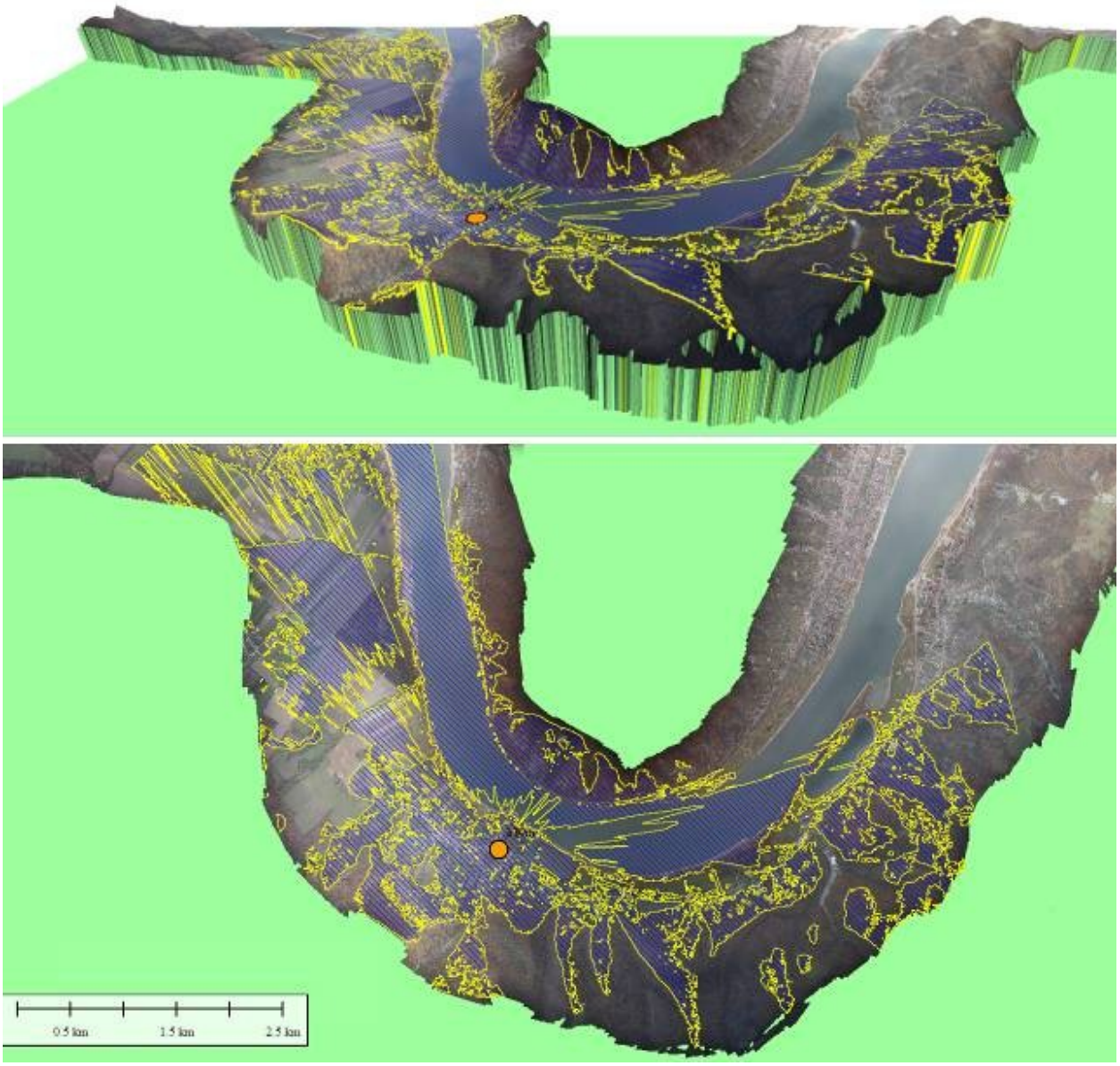


10.14751/SZIE.2017.015

10.14751/SZIE.2017.015

19. melléklet

Adott bázisállomás szimulált telepítési helye



A Dunakanyarban szimulált bázisállomás közvetlen lefedettségi területét a sraffozott poligon jelöli

10.14751/SZIE.2017.015

10 KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani Licskó Bélának, a Környezetvédelmi és Vízgazdálkodási Kutató Intézet Tudományos és Nemzetközi Igazgatóság osztályvezetőjének, tudományos főmunkatársának, hogy elindította és javaslataival, segítségével mindvégig segítette kutatómunkámat. Köszönettel tartozom konzulensemnek, Szerdahelyi Tibornak, valamint Nagy János Györgynek, Nagy Zoltánnak, Csintalan Zsoltnak, Szirmay Orsolyának, Burián Endrének és Horváth Péter Brúnónak, Csáky Péternek és Árvay Mártonnak akik botanikai ismereteikkel támogatták a munkámat.

Szeretném megköszönni Arday András pilóta, Molnár Zsolt műszaki igazgató, Góber Eszter, Eiselt Zoltán, Fülöpné Glöckner Ilona, Feldhoffer Zsófia, Bártfay Bence, Kovács Dániel, Szakmári Attila, Birinyi Edina, Szujó Gábor, Kemény Dániel és az Interspect Csoport összes munkatársának segítségét.

Köszönetet mondok Gulyás Gábornak, Kovács Gábornak, Laczkó Márknak, Kirisics Juditnak, Ambrus Andrásnak és Tolnai Mártonnak, valamint Báder Richárdnak, Keszler Orsolyának, Kozics Anikónak, Kőbányai Péternek, Ónodi Zsoltnak, Tóth Franciskának, Tulézi Fruzsinának és az ELTE TTK · Földrajz- és Földtudományi Intézet Geográfus mesterszakos hallgatóinak a kiértékelés szubjektív hatásainak, és a terepi felbontás csökkenésének kiértékelési torzításra gyakorolt hatásának vizsgálatában vállalt szerepükért.

Szeretném megköszönni Krámer Tamás, a Budapesti Műszaki És Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Kar tudományos dékán helyettesének árvízi modellezésben nyújtott együttműködését, továbbá Varga Csilla, Riesz Lóránt és Ács Bence Tamás hallgatók segítségét. Köszönöm Belényesi Márta (Szent István Egyetem), Büttner György, Maucha Gergő és Kosztra Barbara (Földmérési és Távérzékelési Intézet Környezetvédelmi Távérzékelési osztály) javaslatait, tanácsait, útmutatásait.

Köszönetemet fejezem ki Körmöczi Lászlónak és Molnár Andrásnak, a dolgozat opponenseinek, iránymutató javaslataikért, észrevételeikért.

A tesztrepülések személyzete: légifotó operátor: Bakó Gábor, műszaki asszisztens: Molnár Zsolt, pilóta: Arday András.