A távérzékelés erdészeti alkalmazása

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS

Király Géza

Nyugat-Magyarországi Egyetem
Roth Gyula Erdészeti és Vadgazdálkodási Tudományok Doktori Iskola
Erdővagyon-gazdálkodás Program

Témavezető: Dr. Márkus István egyetemi docens
Földmérési és Távérzékelési Tanszék

Sopron
2007

A TÁVÉRZÉKELÉS ERDÉSZETI ALKALMAZÁSA

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében

Írta:
Király Géza

Készült a Nyugat-Magyarországi Egyetem Roth Gyula Erdészeti és Vadgazdálkodási Tudományok Doktori Iskola Erdővagyon-gazdálkodás programja keretében

Témavezető: Dr. Márkus István egyetemi docens

Elfogadásra javaslom (igen / nem)

(aláírás)

A jelölt a doktori szigorlaton …… %-ot ért el,

Sopron ….....

a Szigorlati Bizottság elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom (igen /nem)

Első bíráló (Dr. …..... ….....) igen /nem

(aláírás)

Második bíráló (Dr. …..... ….....) igen /nem

(aláírás)

(Esetleg harmadik bíráló (Dr. …..... ….....) igen /nem

(aláírás)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján….....%-ot ért el

Sopron,

……..
a Bírálóbizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése….....

……..
Az EDT elnöke

Tartalomjegyzék

Ábrajegyzék ... 6
Táblázatok jegyzéke ... 8
Mellékletek jegyzéke ... 9
1. Bevezetés ... 12
2. Szakirodalmi áttekintés ... 13
2.1. A „távérzékelés” mint fogalom ... 13
2.2. A szabályos adatmodellek ... 14
2.3. A távérzékelési folyamat ... 17
2.3.1. Az elektromágneses sugárzás ... 19
2.3.2. Sugárforrás ... 20
2.3.3. A vizsgált objektum ... 21
2.3.4. A hordozóeszköz ... 22
2.3.4.1. A hordozóeszközök fejlődése ... 22
2.3.4.2. A műholdak ... 23
2.3.4.3. Légi járművek ... 24
2.3.5. Az érzékelő ... 24
2.3.5.1. A centrális vetítés ... 24
2.3.5.2. A fotográfiai rendszerek ... 27
2.3.5.3. A letapogatók ... 30
2.3.5.4. Az érzékelők fejlődése ... 32
2.3.6. A távérzékelt felvételek tulajdonságai ... 32
2.3.7. Térképészeti műholdak ... 34
2.3.8. Meteorológiai műholdak ... 35
2.3.9. Erőforrás-kutató műholdak ... 36
2.3.9.1. A NASA műholdrendszerei ... 36
2.3.9.2. A SPOT műholdrendszer ... 40
2.3.9.3. Egyéb műholdak ... 41
2.3.10. A digitális domborzatmodellek (DDM) és a távérzékelés ... 43
2.3.11. Fejlődések, trendek a távérzékelésben ... 46
2.4. A távérzékelés és a vegetáció ... 47
2.5. A távérzékelt felvételek feldolgozása ... 52
2.5.1. Az előfeldolgozás ... 52
2.5.2. A képjavítás ... 56
2.5.2.1. Szűrők ... 56
2.5.2.2. Sávok közötti műveletek ... 57
2.5.2.3. Főkomponens-analízis ... 57
2.5.2.4. KT-transzformáció ... 58
2.5.2.5. Színtér-transzformációk ... 58
2.5.2.6. Fourier-transzformáció (FT) ... 58
2.5.3. A képosztályozás ... 59
2.5.4. Az utófeldolgozás ... 61
2.6. Erdészeti aspektusok ... 61
2.6.1. Történeti áttekintés ... 62
2.6.2. Az Erdővédelmi Hálózat ... 65

3. Anyag és módszer ... 66
3.1. A vizsgált terület: a Soproni-hegység ... 66
3.2. A felhasznált adatok ... 70
3.2.1. Az űrfelvételek ... 71
3.2.2. Archív térképek ... 71
3.2.3. Légifényképek ... 72
3.2.4. Referencia-adatok ... 73
3.2.5. Domborzatmodellek ... 73
3.3. Alkalmazott eljárások ... 74
3.3.1. Landsat-idősor ... 74
3.3.1.1. Vetületbe illesztés ... 74
3.3.1.2. Topográfiai normalizáció ... 75
3.3.1.3. A képosztályozás ... 76
3.3.1.4. Az utófeldolgozás ... 86
3.3.2. SPOT P felvétel ... 89
3.3.3. Az ASTER-felvétel ... 91
3.3.4. Topográfiai térképek ... 92
3.3.5. Légifényképek ... 94

4. Eredmények ... 104
4.1. A mintaterületre vonatkozó eredmények ... 104
4.1.1. Erdőborítás ... 104
4.1.2. Erdőtípus ... 106
4.1.3. Erdő- és korosztálytípus ... 107
4.1.4. Erdőrészlet szintű vizsgálatok ... 108
4.2. Általános eredmények ... 111
4.2.1. SPOT P alapú erdőosztályozás ... 111
4.2.2. Vegetációs index alapú erdőosztályozás ... 111
4.2.3. Spektrális adatbank alapú osztályozó ... 111
4.2.4. Légifénykép-mozaikolás ... 112
4.2.5. Infraszínes → színhelyes színes színtranszformáció ... 112
4.3. Következtetések ... 113

5. Összefoglalás ... 115

6. Tézisek ... 116

Köszönetnyilvánítás ... 117

Hivatkozások ... 118

Ábrajegyzék

1. ábra: 2D-s szabályos tesszelációk, és a Platon-féle szabályos testek ... 15
2. ábra: 2 és 3D-s rekurzív felbontások, valamint a négyes- és nyolcas-fa kódolások ... 15
3. ábra: Az ECW tömörítés folyamata ... 17
4. ábra: A távérzékelési folyamat rendszere ... 18
5. ábra: Az elektromágneses hullám ... 19
6. ábra: Az elektromágneses spektrum ... 20
7. ábra: Az 5900 K hőmérsékletű feketetest sugárzása ... 21
8. ábra: Néhány jellegzetes felszínborítás reflektanciája ... 22
9. ábra: A napszinkron pálya ... 23
10. ábra: A centrális vetítés elve ... 25
11. ábra: A mérőkamera belső tájékozásának elemei ... 27
12. ábra: Leica RC30-as mérőkamera, és az általa készült felvétel részlete ... 28
13. ábra: Egy légifényképezés vázlata, és főbb paraméterei ... 29
14. ábra: KODAK AEROCHROME II Infrared Film 2443 spektrális érzékenysége ... 30
15. ábra: A különböző dimenziójú érzékelők. 0D, 1D, 2D ... 31
16. ábra: Landsat TM űrfelvétel sematikus felépítése ... 33
17. ábra: A Landsat-érzékelők sávkiosztása és geometriai felbontása egy lombos erdő spektrális reflektanciagörbéjével ... 37
18. ábra: Az ASTER érzékelő VNIR egysége ... 39
19. ábra: A SPOT érzékelők sávkiosztása és geometriai felbontása egy lombos erdő spektrális reflektanciagörbéjével ... 41
20. ábra: SAR interferogramm ... 44
21. ábra: Az űrrepülőgép és az antennák, amelyek távolsága ~60 m. (Forrás: DLR) ... 45
22. ábra: Az elektromágneses hullámok és a növényzet kölcsönhatásai [landsat.usgs.gov alapján] ... 48
23. ábra: A klorofil *a* és *b* elnyelési görbéi ... 48
24. ábra: A főbb felszínborítási kategóriák visszaverése, valamint pár fontos érzékelő sávkiosztása ... 49
25. ábra: A vegetációs indexek geometriai szemléltetése ... 50
26. ábra: Egy Landsat TM űrfelvétel jellegzetes szóródási diagramja a 3. és 4. sávban ... 51
27. ábra: A felvételek ortorektifikációjának elve ... 53
28. ábra: Az emberi térlátás ... 54
29. ábra: Automatikus felületmodell-előállítás ([34] alapján) ... 55
30. ábra: A főkomponens-analízis (PCA) ... 58
31. ábra: Az osztályozók működése ... 59
32. ábra: A normál valamint az empirikus eloszláson alapuló legnagyobb valószínűség osztályozó ... 60
33. ábra: A mintaterület elhelyezkedése ... 66
34. ábra: A Soproni-hegység domborzata ... 75
35. ábra: A VI alapú Landsat-osztályozó ... 77
36. ábra: Az ellipszis-osztályozó elvi vázlata ... 78
37. ábra: A mintaterület és környékét lefedő Landsat TM űrfelvétel szóródási diagramja a vörös és a közeli infravörös sávban ... 80
38. ábra: A mintavételi területek befelé pufferelése ... 81
39. ábra: Egy kiválasztott erdőrészlet spektrális változásai ... 82
40. ábra: Spektrális erdőrészlet-változások a Sopron 129 tag esetében ... 83
41. ábra: Az erdőrészlet szintű képstatisztikák adatbázisa ... 84

42. ábra: Különböző faállomány-típusok fejlődése a Landsat űrfelvétel 3. és 4. sávjában. A feltüntetett számok a faállomány korát jelentik. 85
43. ábra: A gazdasági beosztások változásának nyomon követése 87
44. ábra: A mintaterület 1995-ös SPOT P felvételének gyakorisági diagrammja..... 90
45. ábra: Az ASTER felvétel szóródási diagramja a vizsgált területre, és az ellipszis-osztályozó..... 91
46. ábra: Az I. katonai felmérés mintaterületre eső szelvényei 92
47. ábra: Az 1787-es Sárközy-féle térkép [65]. Részlet..... 93
48. ábra: A reambulált III. katonai felmérés térképei osztályozásának lépései: az eredeti térkép; a textúrális osztályozó; a foltozott erdő-osztály..... 94
49. ábra: A vizsgálatba bevont légifényképek területi fedése 95
50. ábra: Az 1999. évi légifényképek feldolgozásának folyamatábrája..... 97
51. ábra: Illesztőpont mérése Trimble 4000SST vevővel, valamint az illesztőpont képe a légifényképen 97
52. ábra: A régiók kialakítása..... 98
53. ábra: Az infraszínes → színhelyes színes színtranszformáció forrása és eredménye 99
54. ábra: A különböző felületmodellek faállománnyal borított terület esetén 101
55. ábra: A megvilágított borított felszín-modell az erdőrészlet-határokkal, valamint pár tipikus erdőrészlet faállomány-magassági modelljének eloszlása a számított átlagmagasságokkal..... 102
56. ábra: A borított felszín modellek változása. 1962–1991, valamint 1991–1999 (Részlet) színskála: -20 m (piros) – 20 m (zöld)..... 103
57. ábra: A „Soproni-hegység” mintaterület erdőborításának átalakulási térképe (1845, 1995) 106
58. ábra: A Soproni-hegység erdő- és korosztálytípusainak diagramja 108
59. ábra: A mintaterület fő fafajnemeinek koreloszlása 20 évvel ezelőtt, jelenleg, és 20 év múlva L: Lombos; F: Fenyő..... 110
60. ábra: Színkiegyenlítés az ER Mapper program segítségével (bal oldalon), valamint a szegmensek egyeztetésével (jobb oldalon) 112

Táblázatok jegyzéke

I. táblázat: Egy légifényképező-repülés legfontosabb paramétereinek számítása 29
II. táblázat: A jelentősebb digitális mérőkamerák 32
III. táblázat: A legfontosabb műhold-csoportok áttekintése 33
IV. táblázat: Néhány – jelenleg már nyílt – katonai műholdprogram adata 34
V. táblázat: A Landsat műholdrendszer fontosabb jellemzői 36
VI. táblázat: Az EOS program műholdjai és érzékelői 38
VII. táblázat: Az EOS Terrán lévő optikai érzékelők tulajdonságai 38
VIII. táblázat: Az EO-1 műholdon található érzékelők áttekintő táblázata 40
IX. táblázat: A SPOT műholdrendszer fontosabb jellemzői 40
X. táblázat: Sztereófelvételek készítésére alkalmas műholdak és érzékelők 44
XI. táblázat: A közeli jövő műholdjai és érzékelői 47
XII. táblázat: A Sárközy-féle leírás adatai 69
XIII. táblázat: A Soproni-hegységről rendelkezésre álló, és részletesen feldolgozott (félkövér) űrfelvételek fontosabb adatai 71
XIV. táblázat: A felhasznált térképek adatai 71
XV. táblázat: A felhasznált légifényképek adatai 72
XVI. táblázat: A vizsgálatba bevont domborzatmodellek 73
XVII. táblázat: A mintaterület domborzatának statisztikai jellemzése 75
XVIII. táblázat: A Landsat-érzékelők látható vörös (R) és közeli infravörös (NIR) sávkiosztása 76
XIX. táblázat: Spektrális erdőrészlet-változások statisztikái a Landsat TM felvétel 3. sávjában 83
XX. táblázat: A vonalak öröklődési táblája 88
XXI. táblázat: Az erdőrészlet-változások területi statisztikái 89
XXII. táblázat: Az osztályozóban alkalmazott szűrő együtthatói 94
XXIII. táblázat: Az 1999-es repülés és előfeldolgozás adatai 96
XXIV. táblázat: A Spot P alapú osztályozó pontossága 104
XXV. táblázat: A „Soproni-hegység” mintaterület erdőborításának változása 105
XXVI. táblázat: A Soproni-hegység erdő- és korosztálytípusai az 1998-as Landsat űrfelvétel és az 1999 évi borított felszínmodell alapján 107
XXVII. táblázat: Erdőrészletek távérzékelési adatainak statisztikái 109
XXVIII. táblázat: Az infraszínes – természetes színes színtranszformáció együtthatói 112

Mellékletek jegyzéke

1. melléklet: A mintaterület elhelyezkedése
2. melléklet: A mintaterület domborzatának, valamint az abból levezetett térképek statisztikáinak grafikus megjelenítése
3. melléklet: Az I. katonai felmérés térképe (1784)
4. melléklet: A Sárközy András-féle térkép (1787)
5. melléklet: A II. katonai felmérés térképe (1845)
6. melléklet: A reambulált III. katonai felmérés térképe (1921) az osztályozott erdőkkel
7. melléklet: Az 1962 évi ortofotó-mozaik
8. melléklet: Az 1983 évi Landsat MS űrfelvétel
9. melléklet: Az 1987 évi Landsat TM űrfelvétel az osztályozással
10. melléklet: Az 1995 évi Spot P űrfelvétel az erdőosztályozással
11. melléklet: Az 1998 évi Landsat TM űrfelvétel az osztályozással
12. melléklet: Az 1999 évi ortofotó-mozaik
13. melléklet: A spektrális adatbank alapú osztályozóval detektált erőrészlet-változások a 2002 évi ASTER űrfelvételen
14. melléklet: A GPS illesztőpontok listája
15. melléklet: A tömbkiegyenlítések jegyzőkönyvei

A távérzékelés erdészeti alkalmazása

Doktori (PhD) értekezés

Király Géza

Kulcsszavak: erdészet, idősoros űrfelvétel osztályozás, változás-vizsgálat, ortofotó-előállítás, borított felszínmodell elemzés

Összefoglalás:

Munkám során a távérzékelés erdészeti felhasználásaival foglalkoztam. Ezen belül az optikai távérzékelésből származó, illetve egyéb, másodlagos digitális képek feldolgozásával, és a segítségükkel kinyerhető helyzeti és leíró, de elsősorban erdészeti adatok felhasználhatóságára helyeztem a hangsúlyt. Egy 1984-től 2000-ig Landsat idősort – amelynek felvételeit 1984 és 2000 között készítették – elemeztem új osztályozók segítségével. Vizsgálataimba további űrfelvételeket, valamint archív topográfiai térképek, archív és aktuális légifényképek digitális adatállományait is bevontam azért, hogy a lefedett idő-intervallumot kiterjesszem. Ezeket az adatokat a digitális képfeldolgozás eszközkészletét használva elemeztem, és az eredményeket térinformatikai rendszerbe integráltam. Légifényképekből és az ASTER űrfelvételből borított felszínmodelleket állítottam elő. Mind az űrfelvételeket, mind a borított felszínmodelleket egy erdőrészlet alapú spektrális adatbázist alkalmazó szakértői rendszerbe integráltam.

Forestry Applications of Remote Sensing

Doctoral (PhD) Thesis

Géza Király

Keywords: Forestry, Multitemporal Image Classification, Change Detection, Orthoimage Production, Digital Surface Model Analysis

Abstract:

The main topic of the research was the forestry applications of remote sensing. The emphases were put on the processing of optical remotely-sensed images and other secondary digital images; and geometric and descriptive data extraction from these images especially in forestry field. A time-series of Landsat images taken from 1984 to 2000 were analysed by means of a new image classifier. Some other source data, such as scanned archive topographic maps, scanned archive and current aerial photography, a Spot P and an ASTER images, were also involved to extend the time span. These source data were analysed with image processing techniques and the results of the analysis were put into a GIS. Digital Surface Models from aerial photography and the ASTER images were extracted and (together with the other results) were put into a forest compartment-base spectral database supporting system.

1. Bevezetés

Értekezésemben a távérzékelés erdészeti alkalmazásaival foglalkozom. A címben megfogalmazott téma nagyon széles területet ölel fel. Ennek egyik oka, hogy annakidején még nem tudtam pontosan, hogy ezen belül mivel fogok, és mivel lesz lehetőségem foglalkozni. Számos elképzelés az évek során nem, vagy nem időben valósult meg, és számos olyan témakör is felmerült, amelyeket eredetileg nem terveztem bevonni a disszertációba. Ugyanakkor az idő előrehaladtával olyan új érzékelők és módszerek jelentek meg, amelyek újabb és újabb lehetőségeket nyitottak meg a szakemberek számára.

Amikor a kilencvenes évek közepe felé még hallgatóként bekapcsolódtam az – akkor még – Erdészeti és Faipari Egyetem Földmérési és Távérzékelési Tanszékének munkájába, nem is sejthettem, hogy tíz év elteltével „még mindig" ugyanott és ugyanazzal fogok foglalkozni. Az eltelt évek során a távérzékelésben rejlő lehetőségek jelentősen kibővültek. Az újabb felvételezési eljárások újabb feldolgozási módszerek kidolgozását követelik meg, ezáltal feladatokat jelent a kutatók számára.

Napjainkban a távérzékelt adatok hatékony felhasználásához elengedhetetlen, hogy azokat földrajzi információs rendszerbe (*Geographical Information System – GIS*) integráljuk. De nemcsak a felhasználáshoz, hanem az adatok elemzéséhez, és megjelenítéséhez is ilyen GIS-t alkalmazunk, a távérzékelés a GIS részévé vált.

Munkám során egyre gyakrabban került előtérbe a Soproni-hegység, az évek során egyre több adattal rendelkeztünk róla. A kijelölt mintaterületen vizsgáltam az egyes távérzékelési forrásadatokból kinyerhető, az erdész szakma által hasznosítható információkat. Mivel a hagyományos értelemben vett forrásadatok – az űrfelvételek – erdészeti szempontból csak egy szűkebb időintervallumra voltak elérhetők (1983–2002), így a forrásadatok körét kiterjesztettem. Vizsgálataimba így bevontam légifényképeket és különböző szkennelt térképeket is, amelyeket a digitális képfeldolgozás eszközkészletével, erdészeti szempontból értékeltem ki.

Jelen munkámban tehát a Soproni-hegységről rendelkezésemre álló elsődleges és másodlagos digitális képek feldolgozásával, és azok erdészeti szakterületeken való alkalmazásával foglalkoztam.

„Olvastam az újságban, hogy szatellitek röpködnek fölöttünk. Puszta szemmel nem látni őket, sőt gukkerral se, mert a kozmoszban röpködnek. Ők viszont látnak minket. Mi több, le is tudnak fényképezni mindent, ami a Földön található – mégpedig olyan pontossággal, hogy bármi, ami fél méternél hosszabb vagy szélesebb, olyan pontosan látszik a képen, mintha csak az unokatestvérünk készítette volna a képet a névnapunk vagy az esküvőnk alkalmából.
Kit érdekel — gondoltam magamban —, az én pofám nem nagyobb fél méternél."

(Sławomir Mrożek: Ez nem fair)

2. Szakirodalmi áttekintés

2.1. A „távérzékelés” mint fogalom

A távérzékelés olyan információgyűjtési eljárás, melynek során úgy kapunk a vizsgált objektumokról egységes adatrendszert, hogy nem vagyunk közvetlen érintkezésben velük. Az információ közvetítésére alkalmazhatjuk a hangokat, a mágneses és szeizmikus rezgéseket, a gravitációt, vagy az elektromágneses hullámokat. A szűkebb értelemben vett távérzékelés esetében a vizsgált objektum a bolygó, ahol élünk: a Föld; és az információt az elektromágneses sugárzás továbbítja az érzékelőhöz.

A definíció alapján a távérzékelés felöleli a fotogrammetria jelentős részét is. Az amúgy sokkal jelentősebb múlttal rendelkező fotogrammetria elsősorban az objektum geometriájára vonatkozó tulajdonságokat (elhelyezkedés, méret, forma) méri, vizsgálja. A fotointerpretáció pedig a felvételek – általában vizuális – értelmezésével foglalkozik [44. Kraus – Schneider (1988)]. A távérzékelés fogalma az első polgári célú műhold fellövésével (ERTS-1, lásd: 2.3.9.1. A NASA műholdrendszer, 36. o.) kezdett meghonosodni, bár az első felvételek az űrből már jóval korábban, de még fotográfiai úton készültek.

A műholdakról készült felvételek esetében már évtizedek óta a digitális érzékelőké az elsődleges szerep, ugyanakkor napjainkban a fotogrammetriában is áttértek a digitális fotogrammetriára. Jelenleg még elsősorban az analóg légifilmek szkennelésével előállított ún. másodlagos digitális képek alapján dolgoznak, de egyre többen alkalmaznak itt is a hagyományos fényképezési eljárások mellet vagy helyett korszerű, digitális érzékelőket és adatrögzítőket.

A távérzékelés munkafolyamata során a digitális képfeldolgozás eszközeivel dolgozunk, amely eszközrendszert a digitális fotogrammetria sem tudja nélkülözni. Napjainkban ezért a határok e szakterületek között elmosódtak. Ráadásul egyre több olyan műhold, valamint érzékelő van, amelynek felvételei alkalmasak a vizsgált objektumok sztereófotogrammetriai kiértékelésére is. Miközben a feldolgozó szoftverek közül a távérzékelési, digitális képfeldolgozási programok fotogrammetriai eszközkészlettel bővültek, a fotogrammetriai programokat képfeldolgozási, valamint az űrfelvételek fotogrammetriai kiértékelését lehetővé tevő modulokkal látták el.

Doktori értekezésemben elsősorban a digitális képfeldolgozással foglalkozom. Mivel azonban az erdők életében a polgári űrfelvételek által biztosított körülbelül 30 éves időintervallum nem ölel fel egy teljes életciklust, ezért vizsgálataimba egyéb digitális képeket – térképeket és légifényképeket – is bevontam.

Mély tisztelettel adózok a fotogrammetria nagyjainak, mégis úgy gondolom, hogy a két tudományág – mármint a fotogrammetria és távérzékelés – fejlődéseként létrejött tudományterületet távérzékelésnek kell nevezni. Ez következik a szakterületek definíciójából is, mert amíg a távérzékelés magába foglalhatja a fotogrammetriát, addig fordítva ez nem igaz. Másrészt didaktikai szempontból is úgy tartom célszerűnek, hogy e két részterületet közös alapokon szükséges tárgyalni.

A napjainkban egyre szélesebb körben alkalmazott földrajzi információs rendszerek (*Geographical Information System – GIS*) esetében mind a fotogrammetria, mind a távérzékelés egy adatgyűjtési eljárás, amely során a geoinformatikai rendszerünk helyzeti és leíró adatok iránti jelentős „éhségét" csillapíthatjuk. Az újabb és újabb technológiák, valamint az ezek alapján kialakuló szakterületek gyakran megpróbálják bekebelezni, vagy ténylegesen be is kebelezik a régebbi, nagyobb hagyományokkal rendelkező szakterületeket. A folyamat megállíthatatlannak tűnik, ami a szakemberek szemléletét is formálja.

A nemzetközi szakirodalomban és szaknyelvben egyre inkább meghonosodott a geomatika kifejezés, amely lényegében magába foglalja az összes, földrajzi helyhez köthető információ gyűjtésére, tárolására, elemzésére és megjelenítésére kialakult részszakterületeket.

A távérzékelés egyik legjelentősebb alkalmazási területe a természeti erőforrások kutatása. Napjainkban egyre gyakrabban szembesülünk azzal, hogy a Föld erőforrásai nem végtelenek. Az erőforrásokkal történő hatékonyabb gazdálkodásban az alábbi területeken segíthet a távérzékelés:

- A természeti erőforrások felmérése: nem megújuló – mint például fosszilis energiahordozók, nyersanyagok –, valamint megújuló – mint például napsugárzás, vízkészlet, talajkészlet, valamint az ezek alapján kialakult növényzet – erőforrások felmérése.
- A természetben – sajnos egyre gyakrabban – előforduló szélsőséges jelenségek, és azok hatásainak vizsgálata: viharok, esőzések, aszály, természetes tüzek, földrengés, szökőár stb.
- Az ember, és az emberi tevékenységek környezetre gyakorolt hatásainak felmérése: környezetszennyezés, rombolások, bányászat, ipar, mező- és erdőgazdálkodás.
- Monitoring és modellezés: az előbb említett felmérések időbeni változása, valamint ezek alapján a jövőbeni várható alakulása.

Az erdészeti távérzékelés mindegyik részterületen alkalmazható. Egyrészt az erdők felmérésére, a természeti csapások hatásának vizsgálata (pl. széldöntések, viharkárok), másrészt az erdőgazdálkodás, valamint egyéb emberi tevékenység (pl. levegőszennyezés) hatásainak felmérésére, az erdők időbeni változásának megfigyelésére (monitoring), valamint a monitoring eredményei alapján történő modellezésre.

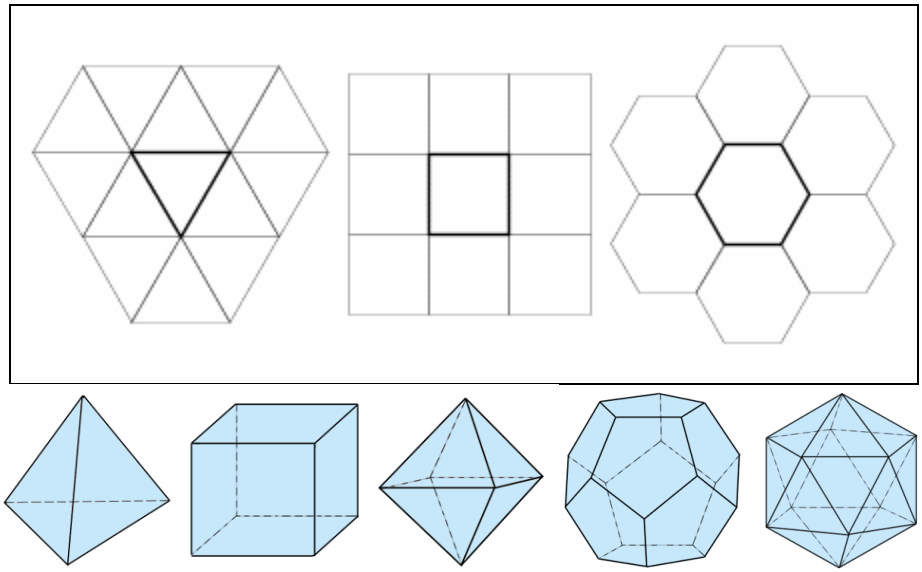
2.2. A szabályos adatmodellek

A távérzékelés általában szabályos adatmodellekkel dolgozik. Ahhoz, hogy az egyes felvételezési módokat és feldolgozási eljárásokat jobban megérthessük, célszerű először az alkalmazott szabályos adatmodelleket megismerni.

Az ún. tesszelációs modellek a vizsgált terület- vagy térrészt úgy osztják fel elemi egységekre, hogy azok hézag- és átfedésmentesek legyenek. Az elemi egységek alakja szerint megkülönböztetünk szabályos és szabálytalan tesszelációt.

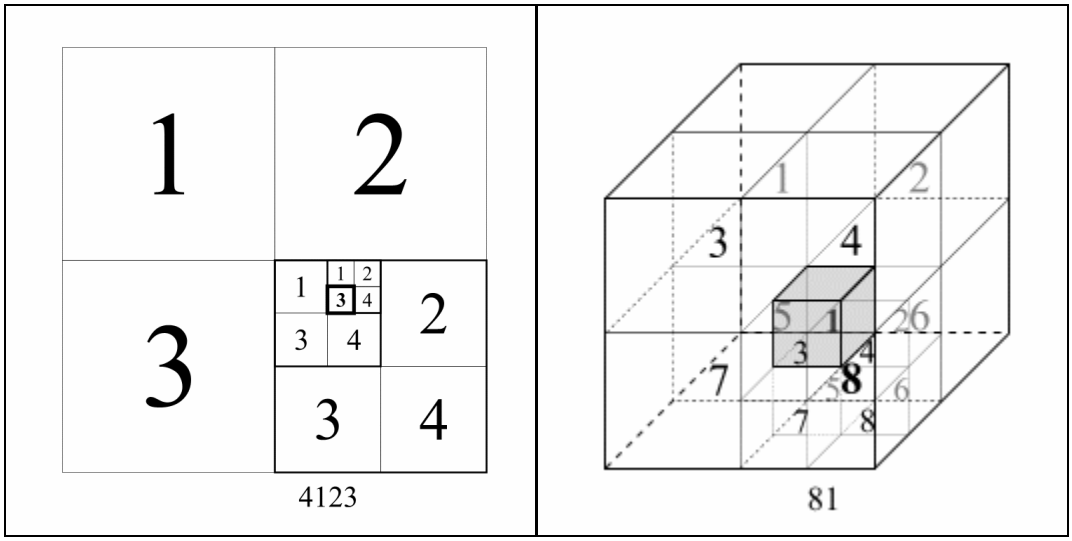
A szabálytalan tesszeláció esetében az elemi egységek alakja igazodik az adatok térbeli elrendeződéséhez. Legismertebb képviselőjük a felületmodellezésben széleskörűen alkalmazott Delaunay-háromszögelés, valamint párja a Voronoi-poligonok.

A szabályos tesszelációk esetében az elemi egységek szabályosak. Két dimenzió esetében elemi egység lehet a szabályos háromszög, a négyzet és a szabályos hatszög. Három dimenzió esetében a Platon-féle szabályos testek lehetnek elemi egységek, ezek a tetra-, hexa-, okta-, dodeka- és az ikozaéder (*1. ábra*). A szabályos tesszelációk esetében néha megkövetelhetjük azt is, hogy az elemi egységeket önmagukban ismétlődően, rekurzív módon – hierarchikusan – tovább lehessen osztani.



1. ábra: **2D-s szabályos tesszelációk, és a Platon-féle szabályos testek**

A fent említett elemi egységek közül egyedül a dodekaédert nem lehet továbbosztani. Mind a két-, mind a háromdimenziós esetben a leggyakrabban alkalmazott szabályos tesszelációk derékszögű elemi egységre, négyzetre és kockára épülnek fel. Az ilyen, derékszögű, szabályos rekurzív felbontásokat mutatja be a *2. ábra*.



2. ábra: **2 és 3D-s rekurzív felbontások, valamint a négyes- és nyolcas-fa kódolások**

A rekurzív felbontásoknak, valamint a hozzájuk kapcsolódó négyesfa (*quadtree*) és nyolcasfa (*octree*) kódolásoknak a geoinformatikában nagy jelentősége van. Az ilyen modellek esetén

az objektumok elhelyezkedését nem a koordinátával, hanem a rekurzívan felbontott rész azonosítójával adjuk meg. Ezen túl az azonosító az objektum egy másik fontos geometriai tulajdonságát, a méretét – pontosabban a befoglaló egység méretét – is meghatározza. A módszert gyakran alkalmazzák a vektoros adatok térbeli indexelésére. Ugyanakkor a szabályos adatmodellek tömörítésére is számos négyesfa alapú eljárást alkalmaznak.

A kétdimenziós szabályos tesszeláció – általánosan elterjedt nevén raszter – alapegysége a pixel (***pi**cture **x el**ement*) (lásd *16. ábra:* Landsat TM űrfelvétel sematikus felépítése, 33. o.), míg a 3D-s alapegysége az ún. voxel (***vo**lume **x el**ement*).

A kétdimenziós szabályos adatmodelleknek a távérzékelésben nagyon nagy a jelentősége. Egyrészt a digitális képek szabályos adatmodellt használnak, másrészt a digitális felületmodellek egy része is raszteres adatmodellt használ.

A raszteres adatmodelleket többféleképpen is csoportosíthatjuk. Az egyik ilyen lehetséges csoportosítás annak megfelelően történhet, hogy a szabályos adatmodell alapegysége mennyiségi vagy minőségi információkat tárol. Mennyiségi információk tárolása esetén a pixelek értéke és valamilyen konkrét fizikai mennyiség között egyértelmű kapcsolat áll fent. Ilyen mennyiségi érték lehet például a vizsgált terület adott hullámhossztartományon történő kisugárzása, vagy a tengerszint feletti magassága. Ugyanakkor minőségi információk tárolása esetén a pixelek tematikus kódokat tárolnak, amelyhez valamilyen minőségi kategória tartozik. Ilyenek lehetnek például a földhasználat kategóriáinak tematikus kódjai.

Azokat a szabályos adatmodelleket, amelyek a vizsgált objektum radiometriai és spektrális tulajdonságairól tárolnak mennyiségi információkat, digitális képeknek nevezzük. Amennyiben ezeket az információkat közvetlenül digitálisan rögzítjük, akkor elsődleges digitális képről, ha már valamilyen más eljárással (pl. fotográfiai eljárás, analóg térképek stb.) rögzített információkat alakítunk digitálissá, akkor másodlagos digitális képekről beszélünk. Amíg az elsődleges digitális képek előállításához leggyakrabban a különböző érzékelőket használjuk (lásd: 2.3.5.3. A letapogatók, 30. o.), addig a másodlagos digitális képek előállításának eszközei a szkennerek.

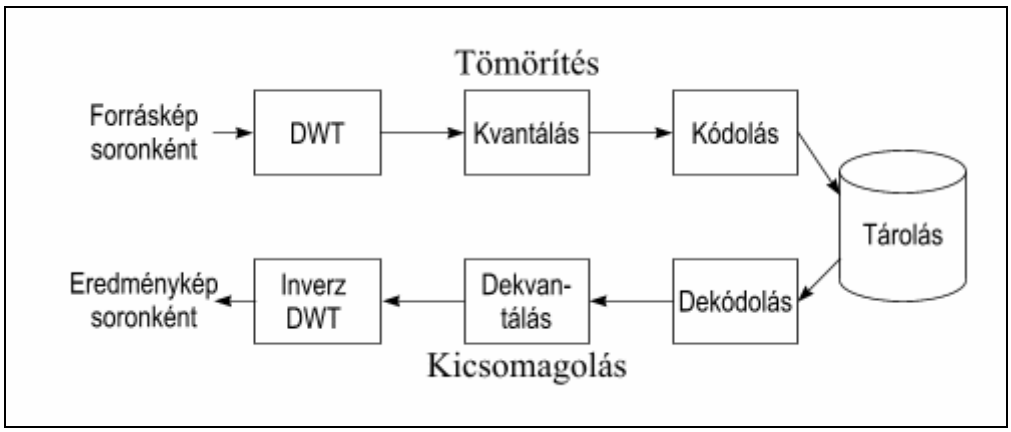
Amennyiben a raszteres adatmodell valamilyen térben változó folytonos mennyiségi értékeket tárol, akkor azt digitális felületmodellnek nevezzük.

A raszteres adatmodellnek a legfontosabb tulajdonsága a felbontása, amely az alapegység méretét jelenti. Mivel a szabályos adatmodellek esetében az információszegény területekről is ugyanannyi értéket tárolunk, ezért ezeknek az adatmodelleknek a tárolási igénye nagy. Éppen ezért a gyakorlatban különféle tömörítési eljárásokat szoktunk alkalmazni. Az adattömörítésnek két alapvető csoportja az adatvesztés nélküli és az adatvesztéssel járó tömörítés. Az előbbinél a tömörített adatokból az eredeti forrásadatokat változatlan módon vissza tudjuk nyerni, míg az utóbbi esetben a tömörítés során meghatározott mértékű eltérésekkel tudjuk csak az eredeti forrásadatokat visszanyerni.

Az adatvesztés nélküli tömörítés egyik ismert módja a hosszkódolás (*Run Length Encoding – RLE*). Ezt a tömörítést akkor tudjuk hatékonyan alkalmazni, amikor a raszter cellaértékei tematikus kódok. Ilyen esetben az egyes kódok gyakran egymás mellett helyezkednek el. Az adatállományban nem tároljuk az egymás utáni azonos értékeket, hanem azt kódoljuk, hogy

most *k* darab *n* érték következik. Ilyen tömörítést alkalmaz például a ZSoft Publisher cég Paintbrush (*pcx*) formátuma, valamint ARC/INFO GRID formátum, amennyiben egész értékeket tárol.

Abban az esetben, ha az adatok valamilyen mennyiségi értéket tárolnak, a különböző adatvesztéssel járó tömörítéseket alkalmazhatjuk hatékonyan. Napjainkban a *wavelet* tömörítés az egyik legelterjedtebb a geomatikában, és munkám során én is gyakran alkalmaztam. Az egyik ilyen *wavelet* alapú tömörítés az *ER Mapper Compressed Wavelet (ECW)*. Ennél a diszkrét wavelet transzformációt (*Discrete Wavelet Transformations (DWT)*) egy olyan új szabadalmaztatott eljárással oldották meg, ahol nem szükséges a forrásképet blokkokra osztani, hanem közvetlenül az eredeti képsorokból, több felbontásban, rekurzív módon számítják ki a wavelet transzformációt [19. Earth Resource Mapping (2001)]. A transzformáció eredménye még nem a tömörített kép, utána ezt kvantálják, kódolják, és utána tárolják. A kicsomagolás során lehetőség van arra, hogy csak azt a területet és olyan részletességgel csomagoljunk ki, amire éppen szükségünk van, így ez nagyon gyors megjelenítést tesz lehetővé (*3. ábra*).



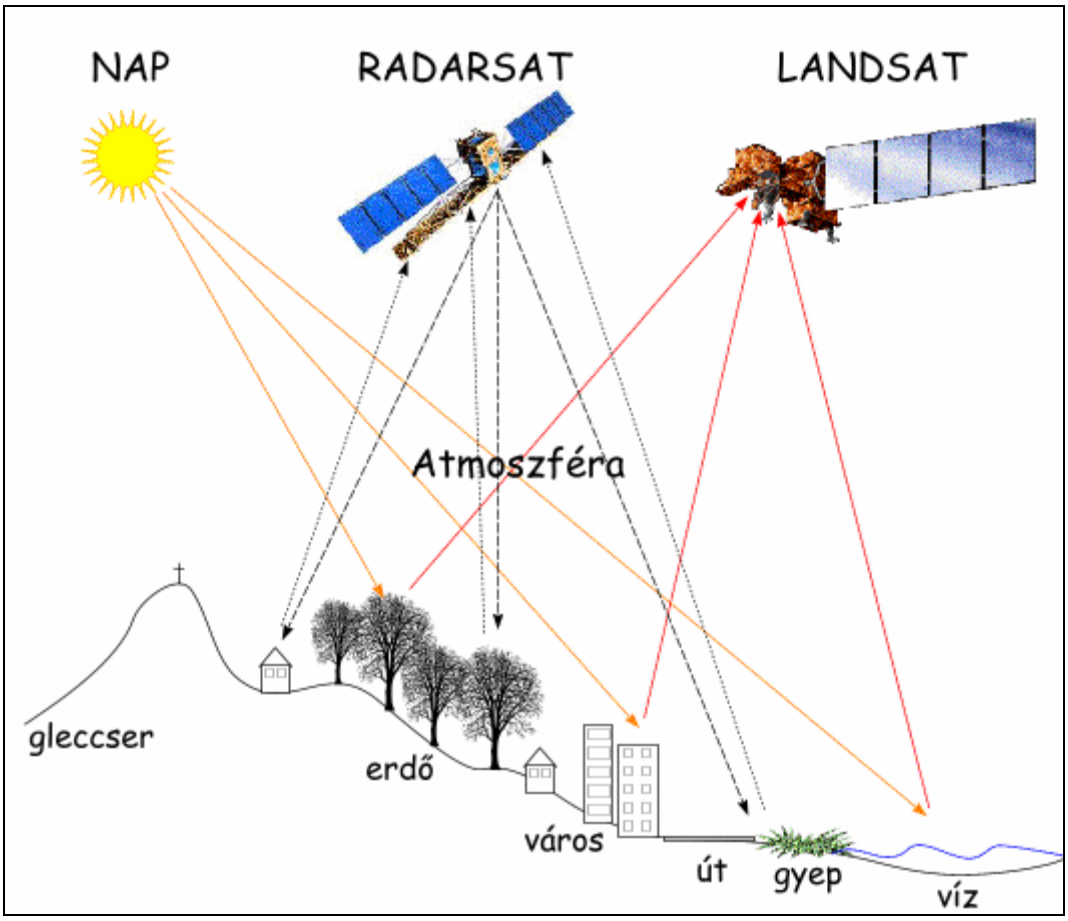
3. ábra: **Az ECW tömörítés folyamata**

2.3. A távérzékelési folyamat

A távérzékelés – angolul *remote sensing*, németül *Fernerkundung* – olyan információgyűjtési eljárás, melynek során az elektromágneses hullámok közvetítésével kapunk a földfelszínről egységes adatrendszert. A távérzékelési folyamat rendszerét mutatja be a következő ábra (*4. ábra*).

A rendszer összetevői a következők:

- adóegység, sugárforrás,
- vizsgált objektum,
- hordozóeszköz (*platform*),
- érzékelő (*sensor*).



4. ábra: **A távérzékelési folyamat rendszere**

Amennyiben az érzékelő egy elektromágneses hullámok kibocsátására alkalmas adóegység – amely lehet az érzékelővel egybeépítve, de attól független is – jeleit érzékeli, aktív távérzékelésről beszélünk (pl. RADAR távérzékelés, az ábrán RADARSAT). Ha azonban az érzékelő valamilyen egyéb sugárforrás által kibocsátott, és a vizsgált objektum által visszavert sugárzást rögzíti, akkor passzív távérzékelésről beszélünk (pl. az optikai távérzékelés, az ábrán LANDSAT). A passzív távérzékelés része – de kétségkívül a legfontosabb része – az optikai távérzékelés, amelynél a sugárzás forrása a Nap, és az elektromágneses sugárzás látható, valamint ahhoz közeli tartományát alkalmazzuk. Vizsgálataim középpontjában elsősorban az optikai távérzékelés áll.

A vizsgált objektum valójában bármi lehet, ami valamilyen módon kölcsönhatásba lép az elektromágneses sugárzással. Az „éjjellátó” távcsövektől kezdve a röntgenfelvételeken keresztül, az emberi látásig mindennapjainkban is körülvesz minket a távérzékelés. Mégis, a szűkebb értelemben vett távérzékelésnek azt nevezzük, amikor a vizsgált objektum a Föld.

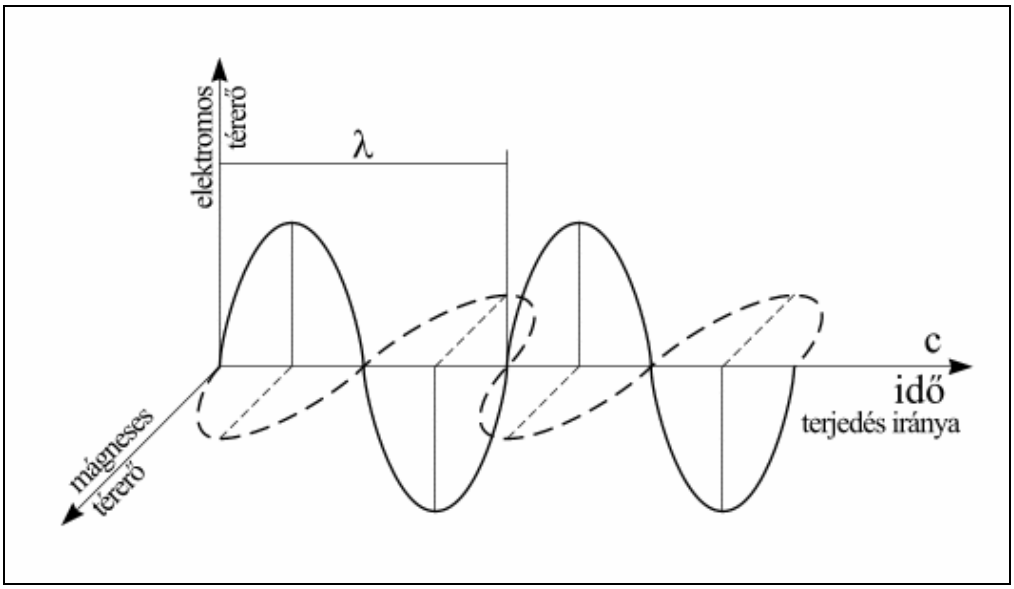
A hordozóeszköz feladata, hogy az érzékelőt a vizsgált objektumhoz viszonyítva olyan helyre juttassa, ahonnan a visszavert hullámok a felhasználásnak megfelelő módon rögzíthetők. A leggyakrabban alkalmazott hordozóeszközök a műholdak, légi járművek (repülőgép, helikopter stb.) és földi eszközök (pl. mérőkocsi).

A távérzékelési folyamat talán legfontosabb összetevője az érzékelő. Az érzékelő (*sensor*) az az eszköz, amelynek segítségével a vizsgált objektumokról visszaverődő elektromágneses sugárzást érzékeljük és rögzítjük.

Ezen a négy összetevőn kívül maga az elektromágneses sugárzás a folyamat főszereplője, mint az információ közvetítője. A következő alfejezetben – mielőtt a másik négy összetevőről szólnék – az elektromágneses sugárzás fizikai alapjait ismertetem.

2.3.1. Az elektromágneses sugárzás

Az elektromágneses sugárzásra igazak a hullámterjedés törvényei. Az elektromágneses hullám két egymásra, és a terjedés irányára is merőleges összetevője az elektromos hullám, valamint a mágneses hullám (*5. ábra*).



5. ábra: **Az elektromágneses hullám**

Az elektromágneses hullámok alapvető törvényszerűségét a hullámegyenlet fejezi ki:

$$c = \nu \cdot \lambda \qquad \text{[1. egy.]}$$

ahol: c a fény terjedési sebessége ~$3 \cdot 10^8$ (m/s)
ν a frekvencia (1/s)
λ a hullámhossz (m)

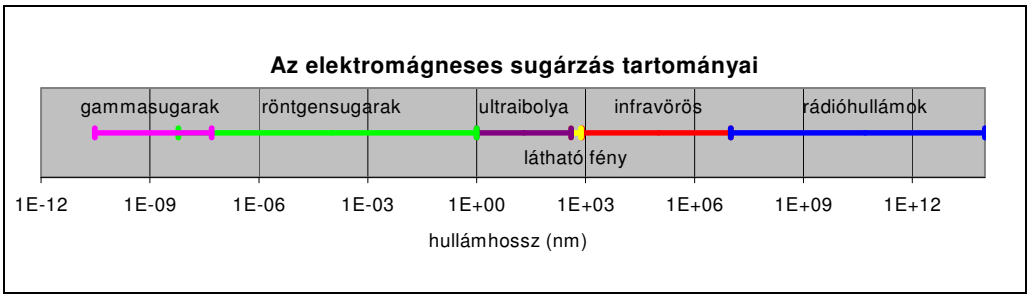
Az elektromágneses sugárzás bizonyos törvényszerűségei nem magyarázhatók meg a hullámtörvények segítségével. Planck feltételezte, hogy a sugárzás energiája nem folytonosan változik, hanem kis lépésekben, ún. kvantumokban. Ezt a feltételezést Einstein alkalmazta és tovább is fejlesztette. Ő nevezte el a fény esetében ezeket a kvantumokat fotonoknak. Egy foton (kvantum) energiáját a Planck-törvény segítségével számíthatjuk ki:

$$E = h \cdot \nu = \mathrm{h} \cdot \frac{\mathrm{c}}{\lambda} \qquad \text{[2. egy.]}$$

ahol: E a foton energiája (J)
h a Planck-állandó ~ $6{,}6256 \cdot 10^{-34}$ (Js)

Látható, hogy az elektromágneses sugárzás energiája egyenes arányban áll a frekvenciával, és fordított arányban áll a hullámhosszal.

Az elektromágneses sugárzás hullámhossz szerinti megoszlása az elektromágneses spektrum (*6. ábra*).



6. ábra: **Az elektromágneses spektrum**

A spektrum meghatározott tartományai az ábrán feltüntetett neveken ismertek. Ebből a széles spektrumból a távérzékelés csak bizonyos hullámhossztartományokat használ, az optikai távérzékelés pedig csak a látható fény, valamint az infravörös tartományát.

2.3.2. Sugárforrás

Értekezésemben passzív távérzékeléssel foglalkozom, ahol az elektromágneses sugárzás elsődleges forrása naprendszerünk csillaga, a Nap. Minden test sugároz, a részecskéinek rendezetlen hőmozgása következtében. A testek nemcsak kibocsátanak sugárzást, hanem az őket érőket el is nyelik. Kirchhoff kimondta, hogy minden anyag emisszió- és abszorcióképességének hányadosa ugyanakkora, adott hőmérséklet és hullámhossz esetében. Éppen ez vezette a figyelmet azt abszolút fekete testek felé. A Stefan–Boltzmann-törvény kimondja, hogy az abszolút fekete test sugárzása egyenesen arányos a hőmérséklet 4. hatványával:

$$E = \sigma \cdot \mathrm{T}^4 \quad \text{vagy} \quad P = \sigma \cdot \mathrm{S} \cdot \mathrm{T}^4 \qquad \text{[3. egy.]}$$

ahol:
- E összes kisugárzott energia
- P a sugárforrás teljesítménye
- σ Stefan-Boltzmann-állandó $5{,}67 \cdot 10^{-8}$ ($\mathrm{W/m^2/K^4}$)
- S a sugárforrás felülete

Wien azt vizsgálta, hogy a sugárzásban milyen az energiamegoszlás az egyes hullámhosszak között. Megállapította, hogy a maximális energiájú sugár hullámhosszának és a hőmérsékletnek a szorzata állandó. Ez a Wien-féle eltolódási törvény:

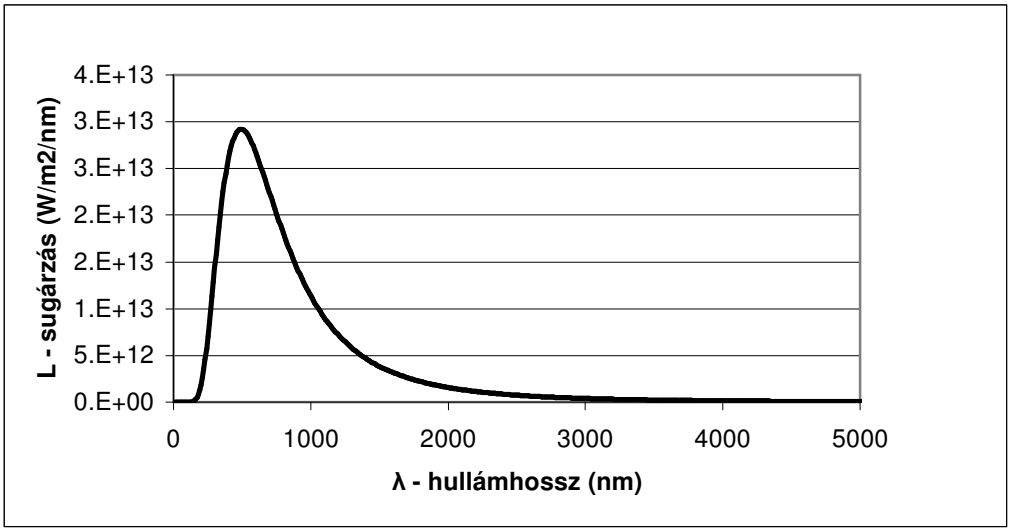
$$\lambda_{\max} \cdot T = 2.8983 \cdot 10^{-3} (m \cdot \mathrm{K}) \qquad \text{[4. egy.]}$$

Mind a Stefan-Boltzmann törvény, mind a Wien-féle eltolódási törvény levezethető a Planck-féle sugárzási törvényből, amely az abszolút fekete testek sugárzását írja le:

$$L_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left(e^{hc/\lambda KT} - 1 \right)^{-1} \qquad \text{[5. egy.]}$$

ahol:
- K Boltzmann-állandó $1{,}3805 \cdot 10^{-23}$ (J/K)
- T a feketetest hőmérséklete (K)

A Nap által kibocsátott sugárzás közelítőleg leírható a Planck-törvény (2. egy.) szerinti ~5900 K hőmérsékletű feketetest sugárzásával (*7. ábra*).



7. ábra: **Az 5900 K hőmérsékletű feketetest sugárzása**

Az ábráról leolvasható, illetve a Wien-féle eltolódási törvény segítségével pontosan meghatározható a sugárzási maximum hullámhossza:

$$\lambda_{\max} = \frac{2.8983 \cdot 10^{-3} (m \cdot \mathrm{K})}{T(K)} = \frac{2.8983 \cdot 10^{-3}}{5900} = 491 \cdot 10^{-9} (m) \qquad \text{[6. egy.]}$$

Erre a tartományra a legérzékenyebbek a szemünk ideghártyájában található csapok.

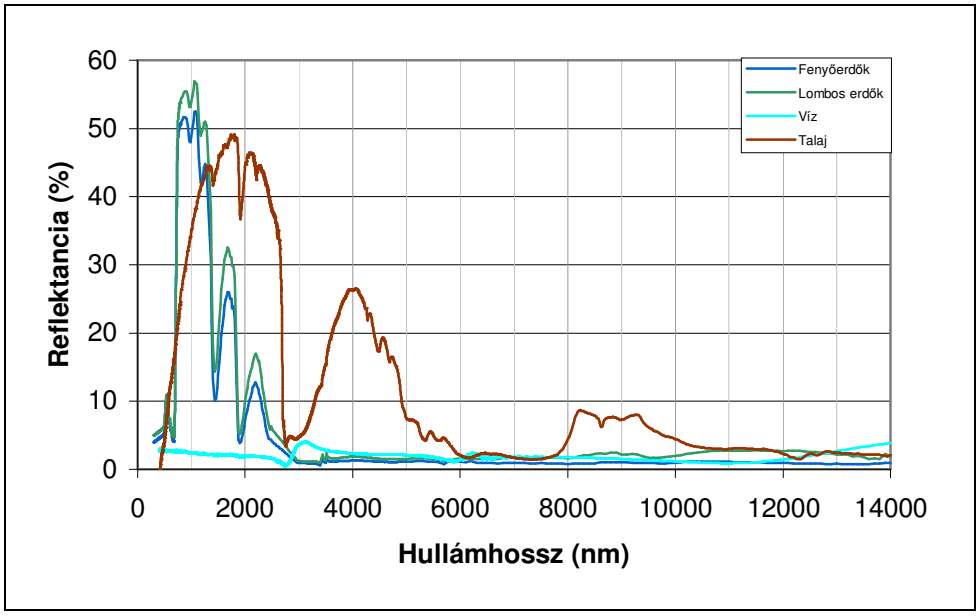
2.3.3. A vizsgált objektum

Ahhoz, hogy a vizsgált objektumokról információt tudjunk gyűjteni az elektromágneses hullámok segítségével, az szükséges, hogy a vizsgált objektum és a hozzá eljutott sugárzás kölcsönhatásba lépjen egymással. A kölcsönhatás különböző fajtái közül (visszaverődés, elnyelés, hőmérsékletnövekedés, kisugárzás) a legfontosabb a visszaverődés (reflexió), valamint a kibocsátás (emisszió). A spektrális visszaverődés, vagy reflektancia egy viszonyszám, amelyet az alábbi képlet mutat be

$$R(\lambda) = \frac{I_v(\lambda)}{I_b(\lambda)} \qquad \text{[7. egy.]}$$

ahol: R spektrális visszaverődés
I_v visszavert fényáram
I_b beeső fényáram

A tárgyak spektrális visszaverése tárgy- és állapotspecifikus, ez teszi egyáltalán lehetővé a távérzékelést. A *8. ábra* a legfontosabb felszínborítások rekflektanciáját mutatja be a hullámhossz függvényében.



8. ábra: **Néhány jellegzetes felszínborítás reflektanciája**

2.3.4. A hordozóeszköz

A hordozóeszköz feladata, hogy az érzékelőt a vizsgált objektumhoz viszonyítva olyan helyre juttassa, ahonnan a visszavert elektromágnese sugárzás a felhasználásnak megfelelő módon rögzíthetők. Mivel a távérzékelés során a vizsgált objektum a földfelszín, amelynek vízszintes kiterjedése nagyságrendekkel meghaladja a függőleges kiterjedését, ezért célszerű az érzékelőt úgy eltávolítani a felszíntől, hogy minél nagyobb területet tudjon egységesen érzékelni. Erre leginkább azok a hordozóeszközök a megfelelőek, amelyek biztosítani tudják ezt az eltávolítást. Erre az egyszerű földi hordozóeszközöktől kezdve, a különböző póznákon és állványokon keresztül a légi járművekig, valamint az űreszközökig sok minden alkalmas.

2.3.4.1. A hordozóeszközök fejlődése

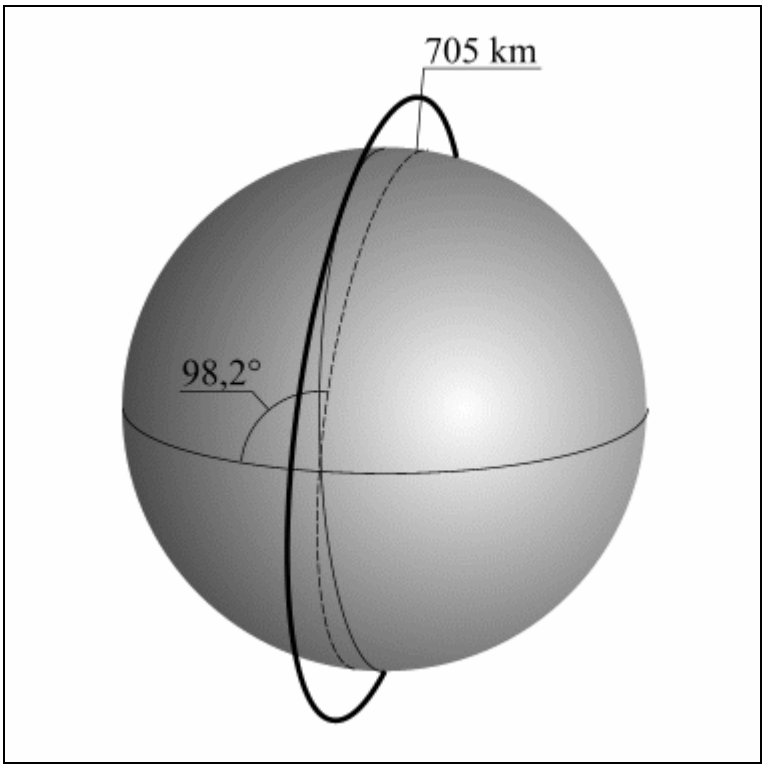
Az első légifényképet 1858-ban Felix Tournachon készítette ballonról, egy francia völgyről. A repülés fejlődésével a légifényképezés egyre jobban elterjedt. Ezzel párhuzamosan azonban már igen korán megjelentek a rakétákról készített felvételek is (Alfred Nobel, 1894). A II. Világháború után – részben a hidegháború miatt – a nagyhatalmak hatalmas lendülettel vetették magukat az űrfejlesztésekbe. Már az 1950-es évek elején sikeres űrfényképezési missziókat hagytak maguk mögött az amerikaiak (Corona-program), később az űrhajósok is számos felvételt készítettek a Földről. 1960. április 1-jén pályára állították az első meteorológiai műholdat (TIROS), 1972-ben pedig az első erőforrás-kutató műholdat (ERTS-1). Innentől kezdve számos műholdat állítottak pályára elsősorban az űrnagyhatalmak, de az 1980-as, ’90-es évektől kezdődően már kisebb országok is megengedhették maguknak egy-egy műhold pályára állítását. Az 1990-es évektől kezdve egyre több magán – nem állami finanszírozású – műhold jelent meg. Napjainkban – a műholdak számának folyamatos növekedése mellett – a kis műholdak (*micro-satellites*) szerepe egyre növekszik. A légi hordozóeszközök esetében a pilóta nélküli járművek (*unmanned*) terjednek egyre inkább. A földi rendszerek esetében pedig az ún. mobil adatgyűjtők (pl. mérőkocsik), amelyek távérzékelőkkel is fel vannak szerelve.

2.3.4.2. A műholdak

Az űrtávérzékelés legfontosabb hordozóeszközei a műholdak. Ezek olyan mesterséges holdak, amelyek valamilyen Föld körüli pályán keringve biztosítják az érzékelő megfelelő helyre juttatását. A passzív távérzékelés során leggyakrabban a geostacionárius, valamint a napszinkron pályán keringő műholdakat használnak.

A geostacionárius műholdakat akkor alkalmazzák, amikor ugyanarról a területről gyakran kell felvételt készíteni (pl. meteorológiai műholdak). Az egyenlítő síkjában keringő, a Földdel azonos szögsebességgel mozgó műholdak ~36 000 km-re vannak a felszíntől.

A Napszinkron pályán keringő műholdak ún. kvázipoláris (a sarkpontokon átmenő síkhoz közeli) síkban keringenek oly módon, hogy az egyenlítő síkját mindig ugyanolyan helyi idő szerint metszik. Az erőforrás-kutató műholdak többsége ezt a műholdpályát használja, amelynek egy tipikus példája látható az alábbi ábrán (*9. ábra*).



9. ábra: **A napszinkron pálya**

Az ábrán látható műholdpálya adatai a következők:

pályamagasság:	705 km
inklináció:	98,2°
keringési idő:	99 perc

A Napszinkron pálya biztosítja azt, hogy ugyanarról a területről készült felvételek közel azonos sugárzási geometriával készüljenek. Ez a feldolgozást jelentősen megkönnyíti.

2.3.4.3. Légi járművek

A távérzékelésben használt hordozóeszközök másik fontos csoportja a légi járművek.

A hőlégballonok ideális hordozóeszközök, mert teljesen rezgésmentes környezetet biztosítanak az érzékelők számára. Ugyanakkor nehezebben irányíthatók.

A repülőgépek a legelterjedtebb légi hordozóeszközök. Különböző meteorológiai körülmények között üzemeltethetők, széles mérettartományban állnak rendelkezésre, viszonylag olcsó üzemeltetésűek. A fotogrammetriai, távérzékelési alkalmazások esetén a minimális repülési sebességnek, valamint a rezgéseknek van nagy jelentőségük.

A helikoptereket – mint hordozóeszközöket – egyre gyakrabban alkalmazzák, különösen azokon a területeken, ahol alacsony magasságból, és éppen ezért alacsony repülési sebességgel szükséges a felvételezés. Esetükben a rezgések csillapításának van nagy jelentősége [77. Winkler (1972)].

Az olcsóbb repülőszerkezetek közül a motoros sárkányrepülőt, valamint a hátimotoros siklóernyőt lehet említeni [31. Haulik (2003)].

Már a múlt század legelején foglalkoztak a sárkányról – és itt most a „papír”-sárkányra kell gondolni – készíthető légifényképekkel. A különböző repülőmodelleknek mind a mai napig nagy a jelentősége a távérzékelésben.

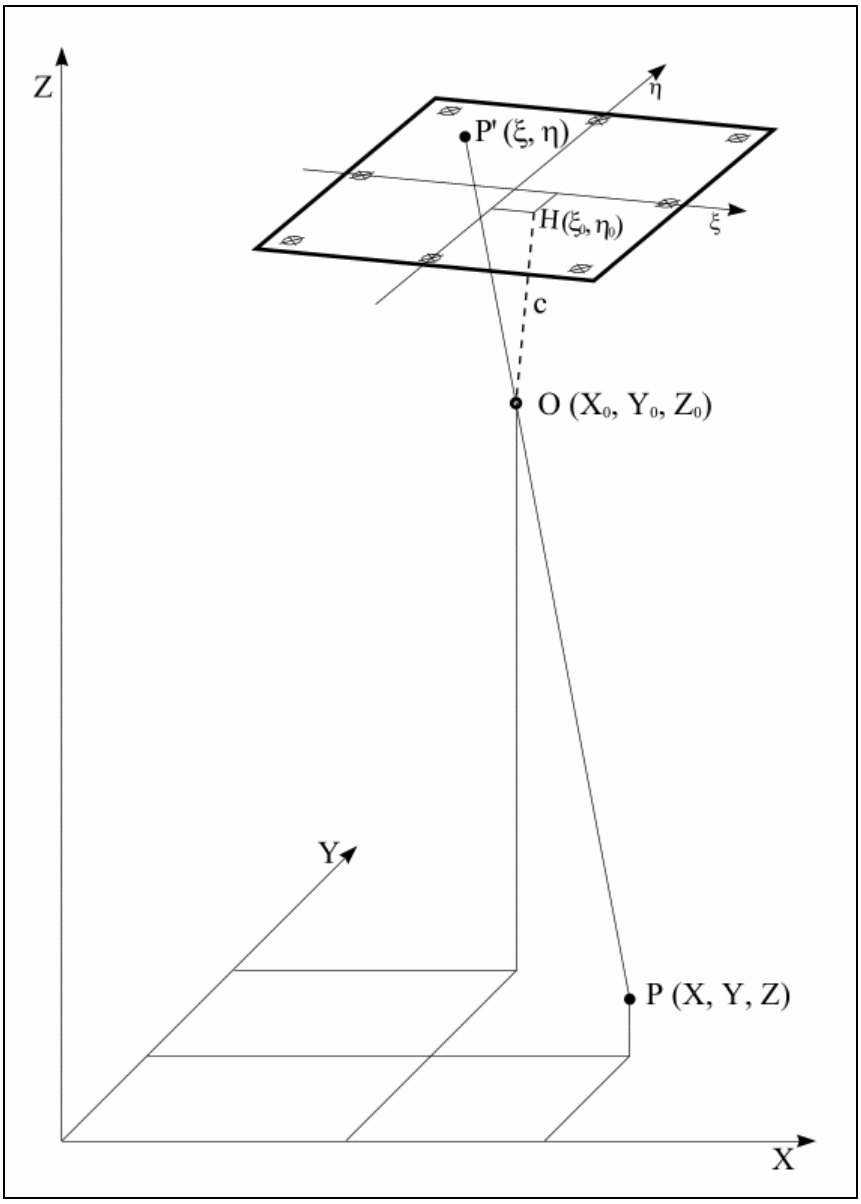
2.3.5. Az érzékelő

A távérzékelés adatgyűjtési folyamatának legfontosabb összetevője az érzékelő. Az érzékelő feladata az elektromágneses hullámok által közvetített információt összegyűjteni, rendszerezni és rögzíteni. Bár ezekre a feladatokra számos technikai megoldás létezik, az érzékelők alapvető felépítése általában egységes (lásd: *15. ábra*, a 31. o.).

Munkám során én elsősorban az optikai érzékelőkkel foglalkoztam, amelyek az elektromágneses hullámok meghatározott tartományával, a látható és az infravörös tartománnyal dolgoznak (lásd: *6. ábra:* Az elektromágneses spektrum, 20. o.). Mivel ezen hullámhossztartomány összegyűjtésére az optikai eszközök a legalkalmasabbak, ezért az ezeket alkalmazó felvételek megfelelő pontossággal a perspektív vetítés szabályai szerint képződnek le.

2.3.5.1. A centrális vetítés

A centrális vetítés során olyan vetítősugarakkal képezzük le a háromdimenziós objektumokat, amelyek egy ponton, a perspektív vetítés középpontján haladnak át, majd metszik a kétdimenziós ún. képsíkot (*10. ábra*).



10. ábra: **A centrális vetítés elve**

A tárgytérben lévő *P* pont *X*, *Y*, *Z* koordinátái, és a pont képsíkon leképződött *P'* pont képsík-beli koordinátái között a következő összefüggés van:

$$\xi = \xi_0 - c\frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$
$$\eta = \eta_0 - c\frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \qquad \text{[8. egy.]}$$

ahol:

c	kameraállandó
O (X_0, X_0, Z_0)	vetítési középpont
H (ξ_0, η_0)	képfőpont
P (X, Y, Z)	tárgypont
P' (ξ, η)	képpont
r_{ik}	forgatási mátrix elemei

Az egyenletből látható, hogy minden egyes tárgypontnak egy képpont felel meg, tehát a hozzárendelés egyértelmű. Ugyanakkor, ha a fenti egyenletből kifejezzük a tárgypont X és Y koordinátáját, akkor a következő összefüggést kapjuk:

$$X = X_0 + (Z - Z_0)\frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c}$$
$$Y = Y_0 + (Z - Z_0)\frac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \qquad \text{[9. egy.]}$$

Ez az egyenlet azt mutatja, hogy bármely képponthoz – a Z koordináta függvényében – számtalan tárgypont tartozhat. Tehát egy adott képpontnak a tárgytérben egy egyenes felel meg. Az ezen az egyenesen lévő összes pont képe a képsíkon ugyanabba a pontba képződik le. Ebből az is következik, hogy egyetlen képből egy térbeli tárgy nem rekonstruálható. A rekonstruáláshoz vagy az szükséges, hogy ismerjük az adott pont Z koordinátáját (vagy valamiből ki tudjuk számítani), vagy pedig szükséges a vizsgált objektumról egy másik kép is [46. Kraus (1998)]. Két – nem azonos nézőpontból készült – felvétel esetén, a két képen meghatározott két képpontból két térbeli egyenes húzható, amelyek pontosan a keresett tárgypontban metszik egymást.

A fenti egyenletekben szereplő ξ_0, η_0 a képfőpont koordinátái, valamint a c kameraállandó ismerete is szükséges a számítások elvégzéséhez. Ezek a paraméterek határozzák meg a vetítési középpont képsíkhoz viszonyított helyzetét, és ezeket belső tájékozási paramétereknek nevezzük (lásd: *11. ábra:* A mérőkamera belső tájékozásának elemei, 27. o.).

Az O vetítési középpont X_0, Y_0, Z_0 tárgytérbeli koordinátái, valamint az r_{ik} forgatási mátrix elemeinek meghatározásához szükséges ω, φ, κ forgatási szögeket pedig külső tájékozási paramétereknek nevezzük. Összesen tehát kilenc paraméter meghatározása szükséges egy adott centrális vetítés definiálásához.

Az optikai érzékelők kialakítására sokféle technikai megoldás alkalmazható. Az érzékelők fejlődése során számos kisebb-nagyobb újítást alkalmaznak, az idő során azonban csak a jelentősebbek maradnak fent hosszabb távon. A napjainkban alkalmazott módszerek a következő két nagy csoportba sorolhatók:

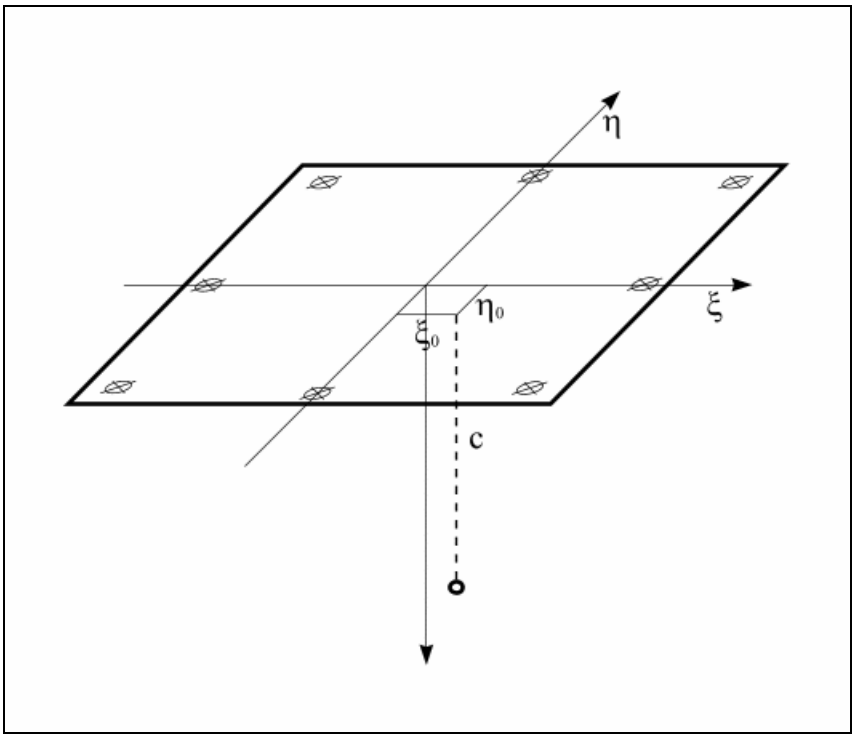
1. fotográfiai módszer;
2. letapogatók (*scanners*)
   a.) mechanikai-optikai letapogatók,
   b.) elektro-optikai letapogatók.

A fotográfiai eljárás során a fotoemulzió egyrészt rögzíti, másrészt hosszú távon tárolja az exponálás alatt az érzékelőt (filmet) elért elektromágneses sugárzást.

A letapogatók esetében valamilyen fotoelektromos eszközön áram indukálódik, amelyet különböző módszerekkel rögzítenek.

2.3.5.2. A fotográfiai rendszerek

A fotográfiai eljárásnak a távérzékelésben leggyakrabban alkalmazott eszközei a mérőkamerák. A mérőkamerákat az különbözteti meg az amatőr (nem mérő-) kameráktól, hogy a képalkotáskor létrejövő centrális vetítés középpontjának nagy pontossággal ismerjük a képsíkhoz (filmhez) való viszonyát. Ezt laboratóriumi körülmények között, a kamerakalibráció során határozzák meg. A kalibrálás során meghatározzák a keretjeleket, amelyek egyrészt definiálják a képsíkot, másrészt a kép koordinátarendszerét. Ugyanezen rendszerben meghatározzák az optikai vetítés középpontjának a képsíkon értelmezett vetületét, ezt hívjuk képfőpontnak, továbbá a vetítési középpont képsíktól való távolságát, amelyet kameraállandónak nevezünk (*11. ábra*). Ezeken a paramétereken kívül meghatározzák még az objektív elrajzolását, azaz az elméleti és gyakorlati leképezés közötti eltéréseket. Ezeket az értékeket a feldolgozás során a szabatos kiértékeléshez használjuk fel.



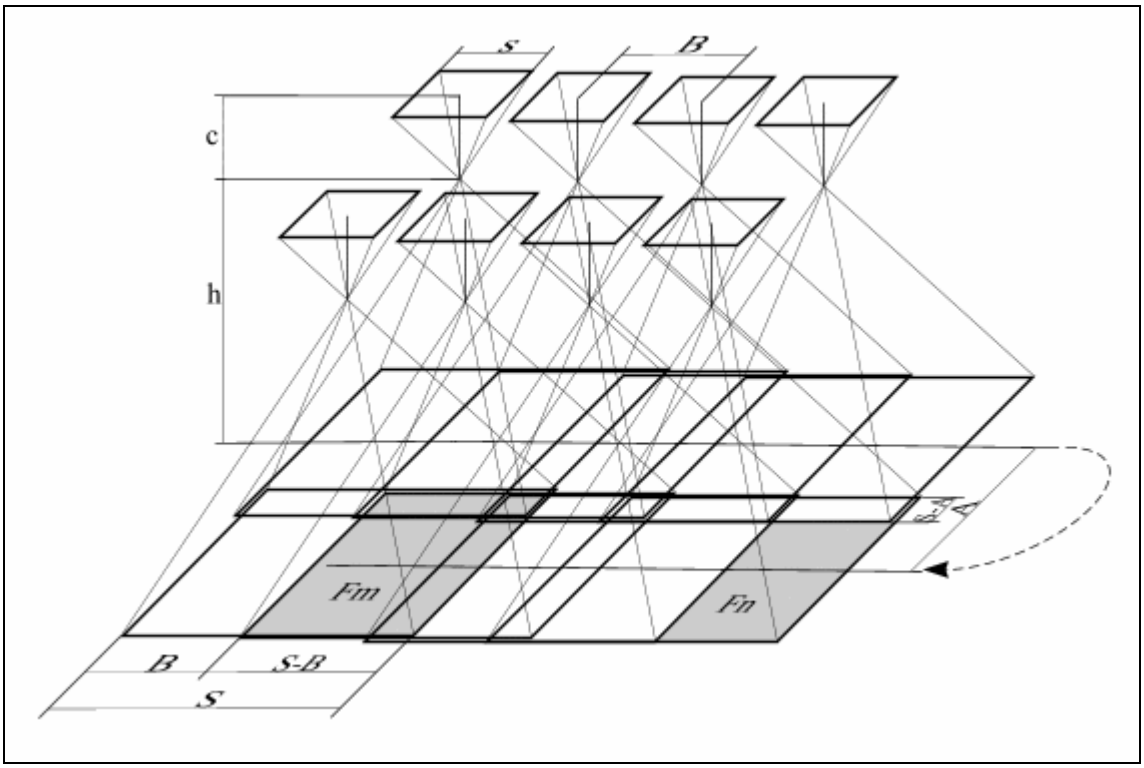
11. ábra: **A mérőkamera belső tájékozásának elemei**

A mérőkamerák az évtizedek során számos technikai újításon estek át, amelyek egyfelől az elkészült felvétel minőségét javítják, másfelől a feldolgozást könnyítik meg. Napjainkban két olyan mérőkamera létezik, amely nagy múltú gyártók eszköze, és amelyet még most is forgalmaznak. Az egyik a Leica RC30 (elődje a Wild RC-20), a másik a Z/I Imaging RMK TOP (korábban Zeiss RMK TOP). Mindkét kamera 23·23 cm-es aktív képmérettel rendelkezik. Ilyen nagy filmfelület esetében vákuumos leszívóberendezéssel biztosítják, hogy a film az exponálás alatt sík legyen. Ehhez természetesen a motoros filmtovábbítás, és az ún. képvándorlás-kiegyenlítő berendezés (*FMC – forward motion compensation*) párosul. Ez utóbbi az exponálás alatt a filmet úgy mozgatja, hogy kiegyenlítse a repülőgép mozgásából a filmsíkon keletkező elmozdulást. Ennek különösen a nagyobb méretarány-tartományban, alacsony repü-

lési magasság, vagy hosszú gyújtótávolság mellett van jelentősége. Ezen kamerák esetében giroszkópos stabilizátort is alkalmaznak a függőleges kameratengely biztosítására, valamint lehetőség van a külső tájékozási elemek GPS- és inerciarendszer (GPS/INS) segítségével történő meghatározására. Bár maga a képalkotás még hagyományos úton történik, azon kívül mindent számítógép vezérel: a repülési tervet is erre kifejlesztett programokkal készítik el, amely alapján a repülőgép navigálása, a kívánt átfedéseket biztosító exponálások, a képvándorlás kiegyenlítése, a GPS/INS-adatok rögzítése, valamint a képkeretre fényképezett adatok előállítása (*12. ábra*) mind-mind automatikusan történik. Mindkét kamerát 300 mm-es normál, valamint 150 mm-es nagylátószögű, kiváló minőségű optikával használhatjuk.

12. ábra: **Leica RC30-as mérőkamera, és az általa készült felvétel részlete**

Egy adott terület mérőkamerás légifényképezése során a képek közötti megfelelő átfedéssel biztosítják, hogy a teljes területről készüljön felvétel. A légifényképezés ún. tömbökben készül. Az egyes – egymás után következő – képek sorokat alkotnak, és a sorok összessége alkotja a tömböt. Amennyiben sík területről van szó, vagy ismerjük a domborzatot, és a fényképezés célja elsősorban az ortofotó-előállítás, akkor elegendő, ha minden terület legalább egy felvételen megtalálható. Ilyenkor mind a soron belül az egyes képek között, mind a sorok között 15-30%-os átfedést alkalmaznak. Amennyiben sztereoszkópikus kiértékelést is szeretnénk végezni, akkor minden területről legalább két, különböző nézőpontból készült helyről szükséges felvétel. Ezt a soron belüli minimum 60%-os átfedéssel szokták megvalósítani (*13. ábra*).



13. ábra: **Egy légifényképezés vázlata, és főbb paraméterei**

A fenti ábrából látszik, hogy a repülés legfontosabb paramétereit egyszerű számításokkal meghatározhatjuk, amelyeket a következő táblázatban foglalok össze (*I. táblázat*).

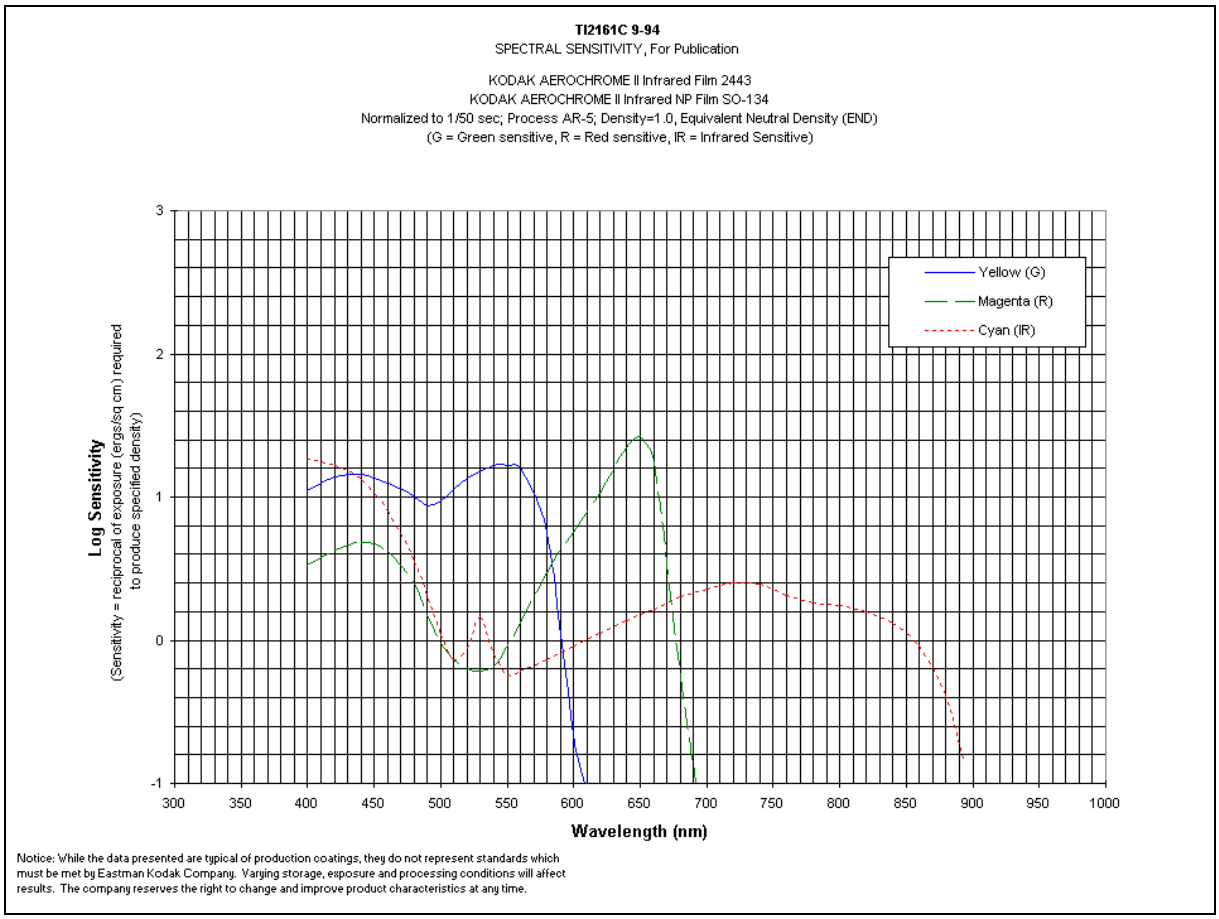
I. táblázat: **Egy légifényképező-repülés legfontosabb paramétereinek számítása**

Megnevezés	Jelölés	Mértékegység	Érték
Térkép méretaránya	***mk***		***1 : 20 000***
Paraméter	***k***		***200***
Kép méretaránya	mb=k*gyök(mk)		1 : 28 284
Kameraállandó	***c***	***m***	***0,152***
Repülési magasság	h=c*mb	m	4299,209
Soron belüli átfedés	l	%	60%
Sorok közötti átfedés	q	%	30%
Képméret	s	m	0,23
Terepi képméret	S	m	6505,382
Egy kép által lefedett terület	$Fb=S^2$	m^2	42320000
Bázishossz	B	m	2602,153
Sortávolság	A	m	4553,768
Hossz	***L***	***m***	***4000***
Szélesség	***Q***	***m***	***4000***
képek száma soronként	nb	db	4
sorok száma	ns	db	2
képek száma	**n**	**db**	**8**

A fotográfiai eljárás során létrejövő kép tulajdonságait elsősorban az alkalmazott film határozza meg. Ez döntően befolyásolja az elkészült felvétel geometriai, spektrális és radiometriai

felbontását. A filmen kívül fontos még az alkalmazott lencse, a kamera egyéb tulajdonságai, a film előhívása, és – hosszabb távon – a tárolása is.

Az erdészeti fotogrammetriában gyakran használt Kodak Aerochrome II 2443 infraszínes film spektrális érzékenységét mutatja a *14. ábra* [18. Eastmen Kodak Comp. (1996)].



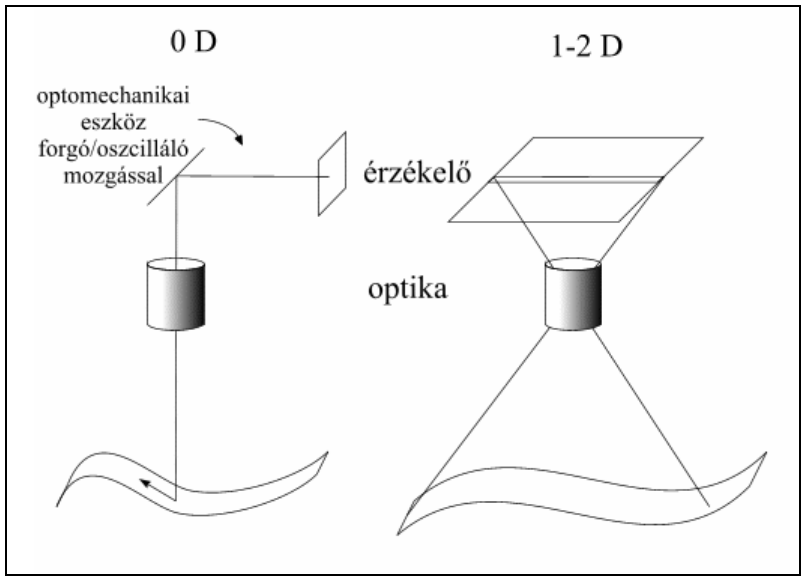
14. ábra: **KODAK AEROCHROME II Infrared Film 2443 spektrális érzékenysége**
(Forrás: Kodak [18])

A fotográfiai rendszerek a Föld szisztematikus felvételezését teszik lehetővé, de a műholdakon történő alkalmazásuk nehézkes. Bár a múltban – főként a felderítés terén – számos esetben alkalmaztak űrfotográfiákat (lásd: *IV. táblázat*, 34. o.), ennek a módszernek nagy hátránya, hogy a már exponált filmet nagyon nehéz és költséges visszajuttatni a Földre. Éppen ez volt a fő mozgatórugója annak, hogy kikísérletezték az elkészült felvételek Földre történő továbbításának módszerét. Ehhez arra volt szükség, hogy az érzékelt elektromágneses hullámokat elektromos jellé alakítsák. Kezdetben ezeket a jeleket – a televízióhoz hasonlóan – még analóg formában továbbították, de hamarosan áttértek a digitális adatrögzítésre.

2.3.5.3. A letapogatók

A letapogatók esetében a kialakítást elsősorban az határozza meg, hogy maga az érzékelő hány dimenziós. A régebbi letapogatók esetében az érzékelő 0 dimenziós volt, azaz 1 pixelből állt. Ezeknél a rendszereknél valamilyen forgó-mozgó optikai eszköz (leggyakrabban tükör vagy prizma) biztosította a haladási irányra merőleges „pásztázást” (*15. ábra*). Ezeket az ér-

zékelőket éppen ezért optikai mechanikai érzékelőknek is hívjuk (*optical mechanical scanner, whiskbroom*). Mivel ilyen érzékelők esetében a haladási irányra merőleges pásztázás jellege az érzékelő kialakításától függ, éppen ezért az ezekkel készült felvételeket – elsősorban geometriai szempontból – a szolgáltatónak korrigálnia kell az előfeldolgozás során (lásd 2.5.1 Az előfeldolgozás, 52. o.). Az 1 dimenziós érzékelők esetében (sorszenzor) a hordozóeszköz mozgása biztosítja a teljes képalkotást (*pushbroom*) (*15. ábra*). Bár a műholdakon alkalmazott 1D-s érzékelők esetében a hordozóeszköz mozgása viszonylag egyenletes, a felvételek tájékozása és ortorektifikálása során mégis szükséges a mozgás figyelembe vétele, és modellezése. Erre többféle megoldás is létezik, a Gugan és Dowman által javasolt modellben 14 ismeretlen paramétert kell meghatározni minden képre úgy, hogy az egyes mintavételi sorok közötti összefüggést dinamikus tájékozási paraméterekkel írják le, amelyeket a mintavételi idő alapján alacsony fokú polinommal közelítenek [29. Gugan – Dowman (1988)]. A 2 dimenziós érzékelők esetében a teljes képsíkon egyszerre történik a képalkotás (*15. ábra*).



15. ábra: **A különböző dimenziójú érzékelők. 0D, 1D, 2D**

Természetesen még bonyolíthatja a helyzetet, ha az érzékelő több spektrális tartományban érzékel. Minél magasabb dimenziójú az érzékelő, annál bonyolultabb technikai megoldások léteznek. A 0D- és 1D-s érzékelők esetében valamilyen optikai eszköz biztosítja a különböző hullámhosszak szétválasztását, és az érzékelők ennek megfelelően egymás mellett helyezkednek el. Ezáltal a hiperspektrális érzékelők esetében sorérzékelőt alkalmaznak a pásztázó letapogatók esetében (*whiskbroom*), valamint területi érzékelőt egyetlen sor érzékelésére (*pushbroom*). A 2D-s érzékelők esetében már nem tudják ezt megoldani, ezért általában több, egymás melletti, külön optikával rendelkező egységeket alkalmaznak. Az optikai távérzékelésben alkalmazott nagyobb hullámhosszak esetében gyakran speciális anyagból készült optikákat kell alkalmazni.

2.3.5.4. Az érzékelők fejlődése

Az érzékelők fejlődéséről elmondható, hogy amíg a kezdetekben a 0D-s érzékelők voltak jellemzők az űrtávérzékelésben, addig manapság az 1D-s érzékelők az általánosan elterjedtek. A légi érzékelők esetében a hagyományos fotográfiai eljárás 2D-s síkfilmre dolgozik. A digitális érzékelők közül 1 és 2D-s érzékelőket alkalmaznak a légi hordozóeszközökön. Amíg az űrben haladó műhold mozgása egyenletesnek tekinthető, addig a légi (illetve egyéb) járművek mozgását a közeg „egyenetlenségei" módosítják, ezáltal az 1D-s érzékelőkkel készített felvételek geometriai tulajdonságait kedvezőtlenül befolyásolja.

A napjainkban forgalomban lévő, fotogrammetriai kiértékelésre alkalmas digitális mérőkamerák találhatók a *II. táblázat*ban.

II. táblázat: **A jelentősebb digitális mérőkamerák**

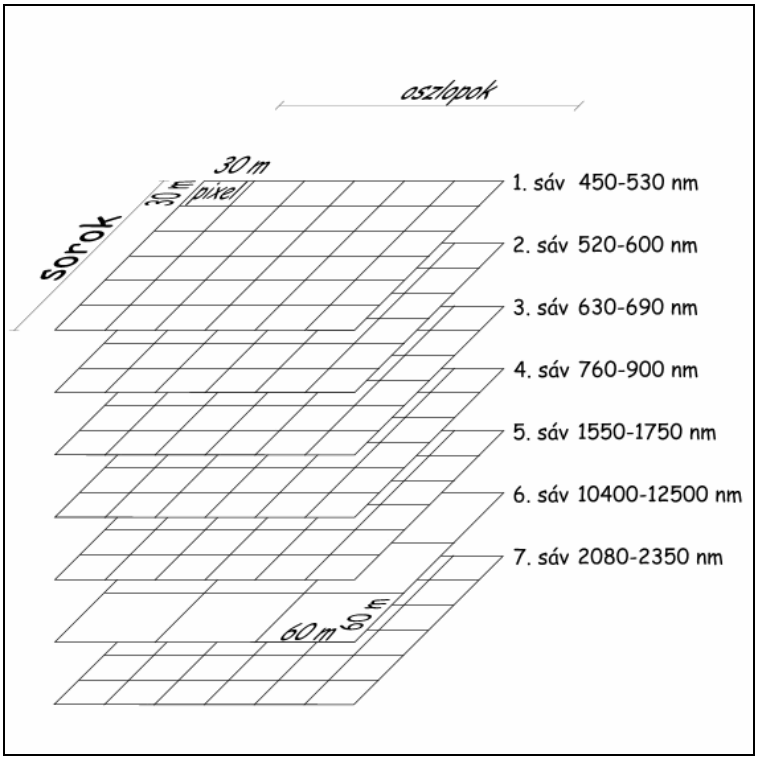
Gyártó	Típus		CCD		Felbontás		
					Geo-metriai	spektrális	radio-metriai
			pixel	db	µm	sáv	bit
1D-s kamerák							
Leica	ADS40	Airborne Digital Sensor	12000	2+4	6,5	5	12
DLR	HRSC	High Resolution Stereo Camera	12172	9	6,5		12
Starlabo Corp	TLS StarImager	Three Line Scanner	14400	3	5,0		9
Wehrli & Ass.	3-DAS-1		8023	3·3	9,0		14
2D-s kamerák							
Z/I-Imaging	DMC	Digital Mapping Camera	13824	7680	12,0		
Vexcel Imaging	UltraCamD	Large Format Digital Aerial Camera	11500	7500	9,0	5	14
Applanix Corp	Emerge DSS	Emerge Digital Sensor System	4096	4076	9,0		

A távérzékelési adatgyűjtés során elkészített felvételek tulajdonságait leginkább az alkalmazott – és ebben a fejezetben bemutatott – érzékelő határozza meg.

2.3.6. A távérzékelt felvételek tulajdonságai

A passzív távérzékelési adatgyűjtés során – az érzékelők felépítése miatt – általában raszteres adatállományokat kapunk. A raszteres állományok felépítése látható a következő ábrán (*16. ábra*).

A raszteres állományok alapegysége a pixel (***pi**cture **x el**ement*). A pixel már tovább nem bontható. A pixelek sorokat alkotnak, és a sorok összessége alkotja a raszteres állomány egy sávját. Egy ilyen sávot egy mátrixnak is el lehet képzelni, ahol a mátrix egyes elemei tartalmazzák a pixelértékeket. Amennyiben az elektromágneses spektrum több tartományából is tartalmaz a felvétel információt, akkor ezek a mátrixok tömböket alkotnak. Egy Landsat TM űrfelvétel sematikus felépítését mutatja be a *16. ábra*.



16. ábra: **Landsat TM űrfelvétel sematikus felépítése**

A szabályos adatmodelleknek a legfontosabb jellemzője a felbontása (lásd: 2.2. A szabályos adatmodellek, 14. o.). A távérzékelt felvételeket a következő felbontásokkal jellemezhetjük:

- Geometriai felbontás: egy pixel méretét határozzák meg vele. Leggyakrabban terepi felbontásról beszélünk, ahol a pixel méretét a terepen értelmezzük. Mértékegysége: m (km, cm).
- Radiometriai felbontás: meghatározza, hogy egy sávban hány különböző intenzitásértéket tud rögzíteni az érzékelő. Mértékegysége: bit.
- Spektrális felbontás: meghatározza, hogy hány különböző spektrális tartományban érzékel az érzékelő. Mértékegysége: sáv.
- Időbeni felbontás: azt mondja meg, hogy ugyanarról a területről milyen gyakran tudunk felvételeket készíteni. Mértékegysége: nap (óra).

A távérzékelési műholdakat és érzékelőket különböző csoportokba sorolhatjuk az elsődleges felhasználásuk szerint. Az egyes csoportok és a felbontások kapcsolatát mutatja be a következő táblázat (*III. táblázat*).

III. táblázat: **A legfontosabb műhold-csoportok áttekintése**

Felbontás	Meteorológiai	Erőforrás-kutató	Térképészeti
Geometriai	+ 0,5-4 km	++ 10-200 m	**+++** **-5 m**
Radiometriai	+++ 8-12 bit	++ 6-10 bit	+++ 8-12 bit
Spektrális	++ 2-5 sáv	**+++** **4-7 sáv**	+ 1 sáv
Időbeni	**+++** **0,5-2 óra**	++ 3-18 nap	+ 30- nap

2.3.7. Térképészeti műholdak

Ezeket a műholdakat elsősorban térképészeti vagy katonai célokra fejlesztették ki. Esetükben a legfontosabb a jó geometriai felbontás, amely jobb, mint 5 m. Jó radiometriai felbontás, valamint gyenge spektrális és időbeni felbontás jellemzi még őket. A katonai kémműholdakkal kapcsolatban rengeteg találgatás látott napvilágot. A legfontosabb amerikai és orosz, ma már nyílttá tett kémprogramok adatait a következő táblázat (*IV. táblázat*) tartalmazza.

IV. táblázat: **Néhány – jelenleg már nyílt – katonai műholdprogram adata**

Üzemeltető	Név	Név	START	STOP	Pálya-magasság	Kamera	Filmtípus	Fókusztáv	Terepi felbontás	Spektrális felbontás
					Km			mm	m	sáv
NRO	CORONA	CORONA	1960.08.18.	1972.05.31.	185,2	C	ff	610,0	12,00	1
		CORONA	1960.08.18.	1972.05.31.	185,2	KH-4	ff	610,0	3,00	1
		ARGON	1962.05.01.	1964.08.30.	0,0	A	ff	610,0	3,60	1
		LANYARD	1963.01.01.	1963.01.02.	0,0	L	ff	1676,4	1,80	1
SOVINFORMSPUTNIK	RESURS	RESURS F1	1974.01.01.		240,0	KATE-200	színes	200,0	15,00	3
		RESURS F1	1974.01.01.		240,0	KFA-1000	ff	1000,0	4,00	1
		RESURS F1	1974.01.01.		240,0	KFA-1000	spektrazonális	1000,0	6,00	2
	KOMETA	KOMETA	1981.01.01.		220,0	KVR-1000	ff	1000,0	1,82	1
		KOMETA	1981.01.01.		220,0	TK-350	ff	350,0	10,00	1
	RESURS	RESURS F2	1988.01.01.		231,0	KATE-200	színes	200,0	15,00	3
		RESURS F2	1988.01.01.		231,0	KFA-1000	spektrazonális	1000,0	6,00	2
		RESURS F2	1988.01.01.		231,0	KFA-1000	ff	1000,0	4,00	1
		RESURS F2	1988.01.01.		231,0	MK-4	spektrazonális	300,0	12,00	2
		RESURS F2	1988.01.01.		231,0	MK-4	ff	300,0	6,00	0
		RESURS F2	1988.01.01.		231,0	MK-4	színes	300,0	6,00	4
	RESURS	RESURS F1M	1997.01.01.		0,0	KATE-200	színes	200,0	15,00	3
		RESURS F1M	1997.01.01.		0,0	KFA-1000	spektrazonális	1000,0	6,00	2
		RESURS F1M	1997.01.01.		0,0	KFA-1000	ff	1000,0	4,00	1
	RESURS	RESURS F2	1998.02.17.		231,0	KATE-200	színes	200,0	15,00	3
		RESURS F2	1998.02.17.		231,0	KFA-1000	ff	1000,0	4,00	1
		RESURS F2	1998.02.17.		231,0	KFA-1000	spektrazonális	1000,0	6,00	2
		RESURS F2	1998.02.17.		231,0	MK-4	színes	300,0	6,00	4
		RESURS F2	1998.02.17.		231,0	MK-4	spektrazonális	300,0	12,00	2
		RESURS F2	1998.02.17.		231,0	MK-4	ff	300,0	6,00	0
	RESURS	RESURS F1M	1999.09.28.	1999.10.20.	0,0	KATE-200	színes	200,0	15,00	3
		RESURS F1M	1999.09.28.	1999.10.20.	0,0	KFA-1000	spektrazonális	1000,0	6,00	2
		RESURS F1M	1999.09.28.	1999.10.20.	0,0	KFA-1000	ff	1000,0	4,00	1

Az amerikai CORONA rendszert a nemzeti felderítő szolgálat (*National Reconnaissance Office – NRO*) üzemeltette. A kezdetben nehezen körvonalazódó programnak számos esemény adott lendületet, amelyek a következők: az oroszok által 1957. október 14-én sikeresen pályára állított Sputnyik 14; Eisenhower elnök 1958 februárjában hagyta jóvá a programot; az oroszok 1960. május 1-jén lelőttek egy U-2-es felderítő repülőgépet, így a légi felderítést az elnök teljesen beszüntette. Az első (sikertelen) kísérlet 1959. február 28-án történt. Többszöri próbálkozások után végül a 13. (!) kísérlet hozott eredményt 1960. augusztus 12-én, amikor a visszatérő egység ténylegesen visszatért, egy amerikai zászlóval. Pár nappal később augusztus 18-án, a 14. kísérlet már teljes eredményt adott. Az egység elérte a helyes pályát, felvételeket készített, és a visszatérő egységet egy C-119-es vadászrepülővel a levegőben befogták. Innen-

től kezdve projekt 145 küldetése során – ebből 102 sikeres – a felvevőkamera, valamint a film paramétereit fokozatosan javították, eljutva ezáltal a kezdeti kb. 12 m-es terepi felbontástól az 1,8 m-es felbontásig. Az utolsó CORONA-küldetést 1972. május 25-én indították útjára, és május 31-én készültek az utolsó felvételek. Mindez persze a legnagyobb titokban történt. A nagyközönség nem is hallott – és hallhatott – róla egészen 1995. február 22-ig, amikor Clinton elnök elhatározta a teljes program titkosságának feloldását. A döntést követően mindenki számára hozzáférhetővé vált ez a nagyszerű képanyag, amely főként a keleti blokk országait fedi le, általában kiváló fotográfiai minőségben, részben sztereoszkópikus kiértékelésre alkalmasan. Összesen kb. 640 km-nyi (!) filmet exponáltak, amely mintegy 2 milliárd km^2-t jelent.

A volt Szovjetunióban is folytak űrfényképek alapján történő felderítések. A két legismertebb program a RESURS és a KOMETA. A RESURS program keretében kezdetben a KATE-200 és a KFA-1000 kamerákat alkalmazták. Később, 1988-tól ezek mellett még egy MK-4-es multispektrális kamerát is használtak. A KOMETA rendszerben két, a TK-350 és a KVR-1000 kamerákat használták. A kamerák esetében a számok – mint az a *IV. táblázat*ból is látható – az alkalmazott optika gyújtótávolságát jelentik. A kamerákat fekete-fehér, ún. spektrozonális (2 tartományra érzékenyített) és színes filmekkel használták. Az orosz repülési és űrkutatási hivatal 2000. június 21-én engedélyt adott a SOVINFORMSPUTNIK nevű cégnek, hogy a fent említett kamerák által készített felvételeket nemzetközi szinten is forgalmazza [68].

2.3.8. Meteorológiai műholdak

Ezeket a műholdakat és érzékelőket a légköri folyamatok megfigyelésére fejlesztették ki. Éppen ezért ezek esetében a legfontosabb az időbeni felbontás, amely általában 0,5-2 óra. Ezt csak úgy tudják elérni, hogy a pályájuk geostacionárius. Viszonylag jó radiometriai felbontás, közepes spektrális felbontás és gyenge geometriai felbontás jellemzi őket. Alkalmaznak még Napszinkron pályán keringő műholdat is, de így csupán 12 óránként tudnak felvételeket készíteni, ezzel szemben a geostacionárius pályán keringő műholdcsaládok már jobb időbeni felbontást tesznek lehetővé.

1960. április 1-jén állították pályára az amerikai TIROS-1 (*Thermal Infrared Radiometry Observation Satellite*) műholdat, amely az első olyan műhold volt, ami felvételeket készített a Földről. Ezt még további 9 műhold követte. 1970-ben indították útjára a második generációt, az ITOS-sorozatot, amely már digitális adattovábbítást alkalmazott. Az 1978-ban fellőtt TIROS-N műhold a 3. generáció első tagja volt. Ennek a generációnak már 10 fölötti műholdja van, és megtalálható rajtuk az AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) érzékelő is, amelyet a meteorológiai alkalmazásokon túl az erőforrás-kutatásban is használnak. Ezek a műholdak kvázipoláris napszinkron pályán keringenek.

A geostacionárius műholdak közül az amerikai GOES (GOES West és GOES East) holdakat a 70-es évek közepén, majd kicsit később az európai Meteosat-ot, és a japán GMS-t is pályára állították. A geostacionárius meteorológiai műholdak rendszerét az 1986-ban fellőtt orosz GOMS egészíti ki.

2.3.9. Erőforrás-kutató műholdak

Az erőforrás-kutató műholdakat a föld felszínének a megfigyelésére, ezen belül is elsősorban a természeti erőforrások megfigyelésére fejlesztették ki. Az erőforrások közül kiemelkedő jelentőségűek az ásványianyag-erőforrások, a talajerőforrások, valamint az ezeken kialakuló növényzet. Ezek kutatásához a megfelelő spektrális felbontás nélkülözhetetlen, éppen ezért az ilyen érzékelők esetében ez a felbontás a legfontosabb, ezek az érzékelők minimum 4 sávosak. Ehhez jó radiometriai felbontás, és közepes geometriai és időbeni felbontás társul.

2.3.9.1. A NASA műholdrendszerei

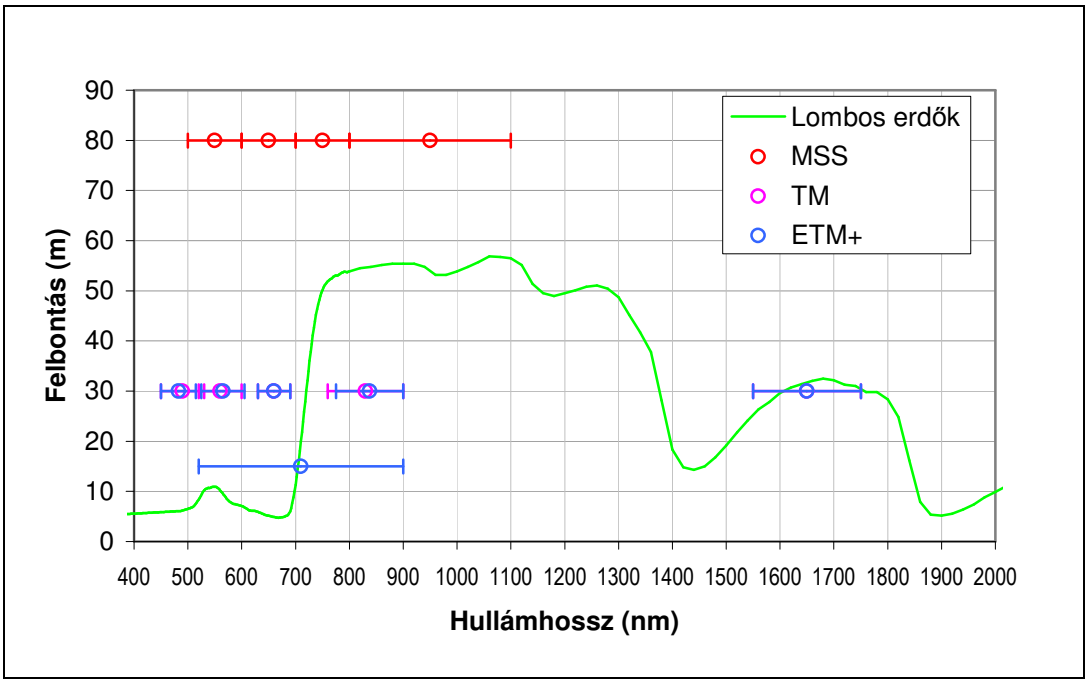
Amerikában a 60-as évek közepén merült fel az ottani belügyminisztériumban (*Department of Interior*) a polgári célú földi erőforrás-kutató műhold gondolata. A NASA (*National Aeronautics and Space Administration* – Nemzeti Légi- és Űrközpont) csatlakozott a javaslathoz, és kifejlesztették az első földmegfigyelő műholdat a földtudományi és erőforrás-gazdálkodó szakemberek számára. Az Amerikai Geológiai Szolgálat (*USGS – United States Geological Survey)* a 70-es évek elején csatlakozott a programhoz az adatok archiválásával és terjesztésével. 1972. július 23-án a NASA fellőtte az első ilyen műholdat. A műhold neve akkoriban még ERTS-A (*Earth Resources Technology Satellite-A*) volt, majd amikor elérte működési pályáját, akkor átnevezték ERTS-1-re. A család második tagját 1975. január 22-én állították pályára, ERTS-B néven. Később a NASA Landsat 2-re (*Land Resources Satellite* – szárazföldierőforrás-műhold) nevezte át, és az ERTS-1-et Landsat 1-re, amely jobban kifejezi az elsődleges felhasználást. További három műholdat lőttek fel Landsat 3, 4 és 5 néven az 1978, 1982 és az 1984-es évben (*V. táblázat*).

V. táblázat: **A Landsat műholdrendszer fontosabb jellemzői**

Műhold			Érzékelő		Felbontás		
neve	fellövés	leállás	neve	Típusa	geometriai	spektrális	időbeni
					m	sáv	nap
Landsat 1	1972.07.23.	1978.01.02.	MSS	MS	80	4	18
			RBV	MS	80	3	18
Landsat 2	1975.01.22.	1982.02.25.	MSS	MS	80	4	18
			RBV	MS	80	3	18
Landsat 3	1978.03.05.	1983.03.31.	MSS	MS	80	4	18
			RBV	MS	80	3	18
Landsat 4	1982.07.16.		MSS	MS	80	4	16
			TM	MS	30	7	16
Landsat 5	1984.03.01.		MSS	MS	80	4	16
			TM	MS	30	7	16
Landsat 6	1993.10.05.	1993.10.05.	ETM	P	15	1	
			ETM	MS	30	7	
			MSS	MS	80	4	
Landsat 7	1999.04.15.	(2003.05.31.)	ETM+	MS	30	7	16
			ETM+	P	15	1	16

A Landsat műholdak első tagjain (1-3) két érzékelőt helyeztek el, az RBV (*Return Beam Vidicon*), valamint az MSS (*Multi Spectral Scanner*) eszközöket. Az RBV érzékelő egy tele-

vízió-felvevőhöz volt hasonlatos. A következő generációkba (4-5) az RBV érzékelők helyett egy új fejlesztésű érzékelőt, a *Thematic Mapper*-t (TM) építették be. Az ezen érzékelő által készített felvételek a világon az eddigi legelterjedtebb távérzékelési felvételek. A következő generációba (6-7) a TM egy továbbfejlesztett változatát, az ún. *Enhanced Thematic Mapper*-t (ETM, ill. ETM+) alkalmazták. Sajnos a Landsat 6 műholdat nem sikerült pályára állítani. A fontosabb Landsat-érzékelők (MSS, TM, ETM+) radiometriai felbontása 8 bit, a geometriai, spektrális és időbeni felbontásról a *V. táblázat* ad áttekintést. A Landsat-érzékelők spektrális sávkiosztását és geometriai felbontását mutatja be a *17. ábra*.



17. ábra: **A Landsat-érzékelők sávkiosztása és geometriai felbontása egy lombos erdő spektrális reflektanciagörbéjével**

A Landsat ETM+ érzékelő pásztakorrekciója (*Scan Line Corrector – SLC*), amely a műhold haladását kompenzálta, 2003. május 31-én elromlott. A hibát többszöri próbálkozásra sem sikerült kijavítani, így 2003. július 14-étől az érzékelő kikapcsolt pásztakorrekcióval működik. Ezáltal a felvételek szélein hézagok, illetve kettős beolvasások találhatók. Számos cikk jelent meg az adatok használhatóságáról, valamint arról, hogy hogyan lehet a hiányzó adatokat interpolálni. A NASA megjelentetett egy összefoglaló tanulmányt, amelyben számos tudós értékeli a problémát [57. NASA (2003)].

A NASA 1991-ben indította el az EOS (*Earth Observing System*) programot. A tudósok felismerték, hogy a Földön olyan megfordíthatatlan változások indultak meg, amelyeknek megértéséhez globális megfigyelési rendszerekre van szükség. Ezeknek az egyik leghatékonyabb módja a távérzékelés. A program keretén belül olyan műholdakat és érzékelőket fejlesztettek ki, amelyek segítik megérteni a Földön (a szárazföldön, az óceánokban és a légkörben) végbenő folyamatokat, és kapcsolatukat egymással, valamint az élettel. A program során pályára állított műholdak és érzékelők áttekintését segíti a *VI. táblázat*.

A program három fő összetevője a következő: műholdak a Föld megfigyelésére; fejlett adatkezelés; kutatók, akik elemzik az adatokat. A kutatások főbb célterületei a következők: felhők, víz- és energia-körforgás, óceánok, légkörkémia, szárazföldek, víz- és ökoszisztéma-folyamatok, gleccserek és sarki jegek, a Föld szilárd kérge.

VI. táblázat: **Az EOS program műholdjai és érzékelői**

Műhold	Fellövés	Érzékelők
OrbView-2	1997.08.01	SeaWiFS
TRMM	1997.11.27	CERES, LIS, VIRS, TMI, PR (JP)
Landsat 7	1999.04.15	ETM+
QuikScat	1999.06.19	SeaWinds
EOS Terra (AM)	1999.12.18	CERES, MISR, MODIS, ASTER (JP), MOPITT (CA)
ACRIMSAT	1999.12.20	ACRIM III
NMP/EO-1	2000.11.21	ALI, Hyperion, AC
QuikTOMS	*2001.09.21*	*TOMS*
Jason-1	2001.12.07	JMR, TRSR, LRA, Poseidon 2, DORIS (FR)
METEOR 3M-1	2001.12.10	SAGE III
ESSP/GRACE	2002.03.17	KBR, GPS, SuperStar (US/FR)
EOS Aqua (PM)	2002.05.04	AIRS, AMSU-A, CERES, MODIS, HSB (BR), AMSR-E (JP)
ADEOS II	2002.12.13	SeaWinds, AMSR, GLI, ILAS-2 (JP), POLDER (FR)
ICESat	2003.01.12	GLAS, GPS
SORCE	2003.01.25	TIM, SIM, SOLSTICE, XPS
EOS Aura (CHEM)	2004.07.15	MLS, TES, HIRDLS (UK/US), OMI(NL/FL)

Az EOS programban a műholdak és érzékelők kifejlesztése csak az első lépés volt. Jelentős forrásokat különítettek el az adatok feldolgozásának, szolgáltatásának, valamint a különböző távérzékelési kutatásoknak is. Az adatok feldolgozására és szolgáltatására a teljes keretösszeg több mint felét szánták. Ez mutatja a jelentős szemléletváltást is.

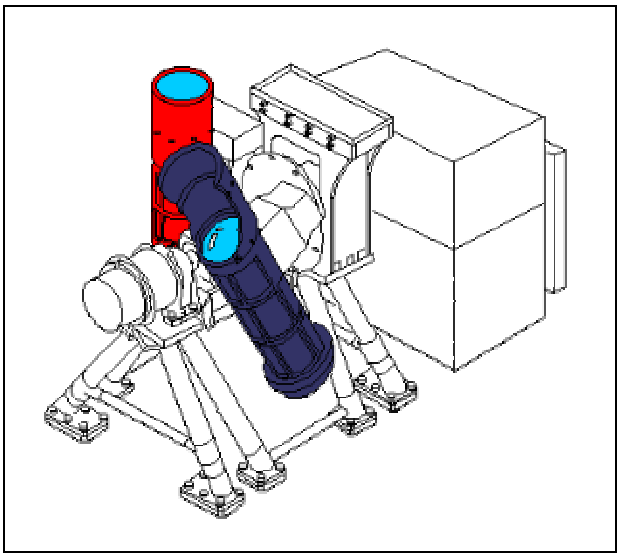
Az EOS program fontos lépése volt, amikor az első műholdját, a Terrát (eredetileg AM-1) 1999. december 18-án állították pályára, amely 2000 februárjában kezdte meg az adatszolgáltatást. A Terrán lévő érzékelők közül az erdészeti szempontból fontosabbak részletes adatait tartalmazza a *VII. táblázat*.

VII. táblázat: **Az EOS Terrán lévő optikai érzékelők tulajdonságai**

Érzékelő neve		Felbontás			Pászta
		geometria	spektrális	időbeni	
		m	sáv	nap	km
ASTER	VNIR	15	3+sztereo	5	60
	SWIR	30	6	16	60
	TIR	90	5	16	60
CERES		20 000			
MISR		max. 275	4	9	360
MODIS		250-1000	36	2	2300
MOPITT		22 000			640

Ezek közül a MODIS érzékelő adatainak elérésére létrehoztak egy ún. gyorsreagálású rendszert (*MODIS Rapid Response System* – http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/) elsősorban a 250 m-es színkompozitok szolgáltatására, valamint a tűzérzékelő rendszerek számára.

Az ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer*) érzékelő kifejlesztését a japán Gazdasági és Ipari Minisztérium (*Ministry of Economy Trade and Industry – METI*) irányította. Az optikai érzékelő a látható fénytől az termális infravörös tartományig 14 sávban érzékel. Három, egymástól jól elkülönülő sugárzásmérőből áll, a látható és közeli infravörös (VNIR), a középső infra (SWIR), valamint a termális infra tartományra (TIR). Ezek közül az első érzékelő három sávban érzékel, a látható zöld, vörös, valamint közeli infravörös tartományban, ugyanakkor az eszköz kiegészül egy hátrafelé néző teleszkóppal, amelynek segítségével a pályán belüli 0,6 B/H viszonyú sztereófelvétel rögzítésére nyílik lehetőség (*18. ábra*). Az ASTER által készített adatok kutatási célra hozzáférhetők, én is felhasználtam őket.



18. ábra: **Az ASTER érzékelő VNIR egysége**

A NASA – számos kutatóintézettel együttműködve – 1996-ban kezdte meg az ún. Új Évezred Programot (***N**ew **M**illennium **P**rogram – NMP*), mivel a tudósok és mérnökök felismerték, hogy olyan űrprogramokra van szükség, amelyek alkalmasak az új eszközök és technológiák sokkal költséghatékonyabb kipróbálására, mint amilyen például – az amúgy sikeres – Landsat-program volt.

A NASA által 2000. november 19-én pályára állított EO-1 (*Earth Observing-1*) műhold volt az első tagja ennek az Új Évezred Programnak. A küldetés elsődleges célja az volt, hogy újabb technológiákat próbáljanak ki. A műholdon 3 teljesen új típusú érzékelő található. Az egyik az ALI (*Advanced Land Imager*), amely a Landsat-érzékelőkkel teljesen kompatibilis, ugyanakkor továbbfejlesztett érzékelő. A másik a *Hyperion*, amely az első hiperspektrális érzékelő, amely műholdon található. A harmadik eszköz pedig a LEISA/AC (*Linear Etalon Imaging Spectrometer Array/Atmospheric Corrector*). Ez az eszköz az atmoszférát figyeli, annak is elsősorban a víztartalmát, és így a műhold valós időben képes a többi érzékelő által készített felvételen az atmoszféra kedvezőtlen hatását csökkenteni. Az EO-1-en található érzékelők áttekintését nyújtja a *VIII. táblázat*.

VIII. táblázat: **Az EO-1 műholdon található érzékelők áttekintő táblázata**

Érzékelő		Felbontás			
Neve	Típusa	geometriai	spektrális	radiometriai	időbeni
		m	sáv	bit	nap
ALI	Multispectral	30	9	0	0
ALI	Panchromatic	10	1	0	0
HYPERION	Hyperspectral	30	220	0	0

Az EO-1 műholdat a Landsat 7-tel azonos pályára állították, az EO-1 két perccel követi a Landsatet, lehetővé téve így az érzékelők jobb összehasonlítását és kalibrálását.

2.3.9.2. A SPOT műholdrendszer

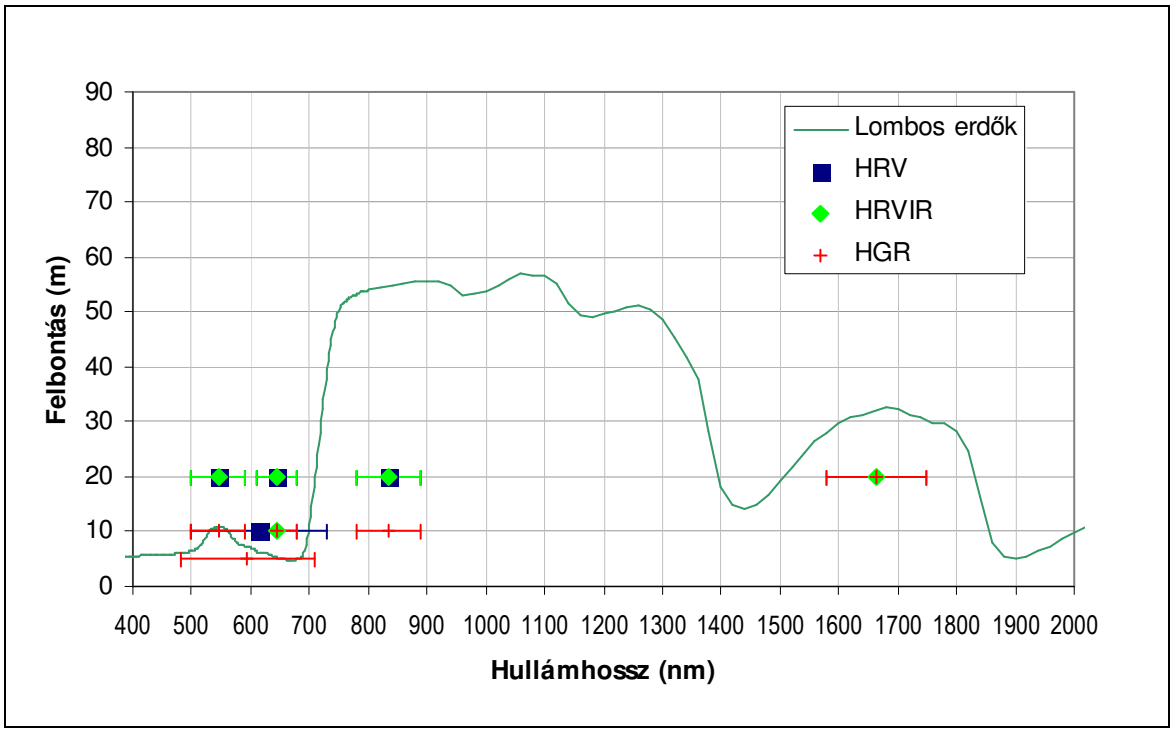
A SPOT (Systeme Pour l'Observation de la Terre – Föld megfigyelését szolgáló rendszer) műholdat a Francia Űrügynökség tervezte (CNES), svéd és belga közreműködéssel. A műholdrendszer 1986, a SPOT 1 fellövése óta működik. A műholdak és a rajtuk használt érzékelők áttekintését adja a *IX. táblázat*. A műholdprogram számára a pánkromatikus érzékelő 10 m-es felbontása vonzotta a felhasználók népes táborát, amely tíz évig (1986–1995) az elérhető legnagyobb geometriai felbontás volt. Az 1998-ban pályára állított SPOT 4 műhold megnövelt spektrális felbontása, valamint a nagyon jó minőségű felvételek sok erőforráskutató szakember számára jelentett alternatívát a Landsat mellett. A jelentősen durvább felbontású VEGETATION érzékelő nagyobb területek monitorozására alkalmas.

IX. táblázat: **A SPOT műholdrendszer fontosabb jellemzői**

Műhold			Érzékelő		Felbontás		
neve	fellövés	leállás	neve	típusa	geometriai	spektrális	időbeni
					m	sáv	nap
SPOT 1	1986.02.22.		HRV	MS	20,0	3	26
			HRV	P	10,0	1	26
SPOT 2	1990.01.22.		HRV	MS	20,0	3	26
			HRV	P	10,0	1	26
SPOT 3	1993.09.26.	1996.11.14.	HRV	MS	20,0	3	26
			HRV	P	10,0	1	26
SPOT 4	1998.03.24.		HRVIR	P	10,0	1	26
			HRVIR	MS	20,0	4	26
			VEGETATION1	MS	1000,0	4	26
SPOT 5	2002.05.03.		HRG	MS	10,0	4	26
			HRG	P	2,5	1	26
			HRS	P	5,0	1	26
			VEGETATION2	MS	1000,0	4	26

A SPOT érzékelők spektrális sávkiosztását mutatja be a *19. ábra*.

Fontos megjegyeznem, hogy a SPOT HRV pánkromatikus érzékelője – szemben a Landsat ETM+ érzékelővel (lásd: *17. ábra*) – főként a látható tartományt fedi le, egy kicsit nyúlik csak át a közeli infravörös tartományba.



19. ábra: **A SPOT érzékelők sávkiosztása és geometriai felbontása egy lombos erdő spektrális reflektanciagörbéjével**

2.3.9.3. Egyéb műholdak

A két legjobban ismert erőforrás-kutató műholdcsaládon kívül, még számos (majdnem számtalan…) műhold, és érzékelő létezik. Ezek közül a fontosabbakat emelném csak ki.

India a szélsőségek országa. Vannak tartományai, ahol leírhatatlanul nagy a szegénység és nyomor, ugyanakkor India már évtizedek óta az űrnagyhatalmak közé tartozik. Az ország számos műholdcsaládja közül IRS (*Indian Remote Sensing Satellites*) műholdakat említem meg. Az IRS 1C, valamint 1D műhold pánkromatikus érzékelője hosszú ideig (1995–1999) az elérhető legnagyobb geometriai felbontású (5,8 m) űrfelvételeket készítette. Az IRS program azóta is számos műholddal gyarapodott: IRS-P4 (OCEANSAT-1), IRS-P6 (RESOURCESAT-1) 2003-ban, IRS-P5 (CARTOSAT-1) 2005-ben.

Japán számos távérzékelési műholdat állított pályára. 1992-ben a JERS-1-et (*Japanese Earth Resource Satellite*), amelyen egy SAR (*Synthetic Aperture Radar*) és egy OPS (*Optical Sensor*) volt. Ez utóbbi 18 m-es geometriai felbontással, 7 spektrális sávval (3 a látható-közeli infratartományban, 4 az infratartományban), valamint egy sztereoszkópikus sávval rendelkezett. 1998-ig működött. A műholdcsalád következő tagja az ADEOS (*Advanced Earth Observing Satellite*) volt, amelyet 1996-ban állítottak pályára és számos érzékelője közül az AVNIR (*Advanced Visible and Near Infrared Radiometer*) volt az egyedüli optikai érzékelő, amelyet a szárazföldek megfigyelésére fejlesztettek ki. Ez az érzékelő multispektrálisan 4 sávon, 16 m-es felbontással, pánkromatikus módban 8 m-es felbontással dolgozott.

A 90-es években igencsak rájárt a rúd a távérzékelésre, ugyanis a számos próbálkozás ellenére (1993 Landsat 6; 1997 EarlyBird; 1999 IKONOS 1; 2000 QuickBird 1) évekig nem tudtak pályára állítani olyan műholdat, amelynek érzékelője méteres geometriai felbontást tudott volna.

1999. szeptember 24-én a Space Imaging cég sikeresen pályára állította az IKONOS-2-t, amit később, érthető okokból, már csak IKONOS-nak neveztek. Ez a műhold, és a rajta található érzékelők igazi áttörést jelentettek a távérzékelésben. A pánkromatikus érzékelője 1 m-es geometriai felbontású képeket tud készíteni, multispektrális érzékelője 4 sávban (kék, zöld vörös, közeli infravörös) 4 m-es terepi felbontással rendelkezik. Mindezek mellé 11 bites radiometriai felbontás társul. Az első felvételek vizsgálata során a felvételek geometriájáról számos cikk jelent meg (pl. [76. Toutin – Cheng (2000)]), amelyek rámutattak, hogy az érzékelő paramétereinek közzététele nélkül nem érhető el megfelelő geometriai pontosság. A Kanadai Távérzékelési Központ (CCRS) kifejlesztett egy közelítő modellt, végül a cég úgy döntött, hogy nyílttá teszi a paramétereket.

A Digital Globe cég QuickBird (QuickBird 2) műholdját 2001. október 18-án állította pályára. Üzleti okokból úgy döntöttek, hogy alacsonyabb pályára állítják a műholdat, ezáltal nagyobb felbontást tudnak elérni, amely ebben az esetben pánkromatikus módban 0,6 m, multispektrális módban 2,4 m. Az alacsonyabb pálya ugyanakkor rövidebb élettartamot eredményez.

Ez a két magáncég jelenlétével erősen átformálta a távérzékelést. Bár felvételeik nem olcsók – ~20 USD/km^2 – mégis nagy érdeklődés mutatkozik irántuk. Számos szakember számára alternatívát jelentenek a légifényképekkel szemben, felbontásuk számos olyan feladatra (pl. térképezési feladatok) alkalmassá teszi őket, amely eddig csak légifényképek segítségével volt megvalósítható. Ugyanakkor sokkal egyenletesebb minőséget tudnak biztosítani, teljes digitális adatfolyamattal dolgoznak, kisebb területek esetén relatíve még olcsóbbak is a felvételek. A Digital Globe cég számos online térképszolgáltatóval (pl. Keyhole, Google [28]) kötött megállapodást háttér űrfelvételek szolgáltatására.

Csupán a teljesebb kép kedvéért említem a RADAR érzékelőkkel felszerelt műholdakat, ezek is jelentős fejlődésen mentek keresztül. Itt az Európai Űrügynökség (*European Space Agency – ESA*) által pályára állított műholdakat, az ERS-1 és ERS-2-t, valamint a Kanadai Távérzékelési Központ (*Canada Centre for Remote Sensing Centre – CCRS*) által pályára állított Radarsat műholdakat kell megemlíteni.

Érdekes az ESA által kezdeményezett PROBA (*Project for On-Board Autonomy* – Intelligens műhold) műhold, amely egy teljesen új koncepción alapuló mikro-műhold. A fejlesztését 1998 közepén kezdték el, és 2001. október 22-én állították pályára. Számos olyan technológiai újdonságot tartalmaz, mint például a fedélzeti navigáció és hibaelhárítás, műholdpálya tervezés, a műhold teljes önállósága, autonómiája. A fedélzetén lévő érzékelők közül megemlítem a CHRIS-t (*Compact High Resolution Imaging Spectrometer*) a WAC-t (*Wide Angle Camera*), és a HRC-t (*High Resolution Camera*). A CHRIS érzékelő egy kisméretű (15 kg alatt), és viszonylag olcsó érzékelő, mivel nincsen benne mozgó alkatrész. 18 m-es geometriai felbontás, 19 spektrális sáv (amely 36 m-es felbontás mellett 63-ra nő), 12 bites radiometriai felbontás, valamint 14 km-es pásztaszélesség jellemzi. A számos kutatás között külön erdészeti kutatások is folynak a felvételekkel, főként a levélfelületi indexszel (*Leaf Area Index – LAI*) és a nem egyenletes visszaverődéssel kapcsolatosak (*Bidirectional Reflectance-Distribution Function – BRDF* és *Bidirectional Texture Function – BTF*), amelyekből a lombkorona 3D-s szerkezetét tudják modellezni.

2.3.10. A digitális domborzatmodellek (DDM) és a távérzékelés

A digitális domborzatmodellek (DDM) olyan adatállományok, amelyek lehetővé teszik egy adott területen belül bármely pontban a magasság meghatározását. A DDM a topográfiai adatok leghatékonyabb tárolási módja. A DDM-ek az adatok eloszlása szerint alkalmazhatnak szabályos, szabálytalan, valamint hibrid adatmodellt [13. Detrekői – Szabó (2002)].

Szabályos adatmodell esetében szabályos tesszelációban (lásd: 2.2. A szabályos adatmodellek, 14. o.) tárolja a modell a magassági értékeket. Ennek előnye az egyszerű felépítés, gyors adatelérés és adatkezelés, egyszerű adatcsere. Hátránya a nagy tárolókapacitás-igény, valamint az, hogy a felbontás nem igazodik az adatsűrűséghez.

Szabálytalan adatmodell esetén a legáltalánosabban alkalmazott modell a szabálytalan háromszögháló (***T****riangulated* ***I****rregular* ***N****etwork – TIN*). Ebben az esetben a térbeli szabálytalan ponthalmazra úgy készítünk háromszöghálót, hogy a háromszögek köré írt körön belül ne legyen negyedik pont. Ez az ún. Delaunay-háromszögelés. Az egyes, így kialakított háromszögön belül a három csúcspontban adott mennyiségi értékből számítjuk az adott pontban a magasságot. A háromszögön belül leggyakrabban a lineáris interpolációt, valamint a Bezier-féle interpolációt szokták alkalmazni [10. Czimber (1997)]. A modell előnye, hogy igazodik a forrásadatokhoz, amelyek általában szabálytalanok (például terepi mérések, meglévő szintvonalak esetében), hátránya, hogy kialakításához nagyobb erőforrásokra van szükség, valamint az adatcsere nehezebben oldható meg.

A hibrid adatmodellek esetében a domborzat tulajdonságait figyelembe véve alakítják ki a modelleket. Ilyen esetben lehet a tárolási igényre, vagy feldolgozási sebességre is optimalizálni az adott modellt.

A digitális domborzatmodellek (DDM) több ponton is kapcsolódnak a távérzékeléshez. Egyrészt a távérzékelt felvételek feldolgozásánál felhasználjuk a DDM-et a radiometriai és geometriai hibák javítására, másrészt az egyes távérzékelési módszerek alkalmasak a DDM előállítására.

A DDM előállítására alkalmas érzékelők – mint általában a távérzékelő szenzorok – lehetnek passzívak és aktívak. A passzív érzékelők esetében a vizsgált objektumokról különböző perspektívából készült képek (sztereóképpárok) segítségével juthatunk a háromdimenziós adatokhoz (lásd: 2.3.5.1. A centrális vetítés, 24. o.). Az aktív érzékelők esetében is lehetőség van a sztereóképpárok alapján történő felület-meghatározásra, de számos olyan aktív érzékelőt is kifejlesztettek, amelyeknek a DDM meghatározása az elsődleges feladatuk.

Az optikai érzékelők által készített sztereóképpárok térbeli kiértékelése a sztereófotogrammetria eszközkészletével lehetséges. A képpárok kiértékelése történhet analóg, analitikus és digitális módszerekkel. Az analóg kiértékelés esetén a képek eredeti felvételi helyzetét optikai és/vagy mechanikai eszközökkel állítják vissza, és az így létrejövő térmodellen az objektumok helyzetét mérőjel segítségével optikai és/vagy mechanikai úton határozzák meg. Az analitikus kiértékelésnél a képsíkon mért képkoordinátákból számítjuk a perspektív vetítés szabálya szerint a terepi koordinátákat [3. Bácsatyai – Márkus (2001)]. A digitális kiértékelés esetén a digitális kép pixelkoordináta-rendszeréből a keretjelek segítségével térünk át a képsík koordináta-rendszerére, ahonnan az analitikus kiértékeléshez hasonló módon jutunk el a térbe-

li koordinátákhoz. A képpárok alapján történő térbeli kiértékelés meglehetősen időigényes, és nagy szakértelmet igénylő munka. Ennek hatékonyabbá tételére számos próbálkozás történt, de tényleges áttörést a digitális fotogrammetria megjelenése hozott, ez tette először lehetővé, hogy a képpárok által lefedett területről automatikus úton felületmodellt állítsanak elő. A képek egyeztetésének (*image matching*) több változata ismert (lásd: 2.5. A távérzékelt felvételek feldolgozása, 52. o.).

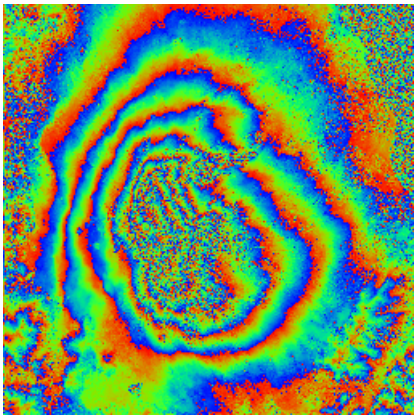
Napjainkban már több olyan műhold és érzékelő működik, amely alkalmas sztereóképek készítésére. Az erre alkalmas műholdak és érzékelők áttekintését mutatja be a *X. táblázat*.

X. táblázat: **Sztereófelvételek készítésére alkalmas műholdak és érzékelők**

Műhold	Működés		Érzékelő	Sztereó mód	B/H	Felbontás	Pontosság	
	-tól	-ig					vízszintes	magassági
CORONA	1960.08.01.	1972.05.31.			1,5	2-8		
COSMOS	1968	1974	TK-200			30,0		
COSMOS	1972	1986	TK-250			20,0		
COSMOS			TK-350	AT	-1,03	10,0	20	5
EOS-Terra	1999.12.18.		ASTER	AT	0,6	15,0		
SPOT 1-3	1986.02.22.		HRV	CT	0,5-1,1	10,0	350	
SPOT 4	1998.03.24.		HRVIR	CT	0,5-1,1	5,0	50	
SPOT 5	2002.05.04.		HRS	AT	-0,8	10,0	15	10
IKONOS	1999.09.24.					1,0		
QUIKBIRD	2001.10.18.					0,6		

Ezek a felvételek a digitális fotogrammetria eszközkészletével kiértékelhetők.

A teljesség kedvéért megemlítem, hogy az aktív érzékelők segítségével már régóta készítettek DDM-eket. Az Európai Űrügynökség (*ESA – European Space Agency*) által 1991-ben pályára állított ERS-1 műholdat (*European Remote Sensing Satellite*) számos érzékelővel látták el. Közülük legfontosabb a SAR (*Synthetic Aperture Radar*), amely ~ 30 m-es geometriai felbontással, és 5,3 GHz-en dolgozik. A különböző nézőpontból készült egyes radarfelvételek is alkalmasak sztereó-kiértékelésre. Bár az ERS-1 egy egyszerű SAR eszközt hordozott, de a visszszatérések felvételeinek egyesítésével lehetőség volt a radar-interferometria alkalmazására (*Synthetic Aperture Radar Interferometry – INSAR*). Az INSAR-technika az adott objektumról visszaverődő hullámok fáziskülönbségét számítja, így jön létre az interferogramm (*20. ábra*).



20. ábra: **SAR interferogramm**

Az ERS-2 1995-ös pályára állításával lehetővé vált, hogy a két műhold által 1 napos eltéréssel készült tandem felvételeket használjuk interferométerként, nagyon jó minőségű, és pontos felületmodell készítéséhez [7. Coulson (1995)]. Az ESA által 2002-ben pályára állított ENVISAT műhold egy továbbfejlesztett, ún. ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*) érzékelőt hordoz, biztosítva ezáltal a folyamatos adatszolgáltatást.

Radar-interferometriát alkalmazott az SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) program is. Az űrrepülőgépről radar segítségével 2000-ben elvégzett topográfiai felmérés – amely Földünk jelentős részét lefedte –, az utóbbi évek egyik legjelentősebb, nemzetközi összefogással megvalósult programja volt. A 11 napos misszió alatt az amerikai űrrepülő fedélzetére két különböző frekvencián működő SAR-t helyeztek el (*21. ábra*). Az űrrepülő hátán lévő nyitott dokkolórészen található 12 m-es antenna bocsátja ki a rádióhullámokat, és a Föld felszínéről visszaverődő jeleket ez a belső, valamint a 60 m-es rúd végén lévő külső antenna is veszi, mintegy sztereóban rögzítve az adatokat. Ezen adatokat a radar-interferometria segítségével kiértékelve lehetséges a felszín domborzatának mérése. A NASA által kifejlesztett C-sávon működő (5,6 cm-es hullámhossz) radar 225 km-es sávban, kb. 10 m-es magassági pontossággal készített domborzatmodellt a 60. szélességi fokok között. Az olasz és német űrügynökség (ASI, DLR) által kifejlesztett X-sávon működő (3,1 cm) radar nagyobb pontossággal, ugyanakkor keskenyebb sávban (50 km) térképezett [17].

21. ábra: **Az űrrepülőgép és az antennák, amelyek távolsága ~60 m.**
(Forrás: DLR)

A másik – DDM-ek szempontjából fontos – érzékelő a *Radar Altimeter* (RA, illetve RA-2 az ENVISAT-on), amely egy függőleges tengelyű aktív mikrohullámú (13,8 GHz – Ku-sáv) érzékelő, amelyet az óceánok és a jég felszínének mérésére fejlesztettek ki.

Újabban egyre több érzékelőt fejlesztenek ki a felületmodellek előállításához. Ezek legismertebb képviselői a lézeres letapogatók (*laser-scanner*, vagy *LIDAR – Light Detection and Ranging*). Ezen érzékelők esetében lézerrel pásztázzák a vizsgált területet, és rögzítik a visszaverődés(eke)t. A visszaverődés idejéből ki lehet számítani a távolságot, a hordozóeszköz pályájából – amit GPS és INS segítségével határoznak meg –, valamint a pásztázás szögéből pedig ki lehet számítani az adott pont térbeli koordinátáit [51. Márkus – Király (2005)].

2.3.11. Fejlődések, trendek a távérzékelésben

A fent említett műholdcsaládokon és műholdakon kívül számos egyéb távérzékelési műholdat is pályára állítottak.

A már eddig is említett nagy űrkutatási központokon kívül (NASA, ESA, DLR, CCRS) egyre inkább megfigyelhető a magántőke bevonása az űriparba. Az IKONOS műholdat üzemeltető SpaceImaging, valamint a QuickBird-öt működtető DigitalGlobe cégek, pusztán üzleti alapokon képesek működni.

A fejlődés a hordozóeszközöket tekintve a méret és súly csökkentését, valamint az üzemeltetési költségek alacsony szinten tartását jelenti. Gondolhatunk itt a kis- és mikroműholdakra, a pilóta nélküli repülőkre…

Az érzékelők tekintetében a fejlődés egyrészt az egyre nagyobb geometriai felbontás elérését, másrészt a spektrális felbontás növelését célozza meg. Természetesen az időbeni és a radiometriai felbontás szinten tartása, vagy kis mértékű javítása mellett. Nyilvánvaló fejlődési irány még az érzékelők radiometriai pontosságának, és jel/zaj viszonyának (*Signal/Noise Ratio – SNR*) növelése. Jelentős fejlesztések vannak (és továbbra is várhatók) a teljesen új technológiákon alapuló érzékelők kialakítására.

A globális helymeghatározás (*Global Positioning Systems – GPS*), valamint az inerciarendszerek (*Inertial Navigation Systems – INS)* fejlődésével a direkt módon meghatározott tájékozás alkalmazásával (*direct georeferencing*) egyre nagyobb pontosságot lehet elérni.

Az elkészült felvételek az egyre nagyobb adatátviteli sebességek következtében egyre rövidebb időn belül, kvázi valós időben elérhetők. Az adatok keresésére és hozzáférésére egyre több szolgáltató alkalmaz internetalapú katalógusokat hálózaton keresztüli megrendelési lehetőségekkel.

Az újabb és újabb érzékelők által rögzített nagyobb és nagyobb adatmennyiségek hatékony feldolgozására is újabb eszközöket – főként szoftvereszközöket – kell kifejleszteni.

A közeljövőben fellövésre tervezett műholdak, és a rajtuk lévő érzékelők áttekintését mutatja a következő táblázat (*XI. táblázat*).

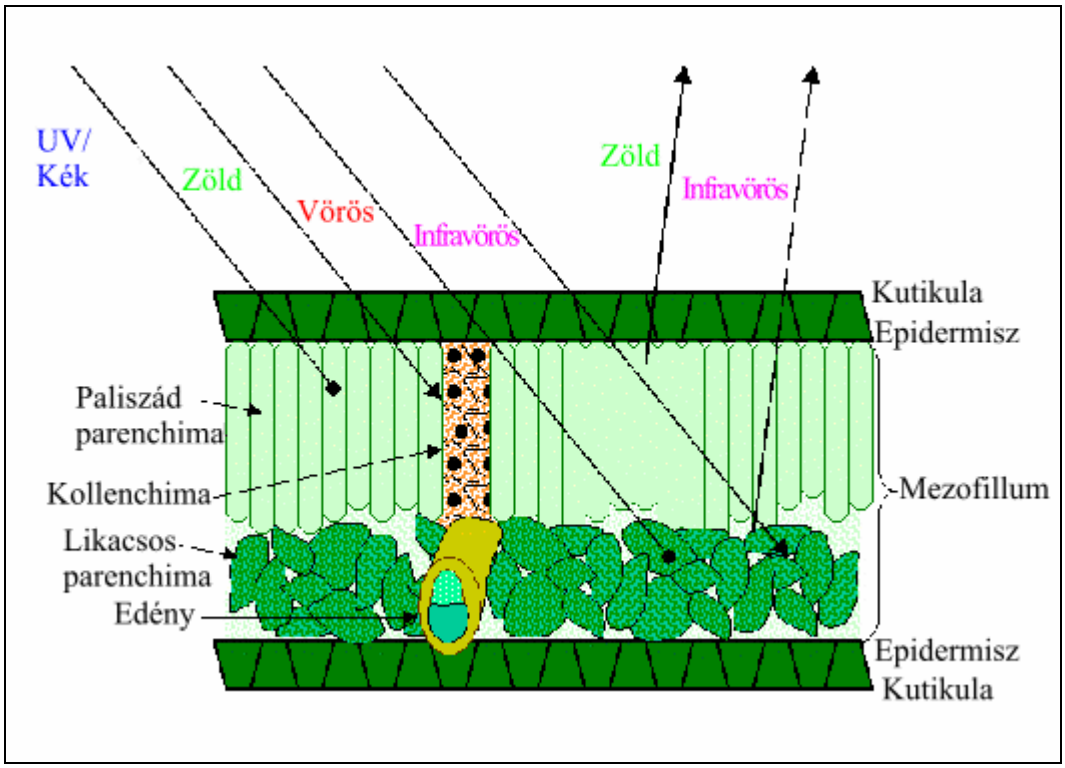
XI. táblázat: **A közeli jövő műholdjai és érzékelői**

Üzemeltető	Név	Tervezett indítás	Érzékelők	Sávok száma	Felbontás
				P / MS	P / MS
NASA	EO3 GIFTS	2007.09.01			
CSA	RADARSAT-2	2007.09.01	SAR		3
Space Imaging	GeoEye-1	2007.10.01		1 / 4	0,41 / 1,65
DigitalGlobe	WorldView-1	2007.09.18		1 / 8	0,5 / 2
INPE	CBERS-2B	2007.09.01	WFI, CCD, IRMS, HRC	1 / 5	2,7 / 20
ESA	Proba-2	2007.09.01			
NOAA	NOAA-19	2007.12.01			
ESA	GOCE	2008.03.01			
ESA	ADM-Aeolus	2008.06.01			
NASA	OSTM	2008.06.15			
INPE	CBERS-3	2009.07.01	PANMUX, MUXCAM, IRMSS, WFI	1 / 4	5 / 10
NASA	OCO	2008.09.15			
Spot Image	PHR 1	2008.12.01			
ImageSat	EROS C	2009.01.01			
NASA	Aquarius	2009.07.14			
Spot Image	PHR 2	2010.03.01			
INPE	CBERS-4	2011.07.01	PANMUX, MUXCAM, IRMSS, WFI	1 / 4	5 / 10
NASA	LDCM	2011.07.01	OLI		

A táblázatból jól látható, hogy amíg a komoly állami hivatalok a régi programjaikat is nehezen tudják fenntartani (pl. a NASA az eredetileg 2005-re tervezett Landsat adatfolytonosságot biztosító programot [*Landsat Data Continuity Mission – LDCM*] jelenleg 2011-re tervezi; a kanadaiak évek óta halogatják a RADARSAT-2 fellövését; a SpotImage újgenerációs Pleaides műholdjaira még legalább 3 évet kell várni, stb.), addig a magáncégek a tervek szerint még 2007-ben pályára állítják a műholdjaik következő generációját. Megfigyelhető ugyanakkor, hogy a nagy űrkutatási hivatalok (ESA, NASA) számos olyan programot indítanak, amely a bioszféra mellett nagyobb figyelmet szentel Földünk egyéb részeinek (hidro-, atmo-, krio-, geoszféra), lehetőséget biztosítva ezzel az összefüggések mélyrehatóbb vizsgálatára.

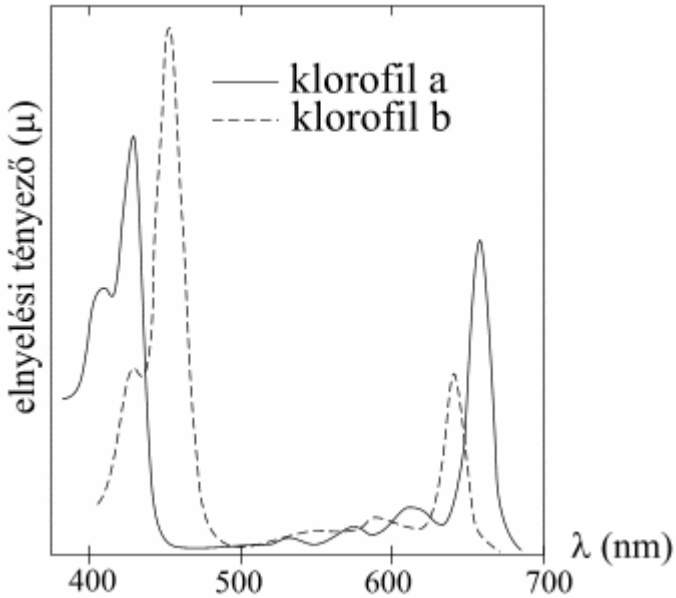
2.4. A távérzékelés és a vegetáció

Az erőforrás-kutató műholdak szempontjából nagyon fontos a növénytakaró megfigyelése. Mivel ez az értekezés szempontjából is egy fontos témakör, ezért egy teljes alfejezetet szentelek neki. Az elektromágneses sugárzás, és a növényzet kapcsolatát szemlélteti a *22. ábra*.



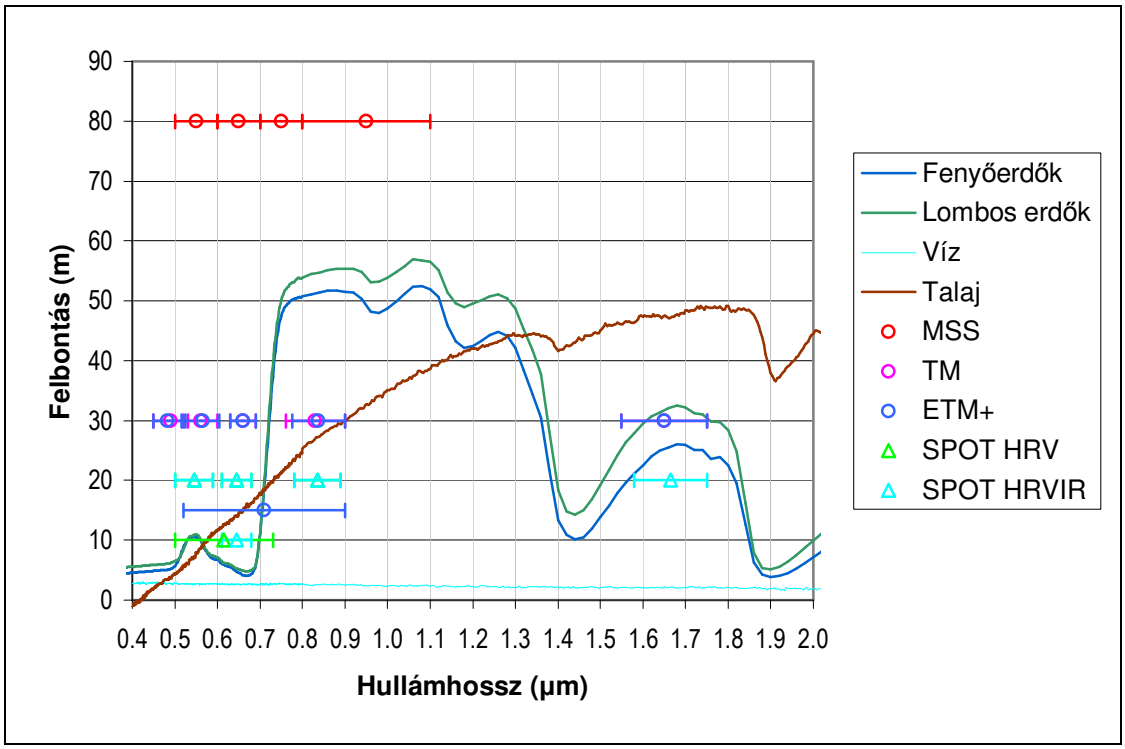
22. ábra: **Az elektromágneses hullámok és a növényzet kölcsönhatásai [landsat.usgs.gov alapján]**

A növények levelei a sejtszerkezetükből adódóan nagyon jó fényvisszaverők, mert az általában magas víztartalmú sejtek és a levegővel telített sejtközötti üregek törésmutatója jelentősen eltérnek. Ugyanakkor a látható fény tartományában a levelek mégis sötétek a különböző színtestek elnyelései miatt. A legfontosabb színtestek, a klorofil *a* és klorofil *b* elnyelését mutatja a *23. ábra*.



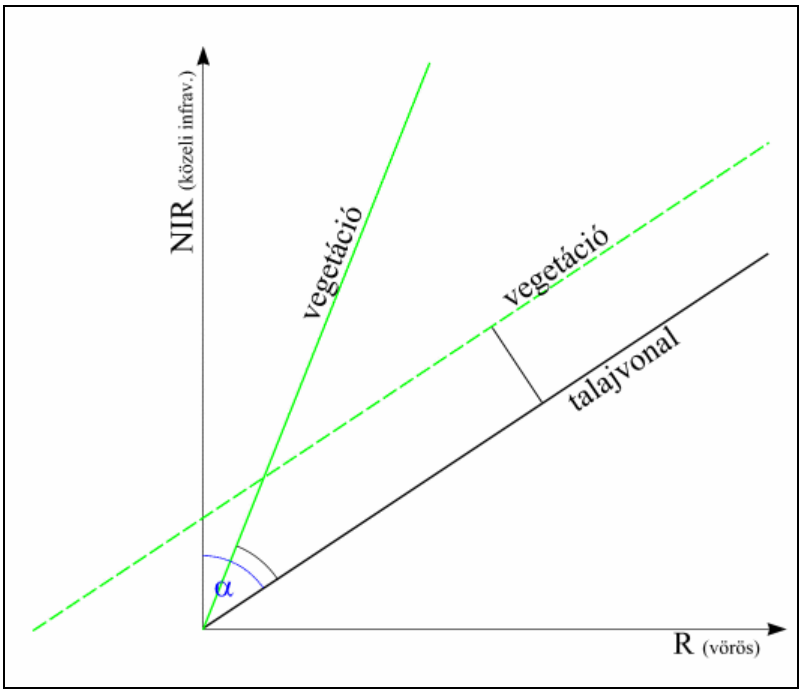
23. ábra: **A klorofil *a* és *b* elnyelési görbéi**

Az ábrából látható, hogy amíg a klorofil *a* elnyelési maximuma az ibolya tartományban, addig a klorofil *b* elnyelési maximuma a kék tartományban van. Ugyanakkor mindkettő rendelkezik egy másik jelentős elnyelési hullámhosszal, ami a látható vörös tartományban van. Ennek folytán a fotoszintetizáló növények a látható tartományban nem elnyelt zöld színt verik vissza. Másik jellegzetessége a növényeknek a sejtszerkezet következtében a nagyon erős reflektanciaérték a közeli infravörös tartományban. Ez általában a likacsos parenchima határfelületeiről történő visszaverődés következménye (*22. ábra*). Ezen folyamatok következtében a fotoszintetizáló növények jellegzetes spektrális reflektanciagörbével rendelkeznek (*24. ábra*).



24. ábra: **A főbb felszínborítási kategóriák visszaverése, valamint pár fontos érzékelő sávkiosztása**

Az erőforrás-kutató műholdak spektrális sávkiosztása szinte kivétel nélkül olyan, hogy alkalmas legyen a növényzet e jellegzetes tulajdonságának a rögzítésére (*24. ábra*). A növényzet megfigyelésére a szakemberek ún. vegetációs indexeket dolgoztak ki. A legtöbb vegetációs indexet a látható vörös (*R*) valamint a közeli infravörös (*NIR*) sávban rögzített reflektanciából számítjuk. A vegetációs indexek elméleti áttekintését nyújtja a *25. ábra*, amelyen egy szóródási diagram (*scattergram*) vázlata látható. Ez az egyes pixeleket, illetve gyakoriságukat ábrázolja a vörös és közeli infravörös reflektanciák által meghatározott koordinátarendszerben. Az ún. talajvonal, a vegetációval nem rendelkező, különböző „fényességű" talaj-visszaverődési értékekre húzható egyenes. Amint az a fentiekből következik (*24. ábra*), a vegetációval borított területeket tartalmazó pixelek a talajvonaltól felfelé helyezkednek el. Az indexek egy csoportja a talajvonal, és a különböző vegetációs vonalak meredekségét vizsgálja, míg a másik csoport a talajvonaltól vett távolságát (*25. ábra*). Természetesen vannak a két módszer ötvözéséből született indexek is.



25. ábra: **A vegetációs indexek geometriai szemléltetése**

A leggyakrabban használt vegetációs index a normalizált vegetációs index (*Normalised Different Vegetation Index – NDVI*), amelyet Rouse és társai [64. Rouse et al (1973)] írtak le először. Ez az index a két sáv arányán alapszik, tehát a vegetációs vonal meredekségét vizsgálja. Az indexet az alábbi összefüggéssel számolhatunk:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \qquad [10.\ \text{egy.}]$$

A talajvonaltól mért távolságot alkalmazza például a PVI (*Perpendicular Vegetation Index – PVI*), és a WDVI (*Weighted Difference Vegetation Index – WDVI*). A PVI-t a következő képlet segítségével számolhatjuk [63. Richardson – Wiegand (1977)]:

$$PVI = \sin\alpha \cdot NIR - \cos\alpha \cdot R \qquad [11.\ \text{egy.}]$$

ahol: α: a talajvonal és az NIR tengely által bezárt szög (lásd *25. ábra*)

A WDVI pedig az alábbi összefüggéssel számolható:

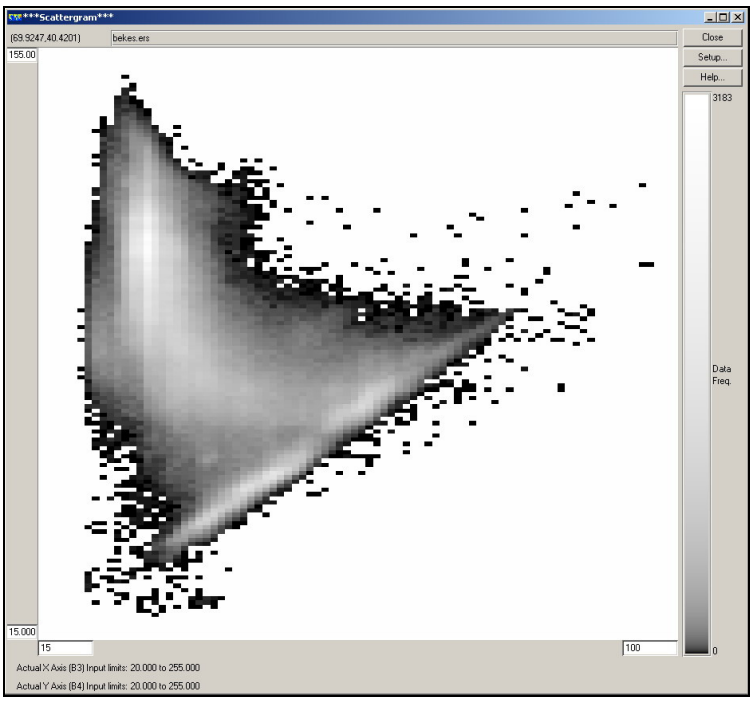
$$WDVI = NIR - s \cdot R \qquad [12.\ \text{egy.}]$$

ahol: s: a talajvonal meredeksége

Ezeknek az indexeknek nagy hátrányuk, hogy az atmoszféra hatása jelentősen befolyásolja őket, ezért csak olyan felvételek esetében javasolt a használatuk, amelyen elvégezték az atmoszférikus korrekciót.

A talajvonaltól való távolságot használják az egyes, ún. zöldérték-meghatározások is. A *26. ábra* egy békés-megyei űrfelvétel szóródási diagramját mutatja. Ez az az ábra, amit Kauth és Thomas [38. Kauth – Thomas (1976)] bojtos sapkának nevezett el (*tasselled cap*). Az esetemben az elnevezés nem találó, az ábrából mégis szembetűnik, hogy a spektrális térnek ebben a metszetében a növényzet jól elkülönül a vegetációmentes részektől. Ezek alapján fejlesztették

ki a Kauth/Thomas (vagy *Tasselled Cap*) transzformációt, amelynél tapasztalati úton több érzékelőre is meghatározták az n-dimenziós „talajvonalat”, valamint a buja vegetációval teljesen borított terület pontját, ebből a pontból húztak merőlegest a „talajvonalra”, és ennek mentén értelmezik a zöld-értéket (*Green Vegetation Index – GVI* vagy *greenness).* Végül is ezek a transzformációk az eredeti felvételi sávok tapasztalati úton meghatározott lineáris kombinációi.



26. ábra: **Egy Landsat TM űrfelvétel jellegzetes szóródási diagramja a 3. és 4. sávban**

Azok közül az indexek közül, amelyek ötvözik a talajvonaltól vett távolságot és a meredekséget, az MSAVI-t (*Modified Soil Adjusted Vegetation Index – MSAVI*) említem meg. Ezt az indexet Qi és társai fejlesztették ki [60. Qi et al (1994)], úgy, hogy egy korrekciós tényezőt építettek be az NDVI képletébe (L), amelyet az NDVI és WDVI alapján határozhatunk meg. Az MSAVI-t az alábbi összefüggéssel számolhatjuk:

$$MSAVI = \left(\left(NIR - R\right)/\left(NIR + R + L\right)\right) \cdot \left(1 + L\right) \qquad \text{[13. egy.]}$$

ahol: L: korrekciós tényező, amit a következő képlettel számíthatunk:

$$L = 1 - 2 \cdot s \cdot NDVI \cdot WDVI \qquad \text{[14. egy.]}$$

Bár a vegetációs indexek nem köthetők közvetlen mérési mennyiségekhez, nincs elméleti (fizikai, kémiai és biológiai) alapjuk, hanem sokkal inkább tapasztalati tényen alapulnak, alkalmazásuk mégis széles körben elterjedt.

A szakemberek az érzékelők fejlesztése során is kifejezetten a vegetáció megfigyelésére alkalmas szenzorokat fejlesztenek ki. Ezeknek a felvételeknek nemcsak a földi természetes folyamatok és erőforrások megfigyelésében van nagy szerepük, hanem az egyes ágazatok felügyeleti eszközévé is válhatnak. A különböző termés-előrejelző rendszerek például jelentős

felhasználói a vegetáció megfigyelésére alkalmas felvételeknek. Ez az egyes stratégiai döntési szinteken is visszahat, ezáltal az érzékelők fejlesztése során a spektrális felbontás növelését részben a vegetáció vizsgálatában érdekelt szakemberek kezdeményezik. Az újabb műholdakon található – jelenleg még ritka – hiperspektrális érzékelők által készített felvételek hatalmas lehetőségeket rejtenek a vegetáció vizsgálatában.

2.5. A távérzékelt felvételek feldolgozása

A távérzékelési munkafolyamat részeként létrejövő nyers felvétel (*RAW data*) számos képfeldolgozási eljáráson keresztül jut el a végtermékig. Ezen feldolgozás lépései a következők:

1. előfeldolgozás (*pre-processing*):
   a.) radiometriai korrekció,
   b.) geometriai korrekció,
   c.) atmoszférikus korrekció;
2. képjavítás (*image-enhancement*):
   a.) szűrők alkalmazása (*filter*),
   b.) sávok közötti műveletek,
   c.) főkomponens-analízis (*Principal Component Analysis – PCA*),
   d.) Kauth-Thomas transzformáció (*KT or Tasselled Cap Transformation*),
   e.) színtér-transzformációk,
   f.) Fourier-transzformáció (*FT*);
3. képosztályozás (*classification*);
4. utófeldolgozás (*post-processing*).

2.5.1. Az előfeldolgozás

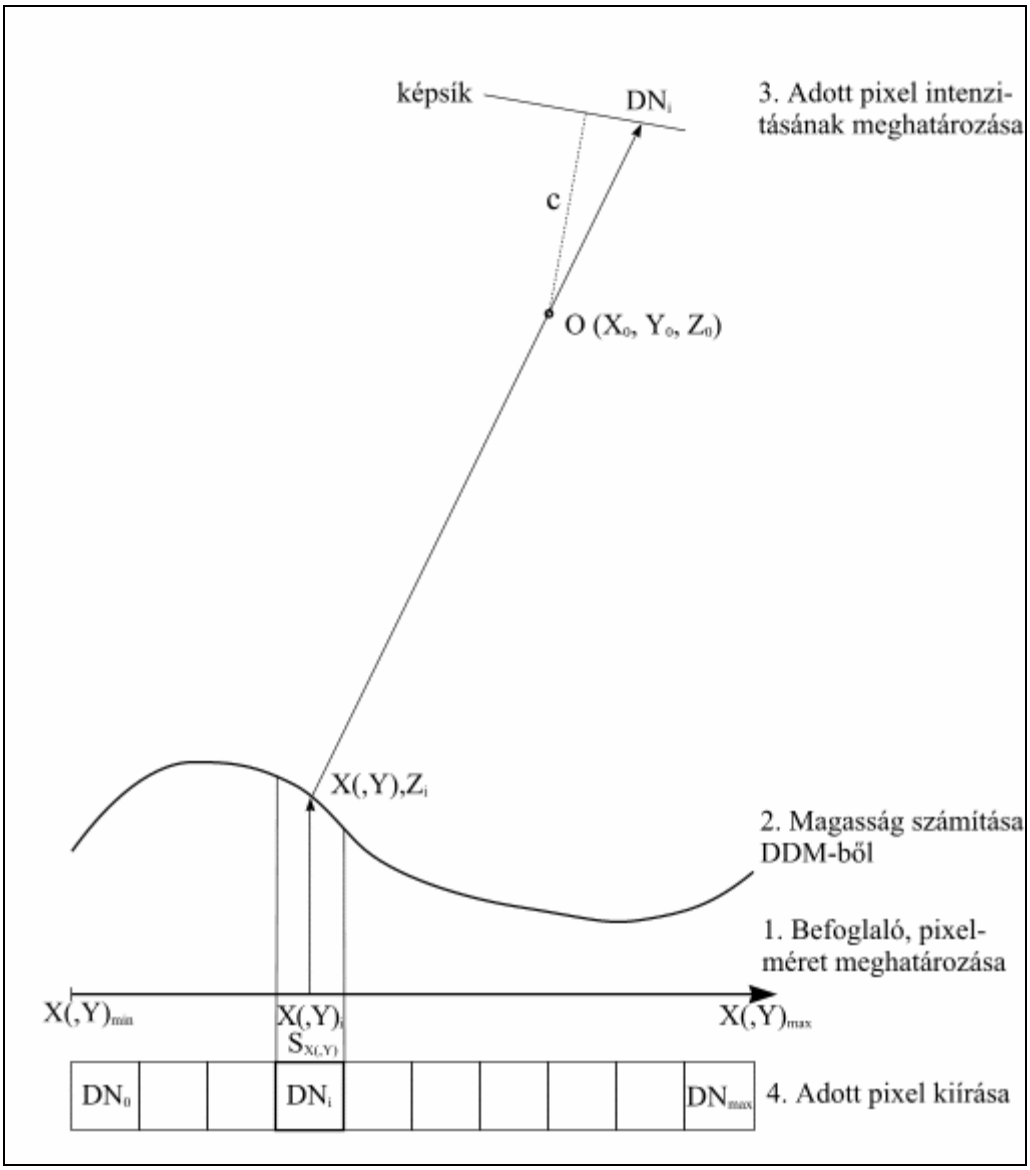
Az előfeldolgozás során a felvételen rögzítésre került zavaró hatásokat próbáljuk csökkenteni. Ezek a zavaró hatások elsősorban a felvétel geometriájára, valamint radiometriájára vannak hatással.

A felvételeken először elvégzik a rendszerkorrekciót (ezt általában az adatszolgáltató végzi el), amelynek során az érzékelő paraméterei, kalibrációja alapján kijavítják a felvétel geometriáját, a szisztematikus hibákat, és az érzékelő által érzékelt mennyiségeket fizikailag mérhető mennyiségeknek feleltetik meg (sugárzás: $W/m^2 \cdot sr$). A geometriai korrekció során a felvételt néha közelítőleg vetületbe is illesztik.

Amíg az elektromágneses hullámok a forrástól eljutnak az érzékelőig, addig kétszer is áthaladnak az atmoszférán (*4. ábra*). Az atmoszféra nagyon kedvezőtlenül befolyásolja a felvétel radiometriáját, valamint a geometriájára is hatással van. Az atmoszférikus korrekció során ezeket a hatásokat próbáljuk kiküszöbölni. Ezt általában kétféle módon, vagy valamilyen atmoszféramodell alkalmazásával, vagy tapasztalati úton szokták elvégezni. Mivel a jelenlegi atmoszféramodellek meglehetősen bonyolultak, és ráadásul számos bemeneti paramétert igényelnek, ezért ezeket a korrekciókat a gyakorlatban legtöbbször tapasztalati úton végezzük el.

Ahhoz, hogy a felvételeket hatékonyan fel tudjuk használni, szükséges a felvételek geometriai korrekciója és vetületi rendszerbe történő illesztése. Ez a felvételek mennyiségi kiértékelésé-

nél elengedhetetlen, de a minőségi értékelés, valamint a kinyert adatok további integrálása szempontjából is hasznos. A felvételek geometriai korrekciója leggyakrabban az eredeti felvételi geometria visszaállításával történik. Az ún. ortorektifikáció, vagy ortokorrekció – magyarul talán képhelyesbítésnek nevezhetnénk – elvét szemlélteti a következő ábra (*27. ábra*).

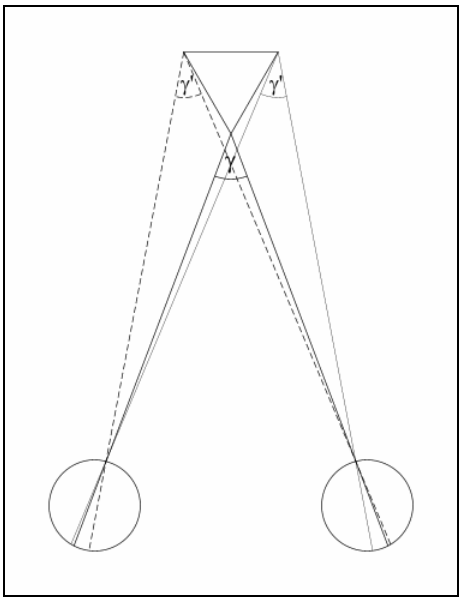


27. ábra: **A felvételek ortorektifikációjának elve**

Az ortorektifikáció során az eredeti felvételt egy meghatározott síkra vetítjük úgy, hogy a felvett objektumok felvételi képe, és az arra a síkra merőlegesen (ortogonálisan) vetített képe megegyező legyen. Először meghatározzuk az adott síkot (légifelvételek esetében ez általában vízszintes), és azon az ortofotó befoglalóját, és pixelméretét. Egy adott pixel $(X,Y)_i$ koordinátáiból a DDM segítségével kiszámítjuk a magasságát. Ebből a pontból $(X,Y,Z)_i$ térbeli egyenest húzunk a tájékozás során meghatározott perspektív középponton ($O(X_0, Y_0, Z_0)$) át, és elmetsszük a képsíkot. Megnézzük, hogy az adott metszéspont körül milyen intenzitásértékek fordulnak elő az eredeti képen, és a mintavételezés függvényében kiszámítjuk az eredmény

pixel intenzitását (DN_i), majd azt kiírjuk. Végighaladva az összes pixelen, megkapjuk az ortofotót.

Amennyiben ugyanarról a területről, különböző szögből több felvétel is készül, akkor azok alkalmasak a térkiértékelésre is. Az emberi térlátás esetében a szembázis-távolságról a retinán leképeződő két különböző képet eltérések, parallaxisok jellemzik [3. Bácsatyai – Márkus (2001)]. Az eltérés mértékét a bázistávolság és a tárgytávolság viszonya, pontosabban a konvergenciaszög határozza meg (*28. ábra*).



28. ábra: **Az emberi térlátás**

Ugyanazon objektumok két, bázisirányú parallaxisokkal rendelkező képei az agyunkban térbeli képpé állnak össze. Az emberi szempár sztereoszkópikus szétválasztó képessége ~ 5”, tehát ennél kisebb konvergenciaszög-különbséget már szempárunk nem érzékel. Ugyanakkor, ha a konvergenciaszög különbsége nagyobb, mint 1,2˚, akkor a térmodell nem jön létre, képei szétesnek [46. Kraus (1998)].

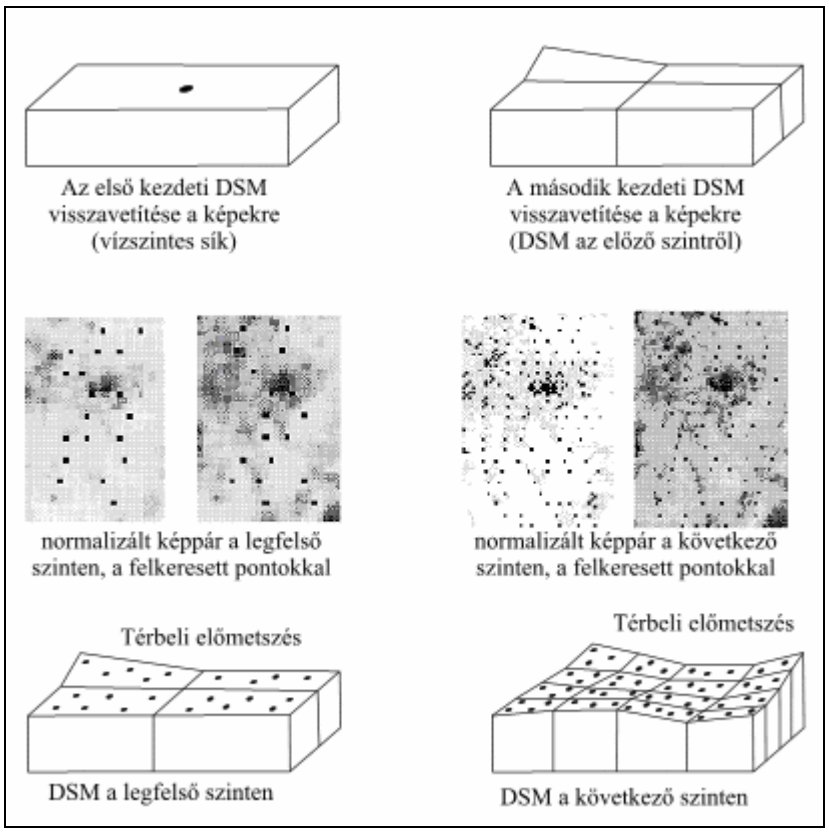
Ugyanazon terület különböző nézőpontból rögzített, tehát bázisirányú parallaxisokat tartalmazó képpárjai alkalmasak a térkiértékelésre. Ilyen sztereóképpárokat szolgáltatnak az egyszerű sztereó-fényképezőgépek, a földi sztereó-mérőkamerák, a hagyományos légifényképezés képei – amennyiben sztereó-átfedéssel készülnek – és egyre több műhold is képes sztereóképpárok rögzítésére (lásd: 2.3.10. A digitális domborzatmodellek (DDM) és a távérzékelés, 43. o.).

Ezeknek a képpároknak a kiértékelése – az egyes képekhez hasonlóan – az eredeti felvételi geometria visszaállításával valósulhat meg. A tájékozott térmodellen méréseket végezhetünk, amely mérések megadják a mért pont térbeli, *X*, *Y*, *Z* koordinátáit.

A digitális képek esetén lehetőség van arra, hogy a képpárok által felvett területről felületmodelleket automatikusan állítsuk elő. Az automatikus felületmodell-előállításnak több módszere is ismert. A fontosabbakat az alábbiakban ismertetem.

Ahhoz, hogy az adott terület felületmodelljét meg tudjuk határozni, szükséges a képpárok homológ pontjainak, képrészleteinek a felkeresése. A felkeresés történhet a képsíkon, amikor

is a forrásképeken – a tájékozás által meghatározott geometriai kapcsolatot figyelembe véve – keressük az azonos pontokat. Ebben az esetben a tárgypont koordinátáit a felkeresés után térbeli előmetszéssel határozzuk meg. A másik lehetőség, hogy a tárgytérben egyeztetjük a képeket. Ebben az esetben adott *XY* koordinátájú pontban felveszünk egy ablakot, amelyet a képsíkokra vetítünk. A képsíkokra vetített ablakokat korreláltatjuk egymással úgy, hogy közben az ablak magasságát változtatjuk. Ahol a legnagyobb lesz a korreláció, az ahhoz tartozó magasság, és természetesen az *XY* koordináta határozza meg a felület egy pontját. A módszert VLL(*Vertical Line Locus*)-korrelációnak nevezik, és nagy előnye, hogy a képrészletek egyeztetését, a tárgypont-koordináta meghatározását, de akár még az ortofotó-előállítását is egy lépésben valósítja meg [46. Kraus (1998)]. Maguknak a képeknek az egyeztetése történhet területegyeztetés segítségével (*area-based matching*), ahol az ún. érdeklődési operátorok segítségével kiválasztjuk azokat a területeket, amelyek alkalmasak az egyeztetésre, vagy pedig jellegzetes objektumok egyeztetésével (*feature-based matching*), amikor a képeken különbségszűrők alkalmazásával (lásd: 2.5.2. A képjavítás, 56. o.) meghatározzuk a jellemző vonalakat és éleket. Ezeket az elemeket utána korreláltathatjuk a képsíkon kétdimenziós korrelációval – ezt szokták az automatikus relatív tájékozásnál alkalmazni – vagy lineárisan, a magsugár geometria (epipoláris kapcsolat) vagy a normalizált képpár segítségével, de lehetőség van ezen elemek tárgytérben történő egyeztetésére is. Bár a tárgytérben történő egyeztetés sokkal számítás-igényesebb, kétségtelenül az a fejlettebb módszer. Ezeket a módszereket még tovább finomíthatjuk a piramisrétegek alkalmazásával, ahol a durvább felbontástól jutunk el a megfelelő finom felbontásig (*29. ábra*) [34. ISSSK (2004)].



29. ábra: **Automatikus felületmodell-előállítás ([34] alapján)**

A vizsgált felszín domborzata mind a felvétel radiometriájára, mind a geometriájára hatással van. A geometriai hatások csökkentését leggyakrabban a vetületbe illesztéskor végezzük el. A (radiometriai) topográfiai normalizáció során a sugárforrás (Nap) különböző beesési szöge következtében létrejövő reflektancia-különbségeket próbáljuk minimalizálni.

Ha az adott felületelemet Lambert-féle tükrözőnek tekintjük, akkor az alábbi képlet segítségével számolhatunk:

$$R_n = \frac{R_e}{\cos i} \qquad \text{[15. egy.]}$$

ahol: R_n normalizált reflektancia
R_e eredeti reflektancia
i beesési szög (*incidence*)

A beesési szöget pedig a következő képlet segítségével számolhatjuk:

$$\cos i = \cos(90 - \Theta_S) \cdot \cos \Theta_F + \sin(90 - \Theta_S) \cdot \sin \Theta_F \cdot \cos(\Phi_S - \Phi_F) \qquad \text{[16. egy.]}$$

ahol: Θ_s Nap magassági szöge
Θ_F felületelem lejtszöge
Φ_s Nap azimutja
Φ_F felületelem kitettsége

A Minnaert [54. Minnaert – Szeicz (1961)] által kidolgozott módszer szerint nem tekintjük a felszínt Lambert-féle tükrözőnek mondván, hogy a felület nem minden irányban egyformán tükröz.

$$R_n = \frac{R_e \cdot \cos e}{\cos^k i \cdot \cos^k e} \qquad \text{[17. egy.]}$$

ahol: e kilépési szög
k Minnaert-konstans

A Minnaert-konstans értékét tapasztalati úton határozhatjuk meg, olyan területen, ahol változatos a domborzat, de a felszínborítás azonos.

2.5.2. A képjavítás

A képjavító eljárásokat azért alkalmazzuk, hogy kiemeljük az adott feldolgozás szempontjából lényeges képi tartalmakat, segítve ezzel a vizuális interpretációt és a további képfeldolgozást.

2.5.2.1. Szűrők

A képjavítás általános eszközei a szűrők, vagy filterek. A szűrők esetében a vizsgált pixelt, és közvetlen környezetét elemezzük, ezen pixelértékekből számoljuk az új kép pixelértékeit. Egyes irodalmak fokális funkcióknak nevezik [10. Czimber (1997)] őket. A közvetlen környezetet leggyakrabban egy (2n+1)·(2n+1) méretű ablakkal definiáljuk. Annak alapján, hogy az ablakon belüli értékekből milyen módon számoljuk az új értékeket, a szűrőket az alábbi csoportokba sorolhatjuk:

- lineáris szűrők: az új pixel értékét az ablakon belüli pixelek lineáris kombinációjaként határozzuk meg;
- adaptív szűrők: itt nem lineáris kombinációval, hanem egyéb függvényekkel számítjuk az új pixel értékét;
- inkrementális szűrők: digitális felületmodellek esetén alkalmazhatjuk az inkrementális szűrőket. Itt az ablakon belüli pixelekre egy felületet illesztünk, majd ennek számítjuk a különböző irányokban értelmezett parciális deriváltjait, és ezekből számíthatunk különféle kategóriákat, mint például lejtés, kitettség, megvilágítás.

2.5.2.2. Sávok közötti műveletek

A sávok közötti műveletek segítségével csökkenteni tudjuk a megvilágításból adódó különbségeket. Leggyakrabban a különböző indexek számítása során alkalmazzuk őket. Az indexek egy speciális csoportján, a vegetációs indexeken túl (lásd: 2.4. A távérzékelés és a vegetáció, 47. o.) sok szakterületnek megvannak a saját indexei, mint pl. vasoxid index, agyagindex stb.

A távérzékelésben széleskörűen alkalmazott élesítési eljárás (*Pan-sharpening, Brovey-transform*) is az egyes sávok közötti műveleteken alapul. Ennél az eljárásnál egy adott multispektrális, de rosszabb geometriai felbontású felvételt egy pánkromatikus nagyobb geometriai felbontású sávval (amelyet készíthetett ugyanaz az érzékelő, vagy akár más műhold is) javítunk. A Brovey-transzformáció képlete:

$$I_R = \frac{B_R \cdot P}{B_R + B_G + B_B} \qquad \text{[18. egy.]}$$

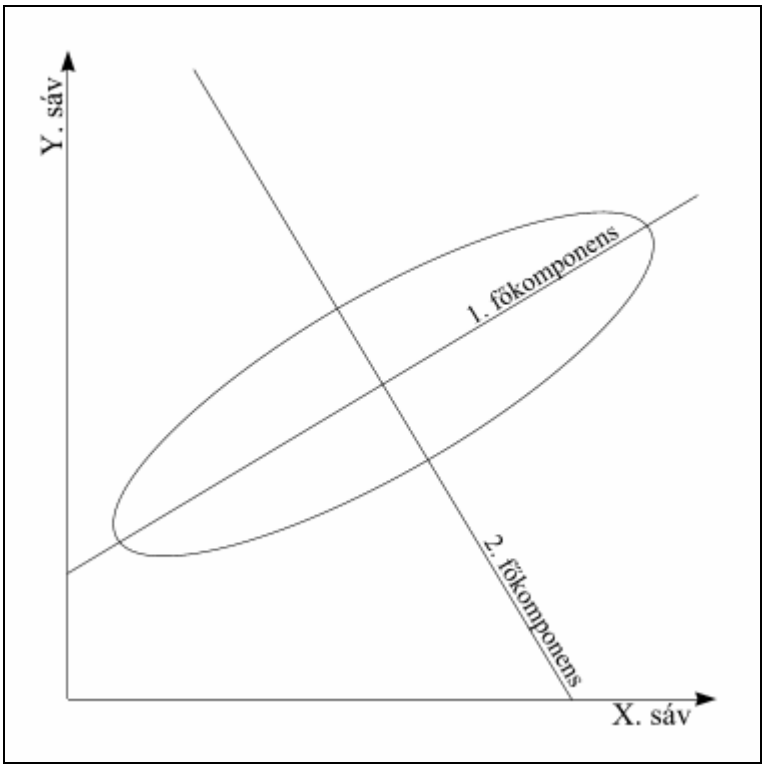
ahol:

I_R	vörös sáv megjelenítendő értéke
B_R	vörös sáv eredeti értéke
B_G	zöld sáv eredeti értéke
B_B	kék sáv eredeti értéke
P	pánkromatikus sáv értéke

2.5.2.3. Főkomponens-analízis

A multi- és hiperspektrális távérzékelt felvételek egyes sávjai általában erősen korrelálnak egymással. A főkomponens-analízis (*Principal Component Analysis – PCA*) segítségével az eredeti felvételi sávok olyan lineáris transzformációját keressük, ahol az eredmény-főkomponensek nem korrelálnak egymással (*30. ábra*).

Az eljárás segítségével lehetőség van az adatmennyiség csökkentésére. Ugyanis a PCA során a kép információtartalmának ~98%-a az első 3 főkomponensben található. Különösen nagy ennek a jelentősége a hiperspektrális felvételeknél. A másik alkalmazási területe a zajszűrés, ahol a főkomponens-transzformáció eredményéül kapott sokadik főkomponensek jelentős zajtartalmát simítjuk, majd visszatranszformálva megkapjuk a zajmentes képet.



30. ábra: **A főkomponens-analízis (PCA)**

2.5.2.4. KT-transzformáció

Kauth és Thomas mezőgazdasági termények távérzékelési megfigyelése során dolgozták ki módszerüket, amelynek a bojtos sapka (*Tasselled Cap*) nevet adták [38. Kauth – Thomas (1976)]. A módszer lényege, hogy a mezőgazdasági termények fejlődésük során a Landsat-felvételeken az ún. talajvonaltól (lásd: 2.4. A távérzékelés és a vegetáció, 47. o.) egyre jobban eltávolodnak, majd a vegetációs ciklus végén visszatérnek. Ezeknek a spektrális és temporális tulajdonságoknak a geometriai modellezésére hozták létre azt a három sajátvektort, amelyik kifejezi a talajvonal irányát (fényesség – *brightness*) az erre merőleges irány, a bojt, a vegetáció mennyiségét fejezi ki (zölderősség – *greenness*), a harmadik irány pedig a nedvességtartalommal (*wetness*) van összefüggésben (lásd: *26. ábra*, 51. o.).

2.5.2.5. Színtér-transzformációk

A különböző színtér-transzformációkat számos helyen alkalmazzuk. Leggyakoribb eseteik a különböző alapszín-összetevők közötti transzformáció, mint például az RGB (*Red-Green-Blue* – vörös-zöld-kék), a CMYK (*Cyan-Magenta-Yellow-Key* – cián-bíbor-sárga-fekete), HSI (*Hue-Saturation-Intensity* – színárnyalat-színtelítettség-intenzitás), YUV (Y – luminancia, UV – krominancia).

2.5.2.6. Fourier-transzformáció (FT)

A Fourier-transzformáció során az eredeti képet a frekvenciatérbe transzformáljuk, ahol olyan frekvenciájú hullámok találhatók, amelyekre az eredeti felvételt felbontottuk. [21].

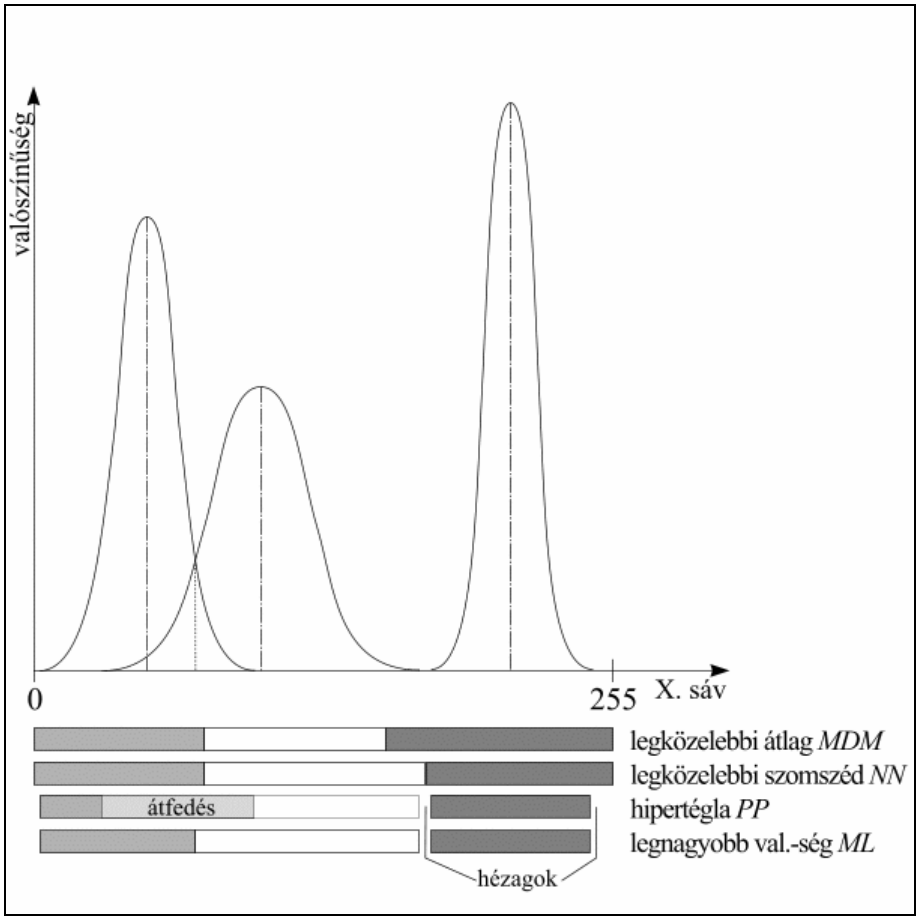
2.5.3. A képosztályozás

Képosztályozásnak azt a folyamatot nevezzük, amelynél az eredeti tónusos képből – ahol a pixelértékek arányban állnak valamilyen mennyiségi értékkel, legtöbbször a megvilágítással – olyan állományt hozunk létre, amelynél a pixelértékek meghatározott kategóriákat jelentenek – a pixelértékek valamilyen minőségi jellemzőket takarnak.

Az osztályok kialakításához használhatunk automatikus módszereket (pl. clusterezés), amikor a feldolgozás során a program pár kiindulási paraméter meghatározása után kialakítja az osztályokat. Gyakrabban alkalmazunk ún. tanítóterületeket, amikor valamilyen referenciaadat birtokában az operátor jelöli ki azokat a területeket, amely alapján a program kialakítja az osztályokat. Mindezek után magára a képosztályozásokra számos módszer használatos. A legfontosabbak:

- legközelebbi középpont (*minimum distance to mean*);
- legközelebbi szomszéd (*nearest neighbour*);
- hipertégla osztályozó (*hyperbox, parallelepiped*);
- legnagyobb valószínűség (*maximum likelihood*):
  a.) normál eloszlás,
  b.) empirikus eloszlás.

Az egyes osztályozók egydimenziós, egyszerűsített működését mutatja be a *31. ábra*.



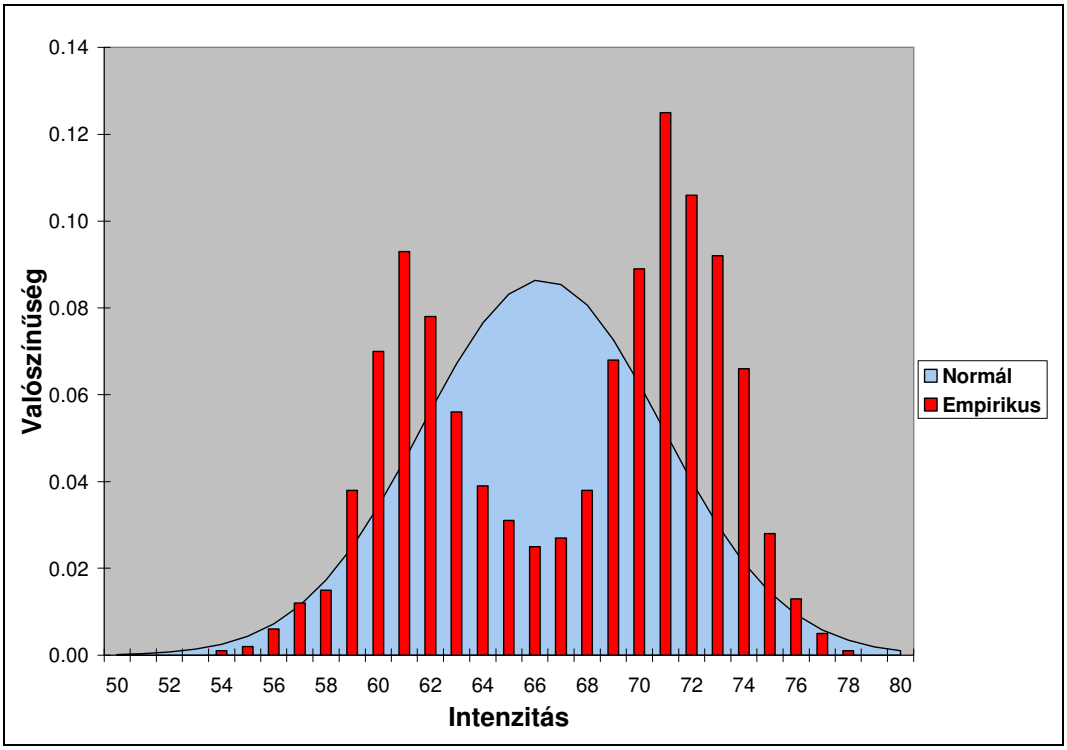
31. ábra: **Az osztályozók működése**

A legközelebbi középpont módszerénél a tanítóterületek pixelértékeinek az átlagát számítjuk, és az osztályozandó pixelt abba az osztályba soroljuk, amelyik átlaghoz a legközelebb esik.

A legközelebbi szomszéd esetében azt vizsgáljuk, hogy az osztályozandó pixel értékéhez melyik tanítóterülethez tartozó pixel van a legközelebb.

A hipertégla osztályozó esetében a tanítóterületek pixelértékeinek az intervallumát vizsgáljuk. Az osztályozandó pixelt abba az osztályba soroljuk, amelyik osztály intervallumába esik. Több dimenziós esetben (a sávok száma *n*) egy *n*-dimenziós ún. hipertéglát kapunk. Az osztályozó hátránya, hogy amennyiben a hipertéglák metszik egymást, még valamilyen kiegészítő módszerre van szükség ezen spektrális térrészek osztályozásakor.

A legnagyobb valószínűség elvén működő osztályozó a távérzékelésben legáltalánosabban használt osztályozó. Ebben az esetben a tanítóterületek egyes osztályokba tartozó pixeleinek számítjuk a statisztikáit, illetve vizsgáljuk az eloszlását. Az eloszlásból számítjuk az osztályba kerülés valószínűségét. Az osztályozandó pixelt abba az osztályba soroljuk, amelyik osztály esetében az adott értéknek legnagyobb a valószínűsége. Többsávos felvételek esetében a valószínűségeket összegezzük. Amennyiben egy adott osztályban a pixelek eloszlását normális eloszlással közelítjük (és ez a leggyakoribb), az osztályozó normál eloszlású fajtájáról beszélünk. Az NyME, Földmérési és Távérzékelési Tanszékén a Czimber Kornél által kifejlesztett Image szoftver [14] a tanítóterületek empirikus eloszlását alkalmazza. Korábbi vizsgálataimban [40. Király (1998)] kimutattam, hogy erdők osztályozása esetében ezen osztályozó alkalmazásával az osztályozási pontosság jelentősen nagyobb, mint a normál eloszlást alkalmazó változat. A két osztályozó közötti különbséget szemlélteti a *32. ábra*.



32. ábra: **A normál valamint az empirikus eloszláson alapuló legnagyobb valószínűség osztályozó**

2.5.4. Az utófeldolgozás

Az utófeldolgozás során a képfeldolgozási munkafolyamat eredményét felülvizsgáljuk, ha szükséges, akkor bizonyos szűréseket alkalmazhatunk a jobb, esztétikusabb eredmény érdekében, valamint előkészítjük az adatokat a GIS-be történő integrálásra.

Ma már elengedhetetlen, hogy a képfeldolgozás eredményét ne integráljuk geoinformatikai rendszerbe. Magát a képfeldolgozást – ezen belül elsősorban a képosztályozást – is nagymértékben segíthetik az egyéb, kiegészítő adatok, amelyeket leghatékonyabban valamilyen térinformatikai rendszerrel kezelhetünk. Az osztályozott felvételeket is célszerűen geoinformatikai rendszerrel elemezhetjük hatékonyan. Ezek a térbeli elemzések teszik lehetővé egy terület monitorozását is.

2.6. Erdészeti aspektusok

A távérzékelésnek számos olyan előnyös tulajdonsága van, amelyet erdészeti vonalon kiválóan hasznosíthatunk. Az alábbi felsorolásban láthatók a távérzékelés legfontosabb jellemzői [12. Csornai – Dalia (1991)] szerint, kiemelve az erdészeti szempontból jelentőseket:

- gyors adatgyűjtés – naprakészség,
- jó térbeli és időbeli mintavételezésű adatrendszert szolgáltat,
- nagy területről homogén adatrendszert kapunk,
- fajlagosan olcsó.

Nézzük sorba ezeket a jellemzőket!

Gyors adatgyűjtés: Bár az erdészeti szakterületen a gyors adatgyűjtésre általános esetben nincsen szükség, számos olyan különleges helyzet merülhet fel, amikor az adatgyűjtés gyorsasága fontos szempont. Ilyenek például a természeti csapások – viharkárok, hó- és jégtörések, erdőtüzek, árvizek, kórokozók gradációi –, valamint az ember által okozott „csapások”, mint például a szennyezések, illegális fakitermelések, lopások.

A *jó tér- és időbeli mintavételezés* az egyik legfontosabb jellemzője a távérzékelésnek az erdészeti alkalmazásoknál. Nehezen képzelhető el olyan, nem távérzékelési alapú mintavétel, amely során ennyire jó mintavételt kapunk. Hozzátartozik még az is, hogy *nagy területről kapunk homogén adatrendszert*. Az Erdővédelmi Hálózathoz (EVH) viszonyítva például, ott szükséges volt a hálózat megtervezése, kijelölése, állandósítása, valamint a szakemberek betanítása. A homogén adatrendszer érdekében gyakran rendeznek ún. EVH-tréningeket, de még így is nehéz elképzelni, hogy a több száz szakember munkájaként létrejövő felmérések teljesen homogének lesznek.

Az, hogy a távérzékelés *fajlagosan olcsó*, az elég relatív kifejezés. Az értekezésemben alkalmazott űrfelvételek ára ~ 2,5 Ft/km^2. Ha ezt a terepi munkákkal hasonlítjuk össze, akkor mindenképpen elmondható, hogy olcsó. Kérdés ugyanakkor az adatkinyerés erőforrás-szükséglete, valamint a kinyert adatok megbízhatósága is. A távérzékelési adatfeldolgozáshoz a nyers adatokon kívül, még számos egyéb összetevőre is szükség van, úgy mint: hardver, szoftver, és megfelelően képzett szakember.

A távérzékelés erdészeti felhasználásáról általánosan elmondható, hogy az egyes erdészeti egységek – legyen az akár természetes, akár jogi-gazdálkodási egység – geometriai és leíró adatairól próbálunk segítségével információkat gyűjteni.

Az egyes egységek esetében a léptéknek van nagy jelentősége, gondolhatunk itt Földünk nagy erdőöveire, az erdőtömbökre, tagokra, erdőrészletekre, állományrészekre, facsoportokra, egyes fákra, vagy akár a fa egyes részeire is. Ezzel a léptékkel összhangban kell lennie az alkalmazott távérzékelési felvétel léptékének.

A geometriai adatok esetében az egyes egységek elhelyezkedésére, méretére és alakjára vonatkozó információkra vagyunk kíváncsiak. Ezeknek, az elsősorban mennyiségi adatoknak a meghatározása során fontos az alkalmazott felvételek geometriai felbontása, a felvételezés geometriája, és az elérhető geometriai pontosság.

A leíró adatok esetében a fent említett egységek minőségi jellemzőire, mint pl. erdő- és faállomány-típus, fafajnem, fafaj, egészségi állapot, faminőség stb. vagyunk kíváncsiak. Itt fontos a felvételek spektrális és radiometriai felbontása.

A felbontásról általában elmondható, hogy minél nagyobb annál jobb. A gyakorlatban azonban szükséges a vizsgálandó egységek méretének, valamint a meghatározandó adatokkal szemben támasztott pontossági követelményeknek megfelelő kompromisszum. Az adatmennyiség a geometriai felbontással négyzetesen, a többi – spektrális, radiometriai és időbeni – felbontással pedig egyenes arányban növekszik. Ez az általános adatgyűjtés–adatkezelés–adatelemzés–adatmegjelenítés munkafolyamat minden egyes műveletének idő- és eszközszükségletére hatással van. Ugyanakkor a nagyobb felbontás alkalmazásával számos egyéb olyan problémába ütközhetünk, amelyek a megfelelő felbontás megválasztásával elkerülhetők lettek volna. Ilyen például az erdők és a geometriai felbontás esetében azok a határfelbontások, amelyek újabb értelmezési szintet tesznek lehetővé. Amennyiben faállományokra vagyunk kíváncsiak, akkor zavaró lehet a felvételen az egyes fák megjelenése, és elkülöníthetősége, a rajtuk jelentkező fény-árnyék hatás. Ugyanígy, ha az egyes fák érdekelnek minket, akkor a feldolgozást és értelmezést nehezíti a levelek elkülönülése.

2.6.1. Történeti áttekintés

A magyar erdészek már mintegy 150 éve foglalkoznak távérzékeléssel. Újsághy Zsigmond erdőmérnök-hallgató már 1854-ben vázolta tanárának a fényképek alapján történő térképezés elméletét. Bár akkor még nem volt megfelelő torzulásmentes alapanyag, de az elv helyessége, miszerint: „…az ortogonális projectio minden méreteit, tehát úgy a vízszintes mint a függélyes távolságokat levezetni lehet…” beigazolódott [59. Németh (1998)].

Az 1879. évi XXXI. törvénycikk, az első magyar nyelvű erdőtörvény, jelentős változásokat hozott az erdőgazdálkodásban, mivel előírta az üzemterv alapján történő gazdálkodást. 1880-ban jelent meg a törvényhez kapcsolódó erdőrendezési utasítás, amely részletesen szabályozta az erdők felmérését, térképezését és területszámítását úgy, hogy a II. Világháborúig a térképek készítési módja és külalakja nem változott.

Az 1896-os Ezredéves Kiállításon számos erdészeti térképet is bemutattak. A besztercebányai igazgatóságon Csiby Lőrinc vezetésével akkor már pár éve sikeres kísérleteket folytattak fotó-

teodolittal, és a műszert, valamint a segítségével készült térképet be is mutatták [59. Németh (1998)]. Csiby Lőrinc munkáival az 1900-as párizsi nemzetközi kiállításon számos díjat nyert.

Jankó Sándor – akinek nevéhez fűződik egyetemünk akkori geodézia tanszékének létrehozása – 1917-ben Pozsonyban jelentette meg az első magyar nyelvű fotogrammetria könyvet [37. Jankó (1917)]. Utódja, Sébor János – aki Jankó Sándor halála után, 1923-ban vette át a tanszék vezetését – 1930-ban jelentette meg tanulmányát „Fotogrammetria az erdőgazdaság szolgálatában" címmel.

A II. Világháborút követően az 1948. évi ideiglenes erdőrendezési utasítás szerint az ún. ideiglenes üzemtervekhez 1:75 000-es méretarányú átnézeti térképvázlatot is kellett készíteni. Ezen túl előírták a területkimutatásokat is. Ezt hagyományos módszerekkel nagyon lassan lehetett csak megvalósítani, ezért a fotogrammetriai módszer kikísérletezésével Bezzegh Lászlót bízták meg, aki akkor az ERTI Erdőrendezési Osztályának vezetője volt. 1949-ben nagy lendülettel vetette magát a munkába, amely során a Honvéd Térképészeti Intézet Wild A5 autográfját használták [6. Bezzegh (1949)]. 1951-ben a munka abbamaradt.

1952–1956 között az Erdészeti Földméréstani Tanszéken foglalkoztak gyakorlati fotogrammetriával. Sébor János és munkatársai több cikkben is beszámoltak eredményeikről, amelyek – ekkor még – elsősorban a földi fotogrammetria tárgyköréből kerültek ki [66. Sébor et al (1954)].

Az erdőrendezés 1959/60-tól kezdett el újra a fotogrammetriával foglalkozni, amikor sikerült beszerezniük egy Zeiss Stereotopot, valamint egy Zeiss C5 típusú sztereóplanigráfot. Pár év alatt kialakult a megfelelő munkamódszer is. Általában a Stereotopot alkalmazták, a tájékozáshoz szükséges illesztőpontokat meglévő térképekről vették le, és így egészítették ki az előző üzemtervezés 1:10 000-es térképeit. Amennyiben nagyon változatos volt a terep, vagy ferdetengelyű volt a felvétel, akkor a kiértékelést a szeteroplanigráfon végezték el. Sík vidékeken a térkép-kiegészítéseket az erdőrendezők végezték a légifénykép-átrajzolók segítségével.

Az első erdészeti célú légifényképezés elkészítése szintén kapcsolódik az Erdészeti és Faipari Egyetem Földméréstani Tanszékéhez. Teszárs Géza egyetemi adjunktus és munkatársai 1960-ban készíttették el a Soproni-hegység első légifényképezését [72. Teszárs (1960a)]. Eredményeiket az Erdő című folyóirat több számában jelentették meg [72. Teszárs (1960a), 73. Teszárs (1960b)].

Az erdőrendezési gyakorlatban a 60-as évektől kezdődően évről évre egyre nagyobb területeket fényképeztettek le az üzemtervek elkészítéséhez. Hosszas kísérletezgetések során végül is a ~ 1:10 000-es fekete-fehér képanyag vált a legelterjedtebbé.

Az EFE Földmérési és Távérzékelési Tanszékén elsősorban Czimber Kornél fejlesztői munkájának köszönhetően 1996-ban elkészült a STEREO program, amely digitális sztereófotogrammetriai kiértékelést tett lehetővé. Egy évvel később, 1997-ben, elkészült az IMAGE digitális képfeldolgozó program, amelybe az ortofotó-előállítás is beépítésre került. Ez volt az első magyar fejlesztésű program, amely az ortorektifikációt megvalósította.

Az ortofotóval kapcsolatos kutatásoknak nagy lendületet adott a PHARE CBC által támogatott „A Fertő-Hanság NP és a Szigetközi TK földrajzi információs rendszerének (GIS) kifej-

lesztése” című projekt, amelynek keretében az EFE FTT megrendelte Győr-Moson-Sopron megye védett területeinek 1:30 000-es, infraszínes légifényképezését, és a képanyagból kiváló minőségű ortofotó-mozaikokat állított elő [41. Király (2000)].

A tanszék az eredményeket az oktatásba is fokozatosan bevonta, ezáltal a frissen végzett erdőmérnökök már nem idegenkedtek a digitális ortofotó-készítéstől. A folyamatot segítette az Állami Erdészeti Szolgálatnál időközben bevezetett digitális térképezés is [1. ÁESZ (2000)]. Jelenleg három irodánál, Szombathelyen, Zalaegerszegen és Debrecenben folyik üzemszerű ortofotó-előállítás a DigiTerra Map program segítségével, és gyakran GPS-es illesztőpontmérésekkel.

Az erdészeti szakigazgatás viszonylag hamar áttért a hagyományos fotogrammetriáról a digitális fotogrammetriára, ugyanakkor még mind a mai napig nem használják ki az egyes űrfelvételek által nyújtott lehetőségeket. Az űrfelvételek erdészeti alkalmazásaira a nemzetközi szakirodalomban számos példát találunk, ugyanakkor a magyarországi alkalmazások csak igen-igen elvétve fordulnak elő.

A földi erőforrás-kutató műholdfelvételeket a nemzetközi erdésztársadalom már évtizedek óta alkalmazza. Az erdővel, mint természetes erőforrással való hatékonyabb gazdálkodást a távérzékelés a következő területeken segíti:

- felmérés,
- természetes folyamatok hatásai,
- emberi tevékenységek hatásai,
- monitoring és modellezés.

Az erdőterületek, és az erdővagyon felmérésében a távérzékelésnek ott jut jelentős szerep, ahol az erdészeti szakma nem rendelkezik jelentős múlttal. Olyan esetekben, ahol az adott ország jelentős erdőterülettel rendelkezik, de bizonyos okokból – társadalmi, gazdasági stb. – mégsem alakult ki az erdészeti szakigazgatás, a távérzékelésnek még nagyobb szerep jut. Ilyen országok például a trópusi esőerdők övében található egyes afrikai országok, valamint az indonéz szigetvilág országai. Azokban az országokban, ahol az erdészeti szakigazgatás jelentős hagyománnyal rendelkezik – mint például Magyarországon is – a távérzékelésnek a hagyományos, évtizedek alatt kialakult terepi felvételezés mellett csak kiegészítő szerep jut. A távérzékelés teszi lehetővé azokat a globális erdészeti erőforrás-felméréseket is, amelyek az 1990-es évektől kezdődően jelentek meg. Ilyen például a globális erdészeti erőforrások értékelése (*Global Forest Resources Assessment – FRA 2000*) [26], valamint az erdők és földfelszín változások globális megfigyelése (*Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics – GOFC-GOLD*) [27]. Ezeknek a teljes Földre kiterjedő felméréseknek egyre nagyobb szerepe van Földünk folyamatainak jobb megértésében.

A természetes folyamatok közül, amelyeknek az erdőre gyakorolt hatása jelentős, kiemelném a különböző természeti katasztrófákat, viharokat, árvizeket, jég- és hókárokat, jelentősebb természetes tűzeseményeket. Az ezen természeti csapások által okozott káresemények felmérésére a távérzékelés gyakran az egyetlen gyors és hatékony módszer. Földünkön számos olyan régió van, ahol az erdőben bekövetkező tűzesetek gyakoriak. Ilyen a boreális erdőöv, a mediterrán régió, valamint a trópusi erdőöv bizonyos területei. Azokban az országokban,

amelyek érintettek ezen természeti csapás által, különféle tűzmegfigyelő, valamint -előrejelző rendszert építettek ki. Az Egyesült Államokban, Montana államban, 2000-ben előfordult jelentős erdőtűzkor az Államok Erdészeti Szolgálata (*US Forest Service*) megbízta a MODIS csapatot, hogy a MODIS felvételek (lásd 2.3.9.1 A NASA műholdrendszerei, 36. o.) alapján kidolgozzon egy aktív tűzjelző rendszert. Ez vezetett később oda, hogy jelenleg nagyrészt automatikusan működik a MODIS Gyorsreagálású Rendszer (*MODIS Rapid Response System* [56]), amely egyrészt a MODIS felvételek 250 m-es felbontású színkompozitját, valamint különböző aktív tűztérképeket szolgáltat valós időben.

Bár az erdőtüzek gyakran természetes folyamatok következményei, számos olyan eset van, amikor emberi tevékenység eredményeként keletkeznek. Globális értelemben az emberi tevékenységek közül az erdőirtások azok, amelyeknek legnagyobb az erdőkre gyakorolt káros hatásuk. Az erdőirtások gyakran összefüggnek az erdőtüzekkel is, ugyanis a letarolt erdőterületeket felégetéssel próbálják művelésre alkalmassá tenni. Az erdőirtásokon, és az antropogén eredetű erdőtüzeken kívül a légszennyezés a harmadik legkárosabb hatás. Számos tanulmány jelent meg az európai iparvidékek környékén található erdők pusztulásáról, amelyért elsősorban a légszennyezés következtében kialakuló savas ülepedéseket tették felelőssé.

Az erdészeti monitoring a fenti három részterület időbeni megfigyelését jelenti. A monitoring-tevékenység kapcsán nemcsak átfogó képet kapunk a fenti események időbeni változásáról, hanem közelebb juthatunk a kiváltó okok jobb megismeréséhez is. Ugyanakkor a monitoring-megfigyelések kiváló lehetőséget biztosítanak a különböző modellezések kifejlesztésére és tesztelésére is.

Az erdészeti monitoring témakörben hazai viszonylatban a legjelentősebb megfigyelési hálózatokat, az **E**rdő**v**édelmi **H**álózatot (EVH), valamint a **F**olyó**n**övedék **m**egfigyelési hálózatot (FNM) kell megemlíteni.

2.6.2. Az Erdővédelmi Hálózat

Az erdővédelem komplex programjában az Állami Erdészeti Szolgálat (ÁESZ) egyik feladata:

„1. A nagyterületű erdőleltár alapelvei szerint működő erdőkár-felmérés hazai módszerének és rendszerének kidolgozása és működtetése, különös tekintettel a légköri szennyezés erdőkre gyakorolt hatásának vizsgálatára, biztosítva a nemzetközi felmérési rendszerhez (ICP Forests) való csatlakozást."

Az erdők egészségi állapotának nagyterületi felvételénél elsődleges cél az egyes megbetegedések, károsodások időbeli előfordulásának és térbeli elhelyezkedésének megállapítása.

A nagyterületű egészségi állapotfelvétel hálózatát (**E**rdő**v**édelmi **H**álózat – EVH) az Erdőrendezési Szolgálat szakemberei 1987-ben hozták létre oly módon, hogy az erdőterületekre egy 4·4 km-es hálót terveztek. Az így létrejövő mintegy 1100 mintapont adatait 1988-tól évről évre felveszik a szakemberek.

3. Anyag és módszer

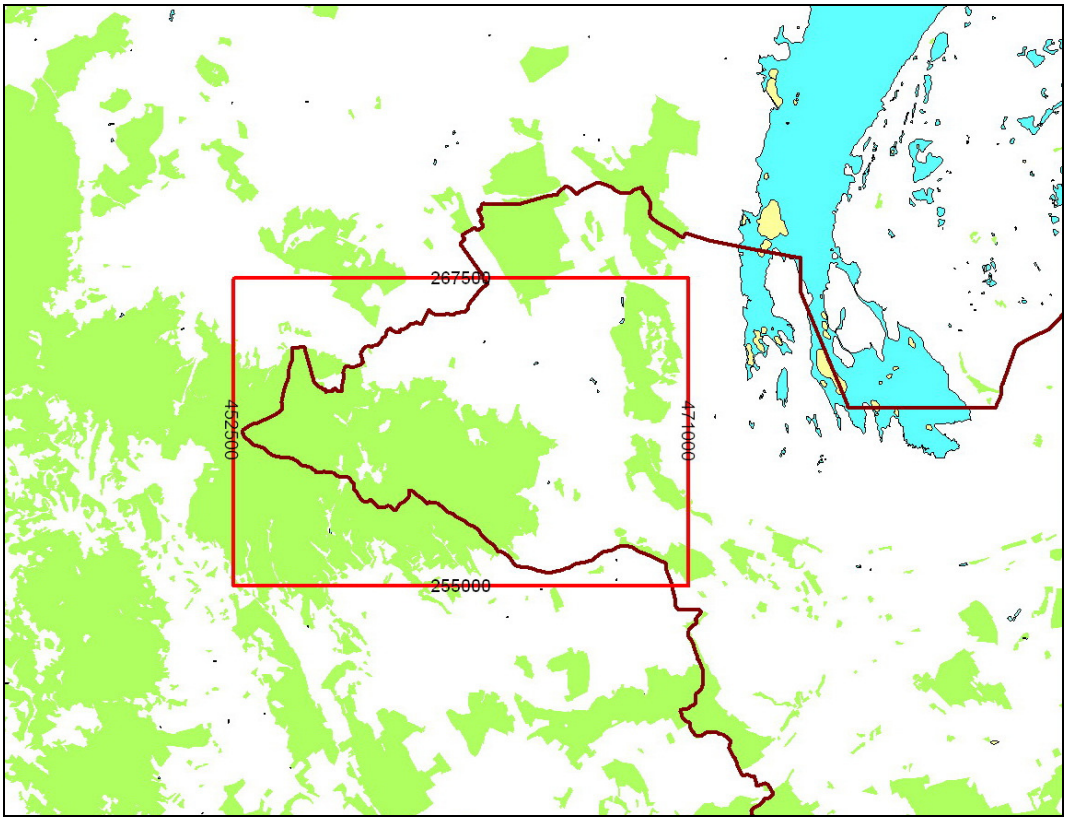
3.1. A vizsgált terület: a Soproni-hegység

Kutatásaim során számos területen – főként Magyarországon, de külföldön is – végeztem vizsgálatokat különböző távérzékelési forrásadatokkal. Elemeztem a Kárpát-medencét, teljes Magyarország területét, teljes Landsat-felvételeket, valamint egészen kis területet lefedő nagyléptékű felvételeket is. Ahhoz, hogy vizsgálataimnak, és a különböző felbontású felvételeknek valamilyen egységes keretet adjak, szükséges volt, hogy kijelöljek egy mintaterületet.

A mintaterülettel szemben az alábbi követelményeket fogalmaztam meg:

- megfelelő méret,
- megfelelő változatosság,
- terepi ismeret,
- jó elérhetőség,
- megfelelő adatforrások.

A megfelelő méret és változatosság fontos a mintavételezés szempontjából. A terepi ismeretre és a jó elérhetőségre akkor van szükség, amikor az adatokban valamilyen érdekességet észlelünk, amelynek tisztázásához terepi bejárásra van szükség. Nem utolsó szempont, hogy megfelelő adatokkal rendelkezzünk a területről. Mindezek alapján a mintaterületet Sopron környékén jelöltem ki (*33. ábra* és az *1. melléklet*).



33. ábra: **A mintaterület elhelyezkedése**

A „Soproni-hegység” mintaterület (*33. ábra*) magába foglalja a Soproni-hegység magyar oldalát, az osztrák oldal egy részét, a Szárhalmi-erdőt, a Balfi-erdőt, valamint a Dudles, és a Kópházi erdő egy részét.

A Soproni Tájvédelmi Körzet 4905 ha-on terül el, azonos a Soproni-hegységgel, amely a kristályos Alpok legkeletibb tagjának, a Rozália-hegységnek keleti nyúlványa. Az Alpok hegyhátainak nyúlványai szegélyezik a Tájvédelmi Körzetet minden irányban: északon Lépesfalva felé a Liget-erdő és a Borsó-hegy (399 m); az Arbesz-rétig az Ágfalvi-erdő (381 m); Bánfalva körül a Várhely Madár-ároki oldala – az őskori földvárat rejtő Sánc-heggyel (339 m) – szelídgesztenyéseivel, mely végigkíséri az erdők és zártkertek vonalát a Vashegytől (374 m) a Vári-si tölgyesig. Kelet-délkeletre a Daloshegyről (400 m) a Harkai-fennsíkra látunk, melyből kiemelkedik a Csarabos Kúp (276 m), szemben dél felé az Istenszékével (259 m).

A hegyhátakat, tetőket és dombsorokat völgyek (pl. Hidegvízvölgy), árkok (pl. Zsilip-árok) és szurdokok (pl. Kányaszurdok) szelik át, ezáltal kapja meg sajátos arculatát a táj. Két fő völgye közül a Füzes-árok a Kecske-patakkal és a Récényi úttal párhuzamos; a másik a K–Ny-i irányú Brennbergi-völgy a Rák-patakkal, melynek vizét a fővölgyből leszakadó, É–D irányú mellékvölgyek (pl. Tacsi-, Tolvaj-, Köves-, Kovács-, Hermes-, Vadkan-árok stb.) forrásai táplálják, medrét égerligetek (*Carici brizoidi-* és *Aegopodio-Alnetum*) szegélyezik. Az állandó források száma 25 (legnevezetesebbek: Deák-kút és Mártírok-forrása), amelyekhez ugyanennyi időszakos forrás járul. Ezek, és az évi 750-850 mm csapadék teremti meg a hegység kedvező erdőtenyészeti viszonyait, duzzasztásuk pedig két mesterséges tavat: a Szalamandra- és a Pisztrángos-tavat. A Tájvédelmi Körzetben több megszűnt kőfejtőben (pl. a Deák-kútnál vagy a Nádormagaslaton) tanulmányozhatók a hegyképző kőzetek, melyek közül számottevőbbek a gneisz, a muszkovitpala és a leukofillit. Ezek a kristályos palákhoz tartozó metamorf kőzetek hazánk legidősebb geológiai képződményei, ezért is nevezik őket „őskőzetek”-nek. Megjelenésük főként a hegység városközeli részein, az ún. Vári-si-tájrészletben jellemzők. A legtávolabbi Brennbergi-medence ezzel szemben alpi hordalékkal feltöltött süllyedékterület, mélyében azzal a kiváló minőségű barnaszénnel, melyet 1753-tól 1953-ig bányásztak.

Még régibb időkre nyúlik az erdőgazdálkodás. Levéltáraink már a XII-XIII. századból őriznek az erdőket óvó intézkedéseket és a rendszeres erdőgazdálkodás nyomait. Az első ismert „üzemterv” 1836-ból származik. Az erdőállományok mai arculatukat a múlt század utolsó harmadától kezdve nyerték el, ugyanis ekkor kezdődött ezen a közép-európai lombos erdős tájon az erőteljes fenyvesítés. Ma az erdőknek kb. 50-55%-a tűlevelű fenyves, melyek főként luc- (*Picea abies*) és jegenyefenyőből (*Abies alba*) állnak. Az örökzöldeket kívülük még az erdei- és feketefenyő (*Pinus sylvestris, P. nigra*), valamint a vörösfenyő (*Larix decidua*) képviselik, de a természetvédelem ügyel arra, hogy az eredeti, lombos fafajokból álló erdővegetáció és élővilág uk, az erdőkhöz tartozó rétekkel együtt fennmaradjanak.

A Tájvédelmi Körzet területének 85%-a erdő, 15%-a rét. A természetes állapotú erdők ebből 45-50%-ot tesznek ki. A várostól távolabb ma is a bükkösök (*Cyclamini-Fagetum*) a jellemzőek. A hozzájuk csatlakozó, nagykiterjedésű gyertyános kocsánytalan tölgyesekben (*Querco petraeae-Carpinetum*) nyílik egyik legszebb erdei virágunk, a ciklámen (*Cyclamen purpurascens*). A gesztenyés tölgyesek (*Castaneto Quercetum*) nyaranta a fekete áfonya (*Vaccinium myrtillus*) liláskék bogyóit érlelik. Ősszel a másik két acidofil erdőtársulásunkban, a

mészkerülő bükkösökben (*Galio rotundifolio-Fagetum*) és a savanyú gyertyános tölgyesekben (*Luzulo-Querco carpinetum*) a rekettyék és hölgymálok sárgáját a lila csarab (*Calluna vulgaris*) váltja fel, amelyet a Soproniak csak erikának neveznek.

A Soproni Tájvédelmi Körzet mégsem csak sajátos, csak az Alpokaljára jellemző tájképi értékeiért, hanem különleges flórája és faunája miatt érdemel védelmet, hiszen 67 védett és fokozottan védett növényfaj és több száz védett állatfaj található a területen. Közülük is kiemelkednek a Keleti-Alpokra jellemző montán és szubalpin elemek, amelyek miatt az egész tájat a kelet-alpesi flóra- és faunabirodalomhoz (*Noricum*) soroljuk. Ilyenek a fás szárú növényfajok közül a molyhos nyír (*Betula pubescens*) és a havasi vagy zöld éger (*Alnus viridis*), a bükkösökben a lombfakadás előtt nyíló illatos farkasboroszlán (*Daphne mezereum*) és a vörös vagy fürtös bodza (*Sambucus racemosa*). A Rák-patak és a Hidegvízvölgy rétjein a patakok mellett a hatalmas levelű fehér acsalapu (*Petasites albus*), a fehér zászpa (*Veratrum album*), az erdei zsurló (*Equisetum sylvaticum*) és a hatalmas struccharaszt (*Matteuccia struthiopteris*) jellemző. Az országban csak itt él a havasi palástfű (*Alchemilla glabra ssp. alpestris*). A Hidegvízvölgynek ritkuló növénye az alpin-kárpáti elterjedésű enyves aszat (*Cirsium erisithales*). Évekkel ezelőtt még megtalálható volt a mára már kipusztult árnika (*Arnica montana*), a narancsvörös aggófű (*Senecio aurantiacus*), a sziklai aggófű (*Senecio rupester*) és az osztrák borzamag (*Pleurospermum austriacurn*) is.

A montán-szubalpin hatást az állatvilág is tükrözi. A madarak közül fészkel a fekete gólya (*Ciconia nigra*), az uhu (*Bubo bubo*), a fekete harkály (*Dryocopus martius*), a búbos-, a fenyves- és a kormosfejű cinege (*Parus cristatus, P. ater, P. montanus*), a hegyi billegető *(Motacilla cinerea*), a süvöltő (*Pyrrhula pyrrhula*) és a keresztcsőrű (*Loxia curvirostra*), de előfordul a szirti sas (*Aquila chrysaëtos*), a siketfajd (*Tetrao urogallus*), a császármadár (*Tetrastes bonasia*), a törpekuvik (*Glaucidium passerium*), a holló (*Corvus corax*), a havasi szajkó (*Nucifraga caryocatactes*), a hajnalmadár (*Tichodroma muraria*) és a vízirigó (*Cinclus cinclus*) is. A kétéltűek közül említést érdemel a szalamandra (*Salamandra salamandra*) és a gyepi béka (*Rana temporaria*). A Rák-patakban és mellékágaiban sebes pisztráng (*Salmo trutta fario*) és kövi csík (*Noemacheilus barbatulus*) él.

A rovarvilág jellegzetes képviselői az alhavasi lepkefajok (*Anaplectoides prasina, Apetele aethiops, Gnophos dilucidaria*), a montán-alpesi araszoló (*Odezia atrata*), a Tacsi-árokban az alhavasi futrinka (*Carabus irregularis*) és a havasi cincér (*Rosalia alpina*). Különösen gazdag a tájvédelmi körzet patakjainak szitakötő-faunája, amelyből kiemelkedő természetvédelmi érték a hegyi szitakötő és a kétcsíkos szitakötő (*Cordulegaster bidentatus és C. heros*) előfordulása. A területen élő 68 csigafaj közül említést érdemel a pagodacsiga (*Pegodulina pagodula*). Még a giliszták (*Dendrobaene ganglbaueri*), a százlábúak (*Lithobius nigrifrons*) és az ugróvillások (*Deotonora benzi*) között is találunk nevezetes, fontos védett fajokat.

Napjainkban a kiterjedt szúkárok, a tölgyfavész, a szelídgesztenyét tönkretevő parazita gomba (*Endothia parasitica*) tizedelik a soproni erdőket, ezért a szokottnál is hangsúlyosabban kell óvni, védeni és kezelni a Soproni Tájvédelmi Körzet valamennyi élőhelyét, fenntartani biológiai sokféleségét [23. FHNPI].

A Sopron környéki erdők történetének nagyon széleskörű az irodalma. Zügn Nándor 1938-as írásában [78. Zügn (1938)] részletesen foglalkozik a város erdővagyonának kialakulásával. Csapody Istvánnak és Roth Gyulának is több írása jelent meg a témában [8. Csapody (), 9. Csapody (1975), 61. Roth (1924)]. Sopron város 1291–1389 közötti időszakban jutott a várostól DNY-ra fekvő erdőségekhez, amelyeket ma Soproni-hegység néven ismerünk. A várostól É-ra és K-re fekvő erdőterületekhez 1366–1547 között jutott a város. Ekkorra alakul ki a városhoz, valamint a hozzá tartozó 8 ún. úrbéri községhez tartozó mintegy 15 000 kat. hold erdő. Az úrbéri községek a következők: Ágfalva, Balf, Bánfalva, Fertőmeggyes, Harka, Kelénpatak, Kópháza, Lépesfalva [78. Zügn (1938)]. A város növekedő lakossága, a növekedő faigények és a legeltetés ahhoz vezettek, hogy a Sopron környéki erdők a XVIII. század végére siralmas állapotba jutottak. Ekkor már szükséges volt egyes erdőrészletek tiltása is, ekkor jöttek létre a szabaderdők (Freiwald, Loosmas, Looswald) és más, védett szálerdők [71. Tamás (1955)]. 1787-ben Sárközy András mérnök és jogász készítette el az első erdészeti térképet a területről. A térképen található egy leírás és egy kimutatás is [65. Sárközy (1787) és 24. Firbás (1957)], amelyet a *XII. táblázat* foglal össze.

XII. táblázat: **A Sárközy-féle leírás adatai**

No	Kor (év)	Terület (ha)	No	Kor (év)	Terület (ha)	No	Kor (év)	Terület (ha)	No	Kor (év)	Terület (ha)	No	Kor (év)	Terület (ha)
1	6, 8, 14, 24, 32	123,9	13	24	119,1	25	7, 23, 30	119,2	19	21	34,1	A	21	6,8
2	2, 6, 8	123,9	14	7, 19, 27	119,1	26	1, 2, 3, 4, 30	115,8	20	10, 11, 21	34,1	B	21	11,3
3	5, 6, 20	111,7	15	5, 6, 7, 9, 30	120,7	27	2, 3, 4, 6, 7, 9, 15	122,4	21	3, 10, 11, 21	34,1	C		16,0
4	4, 5	111,7	16	5, 6, 7, 9, 30	120,7	28	von 8 bis 22	116,7	22	7	35,2	D		9,3
5	3, 4, 5	111,2	17	14, 15, 16, 17	114,6	29	32	114,8	23	7	35,2	E		33,7
6	1, 2	111,2	18	14, 15, 16	114,6	30	32	114,8	24	7	35,2	Summa der ganzen Valdung		4643,0
7	1, 12	113,3	19	10, 12	114,9	Summa der 30 holzschläge		3500,3	25	0	34,1			
8	12, 20	114,6	20	7, 8, 9, 22	123,1	A	für das Dorf Loipersbach	132,7	26	20, 21, 27	34,1			
9	12, 16	113,5	21	1, 2, 7, 8, 9, 30	116,0	B	für das Dorf Agendorf	219,1	27	20	34,1			
10	19, 20	113,5	22	3, 4, 5, 7, 8, 9, 17, 25	117,9	C	für das Dorf Vandorf	168,6	28	11, 27	34,1			
11	14, 16	112,9	23	6, 12, 30	117,6	D	für das Dorf Harkau	150,7	29	7, 27	34,1			
12	14	112,9	24	26, 27	123,7				30	27	34,1			
									Summa der 12 holzschläge		412,6			

A leírásból kiderül, hogy ekkor az itt található legidősebb állomány 32 (!) éves volt. Ez szintén arra enged következtetni, hogy ezek az erdők jelentősen túlhasználtak voltak. 1837-ben Oderszky János erdőmestert kiküldték a soproni és kőszegi erdők felülvizsgálatára és rendbe hozására [71. Tamás (1955)]. Az ún. Oderszky-féle revízióban található állományleírások az erdőtörténeti kutatások értékes forrása. Ugyanakkor az erdők rendbe hozására általa tett javaslatokat nem fogadták meg, ehhez még pár évtizednek el kellett telnie. Az 1867-es kiegyezés után az erdész szakma általános fellendülésnek indult. A város 1869-ben kért fel két neves erdészt, Robert Micklitz és Fredrich Hollan személyében, hogy tegyenek javaslatot a városi erdők átalakítására [53. Micklitz – Hollan (1869) és 25. Frank (1999)]. A szakvéleménynek megfelelően az erdők átalakítása megkezdődött. 1870-ben jelent meg az első, még ideiglenes üzemterv, majd 1885-től – az 1879. évi XXXI. Törvénycikknek megfelelően – a rendes üzemterv. Az erdők ekkori átalakításában nagyon jelentős szerepe volt az 1874-től itt tevékenykedő Muck Endrének [52. Mayer (1975)]. Ő, az általa kezelésébe vett 1/3 tölgy, 1/3 gyertyán és 1/3 nyír sarjerdőkből alakította ki a XX. század soproni erdőinek ma is jellemző képét. Nagy hangsúlyt fektetett a luc- és vörösfenyő-ültetésekre, amelyeket ő még akkor átmeneti talajjavító, gyertyánt visszaszorító, előhasználati fafajként kezelt [61. Roth (1924)]. Az erdőfelújítások során alkalmazott 1 sor luc, 1 sor vörösfenyő és 1 sor tölgy rendszer nyomait néhol még ma is lehet látni. A trianoni diktátummal a 8 úrbéri község közül hármat – Fertőmeggyes

(Mörbisch), Kelénpatak (Klingenbach), Lépesfalva (Loipersbach) – az akkor létrejövő Burgenland-hoz csatoltak, valamint Sopron város saját erdeje is lecsökkent. A két világháború között a Sopron-környéki erdők képében jelentős változás nem volt. Muck Endre leköszönésével (1924), majd halálával (1925) azonban a fenyőállományok már megmaradtak véghasználati fafajként is. Ezeket az erdőket a soproni polgárság is megszokta, valamint az idegenforgalom tekintetében nagy vonzerőt tulajdonítottak nekik. Sajnos ebben az időszakban gyakran nem megfelelő termőhelyre is fenyőt, elsősorban lucot telepítettek. A II. Világháború után az itteni erdők életében az egyes szú-gradációk voltak jelentősek. Az első ilyen jelentősebb gradáció a negyvenes évek végén, ötvenes évek elején történt [30. Győrfi (1954)]. A második, a nyolcvanas évek vége felé megindult, jelentős szúkárosításoknak kiterjedt irodalma van [47. Lakatos (1997), 62. Roth (2003)]. Kutatásaimban – az itt említett erdészettörténeti adatok miatt is – nagy hangsúlyt fektettem az erdők monitoringjára, ezen belül is elsősorban a fenyő és lombos állományok elegyarányának változásaira.

3.2. A felhasznált adatok

A távérzékelés munkafolyamata során a nyers, digitális forrásképekből a digitális képfeldolgozás eszközeivel jutunk el az eredményig. A digitális képfeldolgozás nemcsak a szigorú értelemben vett távérzékelt felvételek, hanem egyéb digitális képi adatok feldolgozására is alkalmas. Az erdők esetében az űrfelvételek által lefedett időtartam – bár már jelentősnek mondható – a teljes életciklushoz viszonyítva nem számottevő. Éppen ezért vizsgálataim során még egyéb adatforrásokat is felhasználtam. Az egyéb adatok felhasználását egyrészt az idősor kiterjesztése, másrészt a vizsgálatok pontosítása, és ellenőrzésének a lehetősége indokolta. Ezek alapján a következő egyéb adatokat használtam fel:

- archív és aktuális felmérési és topográfiai térképek,
- archív és aktuális légifényképek.

Mindkét esetben a fent már említett lehetőségeken túl az is indokolta ezen adatok bevonását, hogy a digitális képfeldolgozás eszközkészletével vizsgáltam ezeket, csak ebben az esetben nem elsődleges, hanem másodlagos digitális képekről van szó.

A távérzékelési kiértékelés során a forrás digitális képi adatokon kívül számos egyéb, kiegészítő adatot is használunk. Ezek közül a legfontosabbak a különböző referencia-adatok, amelyek mind a digitális képek transzformációjához, mind a képfeldolgozás során elért eredmények ellenőrzéséhez is használunk. Ezen referenciaadatok közül a különböző digitális térképi adatokat ismertetem.

A távérzékelt felvételekre nagy hatása van az adott terület domborzatának. Ez egyrészt a képek geometriájára lehet nagy hatással, másrészt hatása van a sugárzás visszaverődésére is. Az elsőt az ortorektifikáció során, az utóbbit topográfiai normalizáció során korrigáljuk. Mindkét esetben a topográfiára vonatkozó információkat digitális domborzatmodellek segítségével tároljuk és használjuk fel. Éppen ezért a felhasznált adatok esetében még külön ki kell térni a digitális domborzatmodellekre is.

3.2.1. Az űrfelvételek

A Soproni-hegység mintaterület esetében vizsgálataim elsődleges célja az volt, hogy milyen erdészeti információkat lehet kinyerni az űrfelvétel-idősorokból, és ezekből milyen következtetéseket lehet levonni. Erről a mintaterületről a rendelkezésemre álló Landsat-űrfelvétel idősort, valamint egyéb űrfelvételeket a *XIII. táblázat* foglalja össze.

XIII. táblázat: **A Soproni-hegységről rendelkezésre álló, és részletesen feldolgozott (félkövér) űrfelvételek fontosabb adatai**

Dátum	Időpont	Műhold	Érzékelő	Solar Azimut	Solar Elevation
1981.07.02.		Landsat 4	MSS		
1983.06.01.		**Landsat 4**	**MSS**	**133,0**	**57,0**
1987.08.23.	**9:05:00**	**Landsat 5**	**TM**	**139,0**	**48,0**
1991.09.10.	**8:31:00**	**Landsat 5**	**TM**	**143,0**	**41,0**
1991.10.05.	8:31:00	Landsat 5	TM		
1992.08.28.	8:31:00	Landsat 4	TM	136,0	44,9
1995.08.11.	**9:43:10**	**Spot**	**P**	**147,4**	**54,4**
1998.07.20.	**9:17:48**	**Landsat 5**	**TM**	**133,9**	**56,6**
2000.08.02.		**Landsat 7**	**ETM+**	**141,7**	**55,3**
2000.08.18.		Landsat 7	ETM+		
2001.05.17.		Landsat 7	ETM+		
2001.05.24.		Landsat 7	ETM+	142,2	58,9
2002.04.02.	**9:58:20**	**Terra**	**ASTER**	**158,4**	**45,4**

A felhasznált idősor mintegy húsz esztendőt ölel át. Az hangsúlyt a Landsat műholdak által készített felvételekre helyeztem. A Spot műholdak pánkromatikus érzékelői által készített felvételeket széles körben alkalmazták a Landsat felvételek geometriai javítására, így ennek alkalmazását ez indokolta. Kutatásaim elején még nem tudtam, hogy a Landsat műholdak által készített felvételek 1972 óta tartó sorozata 2003-ban, az ETM+ érzékelő meghibásodása miatt (lásd a 2.3.9.1 A NASA műholdrendszer című fejezetet a 36. oldalon) megszakad, illetve jelenleg nem biztosított az adatok jövőbeni folyamatossága. Ez indokolta az újabb technológiákat alkalmazó, de hasonló felbontású ASTER felvétel alkalmazását.

3.2.2. Archív térképek

A munkám során felhasznált térképek adatait a *XIV. táblázat* tartalmazza.

XIV. táblázat: **A felhasznált térképek adatai**

Megnevezés	Dátum	Méretarány	Felbontás		
			szkennelés		terepi
			dpi	mikron	m
I. katonai felmérés	1784	1 : 28 800	300	84,7	2,438
Sárközy térképe	1787	1 : 7 200	300	84,7	0,610
II. katonai felmérés	1845	1 : 28 800	300	127,0	2,438
III. katonai felmérés	1880	1 : 25 000	300	84,7	2,117
III. felmérés reambulált kiadása	1921	1 : 25 000	300	84,7	2,117
Gauss-Krüger topográfiai térkép	1961	1 : 10 000	300	84,7	0,847
EOTR topográfiai térkép	2001	1 : 10 000	300	84,7	0,847

Mivel a katonai felmérések térképei mind a magyar térinformatikában, mind az értekezés szempontjából fontos szerepet töltenek be, ezért ezeket egy kicsit részletesebben ismertetem.

Az Osztrák-Magyar Monarchia területén három, többé-kevésbé egységesnek tekinthető ún. katonai felmérés valósult meg.

A hétéves háború befejeztével (1763) Mária Terézia elrendeli a Habsburg Birodalom összes országának felmérését. Ez az ún. I. katonai felmérés (Josephinische Aufnahme), amelynek a felmérési méretaránya 1 : 28 800 volt. Ez az *1 hüvelyk : 400 öl* méretaránynak felel meg. A felmérést grafikus háromszögeléssel, mérőasztallal végezték, vetület nélküli rendszerben. A domborzat ábrázolása szemmérték alapján (*a la vue*) történt, magasságmérések nélkül. A Magyar Királyság esetében a felmérés 1782–1785-ig tartott, a szelvényezésnél az oszlopokat és sorokat római számmal jelölték (pl. Coll: III. Sectio IV., lásd: *46. ábra*, 92. o.).

A napóleoni háborúk rámutattak egy új felmérés szükségességére, ezért 1808-ban II. Ferenc császár elrendelte a II. katonai felmérést (Franzischkaner Landesaufnahme). A felmérési méretarány itt is 1 : 28 800 volt, azonban geodéziai szempontból ez a felmérés már egységes háromszögelési hálózatra épült, amelynek a fő-alappontja a bécsi Stephansturm volt. A felmérési térképszelvények a Cassini-féle transzverzális hengervetületben voltak, szelvényméretük 24·36 hüvelyk. A domborzat ábrázolására kezdetben a lendületcsíkozást, de később – 1827 után – a Lehmann-féle geometriai csíkozást alkalmazták.

A II. katonai felmérés már befejezése idején elavult volt, egyrészt amiatt, hogy többszöri megszakítással 63 évig tartott, másrészt közben a geodézia sokat fejlődött. 1869-ben Ferenc József császár kiadta az utasítást a III. katonai felmérés megszervezésére. A felmérési méretarány 1 : 25 000 volt. Ebben az esetben a felmérés vetülete a Bessel-ellipszoid alapú ún. polieder vetület, amelynél minden térképszelvény az alapfelülethez simuló sík.

A fejezet a következő művek alapján készült: [32. Hofstätter (1989), 35. Jankó (2000)]

3.2.3. Légifényképek

Az űrfelvételek kiegészítéseként felhasznált légifényképek adatait a *XV. táblázat* tartalmazza.

XV. táblázat: **A felhasznált légifényképek adatai**

Dátum	Időpont	Filmtípus	Kameratípus	Méretarány	Szkennelés típusa	Felbontás	
						szkennelés	terepi
						mikron	m
1962.10.01.	12:20	ff	WILD RC-5	1 : 15 000	asztali	21	0,32
1991.09.29.	11:00	infra	WILD RC-20	1 : 31 000	asztali	42	1,30
1999.08.02.		infra	WILD RC-20	1 : 30 000	profi	21	0,63

A táblázatból jól látható, hogy munkámban archív és aktuális légifényképeket egyaránt felhasználtam. A régebbi felvételeket, amelyek a Földmérési és Távérzékelési Tanszéken megtalálhatók, egyszerű asztali síkágyas szkenner segítségével alakítottam digitális formába.

Az 1962. évi légifénykép-sorozat az egyik első, hazai erdészeti légifénykép-sorozat [72. Teszárs (1960)]. Még 18·18 cm-es filmre, Wild RC-5-ös kamerával, ~ 1 : 15 000-es méretarányban készült.

Az 1991-es infraszínes sorozat az ún. „Duna-magas II.” repülésből származik. Egy fotográfiailag jó minőségű infrasorozat, amely nagyban hozzájárult ahhoz, hogy ezt a fajta filmtípust és méretarányt a későbbiekben szélesebb körben alkalmazzák.

Az 1999-es légifénykép-sorozatot az Eurosense Kft. készítette. Az Nyugat-Magyarországi Egyetem Földmérési és Távérzékelési Tanszékén megvalósult PHARE CBC Projekt keretében Győr-Moson-Sopron megye védett területeit repülték le. Ebből a légifénykép-anyagból akkor csak a nemzeti parki területet lefedő képeket dolgozták fel [41. Király (2000) és 49. Márkus et al (2000)]. Munkám során az akkor nem érintett területekről készült légifényképeket szkenneltettem be professzionális fotogrammetriai szkenneren.

3.2.4. Referencia-adatok

Referencia-adatként felhasználtam az 1:10 000-es méretarányú Gauss-Krüger valamint EOV topográfiai térképeket (lásd *XIV. táblázat* utolsó két sora), a digitális erdészeti üzemi térképet, valamint az osztrák területek esetében az 1:50 000-es méretarányú Gauss-Krüger Digitális Topográfiai Alaptérképet (DTA-50).

3.2.5. Domborzatmodellek

Az általam felhasznált domborzatmodellek adatait tartalmazza a következő táblázat (*XVI. táblázat*).

XVI. táblázat: **A vizsgálatba bevont domborzatmodellek**

Név	Rácsméret	Forrás		Magassági felbontás	Elérhetőség
DDM100	100·100 m	EOTR	1 : 100 000	1 m	FÖMI
DDM10	10·10 m	GK	1 : 50 000	1 m	MH-TÉHI
DDM5	5·5 m	EOTR	1 : 10 000	valós m	FÖMI
SRTM	60·90 m	RADAR		1 m	NASA
DTA50		GK	1 : 50 000		MH-TÉHI
EOV10		EOTR	1 : 10 000		FÖMI

Egy korábbi vizsgálat során [43. Király (2004)] kimutattam, hogy az egyes domborzatmodellek különböző feladatokra alkalmasak. Kisebb léptékű, kvázi-globális, kontinentális és multinacionális vizsgálatokhoz az ingyenes SRTM modell a legmegfelelőbb. Magyarországi viszonylatban a DDM-100 országos szinten jól alkalmazható, regionális feladatokhoz pedig a DDM-10 modell a legmegfelelőbb. Kivételt képeznek a hidrológiai modellezési feladatok, ahol a modell egészszám-ábrázolása gondokat okoz. Bár a mintaterületre rendelkezésemre állt az 1 : 10 000-es EOTR topográfiai térképekből előállított domborzatmodell is, az említett tanulmány alapján kijelenthető, hogy a jelen célnak megfelelően a számos forrásadat közül a DDM-10 jelenti a legjobb kompromisszumos megoldást.

3.3. Alkalmazott eljárások

A következőkben ismertetem az egyes forrásadatok esetében alkalmazott feldolgozási eljárásokat.

A Soproni-hegység esetében az egyes idősorokat több szinten is megvizsgáltam. Ezek a szintek a következők:

- erdőborítás,
- erdőtípus,
- erdő- és korosztálytípus,
- erdőrészlet szintű vizsgálatok.

Az erdőborítás vizsgálatakor az idősor egyes digitális képeit olyan szempontból elemeztem és dolgoztam fel, hogy az adott időpontban a mintaterület mely részén volt erdő, és mely területeken nem. Leegyszerűsítve a dolgot, ezekben a vizsgálatokban egy egyszerű bináris, erdő – nem erdő osztályozásról van szó.

Az erdőtípusok vizsgálatakor a fentieken túl azt is vizsgáltam, hogy az erdő esetében lombos vagy fenyőállományokról van e szó. Tehát itt, az erdő kategórián belül alkalmaztam a bináris osztályozást, amely a fő fafajnemre vonatkozott.

Az erdész szakma információigényét a fenti kategóriák csak legfeljebb országos, vagy nagyobb régiók szintjén, statisztikai szempontból elégítik ki. Ezért a 3. értelmezési szinten próbáltam minél több erdőtípust elkülöníteni, valamint az egyes típusokon belül több korosztályt. A korosztályok elkülönítésének az idősorok elemzésénél van nagy jelentősége.

Az erdőrészlet szintű vizsgálatok esetében fordított megközelítéssel dolgoztam. Nem azt vizsgáltam, hogy az űrfelvétel adott területén, pixelén milyen állomány található, hanem azt vizsgáltam, hogy egy adott erdőrészletben és időpontban az űrfelvétel milyen képstatisztikai értékekkel jellemezhető, és ezekből milyen következtetéseket lehet levonni.

3.3.1. Landsat-idősor

A rendelkezésre álló űrfelvételekhez (*XIII. táblázat*) különböző feldolgozási szinteken jutottam hozzá. Volt, amelyik nyers, még teljesen feldolgozatlan felvétel volt, bár az ún. rendszerkorrekciókon már átesett, és voltak olyanok is, amelyeket már vetületi rendszerbe is illesztettek, igaz ugyan, hogy némelyiket UTM vetületbe, míg másokat EOV-ba. Az űrfelvételek általános feldolgozási menetétől éppen ezért gyakran eltértem.

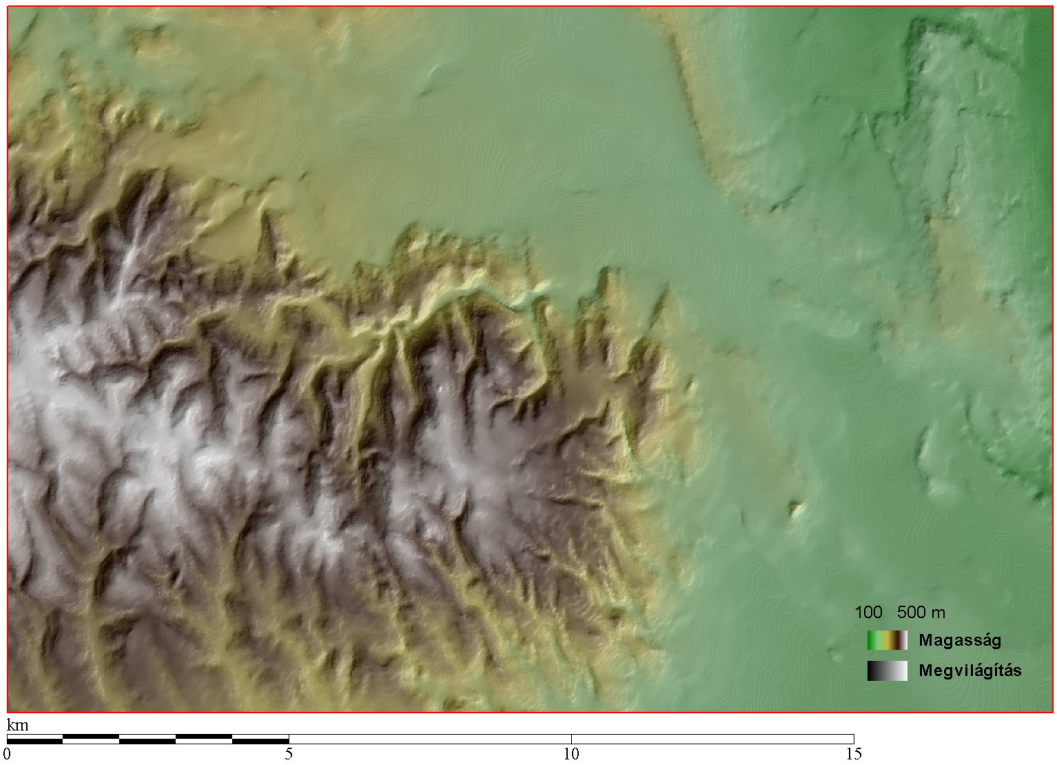
3.3.1.1. Vetületbe illesztés

Az űrfelvételek esetében a vetületbe illesztést (lásd: 2.5.1. Az előfeldolgozás, 52. o.) illesztőpontok segítségével végeztem. Az illesztőpontokat – az illesztendő űrfelvétel gondos tanulmányozása után – az 1 : 10 000-es EOV topográfiai térképekről, valamint – amennyiben ez nem bizonyult elegendőnek, akkor – az 1 : 10 000-es erdőgazdasági üzemi térképekről mértem le. Azoknál az űrfelvételeknél, ahol az eredeti forrásképek (ún. RAW adatok) is a rendelkezésemre álltak, ott a vetületbe illesztést a perspektív leképezésnek megfelelően, ortorektifi-

kációval végeztem el. Azokban az esetekben viszont, ahol a felvételt már valamilyen vetületi rendszerbe illesztve (EOV, vagy UTM) kaptam meg, vagy a teljes felvétel helyett csak egy kisebb kivágattal dolgoztam, – ami nem tette lehetővé a perspektív vetítés helyreállítását –, ott magasabb fokú (általában ötödfokú) polinom segítségével illesztettem a felvételeket EOV-be. Gyakran szükség volt az EOV→EOV illesztésre is a pontosabb georeferencia miatt.

3.3.1.2. Topográfiai normalizáció

A kiválasztott mintaterület, a Soproni-hegység – magyarországi viszonyok között – jelentős domborzattal jellemezhető (*34. ábra*). Bár a területen a szintkülönbségek nem annyira nagyok, ugyanakkor egyes területeken viszonylag meredek oldalak is találhatók, ami jelentős megvilágításbeli különbségeket eredményez a felvételeken (*XVII. táblázat*).



34. ábra: **A Soproni-hegység domborzata**

XVII. táblázat: **A mintaterület domborzatának statisztikai jellemzése**

	Minimum	Maximum	Átlag	Szórás
Magasság	113	557,00	299,40	105,00
Lejtfok	0	54,46	5,79	5,44
Kitettség	-1	358,70	115,05	100,15

A statisztikai jellemzés esetében – különösen a kitettségnél – a kategorizálás, és a kategóriák grafikus ábrázolása sokkal többet mond, ezeket a *2. melléklet*ben találhatjuk.

Az űrfelvételek feldolgozása során nagyon fontos emiatt a topográfiai normalizáció elvégzése. Míg a légifényképek feldolgozása során a domborzatnak a felvételre gyakorolt geometriai hatását nem lehet figyelmen kívül hagyni – ezért ezek a felvételek ortokorrigálásra szorulnak –, addig az űrfelvételek teljesen más arányú geometriájából adódóan a viszonylag kis szintkülönbségek miatt jóval kisebb a domborzat geometriára gyakorolt hatása. A nagyobb pontosság érdekében azonban – ott, ahol a forrásfelvételek ezt lehetővé tették – az űrfelvételek esetében is elvégeztem az ortokorrekciót. Ugyanakkor nagyon fontos mind az űrfelvételek, mind a légifényképek esetében a domborzatnak a felvétel radiometriai tulajdonságaira tett hatásának korrigálása, a radiometriai topográfiai normalizáció (lásd: 2.5.1. Az előfeldolgozás, 52. o.). Az űrfelvételeken a topográfiai normalizációt a Minnaert-módszerrel végeztem el [67. Smith et al (1980)]. Ezt a módszert úgy alkalmaztam, hogy a Minnaert-konstans értékét minden egyes sávra külön határoztam meg.

3.3.1.3. A képosztályozás

Az űrfelvételek idősorainak elemzéséhez olyan osztályozókat célszerű alkalmazni, amelyek viszonylag gyorsan és egyszerűen működnek, és az egyes scenáriók osztályozási eredményei jól összehasonlíthatók egymással. Éppen ezért a Landsat-idősorok feldolgozásához az első két értelmezési szinten több új osztályozót is kidolgoztam, amelyeket a következőkben ismertetek.

3.3.1.3.1. Vegetációs Index (VI) alapú osztályozó

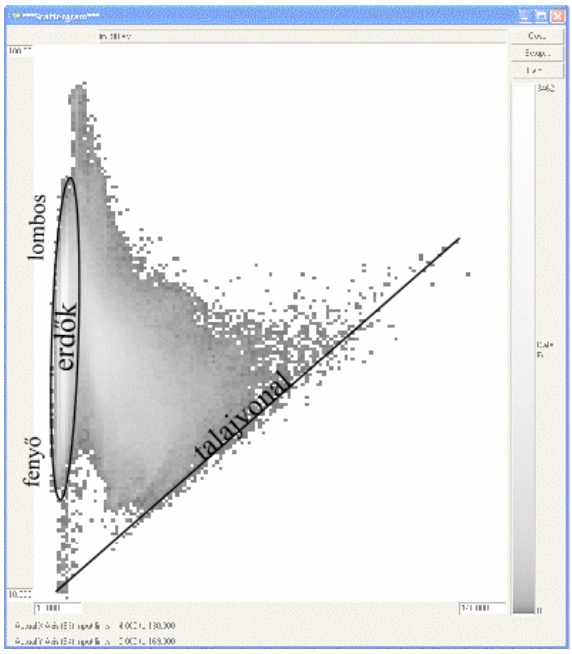
A vegetációs indexek alkalmazása a távérzékelésben és a vegetáció vizsgálatában széles körben elterjedtek (lásd 2.4. A távérzékelés és a vegetáció című fejezetet). Korábbi tapasztalataim is azt mutatták, hogy a vegetációs indexek spektrális síkján bizonyos földhasználati kategóriák jól elkülöníthetőek [42. Király (2001), 50. Márkus et al (2000)]. Éppen ezért vizsgálataimban a látható vörös és a közeli infravörös sáv által meghatározott spektrális síkból indultam ki. Mivel a Landsat-idősorban 3 különböző érzékelő által készített felvételek voltak, ezért az alábbi táblázatban összefoglalom az egyes érzékelők esetében felhasznált sávokat (*XVIII. táblázat*).

XVIII. táblázat: **A Landsat-érzékelők látható vörös (R) és közeli infravörös (NIR) sávkiosztása**

Műhold	Érzékelő	Vörös (R) sáv			Infravörös sáv (NIR)		
		sáv	min. (nm)	max. (nm)	sáv	min. (nm)	max. (nm)
Landsat 1-3	MSS	B5	600	700	B7	800	1100
Landsat 4-5	MSS	B2	600	700	B4	800	1100
Landsat 4-5	TM	B3	630	690	B4	760	900
Landsat 7	ETM+	B3	630	690	B4	775	900
Terra	ASTER	B2	630	690	B3N	760	860

A MSS érzékelők esetében a 700-800 nm-ig terjedő B6 illetve B3 sávot is szokták alkalmazni, de 700 nm-nél még van egy kis átmeneti zóna az élben (lásd: *17. ábra:* A Landsat-érzékelők sávkiosztása és geometriai felbontása egy lombos erdő spektrális reflektanciagörbéjével, 37. o.), amely miatt az elkülönülés nem tökéletes.

Tehát adott a látható vörös (R) és a közeli infravörös (NIR) sáv által meghatározott derékszögű koordinátarendszer. Ha ebben a rendszerben ábrázoljuk a felvétel egyes – adott R és NIR értékkel rendelkező – pixeleinek gyakoriságát, akkor kapjuk az ún. szóródási diagramot (*scattergram*). Ebben a rendszerben a vegetációval nem rendelkező, különböző fényességű pixelek határozzák meg az ún. talajvonalat. A talajvonal felett helyezkednek el a vegetációval fedett pixelek. Ezek közül is az erdővel borított pixelek a talajvonaltól jelentősen meredekebben helyezkednek el (*35. ábra*).



35. ábra: **A VI alapú Landsat-osztályozó**

Az osztályozó esetében nem a talajvonaltól való távolságot, hanem a meredekséget számítottam (lásd: 2.4. A távérzékelés és a vegetáció, 47. o.). Az egyenes alapegyenlete:

$$y = m \cdot x + b \qquad [19.\ \text{egy.}]$$

legyen továbbá:

R	reflektancia a vörös sávban, *x* tengely
NIR	reflektancia az infravörös sávban; *y* tengely
n	a meredekség reciproka

$$y = \frac{x - x_0}{n} \qquad [20.\ \text{egy.}]$$

Ebből a meredekség kifejezése:

$$n = \frac{R - R_{\min}}{NIR} \qquad [21.\ \text{egy.}]$$

Mindezek alapján egy adott meredekségnél nagyobb értékű pixelek az erdőterületekhez tartoznak. A kutatásaim szempontjából nagyon fontos volt még, hogy észrevettem, hogy ezen a meredekebb vonalon a fenyő és lombos állományok jól elkülönülnek, méghozzá a következő képlettel kifejezhető módon:

$$NIR > \frac{NIR_{max}}{2} \qquad [22.\ egy.]$$

Mindezek alapján a két képletet összevonva, és egy képfeldolgozási algoritmusként felírva a következőt kapjuk:

```
if ((R - rmin(,r1,R)) / (NIR )<0,1) then
  (if (NIR>(rmax(,r1,NIR)/2)) then „lomb” else „fenyő”)
else „nem erdő”
```

[23. egy.]

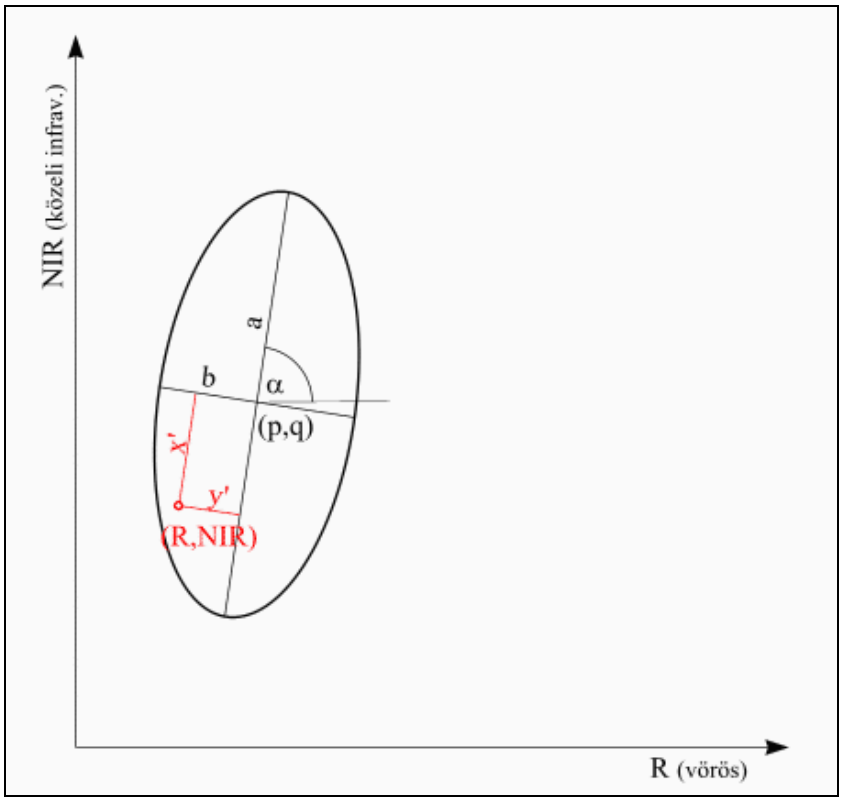
ahol:	R	reflektancia a vörös sávban
	NIR	reflektancia az infravörös sávban
	rmin(,r1,R)	adott sáv minimuma
	rmax(,r1,NIR)	adott sáv maximuma

Több felvétel szóródási diagrammját tanulmányozva kialakítottam egy ún. ellipszis-osztályozót is, amelyet a következő fejezetben ismertetek.

3.3.1.3.2. Az ellipszis-osztályozó

Az ellipszis-osztályozó akkor sorolja az egyes pixeleket a megfelelő osztályba, ha az adott spektrális síkon a megfelelő paraméterekkel meghatározott ellipszisen belül helyezkedik el. Ebben az esetben azonban több kezdeti paramétert kell meghatározni, így csak akkor alkalmaztam, ha az egyszerűbb algoritmus nem adott megfelelő eredményt (lásd: 3.3.3. Az ASTER-felvétel című fejezet; *45. ábra*, 91. o.).

Az ellipszis-osztályozó elvi vázlatát, valamint az egyes jelöléseket a *36. ábra* mutatja be.



36. ábra: **Az ellipszis-osztályozó elvi vázlata**

Legyenek adva az ellipszis fél tengelyei (a, b). Ekkor az ellipszis alapegyenlete a következő:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 1 = 0 \qquad \text{[24. egy.]}$$

Amennyiben az ellipszist eltoljuk a (p, q) pontba, akkor a következő kifejezéshez jutunk:

$$\frac{(x-p)^2}{a^2} + \frac{(y-q)^2}{b^2} - 1 = 0 \qquad \text{[25. egy.]}$$

Forgassuk el az ellipszist α szöggel, ekkor az x' és y'-ra a következő egyenleteket írhatjuk fel:

$$\begin{cases} x' = X \cdot \cos\alpha + Y \cdot \sin\alpha \\ y' = -X \cdot \sin\alpha + Y \cdot \cos\alpha \end{cases} \qquad \text{[26. egy.]}$$

Elforgatás és eltolás után az egyenlet a következő formát ölti:

$$\frac{(\cos\alpha \cdot (x-p) + \sin\alpha \cdot (y-q))^2}{a^2} + \frac{(-\sin\alpha \cdot (x-p) + \cos\alpha \cdot (y-q))^2}{b^2} - 1 = 0 \qquad \text{[27. egy.]}$$

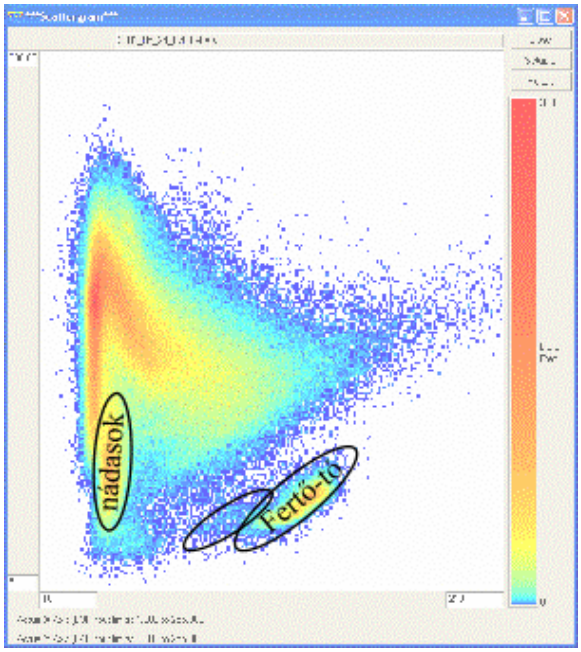
Tehát egy adott (R, NIR) reflektanciákkal meghatározott pixel akkor kerül az osztályba, ha az ellipszisen belül van, azaz a következő feltétel teljesül:

$$\frac{(\cos\alpha \cdot (R-p) + \sin\alpha \cdot (NIR-q))^2}{a^2} + \frac{(-\sin\alpha \cdot (R-p) + \cos\alpha \cdot (NIR-q))^2}{b^2} < 1 \qquad \text{[28. egy.]}$$

A különböző típusú érzékelők, valamint a különböző időpontok az osztályozó paraméterezését megnehezítették, de végül sikerült az osztályozót úgy kifejlesztenem, hogy bármely területről, rövid előkészítés után alkalmazható legyen.

Az ellipszis-osztályozó egyes paraméterei különböző elvi tartalommal bírnak. Míg a középpontnak (p,q) és elsősorban a fél kistengelynek (b) a talajvonaltól való távolságra, és ennek toleranciájára, addig az ellipszis szögének (α) az erdőknek a talajvonallal bezárt szögére van hatása.

Az osztályozó kialakításakor a mintaterületnél nagyobb űrfelvétel-kivágat szóródási diagramját vizsgálva még egy fontos elkülönülésre lettem figyelmes. Ezeken a felvételeken mind a Fertő-tó nyílt vizei, mind a nádas régió jelentősen elkülönül (*37. ábra*). Ez alkalmassá teszi az általam kialakított osztályozót, hogy a segítségével ezeket a területeket is elkülönítsük. A Fertő-tóval kapcsolatos kutatásokban ennek nagy jelentősége van [50. Márkus et al (2000)].



37. ábra: **A mintaterület és környékét lefedő Landsat TM űrfelvétel szóródási diagramja a vörös és a közeli infravörös sávban**

3.3.1.3.3. A felügyelt osztályozás

A 3. értelmezési szinten olyan felügyelt osztályozást alkalmaztam, amely eddigi kutatásaimnak megfelelően [39. Király (1997), 40. Király (1998)] a tapasztalati eloszlást alkalmazó legnagyobb valószínűségi osztályozóval dolgozik (lásd: 2.5.3. A képosztályozás című fejezet, 59. oldal, valamint *32. ábra*, 60. oldal). A tanítóterületek kiválasztásánál próbáltam arra törekedni, hogy a fontosabb faállomány-típusokból legalább három korosztályt el tudjak különíteni. A korosztályoknak – még ilyen durva elkülönítés esetében is – a multitemporális távérzékelésben nagyon nagy a jelentősége.

Az osztályozások eredményeit ezek után úgy elemeztem az adott felvétel esetében, hogy az előző felvétel osztályozásának eredményéül létrejött legidősebb korosztályok megváltoztak-e vagy sem.

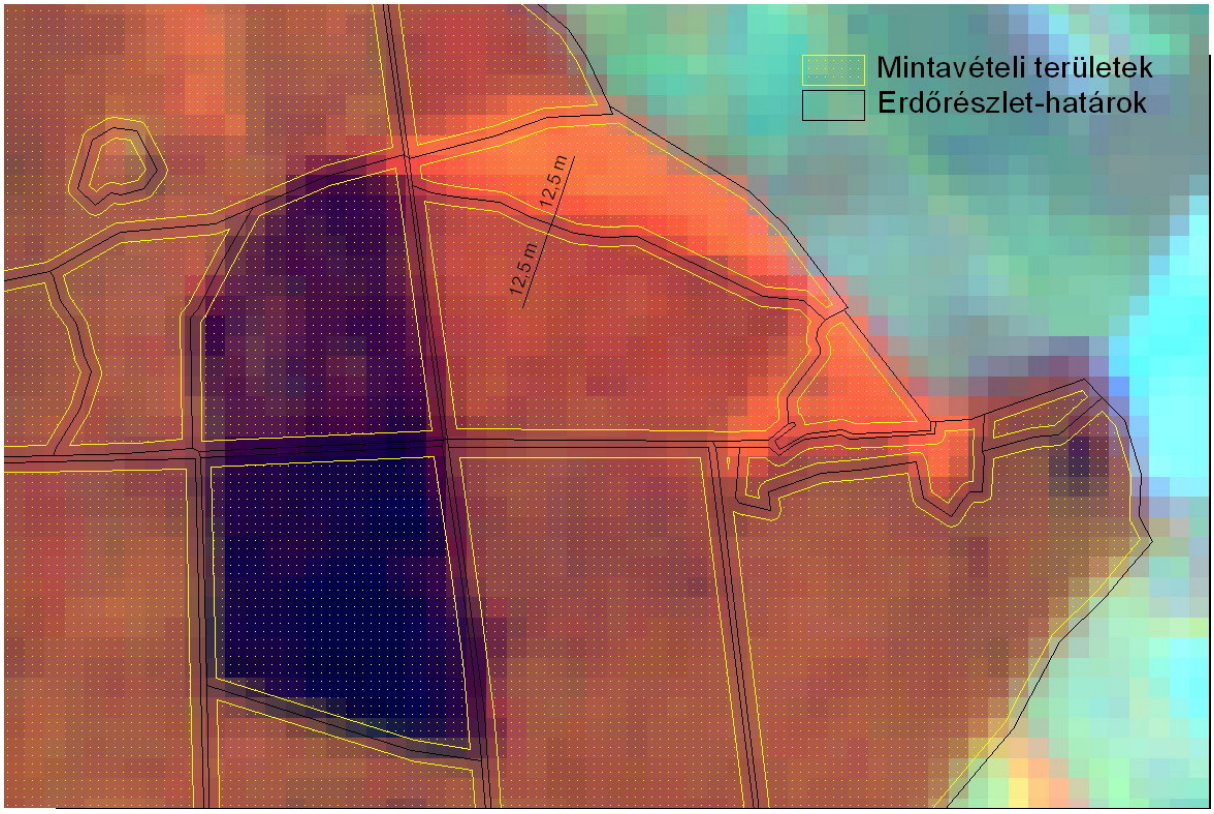
Az osztályozás tanításához a mintaterületeket több lépésben választottam ki. Elsőként a felvételt alaposan áttanulmányoztam, majd ez alapján kijelöltem a lehetséges területeket. A kiválasztott állományrészeket utána megvizsgáltam az éppen aktuális üzemtervi térkép és adatok ismeretében is. Amennyiben nem tapasztaltam jelentős ellentmondást az űrfelvétel és az üzemterv között, akkor az adott területet kijelöltem. Miután megvolt az összes kijelölés, akkor a területek egy részét tanító-, a többi részét teszterületnek jelöltem ki. A 50 pixelnél kisebb területek nem lehettek tanítóterületek, ezen kívül a szétválasztás véletlen módszerrel történt.

A területek többsége több űrfelvételhez is felhasználható volt tanító- vagy teszterületként. Az időben első, 1981-es Landsat MSS felvétellel kezdtem, és haladtam lépésről lépésre előre az időben. Amennyiben egy adott terület a következő felvételen nem volt használható, akkor megpróbáltam helyette egy hasonló paraméterekkel rendelkező másik területet kijelölni.

3.3.1.3.4. A spektrális adatbank alapú osztályozó

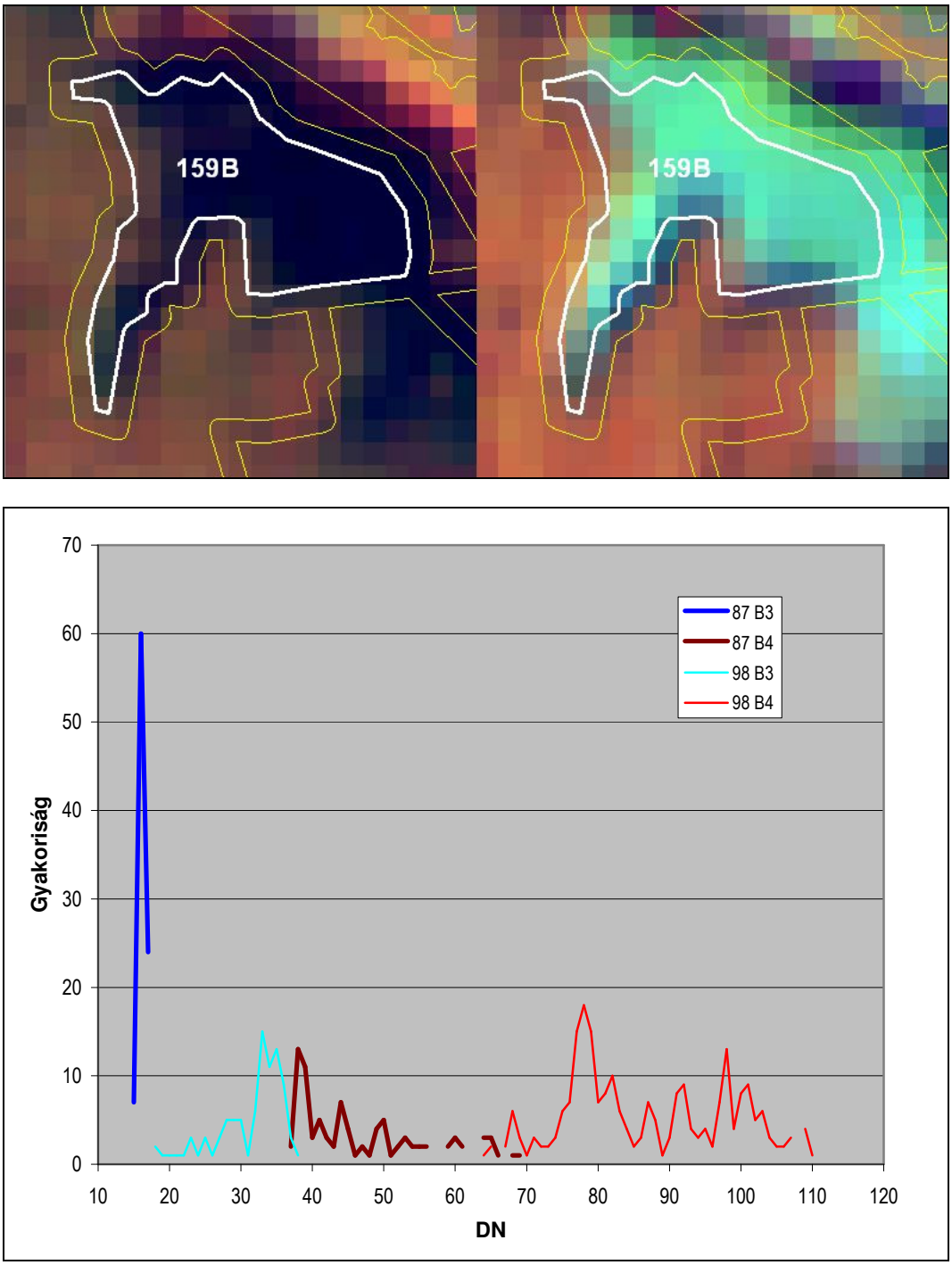
A 4. értelmezési szinten a rendelkezésemre álló digitális üzemi térkép minden egyes adatokkal rendelkező területegységét (erdőrészlet vagy alrészlet) felhasználtam. Korábbi vizsgálataim során kimutattam, hogy az erdőrészlet szintű mintaterületek esetében a tanítóterületek befelé pufferelése (*38. ábra*) jelentősen megnöveli az osztályozási pontosságot egyrészt az erdőszegély menti határpixelek kiszűrésével, másrészt a forrásűrfelvételek geometriai eltérései miatt [40. Király (1998)].

A pufferelés távolságának a megválasztása egy kompromisszum a kevert pixelek kiejtése, és a mintavételi terület nem túlzott mértékű lecsökkentése között. A 0,5 pixellel történő csökkentés egy ilyen megfelelő kompromisszum volt, ugyanakkor elméletileg is alátámasztható, mivel ezáltal azokat a pixeleket, amelyeknek a középpontja az adott erdőrészleten kívül esik, már nem vesszük figyelembe.



38. ábra: **A mintavételi területek befelé pufferelése**

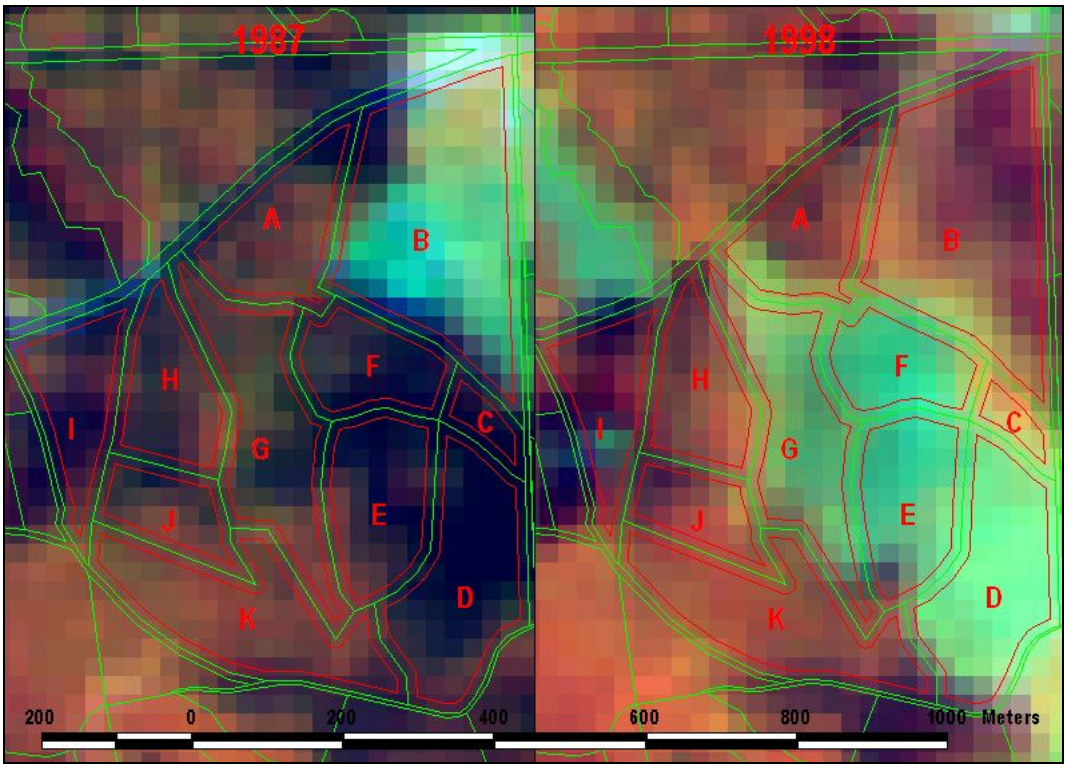
Az erdőrészletekre vonatkoztatott, űrfelvétel alapú változásvizsgálatok lehetővé teszik, hogy az osztályozáson túl egy olyan adatbázist hozzunk létre, amely alkalmas az erdőrészletekhez térbelileg kapcsolt pixelek statisztikai elemzésére. Ezáltal minden egyes erdőrészletre egy olyan adatbázist kapunk, amelynek segítségével nyomon kísérhetjük az adott erdőrészlet fejlődését a spektrális térben. Ezen adatbázis segítségével lehetőség nyílik nemcsak a véghasználatok, hanem az egyéb változások detektálására is (*39. ábra*).



39. ábra: **Egy kiválasztott erdőrészlet spektrális változásai**

A másik – erdészeti szempontból fontos – lehetőség az egyes erdőrészlet-megosztások és -összevonások lehetőségére történő figyelmeztetés. Amennyiben ugyanis egy adott erdőrészlet egyik része spektrálisan az előre meghatározott tartományban fejlődik tovább, a másik része pedig drasztikus változást mutat, akkor ezek alapján a rendszer javaslatot tehet az erdőrészlet megosztására. A módszer tovább finomítható azáltal, hogy ha az eltérések a monitoring egy bizonyos ciklusa alatt (pl. 5 év) kiegyenlítődnek, vagy az egyes részek területe nem ér el egy adott határértéket, akkor a megosztás nem szükségszerű. A másik oldalon, amennyiben két szomszédos erdőrészlet spektrálisan nagyon hasonló egymáshoz, akkor javasolható az össze-

vonásuk. Bár a befelé pufferelt mintavételi területek (*38. ábra*) már nem topológikusak, a szomszédsági viszonyokat az üzemi térkép alapján lekérdezhetjük. Az összevonásokra nyilván csak apró részletek esetében van lehetőség. Az ilyen, spektrális tulajdonságok alapján történő erdőrészlet-változásokat mutatja be a *40. ábra* és a *XIX. táblázat*.



40. ábra: **Spektrális erdőrészlet-változások a Sopron 129 tag esetében**

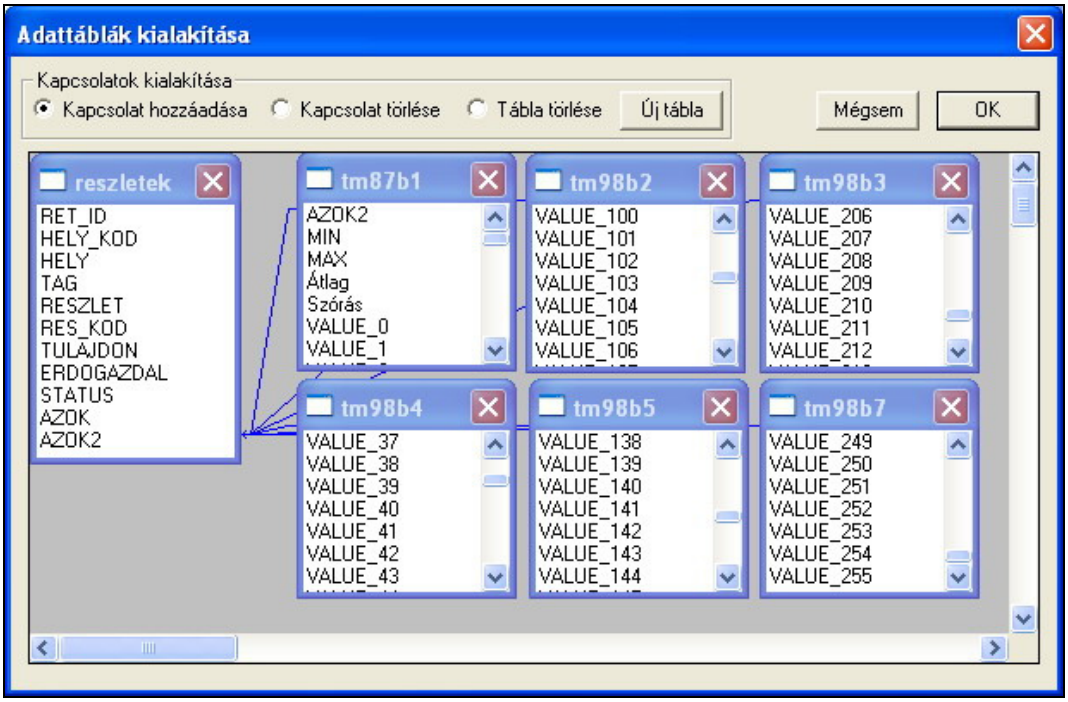
XIX. táblázat: **Spektrális erdőrészlet-változások statisztikái a Landsat TM felvétel 3. sávjában**

	1987				1998			
Erdőrészlet	**MIN**	**MAX**	**ATLAG**	**SZORAS**	**MIN**	**MAX**	**ATLAG**	**SZORAS**
Sopron 129A	17	20	17,919	0,632	15	21	17,270	1,482
Sopron 129B	17	39	**28,346**	4,676	17	24	18,654	1,231
Sopron 129C	16	17	16,833	0,373	21	26	**23,333**	1,886
Sopron 129D	17	18	17,393	0,488	25	33	**29,679**	2,229
Sopron 129E	17	18	17,675	0,468	19	32	**27,775**	2,465
Sopron 129F	17	19	17,893	0,557	23	31	**27,107**	1,970
Sopron 129G	16	19	17,500	0,574	17	26	**22,220**	1,814
Sopron 129H	17	19	17,938	0,348	16	19	16,906	0,723
Sopron 129I	18	20	18,448	0,562	14	22	16,793	1,627
Sopron 129J	17	18	17,750	0,433	17	18	17,250	0,433
Sopron 129K	17	19	17,926	0,325	16	20	16,778	0,875

A Sopron 129B erdőrészlet az előző ciklushoz viszonyítva jelentősen megváltozott. A 129C erdőrészlet esetében a változás nem olyan jelentős. Ilyen esetben amennyiben a szórás nagy, akkor az állomány részleges megbontásáról lehet szó, amennyiben a szórás kicsi, akkor már korábbi véghasználatot követően fiatalos található az adott területen (ilyen eset szerepel az áb-

rán is). A 129D, E, F, G részletek esetében véghasználat volt. Ezek közül a 129 E és F részletek összevonása javasolható.

Az általam alkalmazott spektrális adatbank-osztályozó az adott erdőrészlet területére eső pixelek eloszlását vizsgálja. Az egyes eloszlásokat az adott (al)részletre, felvételi időpontra és felvételi sávra vonatkozó adattáblában tároltam. Ezen túl az adott részletre vonatkozó alapstatisztikákat is kiszámoltam (lásd *XIX. táblázat:* Spektrális erdőrészlet-változások statisztikái a Landsat TM felvétel 3. sávjában). Ezeket az adattáblákat egy relációs adatbázis kialakításával kapcsolhatjuk az egyes területi egységekhez (erdőrészlet vagy alrészlet). A relációs adatbázist egy űrfelvétel hat sávjának a kapcsolásával mutatja be a *41. ábra*.



41. ábra: **Az erdőrészlet szintű képstatisztikák adatbázisa**

Bármelyik időpontból, bármely űrfelvétel bármelyik sávját az azonosító alapján hozzákapcsolhatjuk az adott erdőrészlethez, így megjeleníthetjük az adott űrfelvétel adott erdőrészletre vonatkozó hisztogrammját. Az osztályozás során ezeket az eloszlásokat vizsgáltam. Ehhez azonban szükséges volt, hogy az eloszlási diagrammokból valószínűségeket számítsak, amelyet a következő képlet segítségével oldottam meg:

$$P_i = \frac{n(DN_i)}{\sum_{j=0}^{255} n(DN_j)} \qquad [29.\ \text{egy.}]$$

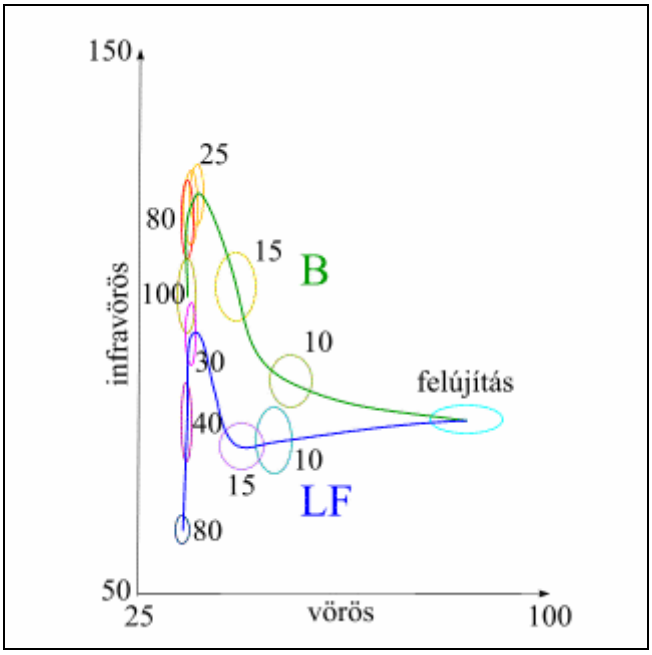
ahol:

P_i *i* értékű pixel valószínűsége

$n(DN_i)$ *i* értékű pixel gyakorisága

A kiszámított valószínűségekre az osztályozáshoz van szükség. Az eloszlási diagramokat azonban szélesebb körben lehet használni. Így az adatbázisban ez utóbbiakat tároltam csak, és az osztályozás során a valószínűségeket ezekből valós időben számítottam.

Az űrfelvétel-idősorok lehetővé teszik azt is, hogy bármely erdőrészletre megjelenítsük annak fejlődését. Ezeket a fejlődési sorokat a különböző faállomány-típusokra szétbonthatjuk. Ilyen módon lehetőség van arra is, hogy a spektrális adatbank alapján az adott erdőrészletet besoroljuk a megfelelő faállomány-típusú és korú osztályba. Egy adott időpontot nézve az osztályok között gyakran nagy az átfedés, az idősorokat elemezve azonban olyan osztályok is elkülöníthetők, amelyek különben nem (*42. ábra*). Az ábrán a bükkös (B) és lucfenyves (LF) faállomány-típusra, és két spektrális sáv által meghatározott koordinátarendszerben láthatók ezek a „növekedési" görbék. Ez természetesen bármely fafajra és sávra előállítható. Az ábrán látható ellipszisek a szórás alapján készültek, azonban az osztályozó a tapasztalati eloszlást használja fel. Tehát egy adott korú faállomány-típus (pl. 25 éves B) egy hétdimenziós tapasztalati eloszlásból számított valószínűségekkel írható le. Ez még kiterjeszthető az adott termőhelyre jellemző faállomány-magassággal is, így az adott erdőrészlet nagyobb megbízhatósággal sorolható be az egyes osztályokba. Az ilyen referencia jellegű spektrális jellemzők teljes körű előállítása igen kívánatos lenne, sajnos azonban a mintaterületem mérete és elhelyezkedése nem tette lehetővé azt, hogy ezeket Magyarország összes állományalkotó fafajára elkészítsem.



42. ábra: **Különböző faállomány-típusok fejlődése a Landsat űrfelvétel 3. és 4. sávjában. A feltüntetett számok a faállomány korát jelentik.**

Egy adott erdőrészlet esetében az osztályozó megvizsgálja, hogy az előző időpontból származó felvétel, és ezek alapján a fejlődési görbék alapján a jelen felvétel esetében spektrálisan hol kellene elhelyezkednie, és amennyiben eltérés mutatkozik, akkor az adott részletet átosztályozza.

A Landsat-űrfelvételek esetében a képrészletek textúrális mutatóival nem foglalkoztam, mivel ilyen felbontás mellett az erdők esetében nincs jelentősége. Még azonban ennél a felbontásnál is idős állományoknál megfigyelhető, hogy egy kicsit szétterülnek (lásd *42. ábra*, B100 „osztály"). Nagyobb geometriai felbontású felvételek esetében szükséges azonban ezeknek az információknak a tárolása és elemzése is.

3.3.1.4. Az utófeldolgozás

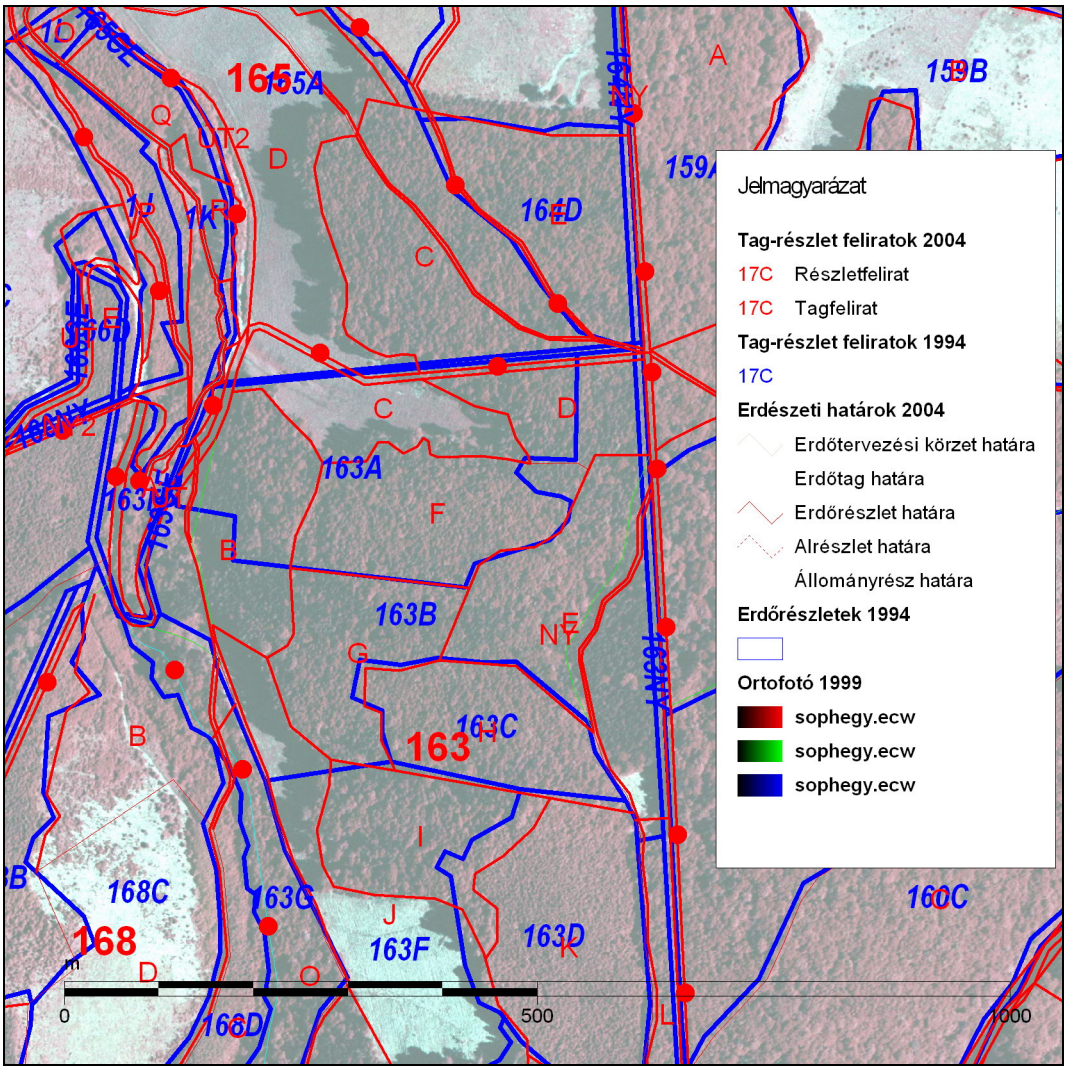
A digitális képfeldolgozási munkafolyamat egyik nagyon fontos, befejező lépése, hogy a képfeldolgozás eredményét a térinformatikai rendszerünkbe (GIS) integráljuk. A Landsat-idősorok esetében a különböző értelmezési szinteken az utófeldolgozás lépései is különbözőek voltak.

Az első három értelmezési szinten az osztályozott felvételeket egy általános simítási eljárás után – ami a 3·3-as, illetve 5·5-ös *median cut* szűrő volt (lásd: 2.5.2.1. Szűrők) – raszteres alapú térinformatikai rendszerbe konvertáltam. Ezután lehetőség nyílt az egyszerű statisztikák elkészítésén túl az átalakulási mátrixok és térképek előállítására is. Az így előállt térképek és mátrixok képezték a modellezés alapját is.

A negyedik értelmezési szinten az osztályozás és az utófeldolgozás lépései összekeverednek, mivel magához az osztályozóhoz is szükségesek olyan csatolások és elemzések, amelyeket térinformatikai környezetben valósítottam meg (lásd előző fejezet), így ott az utófeldolgozás leginkább az osztályozás eredményének megjelenítését és elemzését jelentette.

Az adatbázis kialakításakor, a csatolásoknál már az osztályozásnál, de főként az utófeldolgozásnál sok gondot okozott az erdőrészlet-azonosítók erdészeti szakigazgatás általi többszöri megváltoztatása. Amennyiben az aktuális digitális üzemi térképet tekintjük a helyzeti adatok forrásának, akkor lehetőség van az egyes korábbi évek erdőrészlet-azonosítóinak a tárolására is. Amennyiben azonban erdőrészlet-összevonások történtek, akkor ahhoz, hogy a helyzeti információkat ne veszítsük el, szükséges a régebbi üzemi térképek feldolgozása is (*43. ábra*).

Ennek hiányában ugyanis tudjuk egy új erdőrészletről (pl. az ábrán 163C), hogy annak egyik része mi volt (az ábrán 163A), de azt nem, hogy melyik része. Amennyiben a következő üzemtervezéskor a 163C azon É-i részét kívánják leválasztani, amely az előző üzemtervben még 165A-ként szerepelt, akkor a pusztán adatbázis alapon úgy gondolhatjuk, hogy az, két tervezési ciklussal korábban még 163A volt, és nem a valóságnak megfelelően 165A. A másik figyelemreméltó dolog az ábrán az erdőrészlethatárok geometriai pontatlanságai. A következő változáskor már elképzelhető, hogy olyan új erdőrészletet érintünk egy régi részlettel, amit ténylegesen nem is érint. A térinformatikai alapokon történő változáskövetésnél elegendő az egyes tervezésekhez kapcsolódó térkép rendszerben történő tárolása, amely alapján térbeli elemzésekkel a változások kimutathatók, és visszakereshetők. Sajnos ez az ÁESZ jelenlegi adatstruktúrájában nincs meg, így az adatbázis alapján csak az előző tervezési ciklusig visszamenően tudunk egy adott területről információkat lekérdezni. Másik probléma, hogy az adatbázisban az erdőrészlet RÉGIRÉSZLET azonosítóját általában nem térinformatikai alapokon, hanem manuálisan adják meg. Ez a módszer alkalmas lehet ugyan a geometriai pontatlanságokból adódó hibák kiküszöbölésére, de ugyanakkor számos egyéb hiba forrása is, és ráadásul elég időigényes munka. Az általam alkalmazott módszerek segítségével orvosolni lehetne a problémát. Mivel ennek szakmailag nagyon nagy jelentősége van, ezért ezt külön alfejezetben ismertetem.



43. ábra: **A gazdasági beosztások változásának nyomon követése**

3.3.1.4.1. Az erdőrészlet-azonosítók nyomon követése

A digitális erdőgazdálkodási üzemi térképeken az egyes területi egységeket

HELY/TAG/RÉSZLET/ALRÉSZLET

azonosító-négyessel, vagy az ezekből összeállított AZOK azonosító mezővel határozzuk meg (pl. Sopron 133 TI 3 / 3141-133-53-3 / 3141133533). Ez szerepel az ún. elsődleges adattáblában. A részletfejléc adataiban megtalálható a régi azonosító is (REGIAZON), pl. a Sopron 163C erdőrészlet esetében a régi azonosító Sopron 163A, pedig részben a 165A területére esik (lásd: *43. ábra*). A probléma megoldására több térinformatikai módszer is kínálkozik.

A legegyszerűbb persze az lenne, ha az üzemi térkép frissítése (újrarajzolása) során tárolnánk a változásokat. Lennének vonalak, amelyek:

1. sem topológiailag, sem geometriailag nem változtak;
2. topológiailag nem, csak geometriailag változtak;
3. új vonalak (részletmegosztás);
4. törölt vonalak (részletösszevonás).

Az 1. csoportba olyan vonalak tartoznak, amelyek több tervezési cikluson keresztül állandóak. Ilyen a jelenlegi gyakorlatban alig-alig akad. A 2. csoportba azok a vonalak tartoznak, amelyek topológiailag nem változnak, de geometriai szempontból pontosításra szorulnak. Ez talán a legjelentősebb csoport, pl. a Sopron 159A és a 164NY közötti vonal (lásd: *43. ábra*). Az új vonalak azok, amelyekkel a tervezés során erdőrészleteket megosztunk. A törölt vonalak pedig az összevont részletek közötti régi határoló vonalak. Külön figyelmet kell szentelni annak, hogy amennyiben egy új vonallal határolunk el két részletet, akkor ahhoz, hogy topológiailag korrekt legyen az állomány, ahhoz a csatlakozó régi vonalat el kell metszeni. Ezért meg kell oldani azt is, hogy az új állományban létrejövő 2 (vagy több) vonalnak mely vonal volt a „szülője". Ezt a következő kapcsolótáblával lehet megoldani (*XX. táblázat*).

XX. táblázat: **A vonalak öröklődési táblája**

ID_1	Hossz	Bal	Jobb	Top.	Geom.	ID_2	Hossz	Bal	Jobb
1111	185,310	S99A	S99B	0	0	2222	185,31	S99A	S99B
1823	345,190	S152A	S152B	0	1	4321	341,45	S152A	S152B
						8147	257,02	S95A	S95C
2145	200,230	S105G	S105F						
2563	365,490	S98J	S98I	1	1	9365	223,29	S98N	S98L
						9364	138,21	S98N	S98M
2141	68,768	S105E	S105F	1	1	9512	185,99	S105B	S105J
2142	134,870	S105E	S105G	1	1				

A törölt vonalakat nem szükséges ténylegesen is törölni az állományból, elegendő csupán a megszűnés idejét bejegyezni. Ugyanakkor ezáltal az állományunk egyre bonyolultabb lesz, a vonalak összedarabolódnak. Lehetséges csak az öröklődési táblát is tárolni, ilyenkor ezáltal virtuálisan lehet létrehozni a régebbi vonalas térképeket. Ehhez persze megfelelő szoftver is szükséges.

Az egyes kódolásokat tovább finomíthatjuk. Például a topológián belül különbséget lehet tenni, ha az adott vonal topológiailag nem változik meg, de valamelyik oldali terület azonosítója megváltozik. A geometriai változásoknál pedig további felosztások tehetők aszerint, hogy mennyire módosult az adott vonal. Az öröklődési tábla alkalmazásával nem csak azt lehet jól nyomon követni, hogy az egyes erdőrészletek hogyan változtak, hanem segítségével a régebbi térképek geometriai pontosságát is javítani tudjuk, például a két tervezési ciklussal korábbi térkép is megjeleníthető, az akkorinál pontosabb geometriával.

Amennyiben a térképek aktualizálásakor nem kódoljuk a változásokat, akkor két állapotot tükröző térkép térinformatikai elemzésével számos fontos információhoz juthatunk.

Egyik lehetőség maguknak a területi egységeknek az elemzése. A legegyszerűbb, ha a jelen állapotot tükröző térkép és az előző térkép területeit átfedjük egymással. Ekkor már egyszerű statisztikai elemzéssel meghatározhatjuk, hogy az új részlet, mely régi részletekből, milyen arányban, és a régi részlet milyen százalékából áll össze (***XXI. táblázat***). Ha ragaszkodunk az ÁESZ jelenlegi adatstruktúrájához, akkor is a legnagyobb területű régi részlet azonosítóját automatikusan csatolhatjuk az új részlethez.

XXI. táblázat: **Az erdőrészlet-változások területi statisztikái**

		1994-es üzemterv				
		163A	163B	163NY	**165A**	
163C Terület 2004	%	**82,5%**	0,2%	2,3%	**15,0%**	100%
	m2	17 249	32	486	3 143	**20 910**
Terület 1994	%	21,9%	0,0%	5,0%	1,9%	
	m2	78 833	103 514	9 812	165 462	

		1994-es üzemterv				
		163B	**163C**	163D	163F	
163H Terület 2004	%	2,0%	**123,6%**	4,4%	4,3%	134%
	m2	423	25 846	915	893	**28 078**
Terület 1994	%	0,4%	94,5%	1,8%	1,3%	
	m2	103 514	27 361	51 568	70 529	

A 163H erdőrészlet esetében egyértelmű a helyzet, mivel a régi, *163C* erdőrészleten kívül a többi érintett erdőrészlet 5% alatt szerepel, és a térképet megtekintve (lásd: *43. ábra*) kijelenthető, hogy ezek a geometriai pontatlanságból adódnak. Ugyanakkor a 163C erdőrészlet esetében a régi beosztás szerint a *163A* és a *165A* is érintett, bár ez utóbbinak az előző ciklusbeli területéhez viszonyítva csak ~2%-a került át. Érintett még a *163NY* is, jellegéből adódóan alacsony 2,3%-kal, de az eredeti területéből 5% került át. Ilyen átalakulási mátrixok térinformatikai eszközökkel könnyen előállíthatók az egész üzemi térképre, és segítségükkel számos további elemzés is elvégezhető. Nehéz ugyanakkor szétválasztani a tényleges részletváltozásokat a geometriai pontatlanságoktól. Ezen segítene az, ha a változások elemzésébe a vonalakat is bevonnánk.

A területek elemzése után a részleteket határoló vonalakat is elemezhetjük. Az elemzés során egy adott vonalat a fent leírt vonalöröklődésnek megfelelően vizsgálhatnánk. Ha tudjuk egy adott vonalról, hogy – a területelemzés után – ugyanazon területeket határolja, azaz topológiailag nem változott, akkor vizsgálhatjuk a geometriai változását. Ennek keretében lehetőség van a szisztematikus hibák felismerésére, az adott toleranciájú geometriai pontatlanságok detektálására. Ugyanakkor a megváltozott topológiájú vonalak elemzése már nem oldható meg ismert, egyszerű elemző eszközökkel, ezért ilyen esetben nem kapunk teljes eredményt.

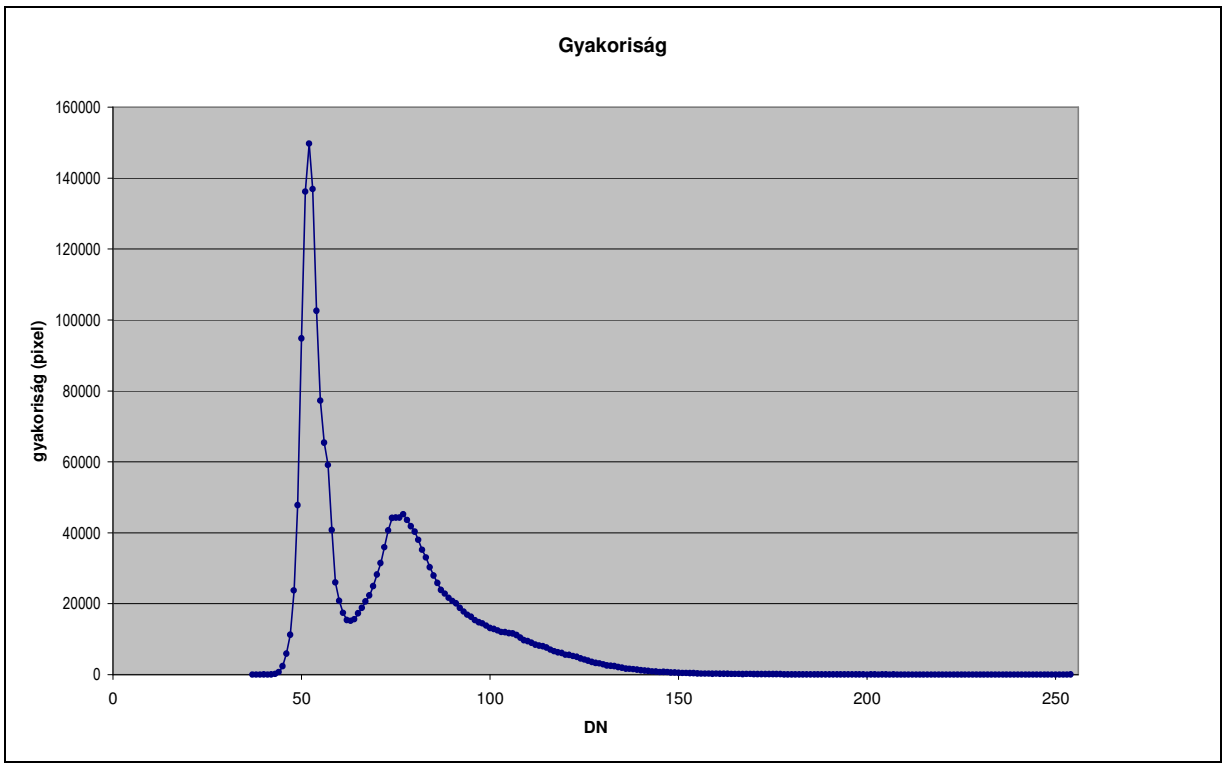
3.3.2. SPOT P felvétel

A Spot műholdakon található HRV érzékelő pánkromatikus csatornájának – röviden SPOT P – (lásd: 2.3.9.2. A SPOT műholdrendszer, 40. o.) felhasználása meglehetősen széles körű. Sokáig (1995) ezek a felvételek rendelkeztek az elérhető legnagyobb geometriai felbontással. Geometriai felbontásánál fogva alkalmas az üzemi térképek durva hibájának korrigálására, valamint geometriailag gyengébb – de például spektrálisan jobb felbontású – felvételek javítására (lásd: 2.5.2.2. Sávok közötti műveletek, 57. o.).

A SPOT P felvétel előfeldolgozása során a vetületbe illesztést illesztőpontok segítségével, ötödfokú polinommal oldottam meg, mivel nem a teljes nyers felvétel, hanem csak egy kivágat állt a rendelkezésemre. Ebben az esetben topográfiai normalizációt nem végeztem, mert vizsgálataim alapján ebben az érzékelési tartományban (lásd: *19. ábra*) nagyon kis korreláció van a domborzat és az intenzitásértékek között.

Kutatásiam során arra lettem figyelmes, hogy a SPOT P felvételek hisztogramjai jellegzetesen kétcsúcsú eloszlást mutatnak (*44. ábra*). További vizsgálataim során kiderült, hogy a kisebb

intenzitást mutató csúcs nagyjából az erdőknek felel meg. Fontos volt meghatározni azt a határértéket, amely az erdő-nem erdő osztályozásban jól alkalmazható.



44. ábra: **A mintaterület 1995-ös SPOT P felvételének gyakorisági diagrammja**

A határértéket tapasztalati-statisztikai úton határoztam meg. A Soproni-hegység mintaterület esetében ugyanis a 67-es határértéknél volt a legnagyobb korreláció az erdőtérkép és a SPOT P űrfelvétel között. Az ehhez az intenzitásértékhez tartozó sugárzási értéket a SpotImage honlapjáról [69] letöltött kalibrációs értékek alapján határoztam meg.

$$L = (DN/A) + B \qquad [30.\ egy.]$$

ahol:

L	sugárzás $\left(\frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot \mu m}\right)$
DN	pixelérték (***D**igital **N**umbers*, 0-255)
A	kalibrációs szorzó együttható (jelerősítés)
B	kalibrációs összeadó együttható

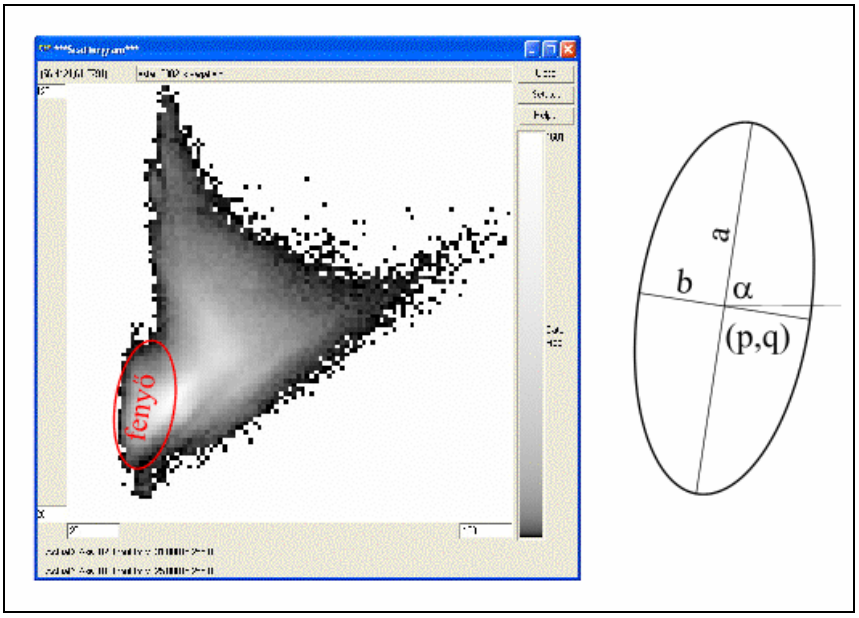
Az osztályozott SPOT P űrfelvételen szintén alkalmaztam a *median cut* szűrőt (lásd: 2.5.2.1. Szűrők, 56. o.), de csak 3·3 pixel méretű ablakkal. Ezután az osztályozott felvételt raszteres GIS-be konvertáltam.

A SPOT P felvételt is beintegráltam a spektrális adatbank alapú osztályozóba, bár itt az egy sáv miatt a „fejlődési görbék” leegyszerűsödnek, az erdőterületeknek nagyon szűk a dinamikája, de a jelentősebb beavatkozásokat, véghasználatokat az osztályozó jól detektálta (lásd *13. melléklet*).

3.3.3. Az ASTER-felvétel

Az ASTER-űrfelvétel vetületbe illesztését ortokorrekció segítségével végeztem. Az illesztőpontokat ebben az esetben is az EOTR topográfiai térképekről mértem le.

A felvétel osztályozása során a hangsúlyt elsősorban a 2. értelmezési szintre fektettem a kora tavaszi felvételi időpont (04.02.) miatt. A Landsat esetében kidolgozott vegetációs index alapú osztályozó a lombfakadás előtti állapot miatt csak a fenyőállományok elkülönítésére volt alkalmazható, viszont itt nagy megbízhatósággal lehetett ezeket elkülöníteni. Bár a lombos állományok is elkülönültek valamennyire a felvételen, de osztályozásukat végül nem használtam fel, mert nagy volt az átfedése elég sok egyéb földhasználati kategóriába tartozó területtel. Ugyanakkor ebben az esetben a szóródási diagramon az ellipszis-osztályozót alkalmaztam, mivel ez nagyobb megbízhatóságot produkált (*45. ábra* valamint 3.3.1.3.2 Az ellipszis-osztályozó, 78. o. és 28. egyenlet).



45. ábra: **Az ASTER felvétel szóródási diagramja a vizsgált területre, és az ellipszis-osztályozó**

Az ASTER érzékelő alkalmas sztereópár rögzítésére is. Számomra is rendelkezésre állt ez a sáv, amely a 3. sáv 760-860 nm közötti, függőleges érzékelőjét (*nadir looking*) egészíti ki egy ~31°-kal visszafele tekintő (*backward looking*) felvétellel. A felvételpár belső tájékozását a felvételekhez szolgáltatott metaadatok alapján, relatív tájékozását automatikus kapcsolópontfelkereséssel, az abszolút tájékozást az EOTR topográfiai térképek (magyarországi részen), valamint a DTA50 (osztrák részen) segítségével valósítottam meg. A tájékozott sztereófelvételpárból a borított felszín modelljét automatikusan előállítottam. Bár ennek a modellnek mind a felbontása (30 m), mind a pontossága elmarad a légifényképekből előállított modellek pontosságától, de a spektrális adatbankban még így is felhasználható volt. Ez a modell képezte a borított felszín modellek utolsó tagját (lásd: 2.3.10 és 3.3.5 fejezet).

A spektrális adatbank osztályozónál az ASTER felvétel esetében a borított felszínmodellen túl a VNIR érzékelőjének három sávját (a visszafelé tekintő nélkül) vontam be, egyrészt az egységes felbontás, valamint a Landsat sávjaival történő megfeleltetés miatt.

3.3.4. Topográfiai térképek

A topográfiai térképek esetében elsődleges volt az egységes vetületbe történő transzformálás, amely esetemben az EOV volt. Bár a szakirodalomban fellelhetők a II. és a III. katonai felmérés térképeinek parametrikus úton történő ismert vetületbe – majd azon keresztül akár EOV-ba is – történő transzformálása [74. Timár – Molnár (2003), 75. Timár et al (2004)], én illesztőpontok alapján transzformáltam azokat a térképeket, amelyek nem EOV-ben készültek. Ezek a vetületbe illesztett térképek alkalmasak a képfeldolgozásra. Kivételt képeztek a III. katonai felmérés térképei. Ebben az esetben a térképek fekete-fehér volta nem tette lehetővé az automatikus képosztályozást.

Az I. katonai felmérés térképeinek geometriai pontosságával kapcsolatban eddigi munkám során nem voltak jó tapasztalataim. Különösen nagy torzulások találhatók az erdős, hegy-völgyes vidékeken, márpedig a Soproni-hegység ilyen. Éppen ezért ezeknél a térképeknél úgy jártam el, hogy a területet lefedő szelvényeket a szelvények rendszerében összeillesztettem, és az összeillesztett szelvényeket együtt transzformáltam tovább EOV-ba (*46. ábra* és *3. melléklet*). Igaz ugyan, hogy ez kétszeri újramintavételezést jelent, de a szelvényhatárokon nem lesznek ellentmondások.

46. ábra: **Az I. katonai felmérés mintaterületre eső szelvényei**

Az I. katonai felmérés idejében készült Sárközy-féle térkép a Soproni-hegység, de talán egész Magyarország legrégebbi erdészeti térképe [65. Sárközy (1787)]. Bár a közel azonos keletkezési év miatt (lásd: *XIV. táblázat:* A felhasznált térképek adatai, 71. o.) az ember azt gondolná, hogy ennek geometriai alapját az I. katonai felmérés szolgáltatta, de a térképeket meg-

vizsgálva kijelenthető, hogy a Sárközy-féle térkép sokkal részletesebb (az eredeti méretarány 1 : 7 200, szemben az I. katonai 1 : 28 800-as méretarányával) és geometriailag is pontosabb az I. katonai felmérés térképeinél. A térképeket nem lehetett beszkennelni, ezért a Soproni Levéltárban készítettem róluk fényképeket, és ezekkel a digitális képekkel dolgoztam. A fényképezés során a lehetőségek keretein belül biztosítottam a térkép és a képsík párhuzamosságát. A fényképezőgép közelítő kalibrálását is felhasználtam a torzításmentes szelvények előállítására. Ezek után az egyes szelvényeket a szelvények rendszerében összeillesztettem (lásd: *46. ábra*, 92. o.), majd az állományt EOV-ba transzformáltam. Bár az egyes térképi szimbólumok értelmezése nem könnyű feladat, ennek ellenére a térképanyag mind az erdőtörténeti kutatások, mind a térinformatika számára nagyon értékes forrásadat (*47. ábra* és *4. melléklet*).

47. ábra: **Az 1787-es Sárközy-féle térkép [65]. Részlet**

A II. katonai felmérés térképei esetében az erdőket szürkés-zöldes árnyalattal jelölték, a fő fafajnemet pedig szimbólummal. A digitális képfeldolgozás során nehézséget okozott a domborzatábrázolás csíkozása. Éppen ezért a felületmodellből levezetett lejtés és kitettség térképekkel az osztályozást korrigáltam. Az ún. Lehmann-féle csíkozásnál ugyanis a csíkozás iránya a lejtő irányával, tehát a kitettséggel egyezik meg, a sűrűsége pedig arányos a lejtő szögével. Ehhez ki kellett alakítanom olyan mintákat, amelyek a megfelelő lejtőszögek esetében a Lehmann-féle csíkozásban a vonalak vastagságát tartalmazta. Ezt a mintázatot a kitettség szögével jelenítettem meg. Lehetett volna a csíkozást elkülöníteni a térkép színezésétől, de ezt sajnos a térképek sötét tónusa nem tette lehetővé (lásd *5. melléklet*).

A reambulált III. katonai felmérés esetében az erdőket jól elkülönülő, zöld színnel ábrázolták. A magassági ábrázolás itt már szintvonalak segítségével történt, így a képek feldolgozását nem nehezítette meg annyira a magassági ábrázolás. Ugyanakkor pusztán a spektrális jegyek

alapján (szín alapján) nem lehetett elvégezni az osztályozást, mert az ábrázoláshoz használt zöld színt az erdőkön kívül a kert/gyümölcsös kategóriában is találunk. Éppen ezért az ilyen sraffozott területek elkülönítését egy szűrő alapú textúrális osztályozó segítségével valósítottam meg (lásd: 2.5.2.1. Szűrők című fejezet, valamint *XXII. táblázat*).

XXII. táblázat: **Az osztályozóban alkalmazott szűrő együtthatói**

-1	-1	1
-1	-1	1
-1	1	-1
1	-1	-1
1	-1	-1

További problémát jelentett az egyes szimbólumok, és a szintvonalak helyeinek a befoltozása, amit foltozóalgoritmussal végeztem el. Az osztályozás lépéseit a következő ábrán követhetjük nyomon (*48. ábra* és *6. melléklet*).

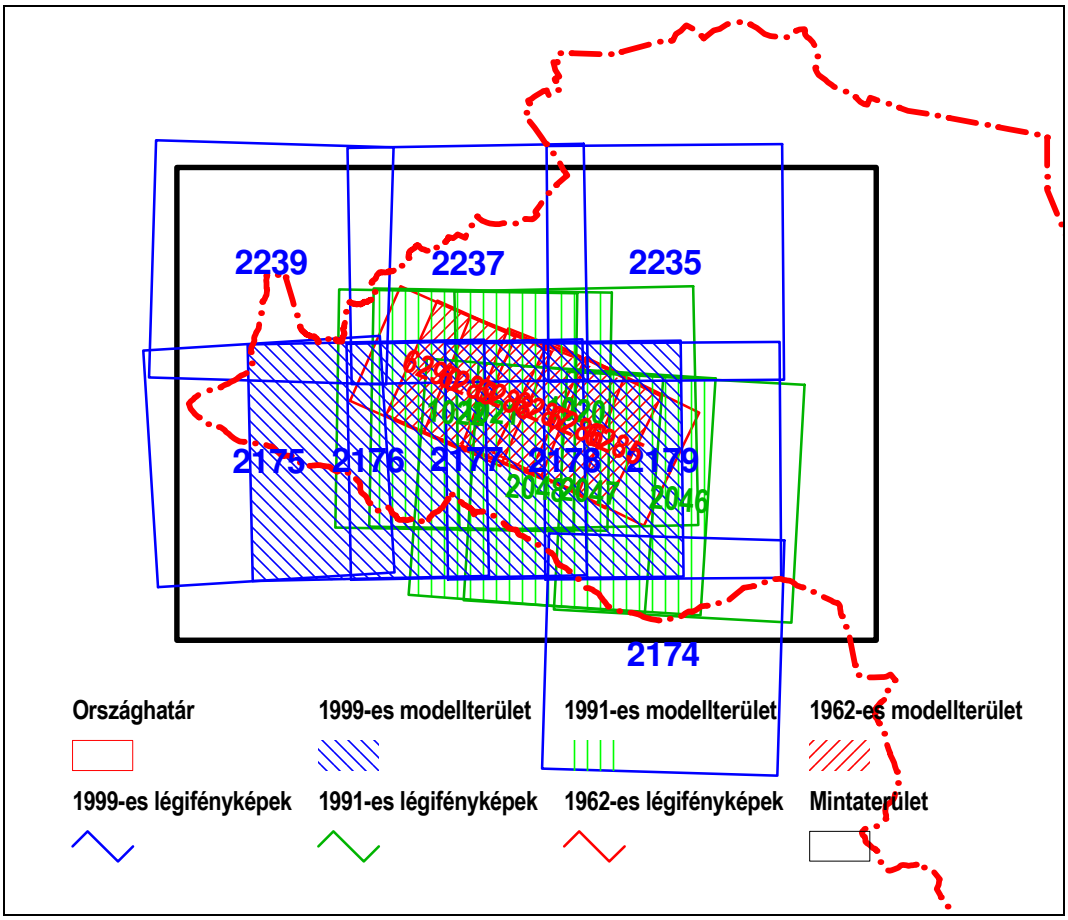
48. ábra: **A reambulált III. katonai felmérés térképei osztályozásának lépései: az eredeti térkép; a textúrális osztályozó; a foltozott erdő-osztály**

3.3.5. Légifényképek

A rendelkezésemre álló légifényképek (*XV. táblázat*) kivétel nélkül analóg filmre készült felvételek voltak. Ezeket a fényképeket valahogyan digitális képpé kellett alakítani. Volt, hogy egyszerű asztali szkennert alkalmaztam, és volt, hogy professzionális fotogrammetriai szkenner segítségével alakították a fényképeket digitális formába.

Minden esetben a digitális fotogrammetria eszközkészletét használtam a képek geometriai korrekciójához, az ortokorrekcióhoz. Egyes felvételek esetében egyképes úton, de leggyakrabban a többképes tömbkiegyenlítés módszerével határoztam meg a képek eredeti felvételi helyzetét, a külső tájékozás paramétereit. A belső tájékozáshoz – amennyiben rendelkezésemre állt – felhasználtam a kamerakalibrációt is. A tömbkiegyenlítés során felhasznált illesztőpontokat egyrészt a tanszéken végzett korábbi terepi mérésekből választottam ki [4. Bácsi (1986), 5. Bánky (1987)], másrészt digitális térképekről mértem le, valamint geodéziai GPS mérésekkel határoztam meg. Ahol lehetőség volt rá, ott a képek átfedő területein borított felszín modellt is készítettem. A vizsgálatba bevont légifényképek területi fedését mutatja be a *49. ábra*.

Az 1962. évi légifénykép-sorozat az egyik első hazai, erdészeti célú mérőkamerás légifényképezés. Ennek ellenére (vagy éppen ezért) azonban a minősége kiváló. Sajnos ennek a légifénykép-sorozatnak csak a kontaktmásolatai voltak elérhetők, így ezeket asztali síkágyas szkenner segítségével digitalizáltam be. A felvételeket tömbkiegyenlítés segítségével tájékoztam. A tájékozott felvételekből előállítottam az ortofotókat, és az egyes ortofotókból az ortofotó-mozaikot. A sztereó-modellterületen automatikus módon előállítottam a borított felszín modelljét is.



49. ábra: **A vizsgálatba bevont légifényképek területi fedése**

Az elkészült ortofotó-mozaik alapján megpróbáltam automatikus erdőtípus-osztályozást végezni (2. szint). Sajnos a fekete-fehér képanyag a fenyő-lomb elkülönítést a szükséges megbízhatósággal nem teszi lehetővé, éppen ezért az osztályozás eredményét manuális módszerrel kijavítottam.

Az 1991. évi „Duna magas” infraszínes légifénykép sorozatból szintén a kontaktmásolatokat szkenneltem be asztali, síkágyas szkennerrel (*XV. táblázat*). A felvételek tájékozásához ebben az esetben is a tömbkiegyenlítés módszerét alkalmaztam. A tájékozott felvételekből mind az ortofotókat, mind a borított felszín modelljét előállítottam. Az 1991. évi ortofotók esetében tematikus osztályozást is végeztem, elsősorban a Landsat-űrfelvétel osztályozási eredményének ellenőrzésére.

A feldolgozott légifényképek közül kiemelkedő az 1999. évi infraszínes légifénykép-sorozat feldolgozása (lásd: *XV. táblázat*). Ezt a légifénykép-sorozatot az Eurosense Kft. készítette egy, az NyME Földmérési és Távérzékelési Tanszék által lebonyolított Phare CBC projekt keretében (lásd: [49. Márkus et al (2000)]). Bár a disszertáció során felhasznált légifényképeket a PHARE projekt során nem dolgoztuk fel, de azoknak a képeknek a feldolgozása számos olyan tapasztalatot eredményezett, amelyet ezen képek feldolgozása során tudtam hasznosítani. A repülés és előfeldolgozás adatait tartalmazza a *XXIII. táblázat*, megmutatva a feldolgozás különbségeit is.

XXIII. táblázat: **Az 1999-es repülés és előfeldolgozás adatai**

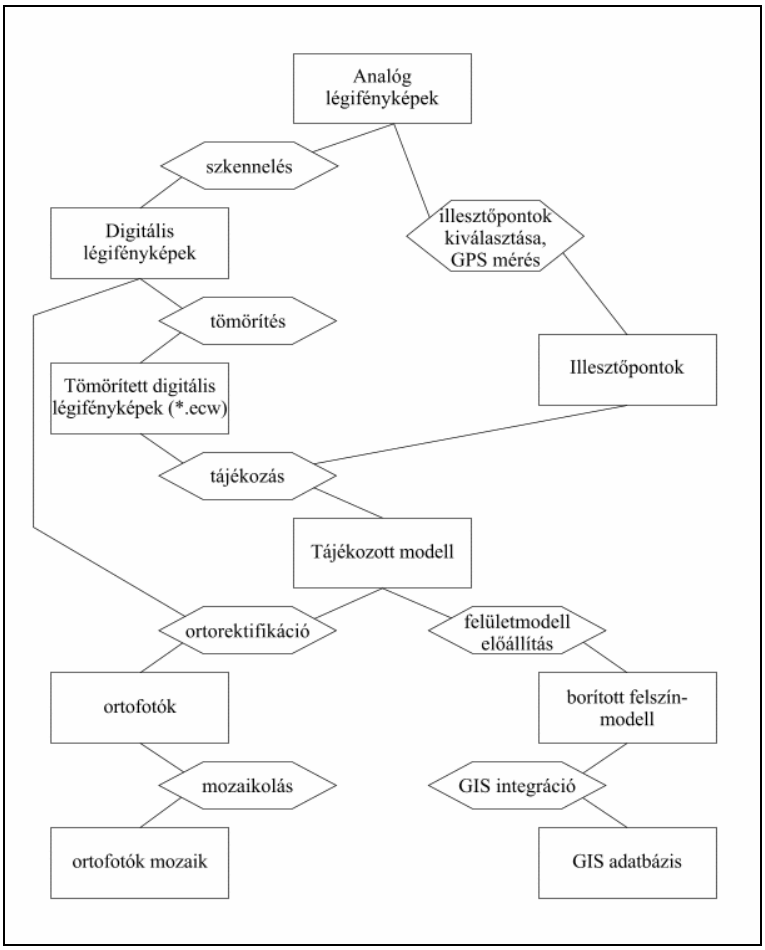
Terület	Program	Szkennelés	Felbontás		Tájékozás	Mozaikolás
			szkennelés	terepi		
			mikron	m		
Fertő, Szárhalom	PHARE CBC	minden 2. kép	42	1,26	képenként	ER Mapper
Soproni-hegység	Doktori	minden kép	21	0,63	tömbkiegyenlítés	ER Mapper +

A jelentős különbségek a feldolgozásban a felbontás megnövelése, a sztereó-átfedés, a rendelkezésre álló illesztőpontok pontossága, valamint a tömbkiegyenlítés.

Ezt a nagyon jó minőségű légifénykép-anyagot az Eurosense Kft. szkenneltette professzionális fotogrammetriai szkennerrel. A feldolgozás során többek között a DigiTerra Map v 2.3 program tömbkiegyenlítő modulját alkalmaztam, valamint térbeli kiértékelést is végeztem (lásd: 2.3.10. A digitális domborzatmodellek (DDM) és a távérzékelés című fejezet). A képanyag feldolgozásának folyamatábráját mutatja a *50. ábra*.

Az előfeldolgozás során a képek vizsgálata és elemzése után a képek tömörítése következett, amelyhez a wavelet alapú ecw tömörítést (lásd: 2.2. A szabályos adatmodellek, 14. o.) alkalmaztam. Erre a könnyebb kezelhetőség, és a korlátozott tárkapacitás miatt volt szükség.

A tájékozás során felhasználtam a kamera-kalibrációs jegyzőkönyvet a belső tájékozás pontosabb elvégzéséhez. A képek tájékozását több programban is megvalósítottam, a legfontosabbak az ER Mapper, a DigiTerra Map, és az Image Station SSK volt. Egy korábbi vizsgálat során kimutattam, hogy a tájékozás pontossága szempontjából általános esetben a különböző szoftverek között nincsen jelentős különbség [2. Bácsatyai – Király – Mezei (2001)]. A tájékozás során az illesztőpontok több forrásból származtak. Jelentős volt azoknak az illesztőpontoknak a felhasználása, amelyeket korábbi tanszéki munka keretében mértek meg, és nagyon jól dokumentáltak [4. Bácsi (1986), 5. Bánky (1987)]. Ezekből a pontokból kiválasztottam azokat, amelyeket ezeken a jelentősen kisebb méretarányú fényképeken is jól lehetett azonosítani, és ezen pontok körülbelül felét vontam be a tájékozásba. Ezeken a pontokon kívül még különböző digitális térképekről lemért illesztőpontokat is vizsgáltam ellenőrzés végett. Az 1 : 10 000-es EOTR és Gauss-Krüger topográfiai térképet, az erdőgazdasági üzemi térképet, valamint az 1 : 50 000-es Gauss-Krüger topográfiai térképet használtam az illesztőpontok lemérésére. A legfontosabbak azonban az általam GPS segítségével bemért illesztőpontok voltak.



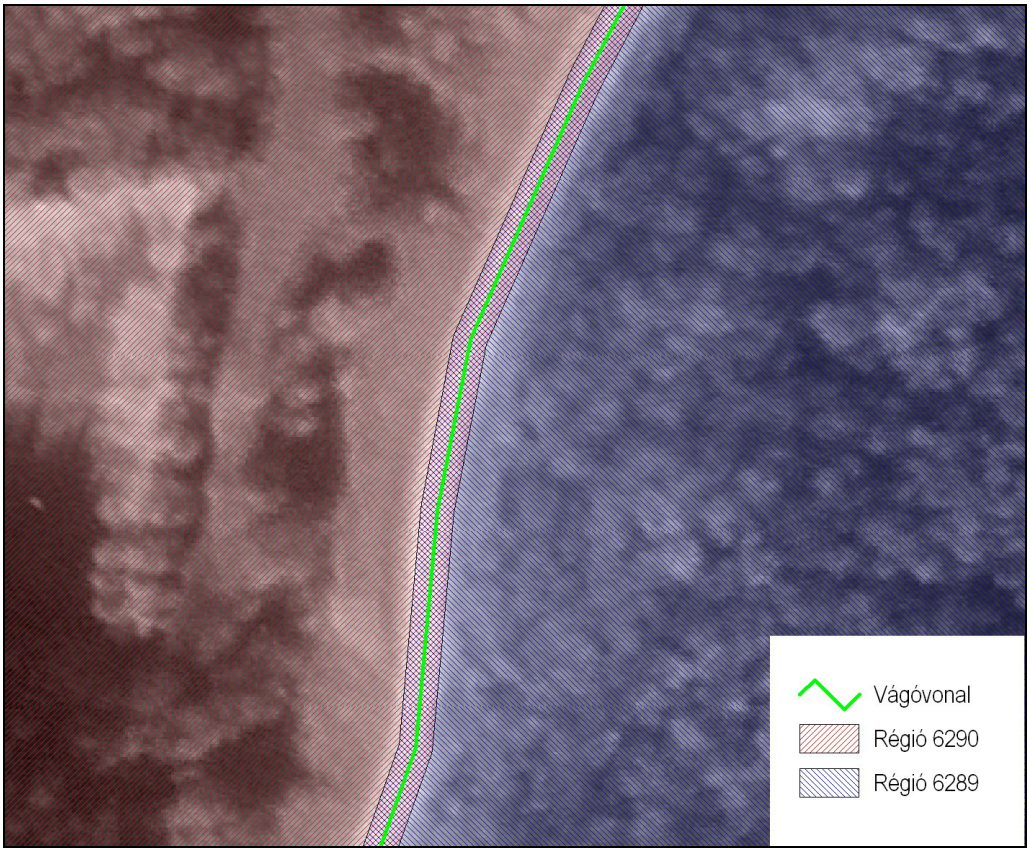
50. ábra: **Az 1999. évi légifényképek feldolgozásának folyamatábrája**

A GPS segítségével történő illesztőpont-meghatározáshoz a repülési vázrajz alapján megterveztem, majd a forrásképek gondos és aprólékos tanulmányozása után pontosan kijelöltem a megmérendő illesztőpontokat. Ezután egy Trimble 4000SST kétfrekvenciás geodéziai GPS vevőpár segítségével mértem meg az adott pontokat olyan módon, hogy amíg az egyik műszer (a bázisállomás) a GGKI tetején végzett folyamatos méréseket, addig én a másik műszer segítségével (amely a mozgó, azaz *rover* állomás szerepét töltötte be) végigjártam a kijelölt pontokat, és ott gyors-statikus méréseket végeztem (*51. ábra*).

51. ábra: **Illesztőpont mérése Trimble 4000SST vevővel, valamint az illesztőpont képe a légifényképen**

Ezeket a méréseket mind a bázisállomásról, mind a rover műszerről letöltöttem, és utófeldolgozás segítségével értékeltem ki őket. Így megkaptam az illesztőpontok WGS-84 ellipszoidon értelmezett földrajzi koordinátáját, amelyeket utána egy lokális paraméterkészlettel transzformáltam át az IUGG-1967-es ellipszoidra, és onnan az EOV vetületi egyenleteinek alkalmazásával számítottam ki az illesztőpontok EOV koordinátáját.

A tájékozás eredményeként az ortofotókat előállítottam. Az egyes ortofotók mozaikolásához egy új eljárást dolgoztam ki, amelyet a következőkben ismertetek. A különböző szakirodalmakban számos módszer ismeretes az egyes felvételek mozaikolására [46. Kraus (1998)]. Mivel korábbi munkáimban az ER Mapper programot ismertem meg mélyebben, ezért a szoftver által alkalmazott eljárást [22] fejlesztettem tovább. Bár a régiók kialakítására kínál a program automatikus lehetőségeket, tapasztalataim azt mutatták, hogy igazán szép mozaikot csak manuálisan igazított régiók segítségével lehet előállítani. Annál is inkább, mivel a felhasználástól függ az is, hogy merre vezessük a régiók határvonalait, mezőgazdasági területeken, az erdőben, vagy éppen utak mentén például. Mivel az egyes felvételek egy adott vágási vonal mentén – még nagyon nagy pontosságú geometriai illesztés esetén is – a legtöbb esetben különböznek az eltérő megvilágítás, valamint perspektíva miatt, ezért a mozaikolás során célszerű egy átmeneti zónát alkalmazni, amely kellően széles a különbségek elsimítására, de ugyanakkor nem túl széles ahhoz, hogy a különböző felvételi perspektívából adódó elmosódás és szellemképesség zavaró legyen. Ezt úgy valósítottam meg, hogy létrehoztam a vágóvonalakat, majd ezen állomány köré egy meghatározott távolsággal védőzónát készítettem, és így az egyes képek a védőzóna távolságának kétszeresén fedték át egymást (lásd: *52. ábra*).



52. ábra: **A régiók kialakítása**

A régiók kialakítása után még gyakran szükség van az egyes képek közötti színeltérések korrigálására is. Ezt az ER Mapper program a következő módon valósítja meg [22]: a képet 5·5 részre osztja fel, amelyekben kiszámítja a képstatisztikákat. Az átfedő területeken a megjelenítés során megvizsgálja az egyes képek részstatisztikáinak különbségeit és a megjelenítés során hisztogram-transzformációval (lásd: 2.5.2.5. Színtér-transzformációk című fejezet, 58. o.) egymáshoz igazítja azokat. Ennek eredményeként a mozaikolás általában megfelelően működik. Vannak azonban olyan esetek – ilyen például a nagy kiterjedésű vizek, erdők, homogén mezőgazdasági táblák –, amikor a szomszédos képrészek statisztikái ténylegesen is jelentősen különböznek, és a színkiegyenlítés érdekes dolgokat produkál. Ilyen esetekre fejlesztettem ki egy újabb mozaikolási eljárást. Ennek az a lényege, hogy a képstatisztikákat nem az 5·5-ös mozaikokban, hanem homogén képszegmensekre számoljuk ki. Abban az esetben, ha a szomszédos képeken azonos felszínborítás található, akkor elvégzi a színkiegyenlítést, amennyiben nem, akkor megkeresi a következő, kicsit távolabbi, de azonos felszínborítású szegmenst, és annak statisztikái alapján végzi el a színkorrekciót. Mivel az eljárás nagyon számításigényes, ezért csak ott célszerű alkalmazni, ahol a másik módszer nem ad megfelelő eredményt.

Az elkészített mozaikállományt a további felhasználásra alkalmassá kell tenni. Ez magában foglalja az utófeldolgozási munkákat, szükség esetén színkorrekciót, valamint a tömörítést. A színkorrekcióra azért lehet szükség, hogy az infraszínes képanyagot átalakítsuk a laikusok számára is könnyen értelmezhető, természetes színekhez közeli képanyaggá. Az általam kidolgozott eljárást a következőkben ismertetem. Az erdészeti gyakorlatban gyakran használt Kodak infraszínes film spektrális érzékenységét (lásd: *14. ábra*, 30. o.) tanulmányozva megfigyelhető, hogy egyrészt a film mindhárom rétegének van egy másodlagos maximuma ~440 nm-nél, amely a látható tartomány alsó határán van, és ezt általában szűrő segítségével kizárják, valamint azt, hogy az infravörös színre érzékenyített cián rétegnek van egy harmadlagos maximuma is, a ~530 nm-nél, amely a kékeszöld színnek felel meg. Ezek alapján egy változatos felszínborítású területről rendelkezésemre álló infraszínes és színhelyes színes képkivágatot hasonlítottam egymáshoz, és statisztikai módszerekkel meghatároztam a lineáris kombináció együtthatóit. Ezeket az együtthatókat utána még finomítani kellett. Így jutottam el ahhoz a színtranszformációhoz, amelynek működését a következő ábra (*53. ábra*) szemlélteti.

53. ábra: **Az infraszínes → színhelyes színes színtranszformáció forrása és eredménye**

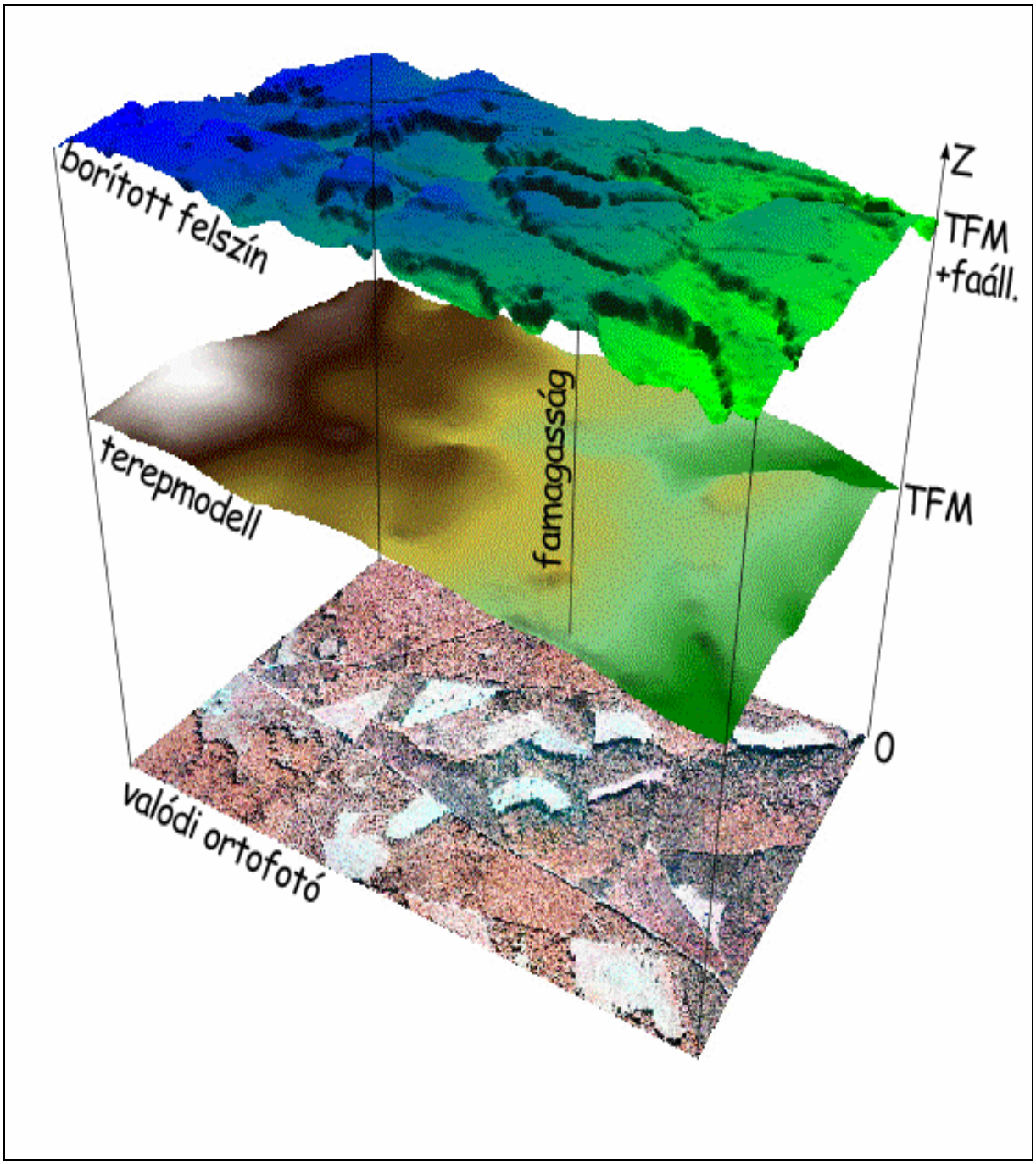
Az így előállított ortofotó-mozaikok esetében az volt a célom, hogy a digitális képfeldolgozás eszközeivel az űrfelvétel-idősorból levezetett adatokat egyrészt időben kiterjesszem, másrészt az osztályozást pontosítsam. Az idősor kiterjesztése igaz az 1962. évi ortofotó-mozaikra. Ebben az esetben megkíséreltem a fent leírt értelmezési szinteken (lásd: 3.3. Alkalmazott eljárások című fejezet, 74. o.) az űrfelvétel-idősorok esetében alkalmazott képfeldolgozási eljárásokat itt is alkalmazni. Sajnos a fekete-fehér képanyag a 2. szinten történő fenyő-lomb elkülönítést az elvárható pontossággal nem tette lehetővé. A nem megfelelő spektrális tartalom miatt a 4. értelmezési szinten sem láttam értelmét az elemzés elvégzésének. Ugyanakkor a 3. értelmezési szinten ez az ortofotó-mozaik jelentős információkkal bírt a korosztályok tekintetében. Már korábbi vizsgálataim [40. Király (1998)] során is szembetűnt, hogy az ortofotó texturális jegyei szignifikáns korrelációt mutatnak a korosztállyal. Éppen ezért a másik két időpontból származó ortofotó-mozaikot főként a 3. értelmezési szint korosztályainak pontosításához használtam fel.

A tájékozott felvételek másik felhasználási módja a 3D-s információk kinyerése. Ez megoldható automatikus úton és manuálisan is. Bár a manuális sztereó-fotogrametriai kiértékelés nagyságrendekkel jobb és pontosabb, mint az automatikusan előállított 3D-s modellek, de hatékonyság szempontjából a térkiértékelést csak speciális esetekben lehet megvalósítani, míg a felületmodell előállítása az ortofotókkal akár párhuzamosan is megvalósítható. Az automatikus felületmodell-meghatározásnak számos módszere ismert (lásd: 2.3.10. A digitális domborzatmodellek (DDM) és a távérzékelés, 43. o. és 2.5.1. Az előfeldolgozás, 52. o.). Ezek közül én a DigiTerra Map, valamint az Image Station SSK programok által biztosított automatikus felületmodell-meghatározást alkalmaztam.

A DigiTerra Map program tömbkiegyenlítő modulja az automatikus felületmodell-előállítást a tájékozott képek tárgytérben történő egyeztetésével valósítja meg (lásd: 2.5.1. Az előfeldolgozás, 52. o.)

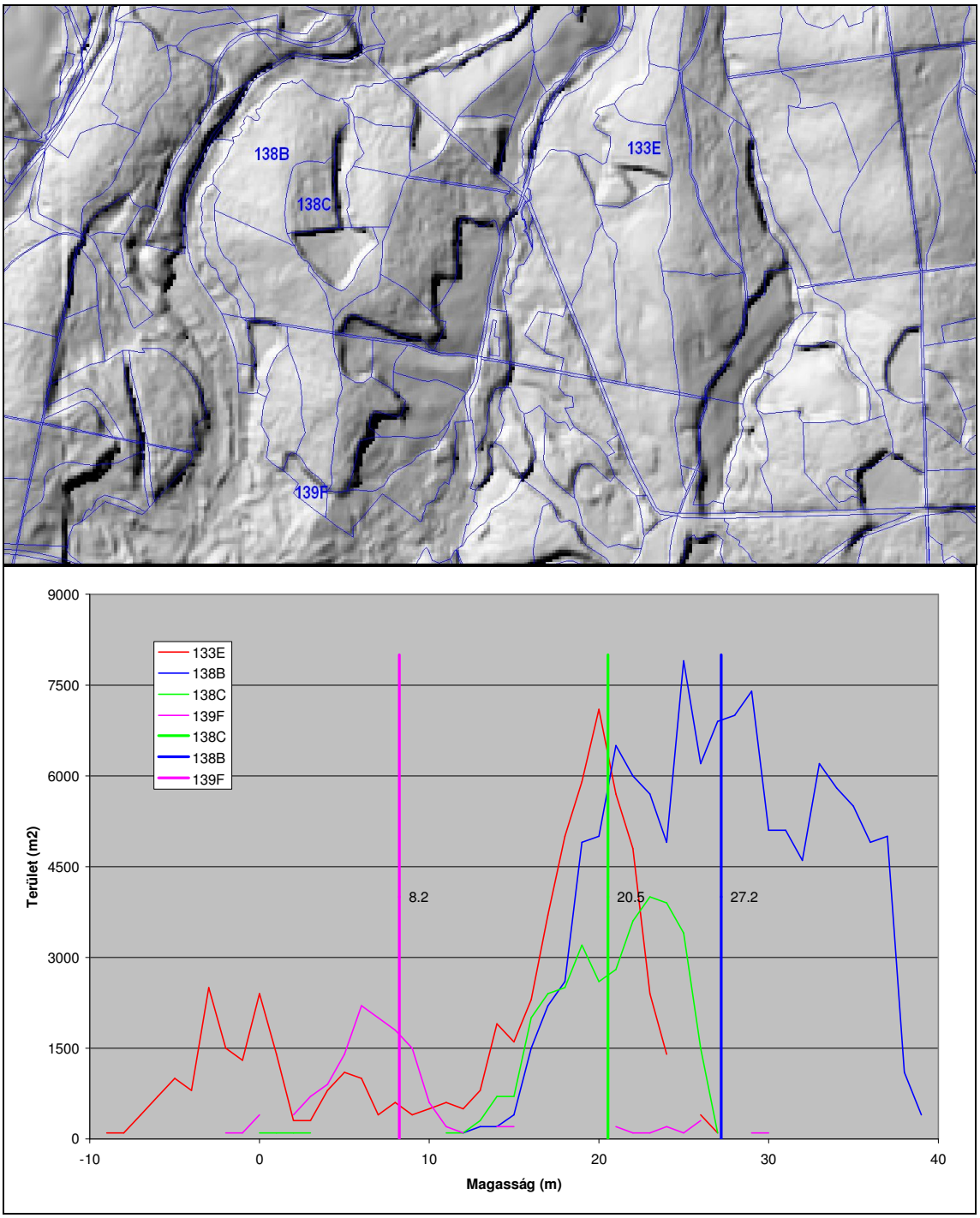
Az Image Station SSK program Image Station Automatic Elevation (ISAE) modulja biztosítja ezt a funkciót.

Az ilyen, képegyeztetés útján előállított felületmodellek tulajdonsága, hogy az ún. borított felszín modelljét határozza meg. Ez a magassági modell minden olyan objektumot tartalmaz, amely a képeken leképződik, és amelyektől a terep nem látható, mint pl. a vegetációt, az épületeket stb. Az egyes programok számos eszközt kínálnak arra, hogy ebből a borított felszín modellből a terepmodellt előállítsuk. Ezt általában minimum- és görbületszűrők (lásd: 2.5.2. A képjavítás, 56. o.) alkalmazásával, korrelációvágás és egyéb módszerek segítségével érik el. Amennyiben azonban a felületmodell-meghatározásnak a célja nem a domborzatmodell előállítása, akkor ilyen utófeldolgozási munkákra nincsen szükség. Erdészeti szempontból a módszer azért érdekes, mert a faállományok magasságát tudjuk segítségével meghatározni. Ebben az esetben a faállomány-magasságok modellje a borított felszín és a terepmodell különbségeként áll elő (*54. ábra*).



54. ábra: **A különböző felületmodellek faállománnyal borított terület esetén**

A faállomány-magasságok modellje alkalmas a famagasság bármely pontban történő meghatározásához. Ezen túlmenően azonban számos egyéb lehetőséget is kínál. Kiszámolhatjuk segítségével a famagasságok eloszlását az erdőrészletekre (*55. ábra*). Pár jellemző esetet az alábbiakban foglalok össze.



55. ábra: **A megvilágított borított felszín-modell az erdőrészlet-határokkal, valamint pár tipikus erdőrészlet faállomány-magassági modelljének eloszlása a számított átlagmagasságokkal**

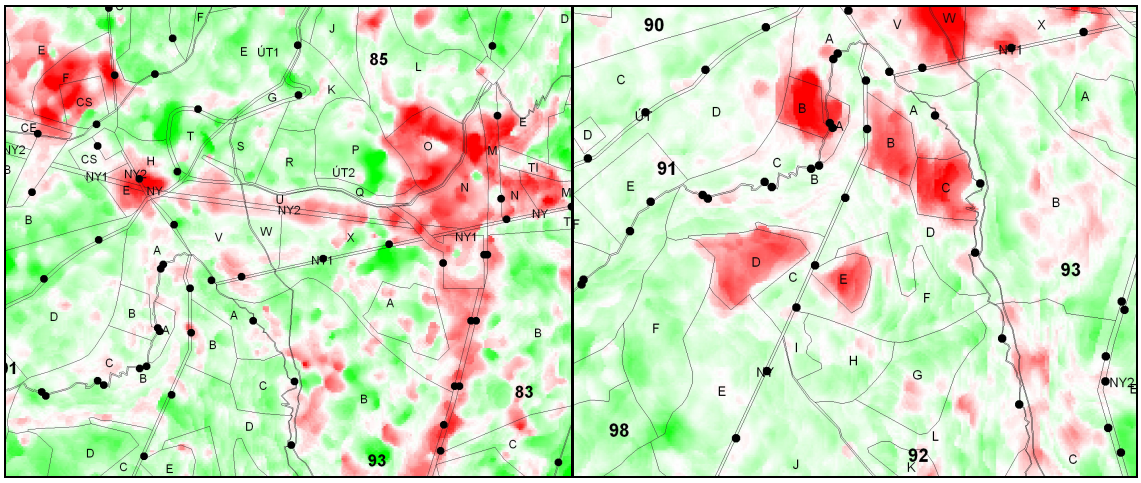
A Sopron 139 F erdőrészletet teljesen véghasználták (bíbor vonal). Ugyanakkor az erdőrészlet-határon van egy-két olyan cella, ahol a szomszédos részletek magassága jelenik meg. A 133 E erdőrészlet egy részét levágták (piros vonal). Ez jellegzetesen kétcsúcsú eloszlást mutat, az egyik 0, a másik 20 m körül. A 138 B erdőrészlet egy nagyobb részlet (12 ha), ahol a famagassági-modell is jobban szór. Ugyanakkor a 138 C részlet egy kisebb (3,5 ha), itt a magasságok sem szórnak annyira. A vastagabb függőleges vonalak a geoinformatikai módsze-

rekkel kiszámolt átlagos erdőrészlet-magasságot mutatják. Ezt a következő módon számoltam:

$$\overline{H} = \frac{\int ds \cdot dh}{\int ds} \qquad [31.\ \text{egy.}]$$

A képlet integrálást mutat, de lényegében a raszteres térinformatikában gyakran alkalmazott végeselemek módszerét alkalmaztam, ahol az adott területet véges elemi részre bontjuk fel. A faállomány-magassági modellt kiválasztott felbontásban raszterizáljuk. Meghatározzuk minden egyes elemi cellában a modell átlagos magasságát, és ez alapján kiszámítjuk a hasábok térfogatát, amelyet elosztunk az adott részletet fedő cellák területével. Tehát annak a hasábnak a magasságát keressük, amelynek ugyanakkora a térfogata és az alapterülete, mint a faállomány-modellé az adott erdőrészletben. A 133 E részlet esetében nem láttam értelmét az átlagmagasság feltüntetésének. A 138 B és C részletekben több fafajt is találunk, de az, hogy az eloszláson látható egyes csúcsok az egyes fafajokhoz lennének köthetők, annak igazolása részletesebb vizsgálatokat igényelne. A 139 F erdőrészlet esetében az átlagmagasságot jelentősen megnöveli a szomszédos részletekből származó magasságok.

A légifénykép-idősorból előállított borított felszín modelleknek a monitoring során nagyon nagy szerep jut. Egyrészt ezekből a modellekből már közvetlenül is levezethetők az egyes állományok magassági növekedései, valamint a különböző használatok és erdőfelújítások (*56. ábra*).



56. ábra: **A borított felszín modellek változása. 1962–1991, valamint 1991–1999 (Részlet) színskála: -20 m (piros) – 20 m (zöld)**

Ezek az adatok azonban még értékesebbé válnak, ha a digitális képosztályozás során nyert adatokat egészítjük ki velük. Ezáltal minden értelmezési szinten – de főként a részletesebb 3. és 4. szinten – szélesebb körű és pontosabb adatokat kapunk.

4. Eredmények

4.1. A mintaterületre vonatkozó eredmények

4.1.1. Erdőborítás

A „Soproni-hegység” mintaterület esetében az 1. értelmezési szinten (lásd: 3.3. Alkalmazott eljárások című fejezet, 74. o.) az erdőborításokat határoztam meg.

A Landsat-űrfelvétel idősorai esetében az erdő-nem erdő osztályozáshoz kialakítottam egy vegetációs index alapú osztályozót (lásd: 2.4. A távérzékelés és a vegetáció, 47. o.). Az ezek alapján elvégzett osztályozások eredményei a *XXV. táblázat*-ban találhatók.

A táblázat adataiból jól látható, hogy a vizsgált időtartam alatt az erdőborításban jelentős változás nem volt. Ugyanakkor megfigyelhető a fenyő állományok kismértékű visszaszorulása a kilencvenes években.

A Spot műhold pánkromatikus felvételének ilyen szintű kiértékelése megmutatta, hogy az általam kidolgozott egyszerű eljárás jól alkalmazható közepes léptékű erdő-nem erdő osztályozásra. A Spot P alapú erdőosztályozó az erdőterületeken kívül még a vízzel borított területeket is az erdő kategóriába sorolja. Éppen ezért a pontosság növelése miatt szükséges egy vízrajzi térkép használata is. Általában azonban elmondható, hogy egy terület vízrajza nem változik jelentősen, valamint, hogy a vízfelszínek osztályozására számos egyéb, távérzékelés alapú módszer is ismeretes. A következő táblázat (*XXIV. táblázat*) a Spot P alapú osztályozó pontosságvizsgálatát tartalmazza.

XXIV. táblázat: **A Spot P alapú osztályozó pontossága**

SPOT		CORINE LAND COVER												
		11-Lakott területek	12-Ipari területek	13-Bányák	14-Mesterséges zöldterületek	21-Szántóföldek	22-Állandó növényi kultúrák	23-Legelők	24-Vegyes mező-gazdasági területek	31-Erdők	32-Cserjés és/vagy lágyszárú növényzet	41-Szárazföldi vizenyős területek	51-Kontinentális vizek	Összesen
CLC%	Erdő	7,7%	6,5%	3,9%	24,6%	2,9%	6,8%	7,7%	10,1%	95,3%	51,4%	44,5%	80,3%	43,8%
	Nem erdő	92,3%	93,5%	96,1%	75,4%	97,1%	93,2%	92,3%	89,9%	4,7%	48,6%	55,5%	19,7%	56,2%
	Összesen	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
SPOT%	Erdő	1,2%	0,4%	0,1%	0,5%	1,0%	1,9%	2,0%	1,1%	84,8%	6,5%	0,4%	0,1%	100,0%
	Nem erdő	10,9%	4,6%	1,0%	1,2%	27,5%	20,1%	18,8%	7,6%	3,3%	4,8%	0,4%	0,0%	100,0%
	Összesen	6,6%	2,8%	0,6%	0,9%	15,9%	12,1%	11,4%	4,7%	39,0%	5,6%	0,4%	0,0%	100,0%
ÖSSZ%	Erdő	0,5%	0,2%	0,0%	0,2%	0,5%	0,8%	0,9%	0,5%	37,1%	2,9%	0,2%	0,0%	43,8%
	Nem erdő	6,1%	2,6%	0,6%	0,7%	15,4%	11,3%	10,5%	4,2%	1,8%	2,7%	0,2%	0,0%	56,2%
	Összesen	6,6%	2,8%	0,6%	0,9%	15,9%	12,1%	11,4%	4,7%	39,0%	5,6%	0,4%	0,0%	100,0%

A felső részen (CLC%) az látható, hogy az adott kategórián belül az osztályozó mennyit osztályozott „erdő”-nek és „nem erdő”-nek. Itt a jelentősebb hibák: 51-Kontinentális vizek; 32-

Cserjés és/vagy lágyszárú növényzet; 41-Szárazföldi vizenyős területek; 14-Mesterséges zöldterületek. Ezek közül a vizes területek egyértelműek. A 32. kategória esetében tudni kell, hogy a CLC-ben az erdőfelújítások is ilyen kategóriaként szerepelnek.

A középső részen (SPOT%) látható, hogy az űrfelvétel alapján „erdő”-ként osztályozott területek közül – a 31-Erdők-ön kívül – a már említett 32. kategória számottevő.

A táblázat alsó részén található (ÖSSZ%) összesítésben látható, hogy a fent említett 32. kategórián kívül azok az erdőterületek jelentősek (>1%), amelyeket az osztályozó „nem erdő”-nek osztályozott. Ez egyrészt adódhat a különböző időpontokból, valamint az erdőfelújításoknak a 31. és a 32. kategóriák közötti bizonytalan helyéből.

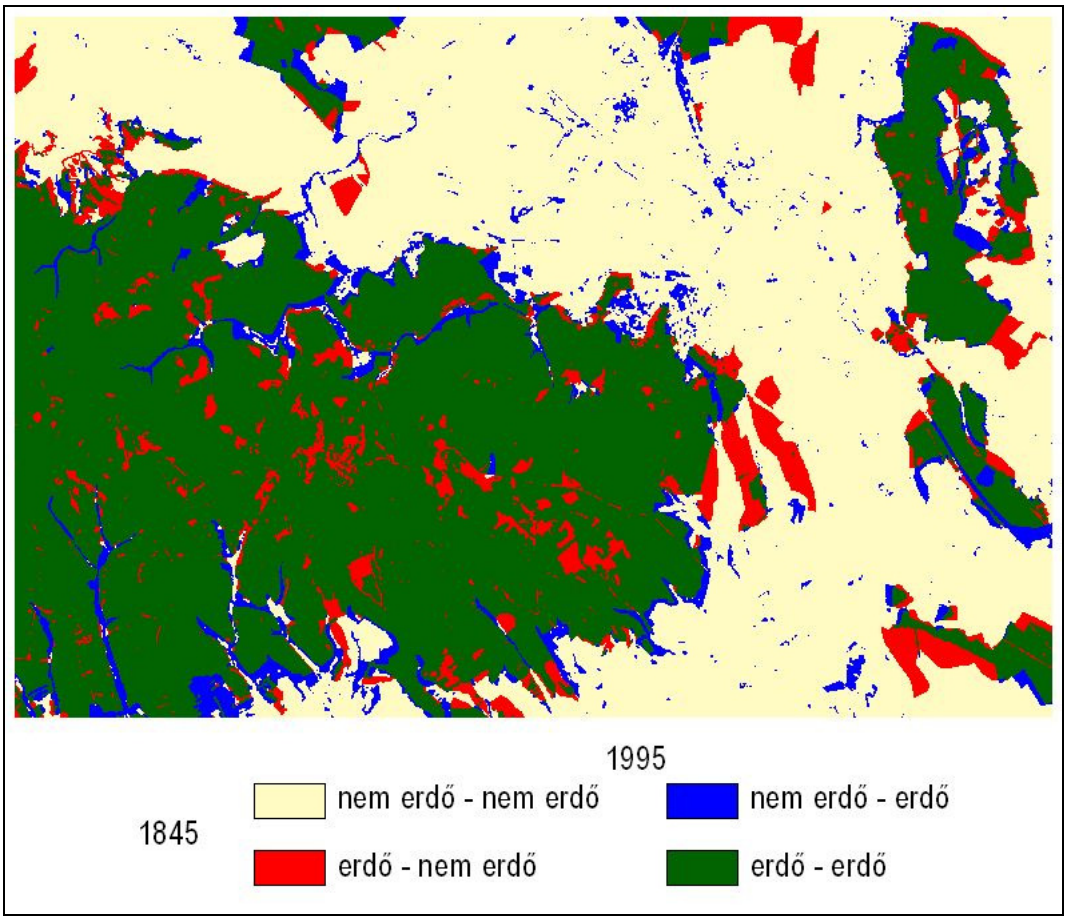
Az archív katonai felmérés térképeivel kiegészített idősor már jóval szemléletesebb képet ad a mintaterület erdőinek változásáról (*XXV. táblázat*).

XXV. táblázat: **A „Soproni-hegység” mintaterület erdőborításának változása**

Évszám		**1784**	**1845**	**1923**	**1983**	**1987**	**1991**	**1995**	**1998**	**2000**	**2002**
Forrás		**I. katonai**	**II. katonai**	**IV. katonai**	**MSS**	**TM**	**TM**	**SPOT**	**TM**	**ETM+**	**ASTER**
		Terület (ha)									
Magyarország	Nem erdő	8 150	8 388	8 918	8 890	8 881	8 762	8 621	8 656	8 891	
	Erdő	6 688	6 450	5 920	5 921	5 957	6 076	6 227	6 182	5 947	
	Fenyő				1 547	1 847	1 493		1 253	1 048	1 260
	Lomb				4 374	4 110	4 583		4 929	4 899	
	Összesen	*14 838*	*14 838*	*14 838*	*14 811*	*14 838*	*14 838*	*14 848*	*14 838*	*14 838*	
Ausztria	Nem erdő	4 105	3 632	3 998	4 111	4 069	3 898	3 698	3 598	3 766	
	Erdő	4 182	4 655	4 289	4 280	4 219	4 389	4 609	4 689	4 521	
	Fenyő				956	1 165	971		1 057	862	1 175
	Lomb				3 324	3 053	3 418		3 632	3 658	
	Összesen	*8 287*	*8 287*	*8 287*	*8 391*	*8 287*	*8 287*	*8 308*	*8 287*	*8 287*	
Teljes mintaterület	Nem erdő	12 255	12 020	12 916	13 001	12 950	12 660	12 320	12 254	12 657	
	Erdő	10 870	11 105	10 209	10 201	10 175	10 465	10 836	10 871	10 468	
	Fenyő				2 502	3 012	2 464		2 310	1 910	2 435
	Lomb				7 699	7 163	8 001		8 561	8 558	
	Összesen	*23 125*	*23 125*	*23 125*	*23 203*	*23 125*	*23 125*	*23 156*	*23 125*	*23 125*	

Amennyiben ezt, a teljes vizsgált időtartamot nézzük, akkor megállapítható, hogy a mintaterület magyar és osztrák oldalán, valamint teljes egészében is az erdőterületekben jelentős változás nem volt.

Az átalakulási mátrix mellett további információkkal szolgálnak az átalakulási térképek. Ezek nemcsak azt mutatják, hogy területileg milyen változások voltak, hanem a megváltozott területek elhelyezkedését is. Két kiválasztott időpont alapján készült, 150 évet felölelő átalakulási térképet mutat az *57. ábra*.



57. ábra: **A „Soproni-hegység" mintaterület erdőborításának átalakulási térképe (1845, 1995)**

Az átalakulási térkép jól mutatja, hogy bár az erdők területe nem változott jelentősen, a mintázat megváltozott. A mintázat változásához fontos megjegyezni, hogy a felhasznált forrásadatok adatsűrűsége nem egyforma. A 2. katonai felmérés időpontjában az apróbb erdőfoltokat nem térképezték. A Spot felvétel alapján készült erdőtérképen pedig a pár éven belüli véghasználati és felújítási területek „nem erdő"-ként szerepelnek

4.1.2. Erdőtípus

A „Soproni-hegység" mintaterület esetében a 2. értelmezési szinten (lásd: 3.3. Alkalmazott eljárások fejezet, 74. o.) a fő erdőtípusokat határoztam meg. Ezek alatt a fenyő és lombos állományokat értem. A Landsat-űrfelvétel idősorai esetében a fent említett, vegetációs index alapú osztályozó alkalmas az erdőn belül a fenyő és lomb elkülönítésére is. A felhasznált történelmi forrásadatok közül nem volt mindegyik alkalmas az erdőn belüli fenyő és lombos állományok elkülönítésére. Az előző, *XXV. táblázat*ban találhatók a fő fafajnem által elfoglalt területek is.

Mint az a terület erdészettörténetéből is következik (lásd: A vizsgált terület: a Soproni-hegység című fejezet, 66. o.), az „eredetileg" – a XVIII. század végén – itt megtalálható, túlnyomórészt lombos állományt a XIX. század végén és a XX. század elején felvirágzó erdőgazdálkodás jelentős mértékben átalakította. Az 1990-es évek itteni jelentős szú-gradációja nyomán pedig egyes kitermelt fenyőállományok helyére már lombosokat telepítenek. Ugyan-

akkor az általam feldolgozott legfrissebb, 2002. évi ASTER felvétel a fenyő állományok újbóli előretörését mutatja.

4.1.3. Erdő- és korosztálytípus

A „Soproni-hegység” mintaterület esetében a 3. értelmezési szinten (lásd: 3.3. Alkalmazott eljárások fejezet, 74. o.) erdő- és korosztálytípusokat különítettem el. Az idősorok elemzésénél a korosztályok szerepe megnövekedik, mivel hosszú távon a korosztályszerkezet változásából sok mindenre lehet következtetni.

A mintaterület szempontjából különösen érdekes az, hogy a véghasznált erdők felújítása során milyen fafajt alkalmaznak. Éppen ezért ezen a szinten az kapott nagy hangsúlyt, ha az idősorban előtte lévő felvétel, és az aktuális között jelentős változás – tehát véghasználat történt. Mivel azonban a fiatal telepítések esetében még jó pár évig nagyon nehéz meghatározni a fafajt a felhasznált forrásadatok alapján (de még a fafajcsoportot is), ezért ezen a szinten sajnos több osztályt is össze kellett vonnom. Itt egy-két esetben pontosítást jelentett a légifényképekből előállított ortofotó-mozaikok vizsgálatokba történő bevonása.

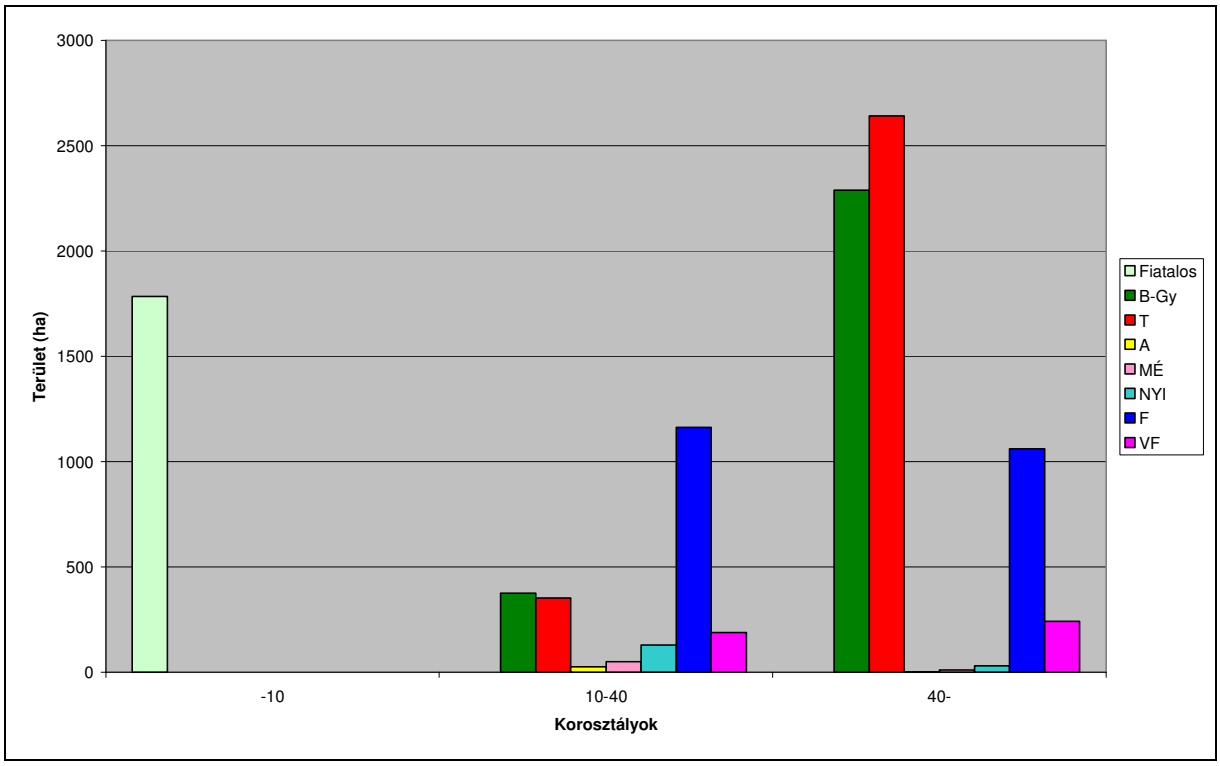
Ezen az értelmezési szinten jól lehet használni a távérzékelési módszerek segítségével előállított borított felszín modellt (lásd: 2.3.10. A digitális domborzatmodellek (DDM) és a távérzékelés, 43. o.; 2.5.1. Az előfeldolgozás, 52. o. és 3.3.5. Légifényképek, 94. o.). Ezen modellek alkalmazásával a korosztályokat jelentősen tudtam pontosítani.

Az ezen az értelmezési szinten kapott eredményekre példa a *XXVI. táblázat* és az *58. ábra*.

XXVI. táblázat: **A Soproni-hegység erdő- és korosztálytípusai az 1998-as Landsat űrfelvétel és az 1999 évi borított felszínmodell alapján**

Korosztályok	B-Gy	T	A	MÉ	NYI	F	VF
-10	17 851 770						
10-40	1 874 393	1 765 588	125 667	248 688	643 885	5 813 321	944 822
40-	11 448 863	13 204 906	10 867	54 205	155 122	5 302 225	1 208 247

Bár az így kapott korosztályok csak nagyon durva felosztást tesznek lehetővé, azért már így is megfigyelhető a fenyő állományok eltérő korosztály-szerkezete. Már ilyen széles korosztályok esetében is lehetőség van arra, hogy a különböző időpontból előállított osztályozások alapján a faállományt modellezzük. A következő értelmezési szinten azonban finomabb korosztályok elkülönítésére van lehetőség, ezért a modellezést ott mutatom be (lásd *59. ábra*).



58. ábra: **A Soproni-hegység erdő- és korosztálytípusainak diagramja**

4.1.4. Erdőrészlet szintű vizsgálatok

A „Soproni-hegység” mintaterület esetében a 4. értelmezési szinten (lásd: 3.3. Alkalmazott eljárások fejezet, 74. o.) erdőrészlet szintű vizsgálatokat végeztem. Itt az elsődleges cél az volt, hogy a napi gyakorlatban is használható (elsősorban erdőfelügyelet) monitorozó rendszer alapjait teremtsem meg. A rendszernek nem célja a terepi munka kiváltása, pusztán annak hatékonyabbá tétele.

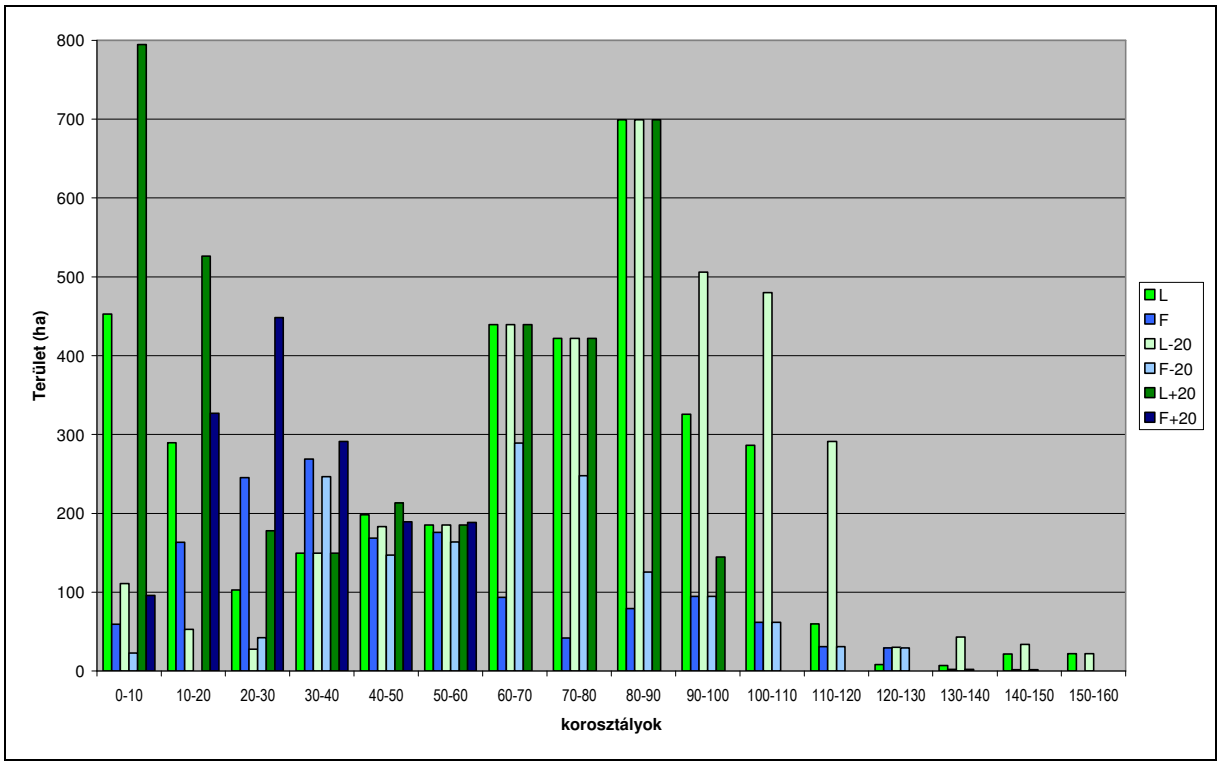
Az egyes erdőrészletek, mint egységek, alkalmasak arra, hogy az űrfelvételekből, és egyéb digitális képi adatokból mintát vegyünk. Az ezen minták idősorainak elemzéséből számos következtetést lehet levonni. A korábbi évekből származó, „aktuális” referenciához viszonyítva a használatok, véghasználatok és felújítások könnyen felismerhetők, valamint azok az esetek, amikor az addig homogén részlet elveszti egységes jellegét, tehát valamilyen tervezési beavatkozásra van szükség. Az erdőrészlet szintű spektrális adatbankok létrehozása számos lehetőséget kínál mind a napi gyakorlat, mind a kutatás számára. Ezek az adatok, kiegészítve még a távérzékelés segítségével meghatározott faállomány-magasságok adataival (lásd: 2.3.10. A digitális domborzatmodellek (DDM) és a távérzékelés, 43. o.; 2.5.1. Az előfeldolgozás, 52. o. és 3.3.5. Légifényképek, 94. o.) további következtetéseket tesznek lehetővé.

XXVII. táblázat: **Erdőrészletek távérzékelési adatainak statisztikái**

TM B3	1991				1998			
Erdőrészlet	**MIN**	**MAX**	**ATLAG**	**SZORAS**	**MIN**	**MAX**	**ATLAG**	**SZORAS**
Sopron 129A	16	22	17,757	1,149	15	21	17,270	1,482
Sopron 129B	18	41	**31,702**	**5,189**	17	24	18,654	1,231
Sopron 129C	14	19	16,500	1,500	21	26	**23,333**	1,886
Sopron 129D	15	19	16,750	0,931	25	33	**29,679**	2,229
Sopron 129E	16	19	17,850	0,760	19	32	**27,775**	2,465
Sopron 129F	15	19	17,464	0,823	23	31	**27,107**	1,970
Sopron 129G	15	20	17,620	0,978	17	26	**22,220**	1,814
Sopron 129H	15	19	17,469	0,968	16	19	16,906	0,723
Sopron 129I	15	20	17,483	1,133	14	22	16,793	1,627
Sopron 129J	16	19	17,650	1,014	17	18	17,250	0,433
Sopron 129K	17	20	18,278	0,826	16	20	16,778	0,875
nDSM	**1991**				**1999**			
Erdőrészlet	**MIN**	**MAX**	**ATLAG**	**SZORAS**	**MIN**	**MAX**	**ATLAG**	**SZORAS**
Sopron 129A	17	33	25,078	3,139	3	36	24,277	6,286
Sopron 129B	-2	19	**2,408**	3,623	-1	10	**3,757**	1,786
Sopron 129C	-4	9	**0,605**	2,084	-3	4	0,941	1,814
Sopron 129D	7	33	22,989	5,391	-1	13	2,158	1,952
Sopron 129E	13	32	23,278	3,162	-2	23	2,127	3,323
Sopron 129F	21	34	28,217	1,945	-7	5	0,648	1,786
Sopron 129G	19	34	27,424	2,806	-3	22	2,815	3,243
Sopron 129H	18	35	26,417	3,546	19	39	29,005	3,847
Sopron 129I	16	25	19,956	1,731	16	26	21,623	1,773
Sopron 129J	19	33	24,235	2,448	20	32	25,861	2,259
Sopron 129K	15	31	23,163	2,961	12	28	23,262	2,373

A táblázat adataiból jól látszik, hogy egyes erdőrészletek esetében (Sopron 129C) a véghasználat a spektrális adatok alapján nem derül ki, ugyanakkor a famagasság-modell alapján egyértelműen detektálható. Más erdőrészletek esetében (129B) a véghasználat a spektrális adatok alapján is kiderül, de ugyanakkor a következő felvétel adatai alapján nem lehet megállapítani, hogy milyen fafajjal újították fel az adott erdőrészletet, ez csak majd az idősor rákövetkező eleméből derül ki. Vannak olyan erdőrészletek is (129B) amelyeknél a fiatalkori magasságnövekedés is megfigyelhető a famagasság-modellek alapján.

A spektrális adatbank alapú osztályozó segítségével a különböző használatok könnyen detektálhatók (lásd *13. melléklet*). Az osztályozó minden egyes erdőrészlethez hozzárendeli azt, hogy melyik felvétel alapján detektálta a változást, azaz melyik évben történt meg a beavatkozás. Mivel nem rendelkeztem minden évből űrfelvétellel, így a köztes időben történt beavatkozások legkorábban a következő felvételen osztályozhatók. Az osztályozott véghasználatok alapján a felújítások kora jól becsülhető. Ezek alapján a mintaterület korszerkezete is vizsgálható. Amennyiben az idősor által lefedett, körülbelül húsz esztendőben megvizsgáljuk a korosztályok változását, és ezek alapján modellezzük, hogy az elkövetkező húsz évben ez milyen hatással lesz a hegyvidéki erdőkre, akkor meglehetősen lehangoló képet kapunk (*59. ábra*).



59. ábra: **A mintaterület fő fafajnemeinek koreloszlása 20 évvel ezelőtt, jelenleg, és 20 év múlva L: Lombos; F: Fenyő**

Látható, hogy az elmúlt évek gazdálkodásának eredményeként a korosztály-szerkezet jelentősen fiatalodik. Különösen igaz ez a fenyő állományokra, de a lombosok esetében is megfigyelhető. Ha a tendencia tovább folytatódik, akkor a fenyők esetében jelentősen, a lombosok esetében kisebb mértékben redukálódik a vágáskor is.

Abban az esetben, ha megvizsgáljuk egy adott erdőrészleten belül mind a spektrális, mind a magassági adatok változatosságát, akkor az erdőrészletek megosztására tehetünk javaslatokat. A rendszer lehetőséget ad az eloszlási diagrammok megjelenítésére (lásd *55. ábra:* A megvilágított borított felszín-modell az erdőrészlet-határokkal, valamint pár tipikus erdőrészlet faállomány-magassági modelljének eloszlása a számított átlagmagasságokkal, 102. o.) Ezek jelentősen több információt adnak az egyszerű statisztikáknál. Olyan esetben, amikor az erdőrészletek egy részén történt beavatkozás, akkor ezek jellegzetesen kétcsúcsú eloszlást mutatnak, amelyek az eloszlási diagram alapján könnyen detektálhatók.

A spektrális adatbank alapú osztályozó jelenleg a használatokat könnyen érzékeli. Ugyanakkor az egyes erdőrészletek fejlődését korlátozó finomabb hatásokat nem tudja biztosan azonosítani. A különböző érzékelők spektrális érzékenysége is különböző, az „abszolút” spektrális adatbank létrehozásának számos nehézsége adódik ebből.

A jelenlegi működés során, amikor a spektrális adatokat az adott erdőrészlethez csatolom, akkor azok térbelisége elvész, tehát nem tudom például egy adott részlet esetében a felújítás mintázatát. Ahogy a spektrális adatbankból a valószínűségek számítása megoldható valós időben, hasonlóan az adatbankot is elő lehetne állítani kvázi-valósidőben. Ehhez azonban jelentősen korszerűbb fejlesztői környezetre lenne szükség.

4.2. Általános eredmények

Ebben a fejezetben összefoglalom azokat az eredményeket, amelyeket a munka során elértem, és a mintaterülettől függetlenül általános értelemben is használhatók.

4.2.1. SPOT P alapú erdőosztályozás

A SPOT műholdak pánkromatikus érzékelői (lásd: 2.3.9.2. A SPOT műholdrendszer, 40. o.) által készített felvételek egy egyszerű határértékkel alkalmasak erdő-nem erdő osztályozásra. A módszer segítségével nagy területről gyorsan tudunk erdőtérképet készíteni. Szükséges azonban a vízfelületek ismerete, mert ezek az erdőterületektől – ezen felvételek alapján – nem elkülöníthetők. Ezt vagy meglévő térképi adatbázisok segítségével, vagy egyéb távérzékelési adatforrások bevonásával valósíthatjuk meg.

4.2.2. Vegetációs index alapú erdőosztályozás

Ezt az erdőosztályozást eredetileg Landsat MSS/TM/ETM+ érzékelőkre dolgoztam ki. Nagy előnye, hogy az erdő-nem erdő osztályozáson túl a fenyő-lomb osztályozást is elvégzi. Az osztályozó átparaméterezésével más távérzékelési forrásadatokra is alkalmazható, amennyiben rendelkezik vörös és közeli infravörös sávval. Az osztályozó kifejlesztése során lettem figyelmes arra is, hogy az űrfelvételek vörös és közeli infravörös sávjában ábrázolt szóródási diagramon mind a Fertő-tó, mind a Fertő nádas régiója teljesen elkülönülnek (lásd *37. ábra:* A mintaterület és környékét lefedő Landsat TM űrfelvétel szóródási diagramja a vörös és a közeli infravörös sávban, 80. o.). Ezeknek az osztályozásához fejlesztettem ki az ellipszis-osztályozót, amelyet az erdő-osztályozásban is nagyobb pontossággal lehet alkalmazni, mint az előbb említett módszert.

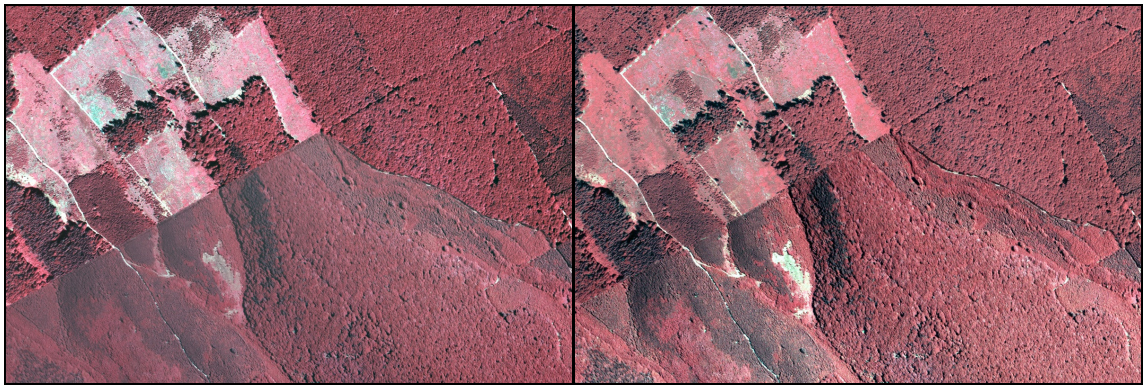
4.2.3. Spektrális adatbank alapú osztályozó

Az űrfelvételek – és egyéb raszteres adatok – osztályozásának újszerű módja az, amikor nem az osztályozandó felvétel egyes pixeleit, vagy azoknak csoportjait vizsgáljuk, hanem azt, hogy az osztályozás szempontjából fontos vektoros referencia-adat – amely az esetemben a digitális üzemi térkép volt, de ugyanúgy lehet kataszteri térkép, vagy mezőgazdasági parcellatérkép is – meghatározott egységeire milyen az űrfelvétel gyakorisági diagramja (lásd *39. ábra:* Egy kiválasztott erdőrészlet spektrális változásai, 82. o.). Ebből utána valószínűségeket számolhatunk, amelynek segítségével az adott terület-egységen a változásokat kimutathatjuk (29. egyenlet). Az osztályozás még hatékonyabb lehet, ha a számunkra érdekes kategóriákhoz előállítjuk azokat a spektrális jegyeket, amelyek referenciaként szolgálhatnak az osztályozásban. Ha mindezt nem csak statikusan, egy időpontra, hanem idősorok alapján az adott felszínborítás fejlődési adatsorát is előállítjuk, akkor olyan osztályokat is elkülöníthetünk, amelyeket egy felvétel alapján nem (*42. ábra:* Különböző faállomány-típusok fejlődése a Landsat űrfelvétel 3. és 4. sávjában. A feltüntetett számok a faállomány korát jelentik., 85. o.). A spektrális adatbank alapú osztályozó alkalmas az űrfelvételeken túl más raszteres adat, például a borított felszínmodellek integrálására is.

4.2.4. Légifénykép-mozaikolás

A légifényképek geometriai korrekciója után, az egyes ortofotók mozaikolására kidolgozott módszer széles körben alkalmazható. Bár igényel manuális munkát is, ez a képek tájékozásához viszonyítva nem jelentős, és segítségével teljesen egyöntetű mozaik állítható elő.

A mozaikolás során a színkiegyenlítés az ortofotó-mozaik elkészítésének az egyik legkritikusabb pontja. A legtöbb szoftver által kínált megoldások általában megfelelők, vannak azonban olyan esetek, amikor kudarcot vallanak. Az ilyen esetekben alkalmazhatjuk az általam kidolgozott színkiegyenlítést, ahol az azonos felszínborítású szegmensek színegyensúlyát igazítjuk egymáshoz (*60. ábra*).



60. ábra: **Színkiegyenlítés az ER Mapper program segítségével (bal oldalon), valamint a szegmensek egyeztetésével (jobb oldalon)**

4.2.5. Infraszínes → színhelyes színes színtranszformáció

Ez a színtranszformáció általánosan alkalmazható olyan esetben, amikor infraszínes filmanyagra készült felvételből a természetes színekhez közeli kompozitot szeretnénk elérni. A transzformáció együtthatóit a *XXVIII. táblázat* tartalmazza. A hatását pedig a 99. oldalon található *53. ábra* szemlélteti

XXVIII. táblázat: **Az infraszínes – természetes színes színtranszformáció együtthatói**

	Eredmény (Színhelyes)		
Forrás (IR)	**R**	**G**	**B**
R	0,5	0,5	-0,3
G	1,1	-0,5	0,3
B	-0,6	1,0	0,7

4.3. Következtetések

Munkám során az vezérelt, hogy távérzékelési módszerekkel minél több információt tudjak gyűjteni az erdőkről. Közben rengeteg olyan részfeladatba ütköztem, amelyeket szintén meg kellett oldani, de ugyanakkor a kitűzött cél érdekében közvetlenül nem hasznosult.

A távérzékelés alkalmas nagy területekről egységes erdőtérkép készítésére. Bár azt hihetnénk, hogy erre hazai viszonylatban egyáltalán nincsen szükség, mivel rendelkezünk ilyennel, de ugyanakkor azok a térképek az erdész szakma szemüvegén keresztül készültek, és az ezekből készíthető terület-kimutatások gyakran nem felelnek meg a mi szakmánk, illetve más szakterületek elvárásainak.

Mivel nagy területekről egységes módszerrel tudunk erdőtérképet előállítani, ráadásul nemcsak a jelen állapotról, hanem archív felvételek alkalmazásával egy bizonyos időintervallumon belül szinte bármilyen időpontból, ezért a távérzékelés egy adott terület monitorozásában szükségszerűen alkalmazandó módszer. Ráadásul a digitális képfeldolgozás eszközeivel az archív térképek is feldolgozhatók, ezáltal a monitorozási tevékenységünk időben kiterjeszthető.

Az általam kidolgozott vegetációs index alapú osztályozók a közepes felbontású optikai érzékelőkkel készített űrfelvételek esetében könnyen alkalmazható, feltéve, hogy rendelkezik érzékelési tartománnyal a látható vörös, valamint a közeli infravörös tartományban, de ez napjainkban a legtöbb optikai szenzor esetében igaz. Az osztályozó alkalmas az erdők elkülönítésére, valamint ezen belül a fenyő-lomb elkülönítésre is. Az egyik osztályozó mindenféle előkészítés nélkül is alkalmas az osztályozás elvégzésére, a másik, az ellipszis osztályozó, rövid előkészületek után alkalmazható. Segítségükkel egy adott terület gyors monitorozását valósíthatjuk meg.

Számos digitális képfeldolgozási eljárást fejlesztettem ki a különböző archív, valamint aktuális térképek feldolgozásához. Ezek közül jelentősebb a felvételek tájékozásához kidolgozott többlépcsős transzformáció, amely során az egyes térképszelvényeket egy helyi, a szelvények rendszerébe illesztjük, majd az összeillesztett állományt transzformáljuk a megfelelő vetületi rendszerbe. Az eljárás számos tanszéki kutatás során is nagyon jónak bizonyult. Kidolgoztam több olyan algoritmust is, amely alkalmas a különböző képi információk alapján történő automatikus művelési ág (ezen belül is elsősorban az erdő) meghatározására.

Vizsgálataimba mérőkamerás légifényképeket is bevontam. Ezeket a felvételeket a digitális fotogrammetria eszközkészletével dolgoztam fel, belőlük ortofotó-mozaikokat állítottam elő. Az ortofotó-mozaikok mind a térinformatikai felhasználók, mind az erdész szakemberek számára olyan háttér-adatot jelentenek, amely képi információ-tartalmával és geometriai pontosságával a szakmai munkát nagyban segíti, és metrikus volta miatt méréseket is lehetővé tesz.

Számos távérzékelési forrásadatból borított felszínmodellt állítottam elő. A borított felszínmodelleket az erdész szakmában széleskörűen lehet alkalmazni. A különböző erdőmérnöki feladatok során a fa- és állomány-magasságok mérésének rendkívül nagy a jelentősége. A hagyományos, földi úton történő méréseket sokszor nagyon nehéz kivitelezni, és a megbízhatóságuk is nagyban függ a mérést végző személytől. További problémákat okozhat változatos

vagy mozaikos állományok esetében a mért egyes fák magasságából becsült állománymagasság is. Hazánkban a hagyományos sztereófotogrammetriai famagasság-mérésre voltak próbálkozások, de üzemszerűen sohasem vezették be. Ennek egyik oka az lehetett, hogy a kiértékelő eszközök igen drágák voltak. A digitális fotogrammetria térhódításával a sztereófotogrammetriai kiértékelés elérhetőbbé vált. Bár ritka az olyan légifénykép forrásanyag, amely az egyes fák magasságának mérésére alkalmas lenne, az erdészeti gyakorlatban alkalmazott légifényképek többsége alkalmas a faállomány-magasságok meghatározására. Munkámban megmutattam pár elterjedt programban elérhető automatikus felületmodell előállítás funkció segítségével létrehozott borított felszínmodell felhasználását és a benne rejlő lehetőségeket. A borított felszínmodellek egyre szélesebb körben terjednek. Mind több űrfelvétel szolgáltató állít elő felvételeiből teljesen automatikusan borított felszínmodellt (Spot 3D termékek, IKONOS Terrain Model), amelyek bárki számára elérhetők. Másrészt egyre több olyan új, aktív távérzékelési technológia létezik, amelyeknek a segítségével a különböző felszínmodellek közvetlenül előállíthatók (különböző RADAR és LIDAR technológiák). Ezen modellek egyre olcsóbbak lesznek, éppen ezért felhasználásuk egyre jobban el fog terjedni. Az előállított borított felszínmodelleket is bevontam a spektrális adatban-típusú osztályozóba. Ez sok esetben segítette az amúgy bizonytalan osztályozást.

Az űrfelvételek osztályozása során már kialakult bennem az a koncepció, amikor nem az űrfelvétel egyes pixeleit osztályozzuk, hanem a digitális üzemi térkép adott egységére, az erdőrészletre vizsgáljuk az adatokat. Így alakítottam ki a spektrális adatbank alapú szakértői rendszert, amely alkalmas az egyes erdőrészletekben bekövetkező változások detektálására, javasolni tudja az egyes erdőrészlet-megosztásokat és -összevonásokat. Az erdőrészlet alapú spektrális adatbankokba nemcsak az egyes űrfelvételeket, hanem az előállított borított felszínmodelleket is bevontam. Az ezek alapján működő felügyeleti támogató rendszer számos olyan lehetőséget kínál, amelyet a mindennapi gyakorlatba is könnyen át lehet ültetni. Az általam kidolgozott módszer igen hatékonyan ötvözi a digitális képfeldolgozás és a térinformatika nyújtotta lehetőségeket, ezáltal integrált elemzési lehetőségeket biztosít a felhasználó számára.

A jelenlegi rendszerben az egyes űrfelvételek sávjainak az adott területi egységekhez tartozó eloszlásainak kiszámítása meglehetősen időigényes folyamat. Éppen ezért munkámban ezek az adatok – igazából azok az adattáblák, amelyekben tároltam ezeket – statikusak voltak. Ezeknek a segítségével is számtalan alkalmazási lehetőséget mutattam be, és természetesen sokkal több létezik, de a rendszer továbbfejlesztését ez jelentősen korlátozza. A másik, ezzel kapcsolatban felmerülő probléma a vektoros referencia adatok gyakori változása, és ennek hatékony, térinformatikai alapú kezelése.

A kidolgozott eljárások segítségével elvégeztem a Soproni-hegység erdőmonitorozását, mintegy 220 éves időtávlatban 1784-től napjainkig. A rendelkezésemre álló forrásadatokat a digitális képfeldolgozás eszközeit használva állítottam elő az egyes időpontok erdőtérképét. Az egyes térképekből levezetett változások elemzéséhez számos térinformatikai eszközt használtam, valamint ilyen módszerekkel végeztem modellezést is.

5. Összefoglalás

Munkám során a távérzékelés erdészeti felhasználásaival foglalkoztam. Ezen belül az optikai távérzékelésből származó, illetve egyéb, másodlagos digitális képek feldolgozásával, és a segítségükkel kinyerhető helyzeti és leíró, de elsősorban erdészeti adatok felhasználhatóságára helyeztem a hangsúlyt.

Ezek a digitális képek a „Soproni-hegység" mintaterületről jelentős időintervallumot átölelő idősort alkottak. Az egyes képekből kinyerhető, erdészeti szempontból fontos információk egyrészt az erdők minőségi, másrészt mennyiségi jellemzőire vonatkoztak. A minőségi jellemzők közül kiemelem a faállomány típusát, a mennyiségi jellemzők közül pedig – a térbeli elhelyezkedésen túl – a faállományok magasságát. A digitális képfeldolgozás eszközeivel mind az archív térképek egy részét, mind a légifényképeket, és a különböző érzékelők által készített űrfelvételeket feldolgoztam. A feldolgozás során több különböző értelmezési szinten vizsgáltam meg a képfeldolgozások eredményeinek alkalmazhatóságát.

A rendelkezésemre álló idősorból előállított erdőborítás, valamint az ezen belüli fenyő-lomb arány a „Soproni-hegység" mintaterület esetében megmutatta a XIX. század végi / XX. század eleji fenyvesítési program eredményét, valamint a kilencvenes években lezajlott szúkárosítás következményeit. Az általam kidolgozott eljárások alkalmasak a közepes felbontású felvételek gyors és pontos kiértékelésére.

Munkám során kifejlesztettem egy spektrális adatbank alapú osztályozót, amelyet a közepes felbontású űrfelvételek feldolgozásán túl számos más területen lehet használni. A rendszer alapja valamilyen vektoros referencia-térkép, amelynek egységeire tudjuk a különböző raszteres adatokat vizsgálni. Ez a szakértői rendszer területek monitorozásában jól használható. Alkalmazása számos lehetőséget rejt, az erdészeti szakterületeken kívül is.

6. Tézisek

1. Közepes felbontású távérzékelési forrásadatoknak az erdőtérképezésben történő felhasználásra kidolgozott módszerek:
   - Kidolgoztam egy távérzékelési, vegetációs index alapú osztályozót Landsat MSS/TM/ETM+ felvételekre, amely alkalmas az erdő – ezen belül a fenyő és lomb –, valamint a nem erdő – ezen belül a Fertő-tó, és a Fertő nádas öve – osztályozásra. Az osztályozó olyan más multispektrális felvétel gyors osztályozására is alkalmas, amely tartalmaz vörös és közeli infravörös sávot.
   - Kidolgoztam egy távérzékelési, vegetációs index alapú ún. ellipszis-osztályozót, azokra az esetekre, ahol az előbbi osztályozó nem alkalmazható.
   - Kidolgoztam egy egyszerű és gyors osztályozási módszert erdőtérképezésre, a Spot 1-3 műholdak HRV érzékelőjének pánkromatikus (Spot P) felvételeire. A módszer a megfelelő hullámhossz-tartományban érzékelő más pánkromatikus felvételek feldolgozására is alkalmas.
2. Légifényképekből előállított egyes ortofotókból készített ortofotó-mozaikok előállításánál több újítást alkalmaztam, amelyek egyenletes és egyöntetű mozaikot eredményeznek.
   - Az ortofotók mozaikolására fejlesztettem ki egy mozaikolási eljárást, amely – bár nem automatikus –, a felhasználási célnak megfelelő mozaik előállítását teszi lehetővé.
   - Az ortofotó-mozaikok színegyensúlyának kiegyenlítéséhez kidolgozott eljárás teljesen egyöntetű mozaikot eredményez.
   - Infraszínes légifénykép anyagok színhelyes-színes megjelenítésére kidolgoztam egy színtranszformációt, amelynek segítségével a laikusok számára nehezen értelmezhető infraszínes képekből a természetes színekhez közeli képanyagot lehet előállítani
3. A különböző távérzékelési adatokból borított- felszín modelleket állítottam elő, és megmutattam az erdészeti szakterületen történő alkalmazásának lehetőségeit.
4. Megmutattam, hogy a digitális képfeldolgozás eszközeivel egy adott területről az archív és aktuális adatok feldolgozhatók, az eredmények geoinformatikai rendszerbe integrálhatók, ezáltal számos olyan lehetőség kínálkozik, amely a hagyományos táj- és erdőtörténet kutatások esetében nem elérhető.
5. Kifejlesztettem a távérzékelési forrásadatok felhasználásával egy olyan erdőrészlet szintű, spektrális adatbank alapú szakértői rendszert, amely alkalmas az erdőrészletekben bekövetkező változások távérzékelési adatok alapján történő automatikus detektálására, valamint a változások alapján különböző javaslattételre. Ezáltal a rendszer alkalmas az erdőfelügyeleti és tervezési munka hatékonyabbá tételére, valamint a különböző monitoring tevékenységekhez.

Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt szeretném megköszönni konzulensemnek, Dr. Márkus István docens úrnak azt a rengeteg segítséget és emberséget, amelyet kutatásaim során nyújtott. Ő volt az, aki annak idején figyelmemet a téma felé irányította, és a későbbiekben is utamat terelgette. Köszönöm a Földmérési és Távérzékelési Tanszék többi dolgozójának segítségét is. Az itt kialakult szakmai műhely és a légkör mindig is nagy ösztönzést nyújtott. Szeretném megköszönni továbbá mindenkinek, akik valamilyen formában segítették munkámat.

Munkám során rengeteg távérzékelési és térinformatikai adatot használtam fel. Köszönet illeti a FÖMI Távérzékelési adatforgalmazási és archiválási osztályát, valamint volt vezetőjét, Dr. Csató Évát, a Landsat felvételekkel kapcsolatos segítségéért. Köszönöm az Egyesült Államok Geológiai Szolgálat Adatforgalmazási Osztályának (LP DAAC USGS), hogy lehetővé tették az ASTER űrfelvétel felhasználását. Köszönöm az Állami Erdészeti Szolgálatnak, hogy kutatásaimban adataikat felhasználhattam. Köszönöm a MH-TÉHI-nek, hogy lehetővé tette a mintaterületen DTA-50 v1.0, valamint a DDM-10 felhasználását. Köszönöm a FÖMI-nek, hogy engedélyezték az 1:10 000-es topográfiai térképek kutatásaimban történő használatát.

Végül – de nem utolsósorban – szeretném megköszönni családomnak a munkám iránt tanúsított türelmet.

Sopron, 2007. június 29.

Király Géza

Hivatkozások

1. ÁESZ (2000): ÚTMUTATÓ, az erdők egészségi állapotának 4x4 km-es erdővédelmi hálózatban történő felméréséhez, Állami Erdészeti Szolgálat, Budapest.
2. Bácsatyai L. – Király G. – Mezei L. (2001): Digitális ortofotók az erdészetben. In: 25. Kutatási És Fejlesztési Tanácskozás, Gödöllő, 2001.
3. Bácsatyai L. – Márkus I. (2001): Fotogrammetria és távérzékelés. Tankönyvpótló segédlet, kézirat, Sopron.
4. Bácsi Benjamin (1986): Diplomaterv, Erdészeti és Faipari Egyetem, Sopron, p.
5. Bánky József (1987): Az ortofotók hasznosítása gazdálkodási, erdészeti céltérképek készítésében. Doktori értekezés, Erdészeti és Faipari Egyetem, Sopron, p. 126.
6. Bezzegh László (1949): A fényképmérés erdészeti felhasználása. In: Erdészeti Lapok, LXXXVIII. évf., Budapest
7. Coulson S. N. (1995): SAR interferometry with ERS. ESA Technical Report. http://earth.esa.int/rootcollection/sysutil/inter_steve.html
8. Csapody István (): Sopron város egykori erdőinek története (XIII–XIX. sz.). In: OEE Erdőtörténeti Szakosztály Közleményei
9. Csapody István (1975): A századforduló erdőgazdálkodása a soproni városi erdőkben. In: OEE Erdőtörténeti Szakosztály Közleményei 1975, pp. 111–119.
10. Czimber K. (1997): Geoinformatika. Egyetemi jegyzet. Soproni Műhely, Sopron.
11. Czimber K. (2004): Geoinformatika az erdészetben. Doktori (PhD) értekezés. Sopron.
12. Csornai G. – Dalia O.(1991): Távérzékelés; EFE, Székesfehérvár.
13. Detrekői Á. – Szabó Gy. (2002): Térinformatika. Nemzeti Tankönyvkiadó Rt. Budapest p 380.
14. DigiTerra IMAGE felhasználói segédlet. DigiTerra Bt, 1997. p. 12.
15. DigiTerra Map Referenciai kézikönyv. DigiTerra GEOinformatikai Rendszerház Kft. Budapest 2004. p. 164.
16. DigiTerra STEREO felhasználói segédlet. DigiTerra Bt, 1998. p. 16.
17. DLR Press- and Public Relation: X-SAR/SRTM – Focusing on Earth. Data for a 3D World Map.
18. Eastmen Kodak Company (1996): TECHNICAL INFORMATION DATA SHEET, KODAK AEROCHROME II Infrared Film 2443.
19. Earth Resource Mapping Pty Ltd. (2001): ECW Whitepaper http://www.ermapper.com/docViewer.aspx?d=72, p. 27.
20. King, M. D. – Greenstone, R. Ed. (1999): 1999 EOS Reference Handbook: A Guide to NASA's Earth Science Enterprise and the Earth Observing System. NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt. p. 355.
21. ER Mapper Application.
22. ER Mapper User Guide.
23. Fertő-Hanság Nemzeti Park honlapja: http://www.ferto-hansag.hu/
24. Firbás Oszkár (1957): A legrégibb erdészeti térkép Sopronból. In: Soproni Szemle, 1957, pp. 109–117.

25. Frank Norbert (1999): Sopron város erdei a XIX. század közepén I., Robert Micklitz és Fredrich Hollan szakvéleménye [53], Sopron, 1999.
26. Global Forest Resources Assessment (FRA 2000): http://edcsns17.cr.usgs.gov/glcc/fao/index.html
27. Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics (GOFC-GOLD): http://www.fao.org/gtos/gofc-gold/land.html
28. Google Earth (2005): http://earth.google.com
29. Gugan, D.J., Dowman, I.J, (1988): Topographic mapping from SPOT imagery. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54(10). pp 1409-1414.
30. Győrfi János (1954): Az Ips typographus magyarországi károsítása 1946-1952-ben. ERTI Évkönyv 2. pp. 164-182.
31. Haulik Á (2003): Amatőr légi digitális felmérő és kiértékelő rendszer kifejlesztése környezet- és természetvédelmi kutatások számára, Diplomaterv, Sopron, p. 102.
32. Hofstätter, E. (1989): Beiträge zur Geschichte der Österreichischen Landesaufnahmen. I.-II. Teil. Bundesamt für Eich- und Vermessungwesen, Wien, p. 196.
33. Huss J. szerk. (1984): Luftbildmessung und Fernerkundung In: der Forstwirtschaft. Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe.
34. Image Station® Stereo Softcopy Kit (2004): Felhasználói kézikönyv.
35. Jankó A. (2000): Osztrák-Magyar Monarchia I., II., III. katonai felmérése. Kézirat
36. Jankó A. (2001): A második katonai felmérés. Hadtörténeti Közlemények 2001/1. pp. 103–127.
37. Jankó Sándor (1917): Fotogrammetria. Pázmány nyomda, Pozsony.
38. Kauth, R. J., Thomas, G. S. (1976): The tasseled cap – A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In: Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, Purdue University, West Lafayette, Indiana, pp. 41–51.
39. Király Géza (1997): Nagyterületi erdőleltárazás digitális űrfelvételek segítségével. Diplomamunka, Sopron, 1997, p. 68.
40. Király Géza (1998): Multiscale Images in Forestry. In: ISPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXII Part 7, ISPRS Commission VII Symposium on Resource and Environmental Monitoring, September 1–4, 1998, Budapest, Hungary. pp. 365–369.
41. Király Géza (2000): A Fertő-Hanság NP és a Szigetközi Tájvédelmi Körzet térinformációs rendszerének (GIS) kifejlesztése. In: Az Erdőmérnöki Kar Tudományos Konferenciájának előadásai, NyME-EMK 2000. december, Sopron, pp. 113–117.
42. Király Géza (2001): A magyar erdők a távérzékelés tükrében. In: „Bedő Albert" Doktorandus Nap 1999. november 12. kiadványa, Soproni Egyetem, 2001. pp. 43-50.
43. Király Géza (2004): Domborzatmodellek előállításához felhasználható forrásadatok összehasonlító vizsgálata. HUNDEM 2004 konferencia, Miskolc 2004. november 11–12. http://www.uni-miskolc.hu/~fkt/hundem/Cikkek/Kiraly%20Geza.pdf
44. Kraus K., Schneider W. (1988): Fernerkundung, Band 1. ©Ferd. Dümmlers Verlag. Bonn, Germany
45. Kraus K. (1990): Fernerkundung, Band 2. ©Ferd. Dümmlers Verlag. Bonn, Germany

46. Kraus K. (1998): Fotogrammetria. Tertia Kiadó, Budapest
47. Lakatos Ferenc (1997): Lucfenyveseinkben fellépett szúkárosítás jellemzői és a jelenlegi állapot. In: Az ezredforduló erdő-, vad és fagazdasága (Erdő-, vad- és fagazdaságtudományi Fórum II. Tudományos felolvasóülés). MTA Budapest, 1997.04.03.–1997.04.03. MTA Erdészeti Bizottság. p. 87–88.
48. Márkus I. (1995): A távérzékelés alkalmazása a vegetáció vizsgálatában és térképezésében, Kandidátusi értekezés, Sopron.
49. Márkus I. et al (2000): A Fertő-Hanság NP és a Szigetközi Tájvédelmi Körzet térinformációs rendszerének (GIS) kifejlesztése. Kutatási zárójelentés, Sopron.
50. Márkus I. – Dinka M. – Király G. – Márkus A. (2000): A Fertő nádasainak 1999. évi térképe. In: Az Erdőmérnöki Kar Tudományos Konferenciájának előadásai, NyME-EMK 2000. december, Sopron, pp. 119–122.
51. Márkus I. – Király G. (2005): Digitális domborzatmodell előállítása légi lézerszkenner felvételekből tájökológiai és természetvédelmi kutatások céljára. In: Geomatikai Közlemények VIII. MTA GGKI, Sopron, 2005. pp. 247–256.
52. Mayer Antal (1975): A Sopron környéki erdők átalakítása és Muck Endre tevékenysége. In: Soproni Szemle 1975/4 pp. 338–347.
53. R. Micklitz – F. Hollan (1869): Szakvélemény, Sopron város erdeinek jelenlegi állapotáról, a felvirágoztatására …, A. Reichard nyomdája, Sopron, 1869. [25] alapján
54. Minnaert, J. L – G. Szeicz. (1961): The Reciprocity Principle In: Lunar Photometry. Astrophysics Journal, Vol. 93. pp. 403–410.
55. Miszori Krisztián (2003): Erdőgazdasági üzemi térkép aktualizálása légifényképek alapján az ÁESZ Szombathelyi Igazgatóságának területén. Diplomaterv, Sopron, p. 69.
56. MODIS Rapid Response System: http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/
57. NASA (2003): Preliminary Assessment of the Value of Landsat 7 ETM+ Data following Scan Line Corrector Malfunction. p. 88. http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/pdfs/SLC_off_Scientific_Usability.pdf
58. R. A. McDonald (1995): CORONA: Success for Space Reconnaissance, A Look into the Cold War, and a Revolution for Intelligence. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol 61, No. 6, June
59. Németh F (1998): A magyarországi erdőfelmérés története a kezdetektől 1990-ig. ÁESZ, Budapest002E
60. Qi, J. et al (1994): Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI). Remote Sensing of Environment, vol. 48, pp. 119–126.
61. Roth Gyula (1924): Tanulmányút Sopron város erdejében. In: Erdészeti Lapok 1924, pp. 153–163.
62. Roth Matthea (2003): Szúgradáció kialakulásának feltételei és lefolyása a Soproni-hegységben 1987–2001. In: Erdészeti Lapok, CXXXVIII. évf. (2003.) 12. szám, 356–358. pp.
63. Richardson, A. J. – Wiegand, C. L. (1977): Distinguishing vegetation from soil background information. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 43, pp. 1541–1552.

64. Rouse, J. et al (1973): Monitoring vegetation systems In: the great plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA SP-351, vol. 1., pp. 309–317.
65. Sárközy András (1787): „Plan von dem Oedenburger sogenannten Burgerwald”. 3 szelvény: 53·86 cm, 63·86 cm, és 62·86 cm. Ma: 100 öl : 1 hüvelyk = 1 : 7 200. Sopron Városi Levéltár SVT 86.
66. Sébor J. – Farkas T. – Sárkány J. – Teszárs G. – Veress S. (1954): A fényképmérés erdőgazdasági felhasználása. Kézirat, Erdészeti Földméréstani Tanszék, Sopron.
67. Smith, J. – T. Lin – K. Ranson (1980): The Lambertian Assumption and Landsat Data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 46, No. 9. pp. 1183–1189.
68. SOVINFORMSPUTNIK: http://www.sovinformsputnik.com
69. Spot Image – Technical Information: http://www.spotimage.fr/html/_167_224_.php
70. SRTM adatok: ftp://e0mss21u.ecs.nasa.gov/srtm/
71. Tamás József (1955): A soproni hegyvidéki erdők történelmi fejlődése, tájleírásai a fafaj, elegyarány és korosztály viszonylatában napjainkig. In: OEE Erdészettörténeti Szakosztály, Erdészettörténeti Közlemények L. Közzéteszi: Bartha Dénes, Sopron, 2001. p. 133.
72. Teszárs Géza (1960): A légifénykép, mint térképezési anyag. In: Az Erdő 1960/2. pp.
73. Teszárs Géza (1960): Fotogrammetriai úton készülő erdőgazdasági alaptérképek méretaránya. In: Az Erdő 1960/1. pp.
74. Timár G. – Molnár G. (2003): A második katonai felmérés térképeinek közelítő vetületi és alapfelületi leírása a térinformatikai alkalmazások számára. In: Geodézia és Kartográfia. 2003/5. pp. 27–31.
75. Timár G. et al (2004): A második és harmadik katonai felmérés erdélyi szelvényeinek vetületi- és dátumparaméterei. In: Geodézia és Kartográfia. 2004/5. pp. 12–16.
76. Toutin, Th. – Cheng, P. (2000): Demystification of IKONOS. Earth Observation Magazine, Vol. 9, No 7, 2000, pp. 17–21.
77. Winkler P (1972): Helikopteres légifényképezési tapasztalataink. Geodézia és Kartográfia, 1972/3. pp. 202–209.
78. Zügn Nándor (1938): Soproni erdészeti régiségek. In: Erdészeti Lapok 1938/XII. pp. 1064–1079.