

# Távérzékelte felvételek elemzése

Egyetemi jegyzet

László István – Csornai Gábor –  
Dr. Fekete István – Giachetta Roberto



Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Informatikai kar  
Budapest, 2014.



# Tartalomjegyzék

<b>1. Mi a távérzékelés?</b>	<b>8</b>
1.1. A távérzékelés kialakulása és fejlődése . . . . .	8
1.2. A távérzékelés általános ismérvei . . . . .	9
<b>2. A távérzékelés fizikai és technikai alapjai</b>	<b>12</b>
2.1. A távérzékelés fizikai alapjai . . . . .	12
2.1.1. Az elektromágneses sugárzás, mint információhordozó . .	12
2.1.2. A napsugárzás, mint a reflektív távérzékelés energiaforrása	14
2.1.3. A reflektancia, mint a földfelszín állapotjellemzője . . . .	14
2.2. A távérzékelés technikai alapjai . . . . .	16
2.2.1. Aktív és passzív távérzékelés . . . . .	17
2.2.2. A távérzékeléses hordozóeszközök sokfélesége . . . . .	17
2.2.3. A felvételkedészítés módjai . . . . .	18
2.2.4. A digitális felvételek matematikai ábrázolása . . . . .	19
2.2.5. A távérzékelési alkalmazások előnyei és hátrányai . . . . .	19
<b>3. A felvételek típusai és jellemzői</b>	<b>21</b>
3.1. A műholdas felvételező-rendszerek jellemzői . . . . .	21
3.2. Nagyfelbontású űrfelvételek . . . . .	24
3.3. Kisfelbontású űrfelvételek . . . . .	26
3.4. Szuperfelbontású űrfelvételek . . . . .	27
3.5. Közepes felbontású űrfelvételek . . . . .	28
<b>4. Az előfeldolgozás</b>	<b>30</b>
4.1. Intenzitás-műveletek . . . . .	31
4.1.1. Elemi képpontstatisztikák készítése . . . . .	31
4.1.2. Radiometriai korrekció . . . . .	32
4.1.3. Látványjavítást szolgáló intenzitás-műveletek . . . . .	33
4.2. Geometriai transzformáció . . . . .	40
<b>5. A képelemzés feladata és alapvető módszerei</b>	<b>43</b>
5.1. A kiértékelési módszerek általános jellemzői . . . . .	43
5.2. A képelemzés alapfeladata . . . . .	47
<b>6. A statisztikai tematikus osztályozás</b>	<b>49</b>
6.1. A maximum likelihood- és a Bayes-osztályozás . . . . .	50
6.2. A normális eloszlás használata az osztályok közelítésére . . . . .	51
6.3. Spektrális adatosztályok . . . . .	53
6.4. A felügyelt osztályozás folyamata . . . . .	55

<b>7. Az osztályozás pontosságvizsgálata</b>	<b>59</b>
7.1. Az osztályozás hibáinak előrejelzése . . . . .	59
7.2. Az osztályozási eredmény pontosságvizsgálata . . . . .	62
<b>8. A távérzékelte felvételek tematikus kiértékelésének lépései</b>	<b>64</b>
<b>9. Válogatott kérdések a képelemzésből</b>	<b>77</b>
9.1. A felvételek szegmensenkénti osztályozása . . . . .	77
9.1.1. A szekvenciális csatolás módszere . . . . .	78
9.1.2. További szegmentáló-algoritmusok . . . . .	80
9.1.3. A szegmensalapú osztályozás formális tárgyalása . . . . .	82
9.2. Több forrású adatok integrálása . . . . .	84
9.2.1. Az úrfelvételek dimenzióinak összefüggése . . . . .	84
9.2.2. Az adatintegráció szintjei . . . . .	85
9.3. A texturális mértékek használata . . . . .	86
9.4. Objektum-alapú felvétel-kiértékelés . . . . .	87
9.5. Speciális spektrális transzformációk és ezek időfüggvényei . . . . .	89
<b>10. Távérzékelési projektek</b>	<b>92</b>
10.1. Növénymonitoring . . . . .	92
10.2. Parcella-azonosító Rendszer . . . . .	94
10.3. Távérzékeléses támogatás-ellenőrzés . . . . .	98
10.4. Katasztrófa-monitoring . . . . .	100
10.5. Parlagfű felmérése távérzékeléssel . . . . .	105
10.6. Gyapjaslepke kártételének kimutatása . . . . .	108
<b>11. Távérzékelési alkalmazások fejlesztése</b>	<b>110</b>
11.1. Adatkezelés és modellezés . . . . .	111
11.2. Adattárolási megoldások . . . . .	112
11.2.1. A nyers bináris képformátum . . . . .	114
11.2.2. A GeoTIFF formátum . . . . .	115
11.2.3. A PostGIS raszter . . . . .	116
11.3. Távérzékelési műveletek megvalósítása . . . . .	117
11.3.1. Térbeli műveletek . . . . .	118
11.3.2. Képi műveletek . . . . .	120
11.3.3. Műveletek egységes modellezése . . . . .	121
11.4. Esettanulmányok . . . . .	122
11.4.1. Mintaillesztés alapú georeferálás . . . . .	122
11.4.2. Hisztogram-kiegyenlítés . . . . .	122
11.4.3. Konvolúciós szűrés . . . . .	123
11.4.4. Főkomponens elemzés . . . . .	124
11.4.5. Szegmens alapú tematikus osztályozás . . . . .	125

# Bevezetés

Az ELTE Informatikai Karán, a Programtervező matematikus szakon 2004-ben indult a 16 kredités Térinformatikai modul. A modul a hagyományos kétlépcsős Programtervező matematikus képzésben került bevezetésre, majd az új bolognai rendszerű Programtervező informatikus MSc szaknak is választható blokkjává vált.

A Térinformatikai modul különböző kurzusainak az előadásain a hallgatók megismerkednek a szakterület elméleti alapfogalmaival, a térinformatikai adat-típusokkal, az adatbázis-kezelés specialitásaival, a digitális térképek és a távérzékelte felvételek típusaival, valamint azok különböző felhasználási módjaival. Jártasságot szereznek továbbá néhány képfeldolgozási és térinformatikai (Geographical Information System, GIS) alapszoftver használatában is.

A tantárgyak gyakorlatain kísérleti fejlesztéseket végeznek, természetesen még nem termék-szinten, de a térinformatika széles spektrumára kiterjedően, pl. a következő területeken: GPS-nyomkövetés, útvonaltervezés, 3D terepmo-dellek generálása, térinformatikai adatbázisokra épülő webes alkalmazások, űr-felvételek szűrési spektrális transzformációval, alakzat- és textúrafelismerés, te-matikus osztályozás.

A modulban kapott helyet a „Távérzékelte felvételek elemzése” című kurzus is, amelynek előadását és a hozzá tartozó gyakorlatot a FÖMI munkatársai – a jegyzet első két szerzője – ELTE-s oktatókkal kezdettől fogva együtt tartják.

Az előadáshoz készített diasor ([23]) sokat fejlődött az évek során. Alap-ját a maga idejében úttörőnek számító [4] jegyzet képezte, amelynek megírása időszakában a hazai viszonyok között inkább távérzékeléssel nyert felvételek fel-dolgozási, alakfelismerési módszereinek fejlesztése folyt, kísérleti alkalmazásokkal. A távérzékelés elméletének központi fogalmai és módszerei (fizikai alapok, előfeldolgozás, statisztikai tematikus osztályozás) már a jegyzet megjelenésekor is kiforrottak voltak, ezeket lényegében a mai napig is hasonlóan használjuk. Azonban az azóta eltelt idő alatt az alapokon tovább építkezve a távérzékelés módszertanában sok új irány teljességet ki, például a mikrohullámú (radar-) felvételezés és kiértékelés, illetve az objektum-alapú képfeldolgozás. Még látvá-nyosabb a fejlődés világszerte a gyakorlati alkalmazásokban, valamint a hazai alkalmazások köre is alaposan bővült és kiterjedt.

A tananyag folyamatos korszerűsítése során figyelemmel kísérjük a szakiro-dalomban megjelenő új könyveket, illetve a korábbiak újabb kiadásait, így pl. az alapműnek számító, Richards-féle könyv változatait ([34]). Hasonlóan, a FÖMI-nél jelentkező új alkalmazások, operatív feladatok és a megoldásuk vagy fo-lyamatos végrehajtásuk során szerzett tapasztalatok is jobbra elhangzanak az órákon.

Az előadások anyagát tartalmazó, több mint 400 részletesen kidolgozott di-

ából álló sorozat minőségében talán már közel áll a jegyzet műfajához. Ezt az is megerősíti, hogy 2011-ben indulhatott és nyert az ELTE Informatikai Kar jegyzettámogatási pályázatán, és így elhelyezésre került a Kar Digitális Könyvtárában; az oktatási anyag aktuális változata pedig mindig elérhető a tantárgyfelelős Fekete István honlapján is (lásd: [23]).

Az előadáson elhangzó tananyag folyamatos fejlődése szinte „kikövetelte”, hogy a diasorokon kívül létrejöjjön egy konszolidált jegyzet is, amely egy az egyben tartalmazza leírva a félév során elhangzott elméleti és gyakorlati tudnivalókat. A korábban megírt jegyzetrészek felhasználásával az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, a Társadalmi Megújulás Operatív Program „ELTE–PPKE informatika tananyagfejlesztési projekt” pályázatának (TÁMOP-4.1.2.A/1-11/1-2011-0052) támogatásával készült el a jegyzet.

Bár Magyarország felsőoktatási intézményeiben is több jegyzet és tankönyv készült a távérzékelés oktatásához, de értelemszerűen mindegyik a megfelelő szak, illetve intézmény sajátosságaihoz igazodik. Jegyzetünk specialitását – az előadók és gyakorlatvezetők személyéből adódóan is – a tematikus osztályozás egységes formális matematikai tárgyalása, az operatív távérzékelési alkalmazások bemutatása és a távérzékeléses szoftverfejlesztés fontos kérdéseinek ismertetése adja.

A jegyzet első négy fejezetében a távérzékelésről adunk átfogó ismertetést. A távérzékeléses feladatok hatékony megoldásához nagy mennyiségű háttérismeret elsajátítása és felhasználása szükséges. Az itt szereplő néhány fejezet a távérzékelés olyan összefoglalást tartalmazza, amely megkönnyíti a jegyzet későbbi részeinek olvasását azáltal, hogy a szakterület fontosabb alapfogalmai bevezetésre kerülnek bennük.

A távérzékelés alapjai, a felvételező-rendszerek és felvételtípusok, valamint az előfeldolgozás bemutatása után részletesebben tárgyaljuk a felvételek kiértékelésének témakörét. Az ismertetés fókuszában a statisztikai módszerekre épülő tematikus osztályozás áll, beleértve a pontosságvizsgálatot is. Ez a rész lényegében az elméleti tananyag „magja”.

A szakterületen még járatlan, de az eddigi tanulmányokban az egzakt meghatározásokhoz szokott hallgatók részéről általában pozitív visszaigazolást kap, hogy a távérzékelési fogalmak (pl. digitalizált felvétel, intenzitástér, clusterezés, alosztályok finomítása, szegmentálás, pontosságvizsgálat) a matematika absztrakciós erejével kerülnek leírásra.

A statisztikai osztályozás több évtizede stabilnak tekinthető módszertana után bemutatunk néhány válogatott kérdést, amelyek megoldásában a digitális képelemzés, a távérzékelés adatok modernebb kiértékelési eszközei – szegmentálás, adatfúzió, mintázatelemzés, objektum-alapú felvétel-kiértékelés – alkalmazhatók.

Az elméleti ismeretek bemutatása után az előadáson és a jegyzetben is bemutatásra kerül néhány operatív távérzékeléses alkalmazás. A FÖMI jelenleg is futó vagy több éven keresztül működött nagy volumenű projektjeiről van szó, amelyek a tanult elméletre épülnek.

Végül a tantárgyhoz tartozó gyakorlatnak megfelelően a távérzékeléses képfeldolgozó szoftverek fejlesztésének jellemzőit mutatjuk be, kiemelve néhány ajánlott, igen jól használható eljárás-, illetve osztálykönyvtárat, valamint egy, a negyedik szerző vezetése alatt fejlesztett komplett térinformatikai keretrendszert.

Bár a jegyzetbe igyekeztünk annyi ábrát beszerkeszteni, amennyi segíti a

leírtak megértését, de a bővebb képanyag eléréséhez mindenképpen ajánljuk a diasor párhuzamos tanulmányozását.

Köszönetet mondunk a jegyzet lektorának, Verőné Dr. Wojtaszek Malgorzátának a szöveg lelkiismeretes átnézéséért és értékes megjegyzéseiért.

# 1. fejezet

## Mi a távérzékelés?

A távérzékelés olyan információgyűjtési eljárás, mellyel elektromágneses hullámok közvetítésével kapunk információt, általában a földfelszínről. A felvételezés a tárgyak felszínéről visszavert, vagy a tárgyak által kibocsájtott sugárzást rögzíti. Az alkalmazások közös jellemzője, hogy az érzékelő nem áll közvetlen kapcsolatban a vizsgált objektummal, nem közvetlen méréssel vagy emberi megfigyeléssel történik a vizsgálat, hanem rendszerint nagyobb távolságról, és az információt az emberi szám által érzékelt tartománynál jóval szélesebb spektrumú elektromágneses sugárzás hordozza. Bizonyos alkalmazásoknál a földfelszín helyett a légkörben, a vizekben vagy akár a felszín alatti rétegekben is lehetnek a megfigyelt objektumok. A távérzékelte felvételek felhasználásában egyaránt fontos a vizuális, szemmel történő kiértékelés és a kvantitatív, numerikus módszerek alkalmazása. Egy feladat megoldása során a fizikai háttér ismeretéből kiindulva, megfelelő felvételek készítésével egy modell alapján a földfelszín elemi darabjainak tulajdonságaira következtetünk vissza.

### 1.1. A távérzékelés kialakulása és fejlődése

A távérzékelés létrejöttét nemcsak a technológia fejlődése tette lehetővé, hanem a természeti erőforrások átfogó felmérésének igénye is siettette a kialakulását. A 60-as években nyilvánvaló lett, hogy egyes természeti erőforrások véges készletei néhány évtizeden belül kiapadhatnak, illetve a megújuló erőforrásokban és általában, a természetben visszafordíthatatlan negatív folyamatok indulhatnak meg. Egyértelművé vált, hogy gazdálkodni kell a környezeti erőforrásokkal, aminek első, alapvető tényezője a pontos felmérés.

Ezzel együtt az űrtechnika fejlődése, a látható tartományon túli elektromágneses sugárzást is jó hatásfokkal felvételezni képes szenzorok kifejlesztése, valamint az adatátvitel sebességének és megbízhatóságának növekedése elvezetett az első erőforrás-kutató műholdak kifejlesztéséhez és üzembe állításához. 1972-ben felölttek az ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite; később: Landsat-1) műholdat, amely az első volt a széles körben elérhető földmegfigyelési adatokat szolgáltató holdak közül.

Az adatok feldolgozásához és értelmezéséhez a számítástechnika fejlődése, ezen belül az adatfeldolgozás sebességének növekedése, és az egyre jobb grafikus képesség megadta a műszaki alapot. A felvételek kiértékelésének elméleti és gya-



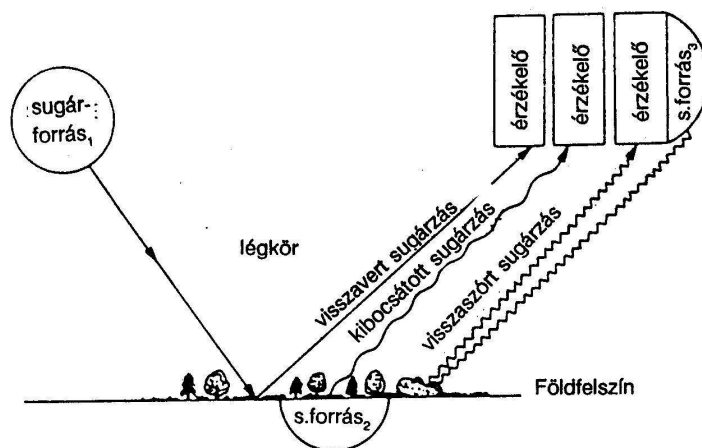
korlati módszertana pedig már nagyban építhetett a digitális képfeldolgozásban elért kutatási eredményekre.

A fent felsorolt tényezők, amelyek lehetővé tették a távérzékelés kialakulását, a hőskor óta gyorsuló ütemben fejlődnek. A technológia és a kutatási eredmények által biztosított háttér mellett egyre több a távérzékelésre építő alkalmazás, amelyek igényei szintén a fejlődést serkentik.

## 1.2. A távérzékelés általános ismérvei

A távérzékelés egyszerűen fogalmazva a felvételezéstől (méréstől) a tematikus információ-kivonásig tart. A távérzékelési rendszernek három alapvető összetevője van: a sugárforrás, a megfigyelés tárgyát képező földfelszín és az érzékelő. A felvételezés – energiaforrástól függő – három fő módját az 1.1. ábra illusztrálja.

A jegyzetben tárgyalt alkalmazások többségénél a távérzékelte felvétel úgy keletkezik, hogy a Nap által kibocsátott elektromágneses sugárzás a földfelszínről visszaverődik, és a visszavert sugárzásból a szenzorra eső energiamennyiséget mérjük. Ezen kívül mérhetjük a földfelszín, illetve az azon elhelyezkedő objektumok által kibocsátott (hő)sugárzást mérjük, továbbá a szenzor mellett elhelyezett eszköz által kibocsátott sugárzást felszínről visszavert részét.



1.1. ábra. A távérzékelési rendszer fő összetevői

Az 1.2. ábra egy úgynevezett úrfelvétel-színkompozitot és két kiválasztott sávképet mutat, amelyek ugyanannak a távérzékelte felvételnek a különböző vetületei. Látni fogjuk, hogy az ún. multispektrális távérzékelés egyik fő jellemzője, hogy a felvételezés több elektromágneses hullámsávban történik. Az ábra képei ebből mutatnak meg néhány kombinációt. Bár a térképszerűnek ható felvételeken felismerhető, hogy ugyanazt a területet ábrázolják, de egyiknek a színe sem hasonlít a felszín természetes színeire.

Az (a) részábra egy ún. hamisszínes kompozit, amelyen a megjelenítőeszköz három színösszetevőjéhez (piros, zöld, kék) rendre a felvételen szereplő közeli infravörös, közepes infravörös és látható vörös sávot rendeltük. Tehát minél

erősebb a földfelszínen a közeli infravörös hullámsávban mérhető energia, annál erősebb a megjelenítésben a vörös színösszetevő intenzitása, és így tovább.

A (b) és a (c) részásra szürkeskálás képeket mutat, tehát itt képpontonként csak egyféle intenzitásértékkel számolunk, ezzel egységesen vezéreljük a megjelenítő színösszetevőit. De a (b) részábrán a közeli infravörös sávban, a (c)-n pedig a közepes infravörösben mért energiamennyiség határozza meg az intenzitást. Így annak ellenére, hogy mind a két felvétel a fekete-fehér fényképekre emlékeztet, a konkrét információtartalom nagyon eltér közöttük.



(a) Hamisszínes kompozit  
(RGB 453)

(b) A 4. sáv

(c) A 7. sáv

1.2. ábra. Egy Landsat 5 TM-felvétel kompozitja és két sávképe

Az előző illusztrációk után nézzük meg átfogóan, mit értünk távérzékelés alatt. Röviden, ez egy korszerű adatgyűjtési és kiértékelési eljárás.

Ami az *adatgyűjtési* részt illeti, a nevének megfelelően a „távolból történő érzékelést” jelent: a földfelszínt nem közvetlen kölcsönhatáson keresztül, hanem bizonyos távolságból, elektromágneses hullámok közvetítésével vizsgáljuk. A felszínről jövő elektromágneses hullámok erősségét, intenzitását méri a felvétel. A mérés kevés kivételtől eltekintve multimodális: egyszerre több hullámsávban történik, tehát ugyanarról a felszínadarabról is több mérési eredményt kapunk. Jelen jegyzetben leggyakrabban az optikai távérzékeléssel foglalkozunk. Az optikai hullámhossz-tartományon ( $0,3-15 \mu\text{m}$ ) belül is a reflektív hullámsáv-tartományba ( $0,3-3 \mu\text{m}$ ) eső visszavert napsugárzás dominál. Az optikai felvételek többsávos légi- és űrfelvételekként állnak rendelkezésre.

A *kiértékelés* történhet szemmel, tájékozódó jelleggel, bár tulajdonképpen ekkor is kategorizáljuk, osztályokba soroljuk a felvétel képpontjait. Ekkor az alapvetően „Hol mi van?” típusú távérzékelte adatrendszerekből gondolatban „Mi hol van?” jellegű leíró információt képezünk. Másrészt digitálisan is kiértékelhetjük a felvételeket, ennek lényege, hogy tudományosan megalapozott, feltárt fizikai törvényszerűségeken alapuló, számszerű kapcsolatot keresünk a földfelszín és a felvételek között. Mindkét kiértékelési módszer célja lehet az objektumok azonosítása, az állapotuk egy időpontban történő felmérése, illetve a több időponton, időszakon át történő nyomonkövetése.

A távérzékelési feladatokra általánosságban jellemző, hogy megoldásukhoz a fizikai háttérismeretekből visszafelé történő tervezésre van szükség. Mindig lényeges, hogy a célnak megfelelő felvételt tudjunk készíteni. A fizikai háttérismeretek alapján az adott felvételekre adekvát információ-kivonási modellt készítünk és alkalmazunk. Jellemzően valamilyen tematikus, tehát kategóriákat megadó térkép a végeredmény, szemben a kiindulási adattal, amely elvileg folytonos mennyiségeket tárol (nevezetesen a sugárzás intenzitását különböző hul-

lámsávokban). Az eredményül kapott tematikus térképet jellemzi a pontossága, a megbízhatósága, amelyet matematikai alapon, pontosságvizsgálati módszerekkel tudunk felmérni.

## 2. fejezet

# A távérzékelés fizikai és technikai alapjai

Ebben a fejezetben a földfelszínnek azokat a jelenségeit, folyamatait mutatjuk be, amelyeket távérzékeléssel elemezhetünk, kimutathatunk, valamint azt, hogy ez az információ hogy jut el az elektromágneses sugárzás közvetítésével, a hordozóeszköz feldélzetén található érzékelő segítségével a kiértékelésig.

### 2.1. A távérzékelés fizikai alapjai

#### 2.1.1. Az elektromágneses sugárzás, mint információhordozó

A távérzékelésben a megfigyelt objektumokról elektromágneses sugárzás közvetíti az információt az érzékelőhöz. Elektromágneses sugárzás alatt fotonok által közvetített oszcilláló elektromos és mágneses teret értünk, amely a térben transzverzális hullám formájában terjed. A hullám elektromos és mágneses komponense merőleges egymásra, és lévén transzverzális hullám, a haladási irányra is. Az elektromágneses sugárzás igen széles, kb.  $10^{-10} \mu\text{m}$  és  $10^{14} \mu\text{m}$  közötti hullámhosszú spektrumot fog át, a viselkedése erősen függ a hullámhossztól.

Vizsgálataink szempontjából a legjelentősebb kölcsönhatás az elektromágneses sugárzás és a földfelszín kölcsönhatása, ugyanis az ezen keresztül megváltozott sugárzásból következtetünk vissza a földfelszín objektumaira, azok tulajdonságaira. Egy objektumra eső sugárzási energia háromfelé oszlik: egy része elnyelődik az objektumban, egy része áthalad rajta, egy része pedig visszaverődik. A megoszlás aránya adott felszínborítás esetén is függ a hullámhossztól, de a három komponens összege az energiamegmaradás elve értelmében minden hullámhossz esetén megadja a beeső energiát. Tehát minden  $\lambda$  hullámhosszra igaz a következő összefüggés:

$$E_I(\lambda) = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) + E_T(\lambda),$$

ahol  $E_I$  a beeső (incident) sugárzás,  $E_R$  a visszavert (reflected),  $E_A$  az elnyelt (absorbed),  $E_T$  az áthaladó (transmitted) része.

A felszín a beeső sugárzást nem csak egy irányba, az ideális tükörnek megfelelően veri vissza, hanem gyakorlatilag minden irányba elosztja. A pontos eloszlást

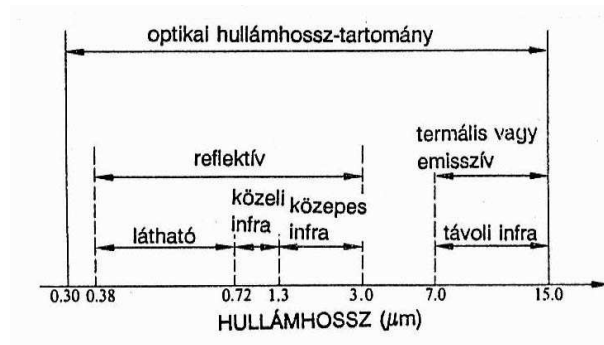
csak laboratóriumi körülmények között lehet meghatározni. A gyakorlati számításoknál valamilyen modellt használunk, amelynek paramétere a sugárforrástól származó beeső nyalábnak és a megfigyelés irányának a szöge.

A teljes elektromágneses spektrumnak a távérzékelés szempontjából jelentős részét két fő tartományra, az optikai és a mikrohullámú tartományra osztjuk. A 0,3 és 15  $\mu\text{m}$  közötti intervallumot optikai sávnak nevezzük (ld. 2.1. ábra). Az ide eső sugárzás a látható fényhez hasonlóan viselkedik, tömör anyagból készült optikai eszközökkel (pl. tükör, lencse) befolyásolható az útja: a sugár megtörhető, illetve visszaverhető.

- A 0,3 és 3  $\mu\text{m}$  közé eső hullámsávban, az ún. *reflektív tartományban* a Nap által kibocsátott sugárzás felszín által visszavert részét mérjük. Ezen belül 0,38 és 0,72  $\mu\text{m}$  között található a *látható tartomány* (Visible), 0,72 és 1,3  $\mu\text{m}$  között a *közeli infravörös* (Near Infrared), 1,3 és 3  $\mu\text{m}$  között pedig a *közepes infravörös tartomány* (utóbbit egyes angol nyelvű források SWIR-nek – Short-wavelength Infrared – nevezik). A reflektív tartományban csak nappali megvilágítás mellett mérhető a sugárzás, amelyet a légkör is befolyásol.
- 3  $\mu\text{m}$ -tól kezdve a Nap csak minimálisan bocsát ki távérzékeléssel mérhető sugárzást. A 3 és 7  $\mu\text{m}$  közé eső (angol nyelvű források által MWIR-nek – Mid-wavelength Infrared – vagy IIR-nek – Intermediate Infrared – nevezett) tartomány kevésbé jelentős a műholdas távérzékeléses megfigyelésekben. Ebbe a tartományba esik az 1000 K fokos tűz sugárzási maximuma, így a földfelszíni tüzek detektálására használható.
- 7 és 15  $\mu\text{m}$  között helyezkedik el a *távoli infravörös tartomány* (LWIR – Long-wavelength Infrared). Ebbe az intervallumba a felszín által kibocsátott hőszugárzás esik, ezért nevezik *termális* vagy *emisszív tartománynak* is. A távoli infravörös sugárzás nem függ közvetlenül a beeső napsugárzástól, ezért éjszaka is mérhető, viszont a reflektív tartományhoz hasonlóan befolyásolja a légkör.

Bár a Nap és a Föld, a földfelszíni objektumok bocsátanak ki, illetve vernek vissza bizonyos mértékű sugárzást a fent megadott intervallumokon kívül is, de ez a földmegfigyelés során sokkal kevésbé mérhető, így ezekkel jellemzően nem foglalkozik az optikai távérzékelés. Az optikai tartományon kívül még a passzív mikrohullámú sugárzás képezi a vizsgálatok tárgyát.

A mikrohullámú tartományon az 1 mm és 1 m közötti hullámhossz-tartományt értjük, amelynek meghatározott részét a távérzékelésben a radarberendezések és a passzív radiométerek hasznosítják. A mikrohullámú tartományban a hullám amplitúdóján kívül fontos szerepet játszik a fázisa és a polarizációja is. A mikrohullámú távérzékelés nem függ a napsugárzástól (ezáltal a napszaktól, valamint a földfelszín és a Nap helyzetének viszonyától sem), és a sugárzást lényegében nem befolyásolja a légkör állapota, tehát független pl. a felhőktől. Sokkal érzékenyebb viszont a felszínborítás szerkezetére, geometriájára és a víz jelenlétére. Bizonyos hullámhosszú mikrohullámok a felszín alá is behatolnak. Az aktív mikrohullámú rendszereknél (radar – RAdio Detection And Ranging) a sugárzást a felvevő melletti eszköz bocsátja ki. A passzív mikrohullámú rendszerek a földfelszín sugárzását észlelik, amelyet a hőmérsékleten kívül a felszín



2.1. ábra. Az optikai sáv felépítése

fizikai, kémiai, geometriai tulajdonságai határoznak meg. Jelen bekezdésben említett fogalmak, illetve általában a radar-távérzékelés nem kerülnek kifejtésre a jegyzetben; az érdeklődő olvasónak a [35] könyv tanulmányozását ajánljuk.

### 2.1.2. A napsugárzás, mint a reflektív távérzékelés energiaforrása

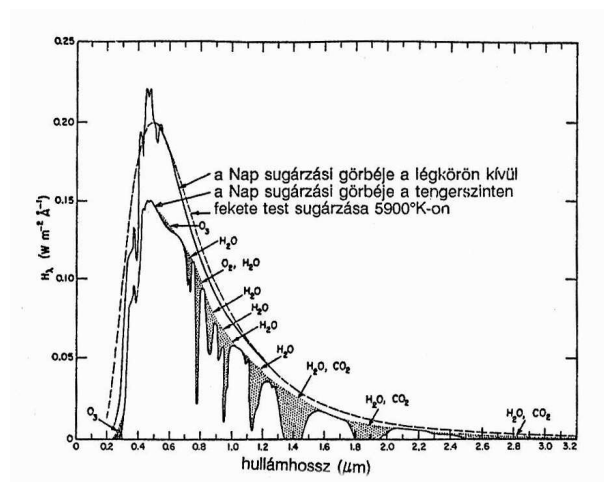
A továbbiakban az optikai sáv reflektív tartományát elemezzük, bemutatva, hogy a Nap által kibocsátott sugárzás milyen kölcsönhatások után érkezik az érzékelőre. A nagy távolság miatt a Föld közelében eleve jóval alacsonyabb az intenzitás, mint a Nap felszínén. A sugárzás a légkörön is áthalad a felszínre érkezése előtt, illetve a felszínről való visszaverődése után is, mielőtt a szenzorhoz érkezik.

A napsugárzás karakterisztikája (2.2. ábra) nagyon hasonló a 6000 K° hőmérsékletű fekete test sugárzásához. A sugárzás maximuma 0,6  $\mu\text{m}$  körül van, amely a látható sárga és vörös szín között helyezkedik el. Az energiaáram a hullámhossz növekedésével erősen csökken, ami különösen a Földet (illetve a légkör külső részét) elérő napsugárzás grafikonján vehető észre.

A légkörnek a Földet megközelítő napsugárzásra gyakorolt hatása nem egyenletesen jelenik meg a hullámsáv-tartomány mentén, hanem bizonyos összetevők (elsősorban a víz, ezen kívül a szén-dioxid és az ózon) meghatározott hullámhosszakon jobban csökkentik az energia áthaladását. Így a légkörön kívül még viszonylag szabályos képet mutató sugárzáseloszlási görbéhez képest a felszínen mérhető sugárzási energia görbéjében jelentős „leugrások” láthatók. A legjelentősebb ún. vízelnyelési sávok 0,9, 1,1, 1,3 és 1,9  $\mu\text{m}$  környékén találhatók. Azonban a légkör részecskéi nemcsak elnyelik a sugárzást, hanem visszaverik és szórják is. A szenzoron mért sugárzáson belül jelentős arányú az a rész, amely nem közvetlenül a földfelszínről (illetve a földfelszínre sem közvetlenül a Naptól) érkezik, hanem a légkör részecskéinek szórása miatt adódik hozzá a megfigyelt sugárzás energiájához.

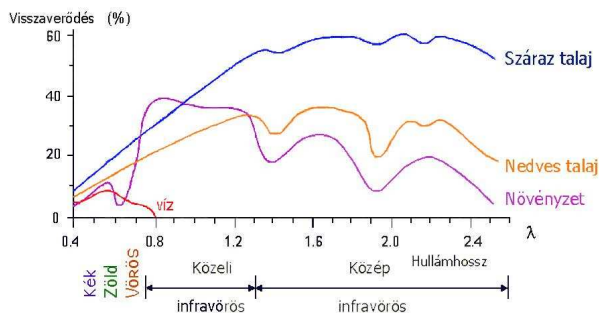
### 2.1.3. A reflektancia, mint a földfelszín állapotjellemezője

A gyakorlatban nagyon fontos tényező a földfelszín objektumainak leírásában az ún. *reflektancia*, vagyis egy felszíndarabról visszavert és az oda beeső su-



2.2. ábra. A napsugárzás eloszlása a légkörön kívül és a tengerszinten

gárzásnak a hányadosa ( $E_R(\lambda)/E_I(\lambda)$ ). A felszínborításoknak igen jellegzetesen alakul a reflektanciájuk a hullámhossz függvényében, ezt adja meg az ún. *spektrális reflektancia-függvény* (2.3. ábra).



2.3. ábra. A víz, a talaj és a felett növényzet tipikus reflektanciagörbéje

A vizek visszaverése kisebb hullámhosszokon is alacsony,  $0,7 \mu\text{m}$  felett pedig teljesen eltűnik. A talajok reflektanciája növekvő tendenciát mutat a hullámhossz függvényében, és minél szárazabb a talaj, annál magasabban fut a görbe. A növényzet visszaverése különösen a közeli infravörös tartományban magas, és a görbén több helyen is „legrás”, határozott lokális minimum látható:  $1,3$ ,  $1,9$  és  $2,6 \mu\text{m}$  körül a részben már említett vízelnyelés miatt (a  $0,9$  és  $1,1 \mu\text{m}$  körüli vízelnyelési sávoknál a növények esetében kevésbé esik vissza a reflektancia), a látható tartomány két keskeny intervallumában pedig a klorofillelnyelés miatt. A fejlettebb növényeknél általában – a magasabb víztartalom, illetve az intenzívebb fotoszintézis miatt – erősebben mutatkozik az elnyelés. Ezt a tény

mennyiségileg is kihasználjuk, amikor a fejlettséget a közeli infravörös és a lát-ható sáv összehasonlításával kapott érték kiszámításával jellemezzük.

Az alapvető felszínborítások úrfelvételeken történő megjelenését, vagyis a spektrális visszaverődést számos tényező befolyásolja, amelyekre tekintettel kell lenni, ha megfelelően szeretnénk értelmezni az úrfelvételeken látottakat.

- *Egy növényegyed* esetén a növényfaj, a fejlődési (fenológiai) fázis, a levél szerkezete, színe és a víztartalom is befolyásolja a távérzékelte felvételeken megjelenő sugárzási értékeket. Jellemzően nem egy-egy növényegyedet vizsgálunk egyszerre távérzékeléssel, önmagukban az egyes egyedek nem is feltétlenül érzékelhetők úrfelvételeken. Értelmszerűen az egyes növényegyedek által mutatott jellemzők összegződnek nagyobb területeken.
- *Vegetáció* esetén az előbb említett tulajdonságokon kívül számít a felszínborítás mértéke is. Ezt számszerűen jellemezhetjük az ún. levélfelületi index-szel (Leaf Area Index, LAI), amely lényegében azt fejezi ki, hogy egységnyi területen, területben vizsgálva a növényzet mekkora arányban, illetve hány-szoros rétegben fed le a talajt. Amennyiben a kifejlett növényzetnél több rétegben takarnak a levelek, akkor a LAI értéke 1-nél nagyobb. Fontos tényező még a biomassa mennyisége, a vegetáció állapota, a levélállás szöge és a talaj jellemzői (adott esetben közvetetten, a növényborításon keresztül).
- *A talajok* esetén megjelenik a felvételen a nedvességtartalom, az ásványianyag-összetétel, a szervesanyag-tartalom és a textúra, vagyis az ásványi anyagok szemcseméret-eloszlása.
- *A víz* esetén jelentős tényező a hőmérséklet és a szennyezettség mértéke.
- *Felszínborítástól függetlenül* befolyásolja a mérési értékeket a domborzat, a Nap állása, az érzékelés szöge és az atmoszféra hatása. Mindezeket a hatásokat az előfeldolgozás később ismertetendő műveleteiben vesszük figyelembe.

Számunkra valójában a fordított irány a fontos, vagyis a spektrális reflektancia-görbéből (illetve a annak a szenzorok által biztosított közelítéséből) szeretnénk megállapítani a felszínborítás jellemzőit. Ideális esetben a függvényből mindig egyértelműen következne a felszíni objektum kiléte, a kapcsolatot pedig egy adatbázisban lehetne tárolni. A környezeti hatások, a felszínborítások sokféle előfordulása miatt azonban ez nem megvalósítható, hanem más, rendszerint statisztikai módszerekkel érhetünk el közelítő, de kielégítő eredményt, ahogy ezt a későbbi fejezetekben bemutatjuk.

## 2.2. A távérzékelés technikai alapjai

A távérzékeléses felvételező-rendszerek három alrendszerből állnak: a felvevőeszközből (amely repülőgép vagy műhold fedélzetén található), az adattovábbítási csatornából és a földi vevőállomásból.



### 2.2.1. Aktív és passzív távérzékelés

A jegyzetben tárgyalt alkalmazások többségénél a távérzékelés felvétel úgy keletkezik, hogy a Nap, mint sugárforrás által kibocsátott elektromágneses sugárzás a földfelszínről visszaverődik, és a visszavert sugárzásból az érzékelőre, a szenzorra eső energiamentisítést mérjük.

Az energiaforrás szempontjából ezen kívül még két alapvető eset fordul elő. Az egyiknél a földfelszín, illetve az azon elhelyezkedő objektumok által kibocsátott hőszugárzást mérjük, tehát maga a földfelszín egyúttal a sugárforrás is. A másik esetben pedig a szenzor mellett elhelyezett eszköz maga bocsátja ki a sugárzást, amelynek a felszínről való visszaverődését mérjük.

Az utóbbi esetben, tehát amikor mesterségesen generáljuk a méréshez felhasználható elektromágneses sugárzást, *aktív távérzékelésről* beszélünk. *Passzív távérzékelésről* pedig az első két esetben, vagyis akkor, amikor a természetben keletkező sugárzás közvetíti az információt, tehát a földfelszín által visszavert napsugárzást vagy a felszíni saját (hő)sugárzását mérjük.

### 2.2.2. A távérzékeléses hordozóeszközök sokfélesége

A távérzékelés változatossága megnyilvánul a különböző magasságú pályán mozgó hordozóeszközök, a felvételezés eltérő napjainak, napszakainak, időpontjainak, valamint a különböző hullámhosszokra érzékeny érzékelők, szenzorok sokféleségében. A hordozóeszköz (pályájának) magasságát tekintve a következő csoportosítást alkalmazhatjuk:

- *A földi megfigyelésnél* minimálisan, csak néhány méterrel, de mégis a földfelszín fölé emeljük a szenzort. Ide tartozik például a daruskocsiról történő felvételezés. Bár így nagyon kis területet tudunk átfogni, de a légkör torzító hatását gyakorlatilag teljesen ki tudjuk küszöbölni. Így a földi megfigyelés kitűnően alkalmazható kalibrációs célú mérésekre.
- *A sárkányrepülő* 100–300 m-es magasságot érnek el. Viszonylag kis anyagi befektetéssel és infrastrukturális beruházással néhány négyzetkilométeres területet tudunk átfogni.
- Napjainkban igen erős felfutó tendenciát mutat *a kisméretű, személyzet nélküli gépek* száma, amelyeket drónoknak vagy angol rövidítéssel UAV-knek (Unmanned Aerial Vehicle) is nevezünk. Általában 30 és 600 m közötti magasságig emelkednek. A kisebb hatótávolságú, látótávolságon belül mozgó gépek vezérlése megoldható távirányítással, a nagyobb hatótávolságú gépeken viszont általában már automatikus szabályozás működik. A jegyzet írása idején Magyarországon aktuális téma a légiforgalom és a légi távérzékelés törvényi szabályozásának átalakulása a drónok megjelenése nyomán.
- *A repülőgépek* a légifényképezés bevált hordozóeszközei. Régebben hagyományos filmmel dolgozó fényképezőgépet, ma inkább digitális légiszenzor szerelnek egy speciálisan átalakított repülőgépre. A geometriai korrekciót giroszkóp és GPS, a radiometriai korrekciót a beeső napsugárzást (irradianciát) mérő műszer segíti. A kis magasságban repülő gépek pályája 300 m és 3 km közötti, a nagy magasságban repülő gépeké 3 és 10 km közötti távolságra van a földfelszíntől.

– A multispektrális úrtávérzékelés és a radar-távérzékelés leggyakrabban a *műholdakat* használja hordozóeszközként, amelyeket a pályájuk szempontjából két fő csoportra oszthatunk:

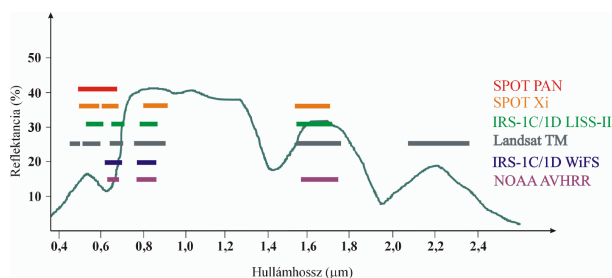
- *Az erőforráskutató műholdak* sarkközei (kvázipoláris vagy poláris) pályán keringenek. Ez a pálya napszinkron, vagyis a Földhöz képest mozgásban van a hold, kb. 400 és 1000 km közötti magasságban. A pálya a napon belül mindig ugyanabban az időpontban metszi az egyenlítőt, illetve általában, adott terület felett mindig azonos időpontban haladnak át. Ezek a holdak kisebb területi átfogással, ritkább (több naponta, vagy akár több hetente történő) felvételezési gyakorisággal, de nagyobb földfelszíni részletességgel rendelkeznek.
- *A meteorológiai műholdak* földszinkron (geostacionárius) pályán, tehát a Földdel együtt keringenek. A Földhöz képest látszólag ugyanabban a pontban helyezkednek el, az egyenlítő felett nagy, mintegy 36000 km-es magasságban. Globális területi átfogású, gyakori (akár óránként többszöri), de kis felszíni részletességű (kilométeres nagyságrendű képpontok) adatokat szolgáltatnak. Ahogy a nevük is mutatja, fő felhasználásuk az időjárás-előrejelzés.

### 2.2.3. A felvételkészítés módjai

A felvevőeszközök egyik részét a *fényképező típusú rendszerek* alkotják. A síkban kiterjedt, jellemzően téglalap alakú területről egyszerre készítenek egy képet, amelyet hagyományosan filmre rögzítettek, az utóbbi években viszont a digitális kamerák kerültek előtérbe. A feldolgozás módjában már hosszabb ideje a digitális módszereké a döntő szerep, vagyis amennyiben a felvétel analóg filmre készül, akkor is a szkenneléssel kezdik a munkát, és a további feldolgozási lépések digitálisan történnek. Spektrálisan a látható tartományon túl a közeli infravörös sáv egy részét fedik le.

A felvevőeszközök másik részét a *többsávos digitális pásztázó letapogatók* képezik. Spektrális lefedésük kiterjedhet a távoli infravörös tartományig is. A repülési irányra merőleges csíkok mentén mérik a sugárzás intenzitását. A régebbi rendszerek egy csíknál is sok részletben, minden egyes földi képpontról külön mérték az intenzitást. Mozgó (forgó vagy lengő) tükörrel oldották meg, hogy földfelszín egy pásztázott sorának minden egyes pixeléről érkező sugárzás a detektorra jusson. Az újabb rendszerek egy csík összes képpontját önálló detektorral, egyszerre felvételezik. Így jóval kevesebb mozgó alkatrészrel, vagyis kevesebb hibalehetőséggel oldható meg a teljes pásztázott sor felvételezése – ebben az esetben inkább az elemi detektorok összekalibrálása okoz megoldandó problémát. Síkban kiterjedt területek felvételezése csíkonként történik (szemben a fényképező típusú rendszerekkel).

A szenzorok az elemi felszínarabról összegyűjtött elektromágneses energiából bizonyos, számunkra érdekes hullámhosszakhoz tartozó energia nagyságát határozzák meg. A beérkező energiából érzékelt hullámhosszak az érzékelő anyagától, illetve az elé helyezett szűrőktől függenek, amelyek a teljes hullámhossz-tartomány egy-egy intervallumát engedik át. Így minden felvételezett elemi felszínarabhoz több intenzitásérték tartozik, az egyes hullámhossz-intervallumoknak – spektrális sávoknak – megfelelően. Ezzel lényegében a spektrális reflektancia-függvényt mintavételezzük (ld. a 2.4. ábrát).



2.4. ábra. A fejelett növényzet tipikus reflektanciagörbéje és néhány szenzor felvételezési tartományai

Az így mért energia, illetve a reflektancia-függvény mintavételezésének finomsága értelemszerűen függ az elemi felszín darab nagyságától, a hullámhossz-intervallumok szélességétől és egy elemi felszín darab felvételezésének időtartamától.

#### 2.2.4. A digitális felvételek matematikai ábrázolása

Egy többsávos digitális felvétel olyan mátrixként ábrázolható, amelynek minden eleme egy elemi felszín darabnak felel meg; az elemek „koordinátái” kapcsolatban vannak a felszín darab földrajzi helyével. A mátrixelemek maguk is vektorok, melyek elemei egy felszín darabon belül a különböző spektrális sávokban mért intenzitásértékeket tartalmazzák. A mért energia nagyságát nem lehet tetszőleges pontossággal ábrázolni, hanem diszkrét energiaszintekkel teszünk különbséget az intenzitásértékek között (kvantálás). Ezt illusztrálja a 2.5. ábra: a felső képen egy országos úrfelvétel látható, melynek kinagyított, az egyes pixeleket külön-külön mutató részét a bal alsó kép mutatja, tőle jobbra pedig egy kiválasztott pixelhez tartozó sávértékek láthatók.

Egy  $N$  sorból,  $M$  oszlopból álló többsávos digitális felvétel matematikailag a következőképpen írható le:

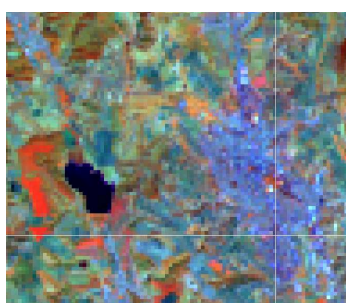
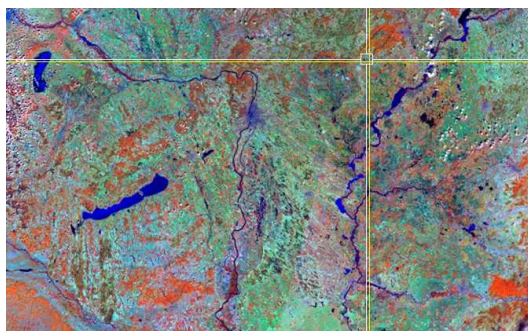
$$V = \begin{pmatrix} \vec{v}_{11} & \dots & \vec{v}_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \vec{v}_{N1} & \dots & \vec{v}_{NM} \end{pmatrix},$$

ahol  $B$  számú spektrális sávot feltételezve  $\vec{v}_{ij} = (v_{ij1}, \dots, v_{ijB})$ . A mátrix koordinátáinak és értékeinek pontos jelentése, értelmezése az alkalmazástól függ, és az előfeldolgozás körébe tartozik a különböző értelmezések közötti átszámítás. A bevezetett terminológiára épülő tematikus osztályozási módszertant az 5., a 6. és a 7. fejezetek ismertetik.

#### 2.2.5. A távérzékelési alkalmazások előnyei és hátrányai

A távérzékelés fizikai és technikai alapjainak ismeretében az alábbiakban röviden összefoglaljuk az alkalmazások előnyeit és hátrányait, adott esetben összehasonlítva a klasszikus helyszíni felmérési módszerekkel.

Ami az *előnyöket* illeti, a távérzékelés a hőskora óta egészen napjainkig modern adatgyűjtési eljárásnak tekinthető. Nagy területekről egységes képet,



Layer	Band	FILE PIXEL	LUT VALUE	HISTOGRAM
1		81.000		234009.000
2		35.000		446877.000
3	Blue	40.000	127.000	169857.000
4	Red	57.000	93.000	115182.000
5	Green	70.000	112.000	139239.000
6		123.000		213597.000
7		37.000		115182.000

2.5. ábra. A digitális űrfelvételek „felépítése”

„pillanatfelvételt” ad. Gyors (főleg, ha egy nagyobb terület teljes felmérésének időigényét vizsgáljuk), több időpontban is figyelhetjük a felszín változásait, és megismételhető a kiértékelés (az egyszer már felvett és archivált felvételeket később is elővehetjük és analizálhatjuk). A fajlagos költsége viszonylag alacsony. Az előbbiekkal összhangban jó a térbeli és időbeli mintavételező-képessége. Digitálisan tárolt adatokkal dolgozunk, amelyeket objektíven tudjuk kiértékelni.

Azt is a digitális technika használatának köszönhetjük, hogy a számítógépes rendszerben több forrású, különböző felbontású és több időpontú felvételeket együttesen, integráltan elemezhetünk. Egy adott időpont felmérésén túl a hosszabb időn át zajló folyamatokat is monitorozhatjuk, sőt, a jövőre nézve is előrejelezhetjük a felszín változásait. A digitális adatrendszer alapján mennyiségi és minőségi elemzéseket végezhetünk.

Néhány *hátránya*, nehézsége is van a távérzékelésnek. A közvetlen mérések helyett közvetett úton kapott adatok alapján kell elvégezni a kiértékelést. A feldolgozási láncot jelentős, megalapozott kutatás és fejlesztés kell, hogy megelőzze. A számítógépes és a vizuális kiértékeléshez is komoly infrastrukturális beruházás és szakmai háttér szükséges.

## 3. fejezet

# A felvételek típusai és jellemzői

Ebben a fejezetben a szerzők eddigi gyakorlatában legtöbbször használt műholdas felvételező-rendszereket tekintjük át, a 3.1. szakaszban ismertetett szempontok szerint csoportosítva. Ez a 10. fejezetet tekintve is meghatározó, ugyanis ott ugyanezen szempontok alapján kerülnek bemutatásra a gyakorlati távérzékelési alkalmazásokban felhasznált felvételek.

### 3.1. A műholdas felvételező-rendszerek jellemzői

A felvételező-rendszereket három alapvető kategória: a térbeli, a spektrális és az időbeli tulajdonságaik szerint jellemezhetjük. Az egyes kategóriák paraméterei meghatározott technikai és gazdaságossági összefüggésben állnak egymással; a felvételező-rendszerek fejlődése mellett sem lehet függetlenül kezelni őket.

A jellemzők alábbi leírásában megadjuk, hogy a jelenleg általános használatban lévő erőforrás-kutató és meteorológiai műholdak esetében milyen tipikus paraméterértékek fordulnak elő.

**A térbeli tulajdonságok** írják le a geometriai kapcsolatot egy digitális felvétel pixeljei (a 2.2.4. alszakaszban bemutatott  $V$  mátrix sor- és oszlopkoordinátái) és az általuk ábrázolt terület egységek között.

- *A területi lefedés* a teljes felvétel által lefedett területdarab nagyságát jelenti. *A fényképező típusú rendszereknél* ez a fogalom egyszerűen kézzelfogható, ugyanis egy felvétel a teljes kiterjedésére nézve egy időpillanatban készül. *A lineáris sorrendezésű digitális pásztázó letapogatóknál* a területi lefedés gyakorlatilag a haladási irányra merőleges csík (a pászta) szélességétől függ, amelyről (megközelítőleg) egy időben készül a felvétel (Field of View, FOV). Ugyanis folyamatos felvételezés esetén „hosszában”, a haladási irányval párhuzamosan akár mekkora távolságot végigpásztázhatunk, ebben az irányban nincs behatárolva a felvételezés. Szokás a pászta szélességével (közel) azonos hosszúságú képdarabot tekinteni egy feldolgozási egységnek (képkeretnek). Erre mutató korlátozó szempont az is, ha egy műhold nem tárolja el a vett adatokat, hanem valós időben továbbítja

azokat a földi vevőállomásra, mivel a fedélzeti háttértár hiánya határt szab a képeret hosszának.

A területi lefedés szempontjából előnyös az a gyakorlat, amelyet néhány napszinkron műholdnál állítottak be: a Földhöz viszonyítva a műhold mindig ugyanazon a szabályos pályán, előre definiált „utakon” (path) mozog, így szabályos időközönként nagy pontossággal ugyanarról a területről készít felvételt.

A területi lefedés jellemzően  $16 \text{ km} \times 16 \text{ km}$  (szuperfelbontású felvételek) és  $2500 \text{ km} \times 2500 \text{ km}$  (kisfelbontású felvételek) között vált ozik.

- *A térbeli felbontás* azt írja le, hogy mekkora a föld felszínén a legkisebb megkülönböztethető felszínadarab, amely egy képpontnak felel meg (Instantaneous Field of View – IFOV). A felvételezés során tulajdonképpen egy szabályos ráccsal felosztjuk a felszínt, ahol a rácselemek az elemi felszínadaraboknak felelnek meg. Egy alkalmazásnál úgy kell megválasztani a felvételtípust, hogy a képpontméret igazodjon a felmérni kívánt objektumok méretéhez. Ehhez azonban figyelembe kell venni, hogy az úrfelvételeken általában (kellően nagy kontraszt esetén) a pixelméretnél kisebb objektumok is észrevehetőek, ugyanis ezek sugárzása is hozzájárul az egyes képpontokhoz tartozó összegyűjtött sugárzásértékhez.

A pixelméret a gyakorlatunkban előforduló felvételeknél kb.  $0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$  és  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  közé esik, a leggyakrabban előforduló ún. nagyfelbontású felvételek esetén  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  és  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$  körüli.

**A spektrális tulajdonságok** határozzák meg a digitális felvétel pixelértékei és a felvételezett területről érkező, hullámsávtól függő sugárzási értékek közötti kapcsolatot.

- *A spektrális felbontás* adja meg a felvételezett hullámsávok számát, a teljes elektromágneses spektrumon belüli elhelyezkedésüket és a szélességüket. Ezekből a paraméterekből kiolvasható a teljes lefedett hullámsáv-tartomány. Két (azonos hullámsáv-tartományt lefedő) felvétel-típus közül azt tekintjük nagyobb spektrális felbontásúnak, amelyik több részre osztja ugyanazt a hullámsáv-tartományt. Egy adott alkalmazáshoz felhasználni kívánt felvételtípus kiválasztásánál fontos szempont, hogy spektrálisan alkalmas legyen a megfigyelt fizikai jelenség részleteinek rögzítésére.

Az ún. pankromatikus szenzorok egy spektrális sávot felvételeznek, amely lefedi a teljes látható tartományt, illetve belenyúlhat a közeli infravörös tartományba. A leggyakrabban használt multispektrális szenzorok sávszáma általában 3 és 7 között van, és a reflektív tartomány többé-kevésbé teljes lefedése mellett bizonyos szenzorok a termális infravörös sávot is felvételezik.

- Az érzékelő a beérkező energiamennyiséget digitális számokká (intenzitási-értékek, sávértékek) alakítja. *A radiometriai felbontás* a kvantálás finomságát jelzi: több energiaszint nagyobb radiometriai felbontást jelent. A megkülönböztethető energiaszintek számát két szempont határozza meg. Egyrészt, korlátozzák a technikai lehetőségek, pl. a szenzor anyaga, felépítése és a hozzá kapcsolt analóg/digitális-átalakító érzékenysége. Másrészt, az energiaszintek számát érdemes a zajszintérzékenység alatt tartani, hogy

a sávértékek eltérését ne a véletlen zaj határozza meg, hanem érdemi, szignifikáns különbséget jelentsen a földfelszín elhagyó sugárzásban.

Ez a paraméter kevésbé változékony: 7-8 bittől 10-12 bitig terjed. A legelterjedtebben használt nagyfelbontású multispektrális szenzoroknál jellemző a 7-8 bites felbontás, amely 128, illetve 256 intenzitásszintnek felel meg. A nagyobb radiometriai felbontáshoz (10-12 bit: 1024-4096 szint) térbeli felbontásban a skála két vége tartozik, vagyis a kisfelbontású, illetve a szuperfelbontású felvételek csoportja.

**Az időbeli tulajdonságok** összefoglalóan azokat a felvételezéshez és az adattovábbításhoz, előfeldolgozáshoz kapcsolódó jellemzőket jelentik, amelyeknél az idő dimenziója játszik szerepet.

- A *visszatérési idő* adja meg, hogy a rendszer milyen gyakran tud ugyanarról a területről felvételt készíteni. Ez a környezetben lejátszódó folyamatok monitorozása szempontjából lehet fontos. A különböző folyamatok igen eltérő igényt támasztanak ezzel a jellemzővel szemben: egy árvíznél gyakorlatilag óráról órára kell követni az elöntést, az aszály monitorozásánál 2-3 naponta szükséges egy-egy újfelvétel, míg növényterképezési alkalmazásoknál évente (a vegetációs időszakon belül) összesen 4-5 felvétel is elég a megfelelő pontossághoz.

A visszatérési idő definíciójánál megkülönböztetjük az alábbi két esetet:

1. A célterületnél a felvételezés geometriája is megegyezik az egymást követő felvételeknél. A terület a felvételnek ugyanazon a részén, a műhold földre vonatkozó merőleges vetületéhez képest ugyanannyival eltolva található.
2. A geometria nem egyezik meg: az egymás utáni felvételeken eltérő pozíción, eltérő felvételezési geometriával látszik a terület. A visszatérési idő csökkenthető azáltal, ha az egész érzékelőt el lehet fordítani a repülési irányra merőlegesen vagy azzal párhuzamosan, így az egyszerre felvételezett pászta helyzete változhat a műhold merőleges vetületéhez képest.

A kisfelbontású holdak akár naponta több felvételt is készítenek ugyanarról a területről (nem feltétlenül ugyanazzal a geometriával), a nagyfelbontású holdak tipikus visszatérési értéke 16-24 nap. Szuperfelbontású felvételeknél szükség szerint programozással a visszatérési idő akár pár nap is lehet, de gazdaságossági korlátokat is figyelembe véve egy területről évente általában nem készül egynél több felvétel.

- Az időkritikus alkalmazásoknál fontos a felvételezett *adatokhoz való hozzáférés ideje*, vagyis hogy a felvételkészítéstől mennyi idő telik el, amíg az adatok a felhasználóhoz jutnak. A leggyorsabb mód, ha a felhasználó azonnal letölti a műholdról a vett adatokat rádiókapcsolaton keresztül. A jelenleg üzemelő műholdak többségénél viszont az a jellemző, hogy a vett adat néhány meghatározott földi vevőállomás valamelyikére kerül, ahonnan a rendszerkorrekció elvégzése után továbbítják a felhasználóhoz, amely a továbbítás módjától függően 1-2 napot (hálózati átvitel) vagy 3-5 napot (postai továbbítás) vesz igénybe.

Az egyéb tulajdonságok közül itt csak az *árat* említjük meg, amelynek megítélésénél nemcsak egyszerűen egy adott nagyságú területre vonatkoztatott egységárat kell figyelembe venni, hanem azt is, hogy a feldolgozás eredményeként várható haszon hogy viszonyul a befektetett pénzösszeghez.

### 3.2. Nagyfelbontású űrfelvételek

A tematikus térképezési alkalmazások szempontjából a legfontosabb a nagyfelbontású űrfelvételek csoportja. Három műholdcsaládot ismertetünk, amelyek nagyfelbontású szenzorai hasonló paraméterekkel rendelkeznek, így az alkalmazások többségénél hatékonyan kiegészítik, helyettesítik egymást.

Az amerikai Landsat műholdcsaládban 1972-ben állították pályára az első műholdat. A jegyzet írásának időpontjában a 8. hold a legújabb, ezen kívül még a 7. üzemel. A hagyományosan használt TM (Thematic Mapper), illetve ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) szenzorokat, illetve a Landsat 8-as műholdon (Landsat Data Continuity Mission – LDCM) működő OLI (Operational Land Imager) szenzort úgy tervezték, hogy kiemelten alkalmasak legyenek a növényzet felmérésére – pl. a mezőgazdasági és erdészeti alkalmazásokban –, illetve ehhez részben kapcsolódva a talajok, illetve a kőzetek megfigyelésére. A rögzített földfelszíni pályáknak köszönhetően az áthaladások jól tervezhetők. A Landsat 5-ös és 7-es holdakból álló konstelláció a működése idején együttesen négy egymást követő nap alatt Magyarország teljes fedését el tudta készíteni.

<b>Landsat 5 TM és Landsat 7 ETM+</b>	
Területi lefedés	185 km × 185 km
Térbeli felbontás	mindkettőnél: 30 m, kivéve a termális: 60 m (5-ös)/120 m (7-es), a 7-esnél még 15 m (pankromatikus) is szerepel
Spektrális sávok	7 (3 látható, 1 közeli infra, 2 közepes infra, 1 termális) mindkettőnél, a 7-esnél még 1 pankromatikus is szerepel
Radiometriai felbontás	8 bit
Visszatérési idő	16 nap (azonos geometria)

<b>Landsat 8 OLI és TIRS</b>	
Területi lefedés	170 km × 185 km
Térbeli felbontás	OLI: 30 m; 15 m (pankromatikus), TIRS: 100 m
Spektrális sávok	OLI: 9 (3 látható, 1 vörösél, 2 közeli infra, 2 közepes infra, 1 pankromatikus), TIRS: 2 távoli infra
Radiometriai felbontás	OLI: 8 bit, TIRS: 12 bit
Visszatérési idő	16 nap (azonos geometria)

Az 1986-ban elindított francia SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre) műholdcsalád célja a Landsat-hez hasonló adatok biztosítása, jobb területi paraméterekkel. Ez egyrészt a térbeli felbontás növelését jelenti. Másrészt



nagyfokú rugalmasságot jelent a felvételezett területben: a földi vevőállomásról végzett programozással a szenzor elfordítható, képes oldalra tekinteni, így sokkal kevésbé kötött a felvételezett terület elhelyezkedése a pályához képest. A spektrális tulajdonságok az alkalmazások többségének megfelelnek, leginkább csak a közepes infravörös sáv hiánya okoz problémát a család első három holdjánál és a SPOT 6-nál. A műholdcsalád jelenleg a legfontosabb távérzékeléses adatszolgáltató az EU-s mezőgazdasági támogatások ellenőrzéséhez.

<b>SPOT 2 HRV</b> (Haute Résolution dans le Visible) <b>SPOT 4 HRVIR</b> (Haute Résolution dans le Visible et l'InfraRouge)	
Területi lefedés	60 km × 60 km (pankromatikus); 80 km × 80 km (multispektrális)
Térbeli felbontás	10 m (pankromatikus); 20 m
Spektrális sávok	<b>SPOT 2:</b> Multi: 3 (2 látható, 1 közeli infra); Pan: 1 <b>SPOT 4:</b> Multi: 4 (2 látható, 1 közeli, 1 közepes infra); Pan: 1
Radiometriai felbontás	8 bit
Visszatérési idő	1-3 nap (programozással)

<b>SPOT 5 HRG</b> (Haute Résolution Géométrique)	
Területi lefedés	60 km × 60 km (pankromatikus); 80 km × 80 km (multispektrális)
Térbeli felbontás	5 m (pankromatikus); 10 m; 20 m (közepes infra)
Spektrális sávok	Multispektrális: 4 (2 látható, 1 közeli infra, 1 közepes infra); Pan: 1
Radiometriai felbontás	8 bit
Visszatérési idő	1-3 nap (programozással)

<b>SPOT 6</b>	
Területi lefedés	60 km × 60 km
Térbeli felbontás	1,5 m (pankromatikus); 6 m (multispektrális)
Spektrális sávok	Multispektrális: 4 (3 látható, 1 közeli infra); Pan: 1
Radiometriai felbontás	8-12 bit
Visszatérési idő	1-3 nap (programozással)

Az indiai IRS (Indian Remote Sensing) műholdcsalád állandó fejlődés mellett többféle típusú távérzékelési adatot szolgáltat. Az IRS 1C és 1D, illetve az újabb P6 (Resourcesat-1) és R2 (Resourcesat-2) holdakat úgy tervezték, hogy párban működve jól kiegészítsék egymást, így a műszaki tulajdonságaik is igen hasonlóak. A LISS III. szenzor (Linear Imaging and Self Scanning Sensor) az előző két műholdcsaládnál bemutatottakhoz hasonló paraméterű nagyfelbontású felvételeket készít, míg a LISS IV-nél a kedvező spektrális tulajdonságok megtartása mellett jelentősen megnövelték a térbeli felbontást.

<b>IRS 1C/1D/P6/R2 LISS III.</b>	
Területi lefedés	141 km × 141 km
Térbeli felbontás	5,8 m (pankromatikus); 23 m; 70 m (közepes infra)
Spektrális sávok	Multispektrális: 4 (2 látható, 1 közeli infra, 1 közepes infra); Pan: 1
Radiometriai felbontás	7 bit
Visszatérési idő	24 nap (azonos geometria)

<b>IRS P6/R2 LISS IV.</b>	
Területi lefedés	24 km × 24 km
Térbeli felbontás	5,8 m
Spektrális sávok	4 (2 látható, 1 közeli infra, 1 közepes infra)
Radiometriai felbontás	7 bit
Visszatérési idő	5 nap (programozással)

### 3.3. Kisfelbontású űrfelvételek

Az elsősorban meteorológiai, hidrológiai és oceanográfiai feladatokra tervezett, az üzemeltető National Oceanic and Atmospheric Administration nevét viselő NOAA műholdcsalád által készített felvételeket elterjedten alkalmazzák a növényzet megfigyelésében is. A családban körülbelül két évenként bocsájtottak fel egy újabb műholdat. Jelenleg a NOAA 18-as jelzésű a legújabb. Az AVHRR szenzor (Advanced Very High Resolution Radiometer) nevében a nagyon nagy felbontás nem a geometriára, hanem a radiometriára vonatkozik: az 1024 kvantálási szint a bevezetés időszakában tényleg kiemelkedő volt, és ilyen szempontból ma is a legjobbak között áll. A képpontmérete és a területi lefedése is igen nagy, így a szenzor inkább nagy területek átfogó monitorozására alkalmas. Adott vevőállomás esetén egy-egy holdnak naponta általában 6 áthaladását lehet venni, ezek közül legtöbbször 1 olyan nappali felvétel van, amelyik elég jó geometriával mutatja a vevőállomás néhány száz kilométeres környezetét. ([18])

<b>NOAA AVHRR/3</b>	
Területi lefedés	2500 km × 2500 km
Térbeli felbontás	1100 m
Spektrális sávok	5 (1 látható, 1 közeli infra, 1 közepes infra/termális (napszaktól függően változik az üzemmód), 2 termális)
Radiometriai felbontás	10 bit
Visszatérési idő	1-6 felvétel/nap (változó geometriával)

### 3.4. Szuperfelbontású űrfelvételek

Napjainkban egyre nagyobb a kereslet olyan űrfelvételekre, amelyekkel lehetővé válik a földfelszín térképezése 1 m-es vagy finomabb pixelmérettel, vagyis készíthetők olyan felvételek, amelyek térbeli felbontása a légifelvételekéhez hasonló. Ezt az igényt elégítik ki a 2000-es évek elejétől széles körben hozzáférhető adatokat szolgáltató szuperfelbontású szenzorok. Bár spektrálisan még gyengébbek, mint a nagyfelbontású felvételek (a jegyzet írásának időpontjában még nincs olyan működő szuperfelbontású szenzor, amely rendelkezne közepes infravörös sávval), de a nagy térbeli és radiometriai felbontásnak köszönhetően gyakran olyan tematikus információ olvasható ki a szuperfelbontású felvételekből, amely egyébként nem állna rendelkezésre. Az Ikonos és a QuickBird műhold felvételei éveken keresztül a területmérés fő adatforrásai voltak az EU-s mezőgazdasági támogatások ellenőrzésénél.

Ikonos	
Területi lefedés	11 km × 11 km (egy pásztázás, nadírban) 30 km × 30 km (egy áthaladás során több pásztázással)
Térbeli felbontás	Multispektrális: 4 m; Pankromatikus: 1 m
Spektrális sávok	Multispektrális: 4 (3 látható, 1 közeli infra); Pan: 1
Radiometriai felbontás	11 bit
Visszatérési idő	1-3 nap (programozással)

QuickBird	
Területi lefedés	14 km × 52 km (Praktikus képermet-méret)
Térbeli felbontás	Multispektrális: 2,4 m; Pankromatikus: 0,6 m
Spektrális sávok	Multispektrális: 4 (3 látható, 1 közeli infra); Pan: 1
Radiometriai felbontás	11 bit
Visszatérési idő	1-3 nap (programozással)

Napjainkra a „klasszikus” szuperfelbontású szenzorok helyét bizonyos szempontból modernebb felvételező-rendszerek vették át.

- A **GeoEye-1** a jelenlegi legfinomabb, 41 cm-es pixelméret mellett kiemelkedő helyzeti pontosságot biztosít.
- A **WorldView-2** a szokásos 4 sávon kívül egy „tengerparti” kék (coastal blue), sárga, vörösel (red edge) és egy további közeli infravörös sávot kínál.
- A **Pléiades-1A/1B**-konstelláció együttesen 1 napos visszatérési időt biztosít, és képes az ún. tri-stereo felvételezésre, vagyis egy áthaladás során három irányból is felvételezni ugyanazt a területet, amely erős alapot nyújt a sztereo-fotogrammetriai kiértékeléshez.

### 3.5. Közepes felbontású űrfelvételek

A monitorozási feladatokban a nagyfelbontású felvételeket jól kiegészítik a közepes felbontású szenzorok által készített képek. A 3.2. szakaszban bevezetett indiai IRS műholdcsalád 1C és 1D jelű holdjain a WiFS (Wide Field Sensor), a P6 és R2 jelű holdakon pedig az AWiFS (Advanced WiFS) szenzor készíti közepes térbeli felbontású, viszont nagyon nagy területi lefedést biztosító felvételeket.

IRS P6/R2 AWiFS	
Területi lefedés	737 km × 737 km
Térbeli felbontás	56 m (AWiFS)
Spektrális sávok	4 (2 látható, 1 közeli infra, 1 közepes infra)
Radiometriai felbontás	10 bit
Visszatérési idő	5 nap (programozással)

Az Európai Űrügynökség (European Space Agency, ESA) 2002. márciusában lőtte fel az ENVISAT műholdat, amelynek célja a nevéhez méltóan különböző környezeti monitorozási feladatok végrehajtása volt. Napszinkron pályán, 800 km-es magasságban kering a Föld körül, 10 szenzort hordozva. Magának a műholdnak 35 nap a visszatérési ideje, vagyis a pályája periódusideje. Bár 2012. áprilisában a kommunikáció megszakadása miatt az ESA befejezettnek minősítette az ENVISAT küldetését, de az operatív évek alatt jelentős kutatási-fejlesztési munka és alkalmazás kapcsolódott a holdhoz.

Az alkalmazásaink szempontjából legjelentősebb multispektrális optikai szenzora a MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer). Érdekessége, hogy nem előre meghatározott az egyes spektrális sávok által lefedett hullámsáv-tartomány, hanem programozható, 0,3 és 1,05 nm közötti szélességű intervallumok alakíthatók ki. A nyers sávértékeken túl nagy szerepük van a származtatott adatoknak, amelyek készen is hozzáférhetők (pl. felszíni reflektancia, vízpáratartalom).

ENVISAT MERIS	
Területi lefedés	Óceán: 1040 km × 1200 km Föld: 260 km × 300 km
Térbeli felbontás	300 m (teljes) 1200 m (csökkentett)
Spektrális sávok	15 programozható 390 és 1040 nm között
Radiometriai felbontás	16 bit
Visszatérési idő	3 nap (eltérő geometriával)

Végül a NASA műholdjain elhelyezkedő MODIS szenzort vesszük sorra. A TERRA holdat 1999-ben, az AQUA-t pedig 2002-ben állították 705 km-es napszinkron pályára. Bár nem egészen azonos a két műhold felépítése, de a MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) multispektrális szenzor mind a kettőn megtalálható. A vett adatok szabadon hozzáférhetők.

<b>TERRA/AQUA MODIS</b>	
Területi lefedés	2330 km-es pásztaszélesség
Térbeli felbontás	250 m (1-2. sáv), 500 m (3-7. sáv), 1000 m (8-36. sáv)
Spektrális sávok	36 sáv 0,62 és 14,385 $\mu\text{m}$ között (nem folytonos, nem monoton)
Radiometriai felbontás	12 bit
Visszatérési idő	1-2 nap

## 4. fejezet

# Az előfeldolgozás

A felvételezés után a távérzékelte adatokon bizonyos előfeldolgozási műveleteket kell végrehajtani, mielőtt felhasználjuk a vizuális vagy numerikus kiértékelésben. Egyrészt, a „nyers” adatokat különféle radiometriai és geometriai hibák terhelik, amelyeket lehetőség szerint ki kell küszöbölni. Ide tartozik pl. a légkör zavaró hatása, a szenzor működéséből, a hordozóeszköz (műhold, repülőgép) mozgásának szabálytalanságaiból származó torzítások, valamint a domborzat egyenetlenségéből adódó eltérések és a szomszédos területekről történő átsugárzás. Másrészt, a hatékony feldolgozás érdekében érdemes minden felvételt egységes geometriai és radiometriai rendszerbe transzformálva kezelni. Ennek kiemelt jelentősége van akkor, amikor egy alkalmazáson belül használunk több felvételt.

A műholdfelvételeken bizonyos korrekciós lépéseket már a földi vevőállomáson, a felhasználóknak történő átadás előtt elvégezzük. Ezeket a lépéseket összefoglalóan *rendszerkorrekciónak* hívjuk. Intenzitást érintő és geometriai műveleteket egyaránt magába foglal.

Az előfeldolgozási műveleteknek két nagy csoportját különböztetjük meg:

- Az *intenzitás-korrekció* alatt összefoglalóan azokat a műveleteket értjük, amelyekkel a felvételek képpontjaihoz, illetve ezen belül az egyes spektrális sávokhoz tartozó sávonkénti intenzitást módosítjuk. Egy részük *globális* abban az értelemben, hogy a változtatást leíró függvény a teljes felvételen egységes, nem függ az adott képpont helyétől és környezetétől, csak az intenzitásától. A másik részük *lokális*, tehát például a képpont pozíciója és a szomszédos képpontok értéke is befolyásolja a függvény értékét. Az intenzitás-korrekciónak két fő célja van:
  - A *képhelyreállítási (restoration) technikák* a felvétel fizikai hűségét segítik elő. Ide tartozik elsősorban a radiometriai korrekció. Ennek célja – a szenzor paramétereitől és a vételi körülményektől függően – az esetek egy részében a pontszerű képhibák kiszűrése.
  - A *képi látvány javítását szolgáló műveletek (enhancement)* célja a felvételek optimalizálása vizuális kiértékeléshez. Ide tartozik például a kontrasztfokozás, az éldetektálás, az élkiemelés. A látvány javítását szolgáló műveletek után általában nem végezhető el a digitális kép-analízis (numerikus, statisztikai feldolgozás) egyes lépései, mivel nem invertálhatóan változhatnak a pixelértékek, a transzformáció nem injektív.

- A *geometriai korrekció* segítségével a nyers műholdfelvétel pontjait összefüggésbe hozzuk a földfelszíni pozíciójukkal (ezt a műveletet *georeferálásnak* nevezzük), majd ezt a kapcsolatot felhasználva a felvételt egy megadott vetületi, térképi rendszerbe transzformáljuk.

## 4.1. Intenzitás-műveletek

Az intenzitás-műveleteket rendszerint megelőzi egy általános vizsgálat, melynek során a felvétel képpontjainak intenzitás-eloszlását vizsgáljuk a vizuális vagy numerikus feldolgozásra való alkalmasság szempontjából. A ténylegesen végrehajtott lépések nagyban függenek a felhasználás céljától, ugyanis az emberi szem és agy teljesen más szempontok alapján tesz különbséget a felvételen látható objektumok, felszínborítások között, mint a numerikus értékekkel dolgozó számítógépes algoritmusok.

### 4.1.1. Elemi képpontstatisztikák készítése

Az elemi képpontstatisztikák hasznosak a vizuális és a numerikus kiértékelés előkészítése során is. Egy  $N$  sorból és  $M$  oszlopból álló,  $B$  sávós digitális felvétel esetén tekinthetjük a pontok számát ( $N * M$ ), illetve egy kiválasztott sávra a pixelértékek minimumát, maximumát, átlagát, szórását és mediánsát (a rendezett minta középső elemét, páros elemszámnál a két középső elem átlagát). Vizsgálhatjuk az intenzitásértékek teljes eloszlását, vagyis a tapasztalati sűrűségfüggvényüket.

A bevezetett terminológiát használva például a  $b$ . sáv ( $b \in [1..B]$ ) átlagát a következőképpen számolhatjuk az  $N \times M$  méretű,  $B$  sávós,  $V$  mátrix-szal ábrázolt távérzékelt felvétel esetén:

$$\mu_b = \frac{1}{N * M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M v_{ijb}$$

Az egyes képsávok külön-külön történő vizsgálatán túl hasznos két vagy több sáv együttes viselkedésének a vizsgálata is. Az intenzitásértékek nem függetlenek egymástól a különböző spektrális sávokban, ezek összefüggését fejezi ki a *kovariancia*. Egy felvétel  $a$ . és  $b$ . sávja ( $a, b \in [1..B]$ ) közötti kovarianciát a következő képlettel számolhatjuk ki:

$$\Sigma_{ab} = \frac{1}{N * M - 1} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (v_{ija} - \mu_a)(v_{jib} - \mu_b)$$

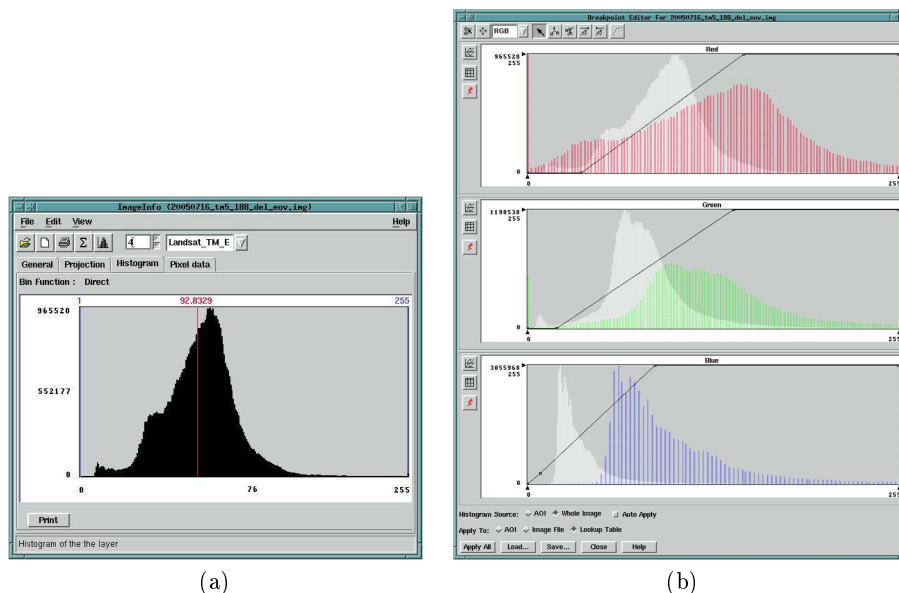
A képletből is adódik, hogy a felvétel minden lehetséges sávparjának kovarianciáját tartalmazó mátrix szimmetrikus, és a főátlóban nemnegatív elemek találhatóak. A főátló elemei az egyes sávok szórásnégyzetének torzítatlan becslései. Így a  $b$ . sáv szórását a  $\sigma_b = \sqrt{\Sigma_{bb}}$  képlettel számolhatjuk. (Egyes források  $N * M$ -mel normálják az eredményt, amely nem a statisztikailag torzítatlan becslést adja meg. Azonban nagy elemszám esetén nincs lényeges eltérés a kettő között. A  $\Sigma_{ab}$  jelölés helyett a  $cov_{ab}$ -t is szokás használni.)

A kovarianciánál általában kezelhetőbb mennyiség a *korreláció*, amelyet szintén két sáv között értelmezünk, és kiszámításához a kovarianciát osztjuk a két sáv szórásával:

$$corr_{ab} = \Sigma_{ab} / (\sigma_a * \sigma_b)$$

A korreláció értéke mindig  $-1$  és  $1$  közé esik. A nagyobb abszolút érték erősebb összefüggést jelent, a nulla körüli értékek pedig a két sáv függetlenségére utalnak. Pozitív érték esetén az egyik sáv értékének növekedésével együtt jellemzően a másik sáv értéke is növekszik. A korreláció vizsgálata hasznos a vizuális megjelenítésben és a numerikus kiértékelésben is, mivel kiválaszthatjuk a sávoknak azt a részhalmazát a további feldolgozásra, amelyek együttesen több információt hordoznak.

A *hisztogram* a statisztikában megszokott módon az egyes elemek – esetünkben a spektrális sávok számának megfelelő dimenziós intenzitásvektorok – előfordulási gyakoriságát (vagy relatív gyakoriságát) adja meg. Az áttekinthetőség kedvéért szokás az összes sávból kiválasztani néhányat, és csak ezekre vizsgálni az eloszlást. A 4.1. (a) ábrán egydimenziós hisztogram látható egy űrfelvétel kiválasztott sávjáról, ahogy a képfeldolgozó szoftverben megjelenik.



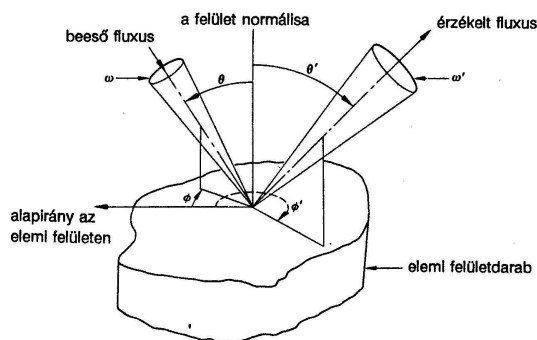
4.1. ábra. Egy űrfelvétel-sáv hisztogramja (a), valamint egy egy háromsávos felvétel hisztogramkihúzásának (hisztogram-transzformációjának) részeredményei (b); szürkével az eredeti hisztogram, folytonos vonallal a transzformációt megvalósító függvény, színessel a kihúzott hisztogram

#### 4.1.2. Radiometriai korrekció

A képhelyreállítási technikákhoz tartozó radiometriai korrekcióval a felvétel pixeljeinek digitális értékéből (digital number, DN) következtethetünk vissza a földfelszín fizikai paramétereire. A rendelkezésre álló korrekciós, kalibrációs adatok és a feldolgozás igényeinek függvényében a reflektív hullámsávok esetében a radiometriai korrekció alábbi szintjeit különböztethetjük meg.



- A *spektrális radiancia* a szenzorra érkező elektromágneses sugárzás intenzitása, a térszögre eső energiasűrűség, amely a hullámhossztól is függ. Mértékegysége a  $W/(m^2 * \mu m * sr)$ . A digitális értékkel legtöbbször lineáris kapcsolatban áll, melynek meredekségét *gain*-nek, konstans tagját *offset*-nek nevezi a szakirodalom. A sávonkénti gain- és offset-értékeket – mivel időben változhatnak a szenzorok üzemmódjától és a detektorok korával járó degradációtól függően – általában az űrfelvételekkel együtt biztosítja a forgalmazó.
- A *ToA-reflektancia* (top of atmosphere reflectance, „légkör tetején mérhető reflektancia”) a felszín visszaverésének, vagyis a visszavert és a beeső sugárzás arányának olyan közelítése, amely nem veszi figyelembe a sugárzás és a légkör közötti kölcsönhatást. A radianciából számolható, figyelembe véve a Nap, a felvételezett terület (földi képpont) és a szenzor geometriai viszonyát, valamint az adott hullámsávban beeső napsugárzás intenzitását (irradiancia). A számításhoz használt geometriai jellemzőket illusztrálja a 4.2. ábra.
- A *felszíni reflektancia* számításánál a ToA-reflektanciából kiindulva végrehajtjuk a légköri korrekciót, vagyis figyelembe vesszük azokat a kölcsönhatásokat, amelyekben a Napról a földfelszínre eső, illetve a földfelszínről a szenzor felé haladó sugárzás részt vesz. Elsősorban a vízpára, az ózon és a szén-dioxid hatásával számolunk. A távérzékelés fejlődésével több fizikai modellt alakítottak ki a légkör hatásainak minél jobb közelítésére (pl. LOWTRAN, MODTRAN), amelyek segítségével elvégezhető a légköri korrekció.



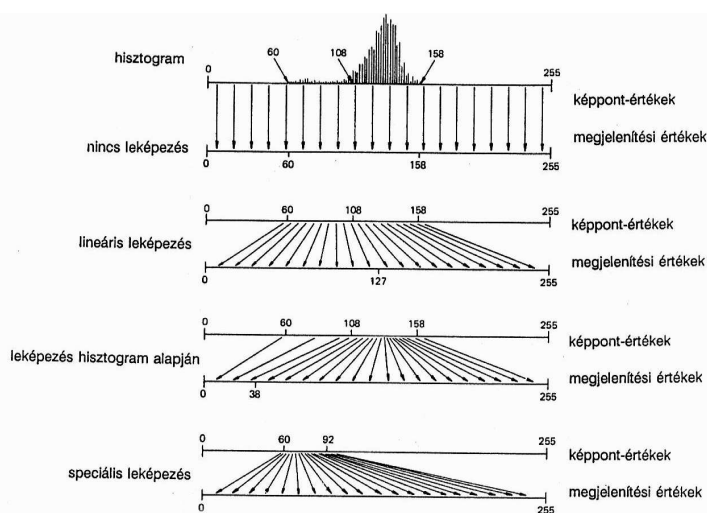
4.2. ábra. A földfelszíni visszaverődés geometriai viszonyai ( $\Theta$ : napzenitszög,  $\Theta'$ : szenzorzenitszög,  $\Psi$  és  $\Psi'$  különbsége: azimutszög)

### 4.1.3. Látványjavítást szolgáló intenzitás-műveletek

A látványjavító műveletek célja a felvétel megjelenítési tulajdonságainak megváltoztatása a vizuális, emberi szemmel történő értelmezés pontossága érdekében. Az esetek egy részében a javítás során ténylegesen megváltoznak a pixelértékek, másik részében viszont az eredeti pixelértékek változatlanul hagyása

mellett csak a megjelenítéshez használt paramétereket, vagyis a pixelértékek és a megjelenítőeszköz (általában képernyő) képpontjainak kivezérlése közötti kapcsolatot megadó táblázatot (Look-up Table, LUT) állítják be a célnak megfelelően. Az előbbi esetben az átalakítás után már nem végezhető el a numerikus feldolgozás lépései, mivel általában nem invertálható transzformációról van szó, és elveszítjük a földfelszíni fizikai paraméterekkel való kapcsolatot.

A *hisztogram-transzformáció* egy globális átalakítás abban az értelemben, hogy a felvétel összes képpontjára ugyanazt a függvényt alkalmazza; adott pontban csak az eredeti intenzitástól függ az értéke, a pont helyzetétől és a környező pontoktól nem. Célja legtöbbször a felvétel kontrasztosabban, nagyobb dinamikával történő megjelenítése, de matematikailag minden olyan művelet ide sorolhatunk, amelyek a hisztogram alapján globálisan számolják ki a megjelenítéshez használt új pixelértékeket. Így nagyon változatos a hisztogram-transzformációs függvények választéka; néhány lehetőséget mutat a 4.3. ábra.

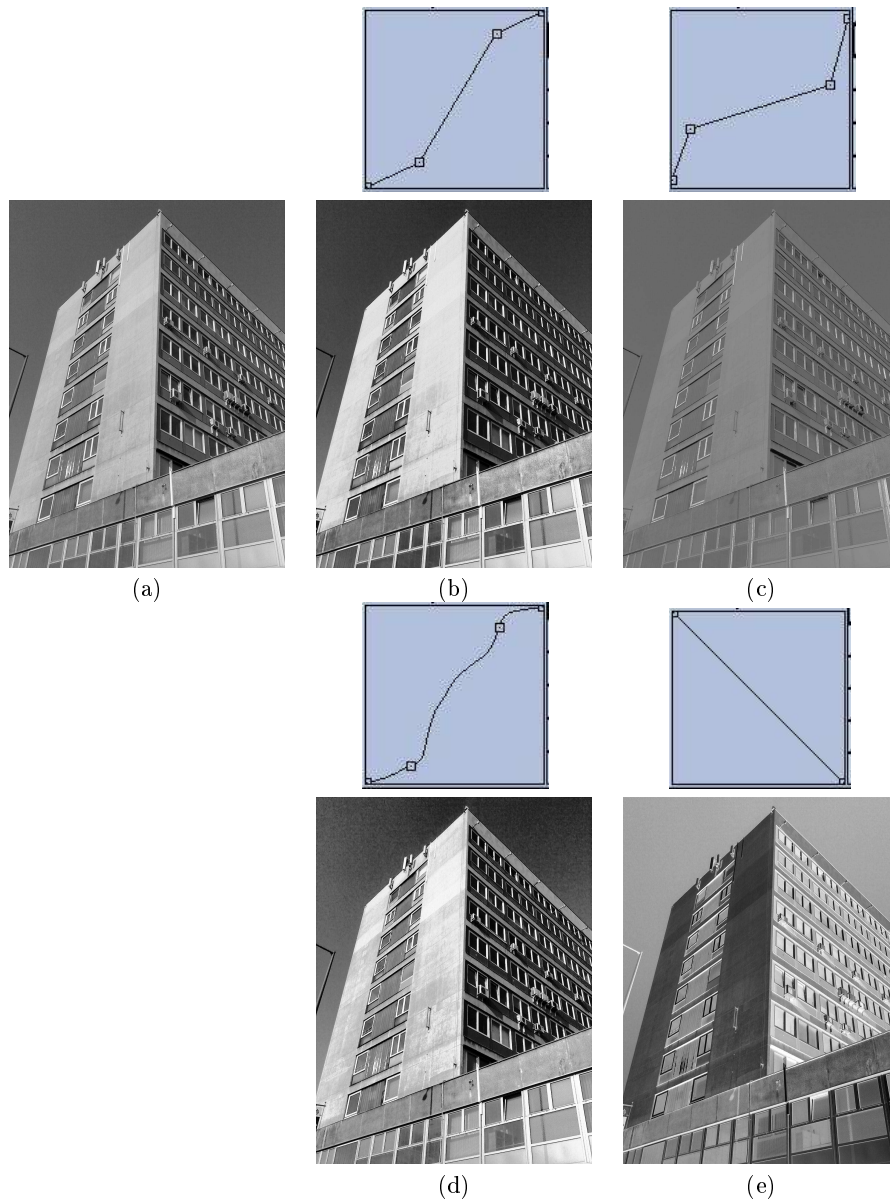


4.3. ábra. Egyszerű hisztogram-transzformációs függvények

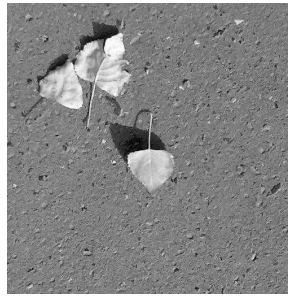
Néhány transzformációs függvény hatását egy konkrét fénykép esetében illusztrálja a 4.4. és a 4.5. ábra.

Több úrfelvétel mozaikként történő együttes vizuális alkalmazásánál szokásos az ún. hisztogramillesztés (histogram matching) használata, amikor a különböző felvételek megjelenítését egymáshoz is igazítják, így a felvételek közötti határoknál nem jelenik meg éles átmenet (4.6. ábra).

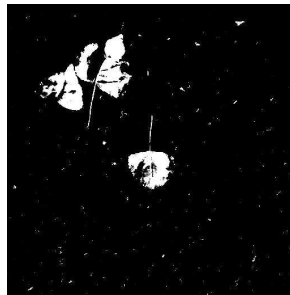
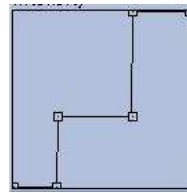
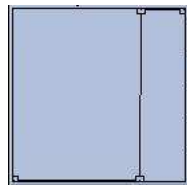
A hisztogram-transzformáció egyszerű, nagyon gyakran használt esete az ún. kontrasztkihúzás. Tegyük fel, hogy egy felvétel spektrális sávjában az intenzitás-értékek ábrázolási tartománya az  $[1..H]$  egész-intervallum. Sávonként ( $b \in [1..B]$ ) a következőket hajtjuk végre. A kontrasztkihúzás első lépéseként megállapítunk egy  $h_b^{min}$  és egy  $h_b^{max}$  értéket, amelyek a számunkra érdekes intenzitás-értékek alsó és felső határát jelentik. A megjelenítéshez használt új pixelérték a  $h_b^{min}$ -nél kisebb vagy azzal egyenlő pixelek esetében 1 lesz, a  $h_b^{max}$ -nál nagyobb vagy azzal egyenlő pixelértékek esetében  $H$ , a kettő közötti értékek pedig lineárisan skálázódnak az  $[1..H]$  intervallumra (4.1. (b) ábra). Tehát



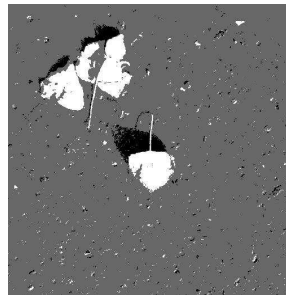
4.4. ábra. Néhány intenzitás-transzformációs függvény hatása fekete-fehér, egysávos felvétel esetében. (a): az eredeti felvétel, (b): a kontrasztnövelést megvalósító függvény és eredménye, (c): a kontrasztcsökkenést megvalósító függvény és eredménye, (d): hisztogramkiegyenlítés, (e): inverz kép.



(a)

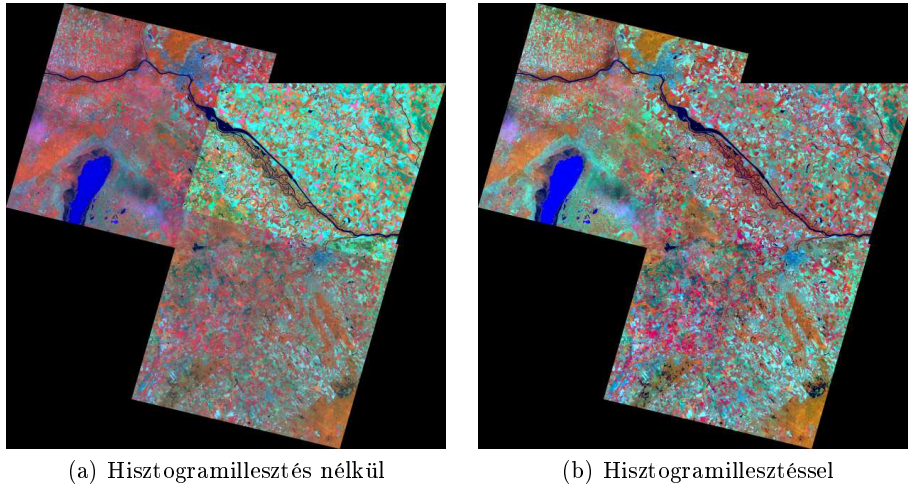


(b)



(c)

4.5. ábra. A küszöbölés hatása. (a): eredeti felvétel, (b): vágás két szintre, egy küszöbvel, (c) vágás három szintre, két küszöbvel.



4.6. ábra. Három elemi felvételtől készített mozaik  
 (© SPOT Image (2008), All rights reserved)

a  $(h_b^{min}, h_b^{max})$  intervallumon kívüli pixelértékeket gyakorlatilag figyelmen kívül hagyjuk, az intervallumba esőket pedig jobban, látványosabban elkülönítjük egymástól.

Az alsó és felső határt gyakran a sáv átlagából  $\mu_b$  és szórásából  $\sigma_b$  számítják:

$$h_b^{min} = \max(\mu_b - \alpha * \sigma_b, 1)$$

$$h_b^{max} = \min(\mu_b + \alpha * \sigma_b, H)$$

Az  $\alpha$  együttható értékét általában 2 és 3 között választják meg. Kisebb érték kontrasztosabb látványt eredményez, viszont több pixel esik ki az érdemi megjelenítés tartományából, vagyis a minimális vagy maximális (telített) intenzitással jelennek meg a kapott képen. Mivel a felhők jelenléte jelentősen elhúzza a statisztikákat, és a fenti módszer alkalmazása felhős felvételnél nem vezet jó eredményre, ezért bevett gyakorlat, hogy az átlagot és a szórást csak a felvétel felhőtlen területeiből számítjuk. A felhőtlen területek lehatárolása történhet manuálisan vagy automatikusan.

A *szűrések* lokális, környezetfüggő műveletek a különböző zajok, illetve képhibák eltávolítására. A látvány javításán kívül a fizikai hűség helyreállítására is használhatók, ha nyilvánvaló, hogy a pontszerű eltéréseket, kiugrásokat nem a földfelszínen ténylegesen mutatkozó jelenség, hanem a felvételezés vagy az adatátvitel zaja, hibája okozza.

A szűrések során a megjelenítéshez használt új értékek kiszámítása megadott méretű súlymátrixszal történik, amelyet „végigcsúsztatunk” a felvételen. Egy  $N$  sorból,  $M$  oszlopból álló  $V$  digitális felvétel  $b$ . sávjára ( $b \in [1..B]$ ) alkalmazva a  $2P + 1$  sorból és  $2Q + 1$  oszlopból álló (a  $[-P..P]$ , illetve  $[-Q..Q]$  egész-intervallumokkal indexelt)  $K$  maszkot, a következő konvolúciós képlettel határozhatjuk meg az eredményként kapott  $V'$  felvétel megfelelő sávértékeit (ahol az indexelt  $v', v, k$  értékek rendre a  $V', V, K$  mátrixok elemeit jelölik).

$$v'_{ijb} = \sum_{p=-P}^P \sum_{q=-Q}^Q v_{i+p, j+q, b} * k_{pq}$$

A fenti képlet az  $i \in [P + 1..N - P]$  és  $j \in [Q + 1..M - Q]$  feltételek fennállása esetén hivatkozik a  $V$  felvétel érvényes koordinátáira. Amennyiben a teljes  $[1..N] \times [1..M]$ -re szeretnénk számolni a konvolvált értékeket, meg kell oldani az 1-nél kisebb és az  $N$ -nél, illetve  $M$ -nél nagyobb indexek kezelését (pl. nulla-érték behelyettesítésével, ahol ez értelmezhető).

Szokás az eredményt normálni a maszk elemeinek számával (tehát  $(2P + 1) * (2Q + 1)$ -gyel), vagy lehet eleve a maszk elemeit normálni.

A lokális élek, vagyis sötétből világosba vagy világosból sötétbe történő átmenetek felismerésére szokás a deriváltból, vagyis a gradiensből származtatott operátorokat használni. A sötétből világosba való átmenetknél, amikor az intenzitás valamelyik irány mentén erősen növekszik, a derivált pozitív, nagy értéket vesz fel – ezen az összefüggésen alapulnak a Prewitt- és a Sobel-operátorok (4.7. és 4.8. ábrák). A Laplace-operátorok pedig a második derivált közelítésén alapulnak: a sötétből világosba történő átmenet „közepénél” az intenzitásfüggvénynek inflexió pontja van, ahol az első derivált lokális maximumot ér el, vagyis a második derivált metszi a nullát (4.9. ábra).

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

4.7. ábra. Élkeresésre használt Prewitt-operátorok

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

4.8. ábra. Élkeresésre használt Sobel-operátorok

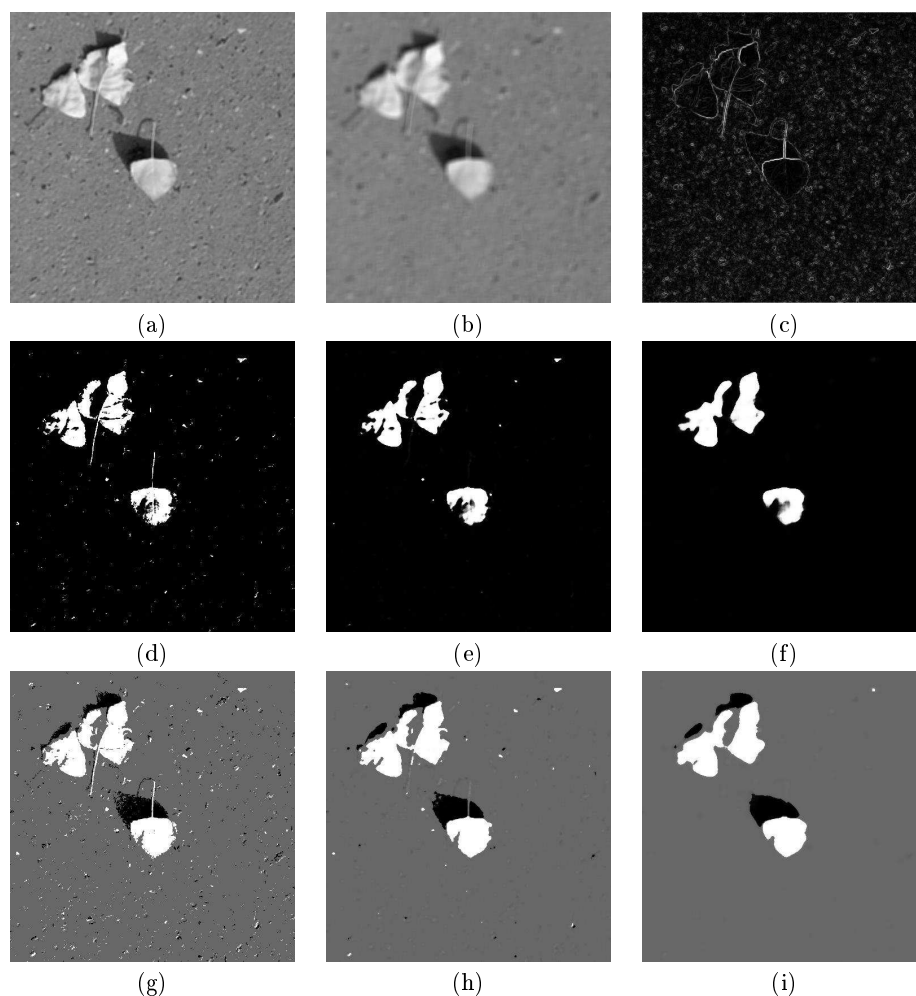
$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

4.9. ábra. Élkeresésre használt Laplace-operátorok

A legegyszerűbb konvolúciós maszk az 1-esekből álló mátrix, amely az eredeti felvétel simítását hajtja végre. A konvolúciós maszkkal végzett simítás hátránya, hogy a pontszerű zajok kiszűrésén kívül az éleket is elkeni, amely nehezíti a vizuális értelmezést és az automatikus objektumfelismerést. Ezt a problémát küszöböli ki az ún. élmegőrző simítás (mediánszűrés; edge preserving smoothing). A konvolúciós maszkokhoz hasonlóan a pixelek új értékének kiszámítása egy megadott (pl. 3\*3-as) környezet pixelértékeinek figyelembevételével történik, viszont

a lineáris kombináció helyett a környezetbe eső pixelértékek rendezett sorozatának középső elemével, vagyis mediánjával számolunk. A bemutatott operátorok hatását szemlélteti a 4.10. ábra.

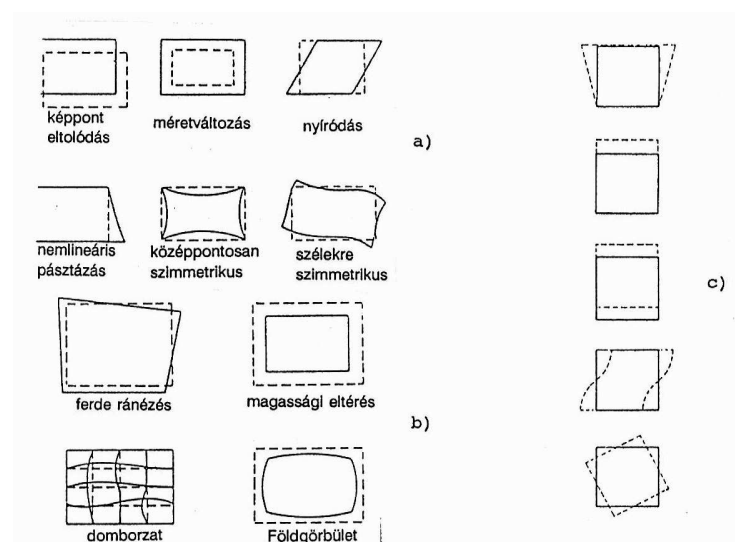
Szintén a lokális hibákat hivatott kiküszöbölni a többségi döntésen alapuló simítás, amelyet azonban jellemzően nem az intenzitásértékekre, vagyis nem az eredeti távérzékelte felvételre, hanem a tematikus osztályozás végeredményére szokás alkalmazni. Az eljárás során egy-egy pixel értékét a megadott környezetben előforduló pixelértékek közül a leggyakrabban előfordulóval helyettesítjük. Előírható, hogy csak akkor történjen meg a csere, ha a leggyakrabban előforduló értéket legalább a környezet adott számú képpontja felveszi.



4.10. ábra. Az  $5 * 5$ -ös (a) és  $11 * 11$ -es (b) maszkkal végzett simítás, illetve az élfelismerés (c) hatása. Az objektumfelismerés előkészítése: a két, illetve három szintre küszöbölt (d, illetve g) képre alkalmazott  $5 * 5$ -ös (e, h) és  $11 * 11$ -es maszkkal (f, i) végrehajtott mediánszűrés eredménye.

## 4.2. Geometriai transzformáció

A pásztázó felvételezők működési elvét alapul vevő egyszerűsítő szemlélet szerint a műholdfelvételek képpontjainak értékét a „földfelszínre terített négyzetrács” celláiba eső felszínadarabok sugárzási viszonyai határozzák meg. A gyakorlatban azonban a nyers műholdfelvételek földi alakját, vagyis a képpontjaiknak megfelelő földfelszíni területdarabok pozícióját bonyolult összefüggések jelölik ki. Ezt a helyi domborzatból adódó geometriai hatások mellett a felvételezés jellege, illetve olyan torzító tényezők befolyásolják, mint a Föld forgásából adódó, nyírászerű hatást eredményező soreltolódás. A szenzort hordozó eszköz magasságának, helyzetének és sebességének változásaiból is adódhatnak eltérések. A szenzor oldalrészéből és az egy pixelre vonatkozó rögzített látószögéből következő panoramikus torzítás is gyakori jelenség. A széles lefedettséget biztosító szenzoroknál pedig általában megjelenik a Föld görbületéből következő torzítás.



4.11. ábra. A felvételeket terhelő, torzító geometriai tényezők: a felvevőeszköz hibái (a), a hordozóeszköz mozgásából, a földgörbületből, domborzatból származó torzulások (b) és a ferde ránézés (földfelszínre nem merőleges felvételezési irány) következményei

A geometriai korrekciót nemcsak egy-egy felvétellel kapcsolatban értelmezhetjük, hanem a többforrású adatok feldolgozásában is fontos szerepe van. A különböző geometriával készült, adott esetben eltérő pixelmérettel rendelkező felvételeket egy közös geometriai, térképi alapra kell hozni. Így tudjuk egy megadott közös térinformatikai, távérzékelési rendszerben együttesen felhasználni a különböző szenzorral készült, eltérő képpontméretű, időpontú, spektrális tartalommal rendelkező felvételeket.

A geometriai korrekció első lépéseként a *georeferálás* során meghatározzuk azt a függvényt, amelyik megadja a nyers műholdfelvétel pontjai és azok földi koordinátái közötti összefüggést. A második lépésben egy meghatározott vetületi, térképi rendszer adott kiterjedésű és sűrűségű szabályos rácshálójába vetítjük át, *transzformáljuk* a felvételt egy újramintavételezési eljárás használatával.



A transzformációs függvényt alapvetően kétféle módszerrel határozhatjuk meg:

- Az *analitikus módszerhez* nagyon pontosan kell ismerni és matematikailag le kell tudni írni a műhold és az ábrázolt földterület geometriai viszonyát meghatározó tényezőket, amelyekből felállítható egy modell. Előnye, hogy az adatok ismeretében viszonylag egyszerűen elvégezhető a felvétel áttranszformálása. Hátránya viszont, hogy maguk a paraméterek nehezen határozhatók meg, és gyakran még a legprecízebb paraméterbeállítás mellett sem érhető el az elvárt földfelszíni pontosság.
- Az *illesztőpontok módszerével* olyan felszíni pontokat (ún. földi illesztőpontokat, Ground Control Points – GCP) keresünk, amelyek jól beazonosíthatók a nyers felvételen (ld. 4.12. (a) ábra), és az elvárt pontossággal ismerjük a földfelszíni koordinátáikat, például szerepelnek egy már georeferált felvételen (4.12. (b) ábra) vagy térképen, vagy GPS-es helyszíni méréssel bemértük. Ezután a feltételezett függvényt, annak együtthatóit az ismert koordinátapárok alapján interpolációval vagy approximációval, a legkisebb négyzetek módszerével határozhatjuk meg. Előnye, hogy nem kell pontosan előre ismerni a geometriai viszonyokat leíró modellt, hátránya viszont a kijelölt pontok meghatározásával járó nagyobb – esetleg helyszíni mérést kívánó – munka és az approximációból adódó numerikus problémák.

A gyakorlatban a transzformációs függvény egy kétváltozós, kétértékű függvény, amely a térképi koordináta-rendszerből a nyers felvétel koordináta-rendszerébe mutat. Tehát  $F$ -fel jelölve a függvényt,  $(U, V)$ -vel a térkép vagy referencia-kép,  $(X, Y)$ -nal a nyers felvétel koordináta-rendszerét, egy  $(u, v) \in (U, V)$  térképi pontra az  $(x, y) = (F_1(u, v), F_2(u, v))$  képlet adja meg a nyers felvétel megfelelő pontjának koordinátáit.

A transzformációs függvény legtöbbször egy (kétváltozós, kétértékű) polinom. Az elméleti leírásokban legfeljebb hatodfokú polinomok szerepelnek. A gyakorlatban legfeljebb harmadfokú polinomokkal dolgozunk, mivel a magasabb fokszám esetén az illesztőpontoktól távolabbi területeken nagyon megnövekedhet a pontatlanság.

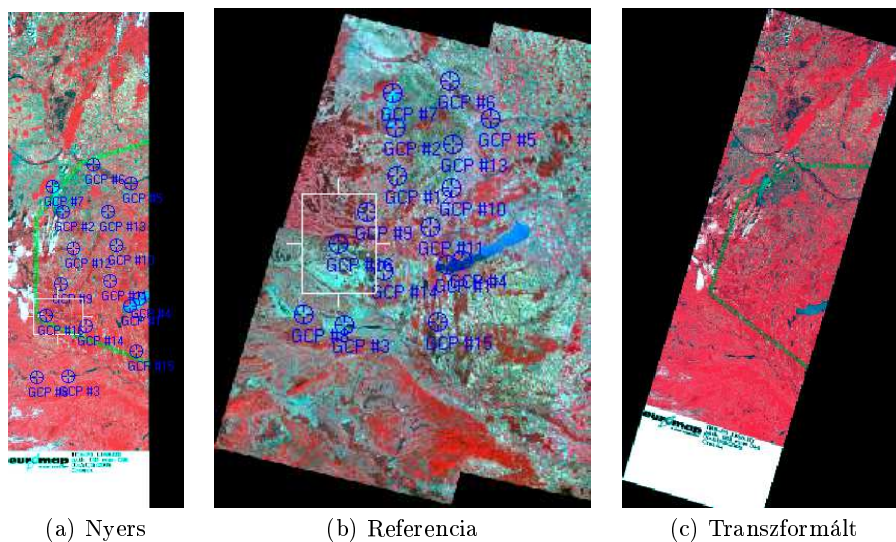
Amennyiben másodfokú polinomokkal nem lehet a kellő pontosságot elérni az illesztőpontokon, az utóbbi években a fokszám növelése helyett inkább olyan transzformációs függvényt alkalmaznak, amely két polinom hányadosaként írható le (Rational Polynomial Coefficients, RPC). A legmodernebb – jellemzően szuperfelbontású – felvételek esetén általában két harmadfokú polinom hányadosát alkalmazzák, amelyben a magasság is részt vesz a számításban.

A transzformációt úgy hajtjuk végre, hogy a térképi rendszerben meghatározott, fentebb említett rácsháló minden egyes (pixelközéppontnak tekintett) pontjára (többsávós felvételek esetén értelemszerűen minden spektrális sávra) kiszámoljuk a pixelértéket. A pixelértéket a nyers felvételnek az a képpontja adja, amelyet a transzformációs függvény meghatároz. A teljes végeredményt illusztrálja a 4.12. (c) ábra.

Ugyanakkor transzformációs függvényvel kiszámolt koordináta a nyers felvételen legtöbbször nem egész koordinátára esik, vagyis nem egyértelműen mutat egy képpontra. Ilyenkor több lehetőségünk van az intenzitásérték meghatározására valamelyik újramintavételezési eljárás használatával.

- A *legközelebbi szomszéd* (*nearest neighbourhood, NN*) módszerénél a leképezett ponthoz legközelebbi, egész koordinátájú pont intenzitásértékét választjuk.
- A *bilineáris interpoláció* (*bilinear interpolation, BI*) során a leképezett pontot körülvevő négy, egész koordinátájú pont intenzitásértékeinek súlyozott átlagát tekintjük, ahol a súly a távolságtól függ.
- A *köbös konvolúció* (*cubic convolution, CC*) esetében kétváltozós, harmadfokú pontot illesztünk a leképezett pont környezetére.

Az eljárások ebben a sorrendben egyre simább – időnként túlzottan sima, elmosódott – újramintavételezett képet eredményeznek, ugyanakkor a műveletigényük is egyre nagyobb. A legközelebbi szomszéd módszerének fontos tulajdonsága a többivel szemben, hogy az eredményképre csak olyan pixelértékek kerülnek, amelyek az eredeti felvételen is előfordultak. A gyakorlatban további újramintavételezési eljárások is használhatók, azonban a fentiek a leggyakoribbak.



4.12. ábra. Geometriai transzformáció az illesztőpontok módszerével

## 5. fejezet

# A képelemzés feladata és alapvető módszerei

A távérzékeléses adatgyűjtés jellemzőinek és a gyűjtött adatok előfeldolgozásának ismertetése után ebben a fejezetben a távérzékelte felvételek kiértékelésének módszereit mutatjuk be. Az alpmódszerek ismertetése után elsősorban a kvantitatív, numerikus kiértékelési módszert részletezzük, egységes formális keretet használva a fejezetben. A 10. fejezetben ismertetendő gyakorlati alkalmazások egy része alapvetően a kvantitatív kiértékelési módszerre épít, teljes egészében vagy bizonyos részletekben használva az itt ismertetett statisztikai alapú eljárás lépéseit.

A felvételkiértékelés célja a felszínborítás, a földfelszíni objektumok egyes fizikai jellemzőinek, állapotának a meghatározása. A kívánt végeredmény rendszerint a megadott terület elemeinek osztályba sorolása, vagyis egy tematikus térkép elkészítése. Bár a feldolgozás során folytonos mennyiségeket használunk a számításokban, a kívánt tematikus végeredmény azonban általában diszkrét értékekkel, véges számú célosztállyal írja le a vizsgált területet. Ugyanakkor a célosztályok tematikája sokféle lehet. A feladathoz felhasznált felvételek több spektrális sávot tartalmaznak, több időpontban készülhetnek és több adatforrásból is származhatnak.

### 5.1. A kiértékelési módszerek általános jellemzői

A kiértékelési módszerek eredményével szemben elvárt jellemzőket térbeli, spektrális és időbeli szempontok alapján értékelhetjük. Az elvárt jellemzők adott esetben függhetnek a rendelkezésre álló felvételek tulajdonságaitól és a környezeti paramétereiktől.

A felvételkiértékelésnek két alpmódszere a *vizuális interpretáció* és a *kvantitatív, numerikus kiértékelés*.

Napjainkban a vizuális interpretációt is messzemenően támogatják a számítógépek, azonban a tematikus döntéseket a felvételeken *látható* információ alapján – színárnyalatok, tónuskülönbségek, mintázat, geometriai szerkezet, időbeli fejlődés – a kiértékelő személy hozza, vagyis azok az emberi szaktudástól függenek.

A kvantitatív, numerikus kiértékelési módszernél a tematikus döntések meghozatala is számítógépen, beprogramozott feltételek alapján történik, erősen építve a számítógépek tárolási és feldolgozási kapacitására.

A technikai fejlődés következtében a számítógépes kiértékelés előnye az utóbbi években folyamatosan erősödik abban a tekintetben, hogy ugrásszerűen megnőtt a gazdaságosan feldogozható adatok mennyisége, és ezzel egyre inkább lehetővé válik a nagy területek egységes, objektív kiértékelése, nagyobb tematikus részletességgel és pontossággal. Kifejezetten a digitális képelemzési, ezen belül a távérzékeléses módszerekkel kapcsolatos kutatásoknak köszönhető, hogy a geometriai összefüggések felismerésében és a mintázatelemzésben is megnőtt a számítógépes módszerek szerepe, bár általában továbbra sem haladja meg az emberi szakértelem súlyát.

A kiértékelés során a felvételekben tárolt, mintavételezés útján keletkezett numerikus információból kell visszakövetkeztetni a földfelszín mérhető fizikai mennyiségeire, illetve ezeken keresztül egyéb lényeges számszerű vagy leíró jellegű tulajdonságaira. Egy adott alkalmazásban azonos tematikus kategóriába sorolt földfelszíni elemek sugárzási tulajdonságaiban is lehet eltérés az elem helyétől, az időtől és egyéb, a felszínt befolyásoló tényezőktől függően. Valamint a földfelszínt elhagyó és a felvételező által mért elektromágneses jel közötti kapcsolatot befolyásolja pl. a légkör és a domborzat.

Bár elképzelhető, hogy a földfelszínen mérhető mennyiségek és a tematikus kategóriák közötti kapcsolatot néha tisztán elméleti úton, a fizikai modellből származtatjuk, de ez nem jellemző. Ehelyett legtöbbször reprezentatív mintákat, úgynevezett *referenciaadatokat* használunk. Ismert kategóriákhoz tartozó, a földfelszín ismert helyeiről származó spektrális információt összegyűjtve, és feltételezve, hogy az azonos kategóriához tartozó területek spektrálisan azonosan vagy hasonlóan viselkednek, a nem ismert területek tematikus kategóriájára következtethetünk.

Ez a távérzékelte adatok kiértékelésének egy alapvető ismérve: a felméréndő terület kis részén (legfeljebb 5-10%-án) hagyományos földi módszerekkel végrehajtott felmérés eredményét távérzékeléssel jóval nagyobb területre terjesztjük ki. A referenciaadatokat az osztályozóeljárás „betanításán” kívül az osztályozási eredmény tesztelésében, a pontosságvizsgálatban is használjuk. Ideális esetben a tanuló- és a teszt-referenciaadatok diszjunktak. A „tanulóadat” kifejezés a korai mintafelismerő rendszerekből származik, amelyek olyan értelemben voltak „taníthatók”, hogy a kapott mintákhoz (beleértve a megfigyelt eredményt és az annak megfelelő ismert tematikus kategóriát) folyamatosan, adaptív módon hozzáigazították a belső paramétereiket, amelyek alapján a döntéseket hozták.

Az elméleti tárgyalásban és az informatikai megvalósításnál a többsávos digitális felvételeket egy mátrixként fogjuk fel, amelynek elemei a földfelszín foltjainak felelnek meg, egy elem pedig a legkisebb megfigyelhető felszínadarabot ábrázolja. A mátrixelemek a megfelelő felszínadarabról érkező mérési eredményt, vagyis a sugárzás mért intenzitását mutatják.

A képi adatrendszer jellemzően több sávból áll, így a mátrixelemek maguk is vektorok, melyek elemei a spektrális sávoknak felelnek meg. Egy  $N$  sorból,  $M$  oszlopból álló,  $B$  spektrális sáv adatait tartalmazó felvétel tehát a következőképpen írható le:

$$V = \begin{pmatrix} \vec{v}_{11} & \dots & \vec{v}_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \vec{v}_{N1} & \dots & \vec{v}_{NM} \end{pmatrix},$$

ahol  $\vec{v}_{ij} = (v_{ij1}, \dots, v_{ijB})$ . Egy távérzékelte felvétel mátrixának elemei elméletileg folytonos mennyiségeket tartalmaznak, azonban a digitális tárolás során – amikor a mért sugárzási energiát nem tetszőleges pontossággal, hanem kvantálva ábrázoljuk – az intenzitásértékek rendszerint egy egész intervallum értékeit vehetik fel. Vagyis  $v_{ijb} \in [1..H]$ , ahol  $H$  a megkülönböztetett intenzitásértékek száma. Minden sáv esetén egyenlő  $H$  értéket tételezünk fel, ami nem jelenti az általánosság megszorítását.

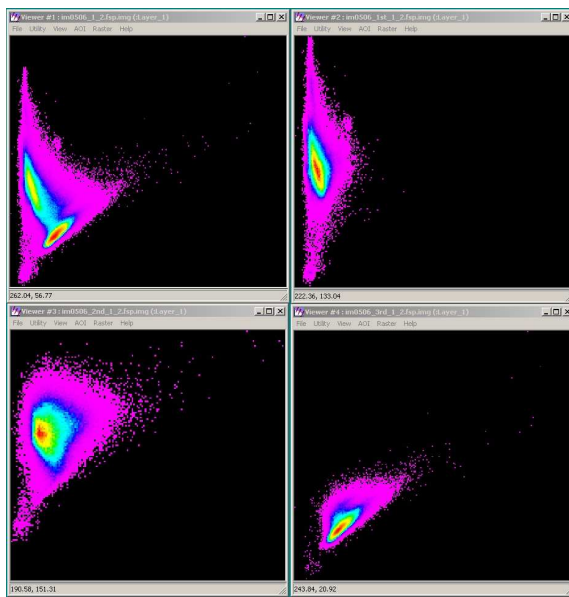
A távérzékelés osztályozási módszerek elméletei tárgyalásának és illusztrálásának szemléletes eszköze az *intenzitástér* (vagy *mérési tér*, angolul measurement space vagy feature space), amely a hagyományos térábrázolástól eltérő szemléletet valósít meg. A felvételek fent bemutatott ábrázolásánál a „koordinátatengelyek” (a  $V$  mátrix sorai és oszlopai, illetve az egy képpontot reprezentáló  $\vec{v}_{ij}$  vektor indexei, vagyis az elemeinek sorszámai) a térbeli koordinátákat és a spektrális sávokat jelölik, és a mátrixelemek intenzitásértékeket tartalmaznak. Az intenzitástér tengelyei viszont az egyes spektrális sávoknak felelnek meg, a koordináták pedig az intenzitásértékeket jelölik. Az intenzitástérben tehát egy pont helye a sugárzása (egy sávokban mért) intenzitásának felel meg, és nincs kapcsolatban a pont térbeli helyzetével.

Az intenzitástérben egy ponthoz értéként hozzárendelhetjük például a felvételen az adott intenzitású pontok számát. Így a fenti  $V$  mátrix által reprezentált úrfelvétel intenzitástérbeli megfelelője felírható az alábbi  $V' \in \mathbb{N}^{(H^B)}$  mátrix-szal, amely tulajdonképpen a kép (minden sávját figyelembe vevő, többdimenziós) hisztogramja.

$$\forall (h_1, \dots, h_B) \in [1..H]^B : v'_{(h_1, \dots, h_B)} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \chi(v_{ij1} = h_1 \wedge \dots \wedge v_{ijB} = h_B)$$

Egy úrfelvétel pixeleinek intenzitástérbeli ábrázolását mutatja az 5.1. ábra. Az (f) részábra a teljes felvételre, míg a (g), (h) és (i) részábrák egy-egy tematikusan jól körülírható részterületre, a képpontok egy-egy halmazára vonatkoznak. A színek a két kiválasztott sávnak megfelelő pixelérték-párok gyakoriságát jelölik: az egyáltalán nem, vagy a legritkábban előforduló pixelérték-párok feketével, míg a leggyakrabban előforduló pirossal jelennek meg.

A pixelek intenzitástérbeli közelsége a nekik megfelelő sugárzási, spektrális értékek hasonlóságát jelenti. Az azonos felszínborításhoz tartozó pixelek tehát az intenzitástérben várhatóan egymáshoz közel, tömör ponthalmazokként jelennek meg. A gyakorlatban a ponthalmazok alakja és kiterjedése igen változatos lehet. A különböző felszínborításokhoz tartozó halmazok egymásba nyúlhatnak, illetve a gyakorlatban egymásba is nyúlnak. Ez egyebek között abból adódik, hogy az alkalmazott – adott számú spektrális sávra kiterjedő, véges sok energiaszintet megkülönböztető, a sugárzást meghatározott nagyságú földfelszínadarabról összegyűjtő, nem tetszőlegesen sűrű időközönként ismételtető – mérések egymástól eltérő felszínborításokra is adhatnak azonos értéket. A ponthalmazok egymásba nyúlása okozza a tematikus kategóriák valószínűségi eloszlással történő leírása és az ez alapján végrehajtott osztályozás során elkövetett tévesztéseket.



(a)	(c)
(d)	(e)

5.1. ábra. Az intenzitástér szemléltetése. A részábrák jelentése: (a) – a teljes felvétel képpontjainak intenzitástérbeli ábrázolása két kiválasztott sávra, pirossal jelölve a leggyakoribb intenzitásokat; (c) – az 1. kategóriát, a kifejlett kultúrnövényzetet képviselő pixelek intenzitástérbeli képe; (d) – a 2. kategóriát, a vegyes és átmeneti felszínborítást képviselő pixelek intenzitástérbeli képe; (e) – a 3. kategóriát, a talajokat képviselő pixelek intenzitástérbeli képe. A részábrák, illetve betűjelek megfelelnek a 8.9. szakaszban található 8.8. ábra clusterének.

## 5.2. A képelemzés alapfeladata

A távérzékelésen belül a képelemzési részfeladat célja, hogy a kiinduló képi adatrendszer minden pixeljét hozzárendeljük a célkategóriák, osztályok valamelyikéhez. A célkategóriák halmaza az alkalmazástól függően igen változatos lehet, pl. egy klasszikus növényterképezési alkalmazásban a növényfaj, katasztrófa-felmérési alkalmazásokban az érintettség, súlyosság mértéke, a felszínborítás osztályozása során a kategóriarendszer (nómenklatúra) valamely szintjén szereplő felszínborítási besorolás. A képelemzés lényegében két fő részre osztható. Az első lépésben meghatározzuk az osztályok statisztikai, számítógéppel kezelhető jellemzőit az osztályok reprezentatívnek tekintett részhalmazaiából kiindulva. A második lépésben a teljes kiindulási adatrendszert besoroljuk valamilyen numerikus módszerrel az első lépésben meghatározott jellemzők alapján.

A bemeneti képi adatrendszer összeállhat egy felvétel több spektrális sávjából, ugyanazon felvétel különböző időpontban készített felvételeiből (az egyes felvételek sávjainak megfelelő rétegeket egymásra téve), vagy akár különböző felvételek által készített felvételekből. A hozzárendelés során mindenekelőtt a pixelek intenzitásértékét használjuk, valamint általában a referenciaadatok is részt vesznek az osztályozó betanításában és a hibavizsgálatban. Az intenzitásértékek alapján működő osztályozás során lényegében az intenzitásértékről az osztályok halmazára történő leképezést határozzuk meg, és ezen keresztül osztályozzuk a képpontokat. Elsősorban ezt, vagyis a képpontok intenzitásán és a referenciaadatokon alapuló módszertant részletezzük jelen szakaszban és a 6. fejezetben. Ezen kívül lehetőség van arra is, hogy a pixelek mellett a környezetükben előforduló intenzitásértékeket, a textúrát (mintázatot) és egyéb, nem távérzékelte adatokat is figyelembe vegyünk. Utóbbiakra a 9. fejezetben szerepelnek példák.

Az intenzitásértékek alapján történő osztályozásnak vannak egyszerű, az intenzitásértékbeli távolságon vagy alakzatokon alapuló módjai. Pl. egy képpontot sorolhatunk abba az osztályba, amelyiknek a középpontjától (a pixelértékek átlagától) a legkisebb a távolsága, vagy amelyikbe a kérdéses képponthoz legközelebbi egy vagy több képpont esik („legközelebbi szomszéd”, „legközelebbi k-pixel”). Ezeknél a módszereknél az osztály jellemzőiből viszonylag kevés információt használunk fel (az átlagot, illetve egy vagy néhány képpont intenzitását).

Közelíthetjük az osztályokat olyan többdimenziós alakzatokkal (pl. az intenzitás tér koordinátatengelyeivel párhuzamos téglatestekkel), amelyek közelítőleg magukba foglalják az osztályok összes pixelét. Ezek azonban egyrészt nem adnak információt a pixelek eloszlásáról az alakzaton belül. Másrészt, fellép az átfedés a különböző osztályokhoz tartozó alakzatok között, tehát az átfedő részekben az alakzatba tartozás önmagában nem dönti el a pixelek hovatartozását; más besorolási szempontot is figyelembe kell venni.

Az előző módszer továbbfejlesztése az, amikor az osztályokat nem zárt alakzatokkal, hanem a pixelek alapján számolt (becsült) valószínűségi eloszlásokkal írjuk le. Míg a zárt alakzatok esetében egy képpont vagy teljesen az osztályba tartozik, vagy egyáltalán nem, a továbbfejlesztett módszernél 0 és 1 között tetszőlegesen meghatározhatjuk, hogy egy pixel mekkora valószínűséggel tartozik az osztályhoz. Egy konkrét valószínűségi eloszlást feltételezve minden osztálynak *és minden valószínűségi értéknek* megfelel egy alakzat – a sűrűségfüggvény adott valószínűséghez tartozó izovonala vagy szintvonala –, amely körbehatárolja az intenzitásértéknek azokat a pontjait, amelyek legalább a megadott valószínűséggel az osztályhoz tartoznak. Amennyiben például normális eloszlást tételezünk

fel, a kapott alakzatok az intenzitástér dimenziószámának megfelelő ellipszoidok lesznek.

A valószínűségi eloszlásokat használó módszernél egy pixelt abba az osztályba sorolunk, amelyikben az ilyen értékű pixelek gyakrabban fordulnak elő, vagyis amelyiknél a pixel a legnagyobb valószínűséghez tartozó alakzaton belül van. Ez a *maximum-likelihood* osztályozási módszer alapelve.

A statisztikai módszerek több okból is kiemelten alkalmasak a távérzékelésben előforduló mintafelismerési feladatok megoldására. Egyrészt, a természet magában hordoz egy adott mértékű véletlenszerűséget, amely a távérzékelte adatokban megjelenő kisebb eltéréseken keresztül bizonytalanná teszi a célkategóriák határozott elkülönítését. Másrészt, a kategóriákat leíró intenzitástérbeli alakzatok lehetnek átfedők, vagyis különböző kategóriák objektumairól származhat ugyanaz a mérési eredmény. Tehát pl. Magyarországon lehetséges, hogy az év egy bizonyos időszakában egyes kukoricatáblák az űrfelvételeken nagyon hasonló képet mutatnak a napraforgótáblákhoz, vagy nehéz különbséget tenni egyes búza- és árpatáblák között. A statisztikai mintafelismerési rendszerekkel ilyen esetekben is dönthetünk amellet az eredmény mellett, amely nagy valószínűséggel a legjobb. Elméletileg nem szerencsés eset, de a gyakorlatban előfordulhat, hogy a tanulmányok hovatartozásának, valós kategóriájának ismerete is bizonytalan. Azonban a statisztikai módszerek egy határon belül nem érzékenyek erre a bizonytalanságra.



## 6. fejezet

# A statisztikai tematikus osztályozás

Ahogy az előzőekben bevezettük, a tematikus osztályozásnál az a célunk, hogy a kiindulási képi adatrendszer minden pixeljéhez egy célkategóriát (osztályt) rendeljünk. Ehhez a következő alapvető adatokat használjuk fel, amelyek közül az első kettőnek mindenképpen szerepelnie kell bemenőadatként, a másik kettő viszont opcionális.

1. **A célkategóriák halmaza:**

$$\omega_1, \dots, \omega_{K_F},$$

ahol  $K_F$  a célkategóriák száma. (Az  $F$  indexet a később ismertetésre kerülő teljes osztályozási folyamat leírásával való egységesség kedvéért használjuk.)

2. Az egyes **osztályokhoz tartozó pixelek valószínűségi eloszlása:**

$$p(\vec{v}|\omega_1), \dots, p(\vec{v}|\omega_{K_F})$$

Vagyis  $p(\vec{v}|\omega_k)$  adja meg a  $\vec{v}$  intenzitásvektorok sűrűségfüggvényét, amennyiben  $\vec{v}$  a  $k$ . osztály eleme.

3. Az egyes **osztályok előre ismert („a priori”) előfordulási valószínűsége a teljes felvételen:**

$$p(\omega_1), \dots, p(\omega_{K_F})$$

Tehát  $p(\omega_k)$  annak a – más információtól független – valószínűsége, hogy a kép egy pixelje a  $k$ . osztályba tartozik. Ez az összetevő opcionális: nem mindig ismert, illetve rendszerint csak közelítő érték áll rendelkezésre pl. az adott terület korábbi felméréséből. Amennyiben nem állnak rendelkezésre, vagy nem kívánjuk használni az előzetes valószínűségeket, értéküket azonosnak ( $1/K_F$ ) tekintjük. Az osztályozás eredménye kevésbé függ az osztályok előre ismert valószínűségétől, mint a sűrűségfüggvényüktől.

4. A téves osztályozásoknak a felhasználó által meghatározott **veszteségi értékei**: jelöljük  $\lambda(\omega_k, \omega_l)$ -vel (vagy röviden  $\lambda_{kl}$ -lel) azt az elemi veszteséget, amelyet egy  $\omega_l$ -beli pixel  $\omega_k$  osztályba történő sorolása okoz. ( $k, l \in [1..K_F]$ ) Ez az összetevő szintén opcionális; hiánya esetén a helyes osztályozás ( $\lambda_{kk}$ ) veszteségét 0-nak, míg minden helytelen osztályozás ( $\lambda_{kl}$ ,  $k \neq l$ ) veszteségét egységnyinek tekintjük.

Célunk, hogy meghatározzuk a kiindulási képi adatrendszer pixeljeinek az osztálybesorolását, vagyis a következő mátrixot:

$$C^{(F)} = \begin{pmatrix} c_{11}^{(F)} & \cdots & c_{1M}^{(F)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{N1}^{(F)} & \cdots & c_{NM}^{(F)} \end{pmatrix} \quad c_{ij}^{(F)} \in [1..K_F],$$

ahol  $K_F$  az osztályok száma. Ehhez a fenti négy paraméter mellett keresünk egy  $g$  relációt, amely megadja a kapcsolatot a felvétel pixelértékei és az osztályok között. A  $g_k : [1..H]^B \rightarrow \mathbb{R}$  ( $k \in [1..K_F]$ ) ún. diszkriminánsfüggvények halmaza alapján egy  $\vec{v}$  vektort abba az  $\omega_k$  osztályba sorolunk, amelyre  $g_k(\vec{v})$  maximális. Amennyiben tehát az osztályokhoz tartozó  $g_k$  diszkriminánsfüggvények ismeretek, a  $g$  reláció a következőképpen írható fel:

$$g = \{(\vec{v}, k) \mid \vec{v} \in [1..H]^B, k \in [1..K_F], g_k(\vec{v}) = \max_{l=1}^{K_F} g_l(\vec{v})\}$$

Ez a reláció azért nem függvény, mert az osztályok érintkezésénél ugyanarra az intenzitásvektorra több  $g_k$  függvény is adhat azonos értéket. Ezekben az esetekben a hozzárendelést másik szabállyal kell megtenni.

Ahogy a referenciaadatok bevezetésénél szerepelt, a diszkriminánsfüggvények meghatározása rendszerint *tanulóadatok* alapján történik, bár ritkán előfordul, hogy elméleti alapon, fizikai modelltől származnak. A statisztikai alapú mintafelismerő rendszerek a tematikus kategóriák sűrűségfüggvényét használják a döntésekben. A sűrűségfüggvényeket viszont általában nem ismerjük előre, hanem a tanulóadatokból becsüljük. Az esetek egy részében a sűrűségfüggvény alakját ismertnek tételezzük fel (pl. normális eloszlás), és a tanulóadatokból csak a paramétereiket becsüljük (a normális eloszlásnál az átlagot és a szórást), ezekben az esetekben a módszert *paraméteresnek* nevezzük. A *nem-paraméteres* esetekben a sűrűségfüggvény alakját sem ismerjük. A paraméteres eljárásokat általában könnyebb megvalósítani, de az alkalmazásuk előfeltétele annak ismerete, hogy a kategóriák valóban a megadott eloszlásnak felelnek meg. A nem-paraméteres eljárások jobban tudnak igazodni egy tetszőleges alakú eloszláshoz, azonban bonyolultabbak az ezekre épülő rendszerek, és sokkal nagyobb számú tanulóadatra van szükség.

## 6.1. A maximum likelihood- és a Bayes-osztályozás

A fejezet bevezetésében ismerttetett terminológiát felhasználva az ún. *maximum-likelihood* döntési szabály diszkriminánsfüggvényei:  $g_k(\vec{v}) = p(\vec{v}|\omega_k)p(\omega_k)$ . Vagyis a maximum-likelihood-szabály abba az  $\omega_k$  osztályba sorol egy  $\vec{v}$  intenzitásvektort, amelynél  $p(\vec{v}|\omega_k)p(\omega_k) \geq p(\vec{v}|\omega_l)p(\omega_l)$ , minden  $l \in [1..K_F]$ -re.

Ez a döntési szabály minden egyes  $\vec{v}$  intenzitásvektorhoz azt az osztályt rendeli, amelyikbe a legnagyobb valószínűséggel tartozik, mivel egy adott  $\vec{v}$  vektorra  $p(\vec{v}|\omega_k)p(\omega_k)$  maximalizálása ekvivalens  $p(\omega_k|\vec{v})$  maximalizálásával. A feltételes valószínűség definíciója szerint ugyanis

$$p(\omega_k|\vec{v})p(\vec{v}) = p(\vec{v} \cap \omega_k) = p(\vec{v}|\omega_k)p(\omega_k),$$

és ezt felhasználva

$$p(\omega_k|\vec{v}) = p(\vec{v} \cap \omega_k)/p(\vec{v}) = p(\vec{v}|\omega_k)p(\omega_k)/p(\vec{v}).$$

Amennyiben veszteségi értékek is rendelkezésre állnak, használhatjuk az osztályozáshoz az ún. *Bayes-döntést*. Egy osztályozási módszer *Bayes-optimalis*, ha az átlagos veszteséget minimalizálja. A diszkriminánsfüggvények alakja  $g_k(\vec{v}) = -L_{\vec{v}}(k)$ , ahol  $L_{\vec{v}}(k)$ -val egy adott  $\vec{v}$  vektor  $\omega_k$  osztályba történő sorolásából származó átlagos veszteséget jelöljük:

$$L_{\vec{v}}(k) = \sum_{l=1}^{K_F} \lambda_{kl} p(\omega_l|\vec{v})$$

Behelyettesítéssel belátható, hogy a maximum-likelihood-osztályozás a Bayes-osztályozás speciális esete a következő elemi veszteségmátrixot használva.

$$\lambda_{kl} = \chi(k \neq l); k, l \in [1..K_F]$$

Ebben az esetben hiba valószínűsége minimális a teljes osztályozott halmazon. Tehát átlagosan ez a lehető legpontosabb osztályozási módszer, és legtöbbször ez az elvárt viselkedés. A maximum likelihood-döntés képletéből adódóan viszont ez is látható, hogy ez a stratégia még jobban lesúlyozza a „kis osztályokat”, vagyis azokat az osztályokat, amelyeknek alacsony az a priori-valószínűségük. Ezt a viselkedést szükség szerint a veszteségfüggvény megfelelő kiválasztásával lehet ellensúlyozni.

Amennyiben az osztályok előzetes valószínűsége nem ismert, tekinthetjük egyenlőknek. Ebben az esetben az elemi veszteségmátrix használata esetén a következők a diszkriminánsfüggvények:  $g_k(\vec{v}) = p(\vec{v}|\omega_k)$ , ahol  $k \in [1..K_F]$ . Belátható, hogy az így kapott osztályozás ekvivalens azzal a Bayes-osztályozással, amelynél a veszteségmátrix alakja:  $\lambda(k|l) = 0$ , ha  $k = l$ , és  $\lambda(k|l) = 1/p(\omega_l)$ , ha  $k \neq l$ . Az előző bekezdéssel szemben ez a megközelítés tehát kedvez a „kis osztályoknak”.

## 6.2. A normális eloszlás használata az osztályok közelítésére

Az egyes osztályok sűrűségfüggvényének a tárolása igen nagy mennyiségű memóriát igényelhet, ha a sűrűségfüggvényt teljesen általánosan tároljuk, vagyis minden előforduló intenzitásértékhez (vagyis az intenzitásérvektoraihoz) megadjuk a relatív gyakoriságot, és sokféle intenzitásérték fordul elő az osztályban. Ez a nem-paraméteres eljárások már említett hátránya. Amennyiben  $B$  sávunk van és az egyes sávokban  $H$  intenzitásértéket különböztetünk meg, a sűrűségfüggvény ábrázolásához  $H^B$  értéket kell eltárolni. Egy lehetséges és gyakran

alkalmazott megoldás, hogy paraméteres eljárást alkalmazunk, melynek során a sűrűségfüggvényt egy kellően sima, analitikus függvénnyel közelítjük – természetesen amennyiben ez lehetséges, vagyis a sűrűségfüggvény alakja ezt megengedi. A távérzékelésben a paraméteres eljárások közül nagyon gyakran használjuk a normális eloszlással való közelítést.

Egyváltozós esetben, amely a távérzékelésnél egysávós felvételeknek felel meg, a normális eloszlás sűrűségfüggvénye az  $\omega_k$  ( $k \in [1..K_F]$ ) osztályra a következő alakban írható fel:

$$p(v|\omega_k) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{1}{2}}\sigma_k} \exp\left(-\frac{1}{2}(v - \mu_k)\sigma_k^{-\frac{1}{2}}(v - \mu_k)\right),$$

az osztályt tehát két skalár-paraméterrel, az átlaggal ( $\mu_k$ ) és a szórással ( $\sigma_k$ ) jellemezzük. Többváltozós esetben,  $B$  sávot tekintve az eloszlás paraméterei (szintén az  $\omega_k$  osztályt tekintve) az egyes sávok átlagai ( $\mu_{kb}$ , ahol  $b \in [1..B]$ ) és a sávok közötti kovariancia ( $\sigma_{kab}$ , ahol  $a, b \in [1..B]$ ). Ekkor a skalárok helyett már áttekinthetőbb a következő vektoros jelölésrendszer használata:

$$\vec{\mu}_k = \begin{pmatrix} \mu_{k1} \\ \vdots \\ \mu_{kB} \end{pmatrix} \quad \Sigma_k = \begin{pmatrix} \sigma_{k11} & \dots & \sigma_{k1B} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{kB1} & \dots & \sigma_{kBB} \end{pmatrix}$$

Ezzel a jelölésrendszerrel  $B$  dimenziós esetben az  $\omega_k$  osztály sűrűségfüggvénye:

$$p(\vec{v}|\omega_k) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{B}{2}}|\Sigma_k|^{\frac{1}{2}}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\vec{v} - \vec{\mu}_k)^T \Sigma_k^{-1} (\vec{v} - \vec{\mu}_k)\right)$$

Amikor normáloszlásokkal meghatározott osztályokra maximum likelihood-osztályozást hajtunk végre, érdemes diszkriminánsfüggvényként az előzetes valószínűséggel szorzott sűrűségfüggvények logaritmusát venni, ezzel ugyanis drasztikusan lecsökken a számítási igény:

$$g_k(\vec{v}) = \ln(p(\omega_k)) - \frac{1}{2} \ln(|\Sigma_k|) - \frac{1}{2}(\vec{v} - \mu_k)^T \Sigma_k^{-1} (\vec{v} - \mu_k)$$

Mivel a logaritmusfüggvény a sűrűségfüggvények értékészletén (általánosabban: az egész  $(0,1]$  intervallumon) szigorúan monoton növekedő, ezért a diszkriminánsfüggvényeknek ez a készlete az eredetivel pontosan egyező eredményt ad. Mivel adott paraméterű normáloszlások esetén csak a jobb oldali kvadratikus alak függ az osztályozandó pont értékétől, ezért valójában elég ezt újraszámolni minden egyes pontra.

Érdemes megemlíteni azt az esetet, amikor a tényleges adatok több lokális maximummal rendelkező eloszlást mutatnak. Bár ez nyilván nem felel meg a normális eloszlásnak, de közelíthetjük több normális eloszlás súlyozott összegével. Ezt a megoldást, amellyel ún. *alosztályokra* bontjuk az osztályt, a gyakorlatban rendszeresen használjuk, a további tárgyalásban is kiemelt szerepe lesz.

Több érv indokolja, hogy a távérzékelte felvételek kiértékelése során az egyes kategóriákat normális eloszlással közelítsük. A tapasztalatok alapján a többdimenziós normális eloszlás jól modellezi a távérzékeléses alkalmazások többségében megfigyelt véletlen folyamatokat. Azok az osztályozóeljárások, amelyeket a normális eloszlás használatára terveztek, a jelek szerint robusztusak abban az

értelemben, hogy az osztályozási pontosságot nem nagyon rontja le, ha a tényleges eloszlás akár jelentősen is eltér a normálistól. A tapasztalatok alátámasztják, hogy a normális eloszlással történő közelítés általában jó kompromisszum a tematikus pontosság és a számítás sebessége, bonyolultsága között.

Egy tematikus kategória több normáleloszlásra történő felosztásának szükségességét a gyakorlati távérzékelési példákban az magyarázza, hogy a kategória többféleképpen lehet jelen a földfelszínen. Előfordul, hogy két terület, amely a tematikus osztályozás szempontjából egyféle kategóriának számít, különbözően viselkedik a távérzékeléses megfigyelés során, különböző sugárzást bocsájt ki. Lehetnek pl. az osztályozás célkategóriái a növényfajok, és egy növényfajhoz tartozó területek sugárzása függhet a fajtától, a talaj- és időjárási viszonyoktól, a domborzattól.

A tematikus osztályozási feladatok egy részében külön esetnek tekintjük azt, amikor bizonyos képpontok nem tartoznak az előre meghatározott osztályok egyikébe sem. Ennek szokásos kezelése az ún. *küszöböléses technikával* (thresholding) történik: amennyiben egy pontra egyik osztály sűrűségfüggvényének értéke sem éri el az előre rögzített küszöböt, a pontot osztályozatlannak tekintjük. Abban az esetben, amikor a fent leírtak szerint nem közvetlenül az osztályok, alosztályok sűrűségfüggvényét számoljuk ki, hanem annak egy transzformáltját, akkor a küszöböléses technikát is a transzformált függvényekre kell átfogalmazni. Amennyiben normáleloszlással való közelítést használunk, és a számítást a fent bemutatott módon a sűrűségfüggvény logaritmusával végezzük, akkor a képletben szereplő kvadratikus alakból kiindulva a küszöbölés egy  $\chi^2$ -próba alkalmazását jelenti.

### 6.3. Spektrális adatosztályok

Az előző szakaszban leírt, normális eloszlást feltételező osztályozási módszer végrehajtásának előfeltétele, hogy valóban ismerjük az egyes normális eloszlások paramétereit. Azonban a távérzékelte felvételekből és a referenciaadatokból kiindulva ez nem mindig adott: nem feltétlenül teljesül az osztályok normalitása, illetve nem feltétlenül ismert a multimodális (több lokális maximummal rendelkező) eloszlásoknak az unimodális, közel normális eloszlásokra történő felosztása.

Ha egy sűrűségfüggvénynek maximuma vagy lokális maximuma van az intenzitástér egy pontjában, az azt jelenti, hogy több mérési vektor esik a pont közvetlen környezetébe, mint a tőle távolabbi helyekre, vagyis a mérési vektorok a pont körül csoportosulnak, tömörülnek (a pontot és a távolságot végig az intenzitástéren értelmezve). Az ilyen tömörülést hívjuk *clusternek*, azt az eljárást pedig, amelyikkel a tömörüléseket meghatározzuk, *clusterezésnek*.

A clusterezés célja a távérzékelte adatok belső struktúrájának meghatározása, vagyis annak az elemzése, hogy a mérési vektorok milyen csoportokat alkotnak önmagukban, más információ (esetünkben: referenciaadatok) felhasználásától függetlenül. A clusterezés után annak eredményéből próbáljuk meghatározni az osztályozáshoz szükséges, a tematikus kategóriákat felépítő alosztályokat.

Amellett az ideális eset mellett tehát, amikor egy cluster (illetve alosztály) pontosan megfelel egy tematikus kategóriának, az „ $n : 1^n$ ”-kapcsolatot is teljesen elfogadhatónak tekintjük. A gyakorlatban ezen kívül az a kedvezőtlen eset is előfordul, amikor egy clustert nem tudunk egyértelműen egy tematikus kate-

góriához rendelni, vagy azért, mert több kategória képpontjai is jelen vannak benne (vagyis „1 : n”-kapcsolat áll fenn egy cluster és bizonyos kategóriák között), vagy azért, mert a pontjai nem tartoznak érdemben egyik kategóriához sem. Ezeknek az eseteknek az azonosítását és kezelését a későbbiekben, a 8.9 szakaszban részletesen tárgyaljuk.

A clusterezés matematikai, algoritmikus leírásához előzetesen meg kell határozni a következőket:

- a) A pontok közötti távolság számításának módját. Itt mindig intenzitásértéki távolságról beszélünk, és leggyakrabban az euklideszi távolságot ( $\|\cdot\|_2$ ) használjuk.
- b) A ponthalmazok közötti távolság számításának módját. Legegyszerűbb a két halmazból vett összes lehetséges pontpár távolságának az átlagát venni, de használhatók a következő, 7. fejezetben bemutatásra kerülő, a clusterok valószínűségi eloszlásából számítható távolságmértékek is.
- c) Egy clusterezési kritériumot, amely az intenzitásvektorok és a clusterok közötti megfeleltetés jóságát méri. Általános jellemzőjük, hogy azokat a besorolásokat preferálják, amikor az egy clusteren belüli pontok távolsága minimális, a különböző clusterbe tartozók távolsága pedig maximális.

Tekintsünk egy  $V$  képet, amely  $N$  sorból és  $M$  oszlopból áll, és tegyük fel, hogy a clusterok száma  $K_f$ . Ekkor a képpontok clusterbesorolását a következő mátrix határozza meg:

$$C^{(f)} = \begin{pmatrix} c_{11}^{(f)} & \cdots & c_{1M}^{(f)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{N1}^{(f)} & \cdots & c_{NM}^{(f)} \end{pmatrix} \quad c_{ij}^{(f)} \in [1..K_f]$$

(Az  $f$  indexet a később ismertetésre kerülő teljes osztályozási folyamat leírásával való egységesség kedvéért használjuk.)

Az egyik gyakran alkalmazott clusterezési kritérium a négyzetes hiba összegét méri („sum of squared error”, SSE). Jelöljük  $\mu_k^{(f)}$ -vel a  $k$ . cluster átlagát, melynek értéke értelemszerűen a következő (osztás alatt skalárral való komponensenkénti osztást értve):

$$\mu_k^{(f)} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \chi(C_{ij}^{(f)} = k) \vec{v}_{ij}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \chi(C_{ij}^{(f)} = k)} \quad (6.1)$$

Ekkor a négyzetes hiba összege a következőképpen számítható egy  $V$  felvétele,  $C^{(f)}$  clusterbesorolás mellett:

$$\text{SSE}^{(f)} = \sum_{k=1}^{K_f} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \chi(C_{ij}^{(f)} = k) \|\vec{v}_{ij} - \mu_k^{(f)}\|^2$$

Ez az érték tehát a pontok és a nekik megfelelő clusterközéppontok (cluster-átlagok) közötti távolság összege, a kép minden pontjára összesítve.

Az ISODATA (Interactive Self-Organizing Data Analysis Technique A) a fenti SSE mennyiséget minimalizáló, iteratív clusterezőeljárás. Az alapalgoritmus a következő lépésekből áll:

1. lépés. Válasszunk kezdő clusterközpontokat az intenzitástérben.
2. lépés. Soroljuk be a képpontokat a legközelebbi clusterközpontokhoz, vagyis minden képpontokhoz rendeljük hozzá annak a clusternek a sorszámát, amelyeknek a legközelebbi a középpontja.
3. lépés. Számítsuk ki az új clusterközpontokat, vagyis határozzuk meg minden clusterre azoknak a képpontoknak az átlagát, amelyek az aktuális iterációban az adott clusterhez sorolódtak.
4. lépés. Ha a leállási feltétel nem teljesül, folytassuk a 2. lépéstől.

Formálisan a következő lépéseket hajtjuk végre:

1. lépés. Válasszunk egy  $K_1$  kezdő clusterszámot és minden  $k$ -ra ( $k \in [1..K_1]$ ) határozzunk meg egy  $\mu_k^{(1)}$  kezdő clusterközpontot. Legyen  $f := 1$ .
2. lépés. Növeljük 1-gyel  $f$  értékét. Az  $f$ . iterációban ( $f \geq 2$ ) a felvétel minden  $i, j$  pixelét ( $i \in [1..N], j \in [1..M]$ ) soroljuk a legközelebbi clusterközpontokhoz:

$$C_{ij}^{(f)} = \arg \min_{k=1}^{K_{f-1}} \|\vec{v}_{ij} - \mu_k^{(f-1)}\|$$

3. lépés. Számítsuk ki az  $f$ . iterációban kialakult besorolás alapján az új  $\mu_k^{(f)}$  clusterközpontokat a (6.1) képlet szerint.
4. lépés. Egy lehetséges leállási feltétel, hogy a clusterközpontok nem változtak, vagyis  $\forall k \in [1..K^{(f)}] : \mu_k^{(f)} = \mu_k^{(f-1)}$ . Egy másik, gyakorlatban is rendszeresen elvilegalkalmazott leállási feltétel, hogy a középpontok változása megadott határ alatt marad. A középpontokra vonatkozó feltétel mellett szokás az iterációk számát is korlátozni.

Jelöljük  $G$ -vel a végrehajtott clusterezési iterációk számát. Bár a fenti algoritmus végig ugyanannyi clusterrel dolgozik (tehát  $K_1 = K_2 = \dots = K_G$ ), de lehetőség van arra, hogy a futás során elhagyjunk vagy összevonjunk clustereket. Előbbi akkor fordulhat elő, ha valamelyik iterációban egy középponthoz nagyon kevés képpont sorolódik (elhagyás esetén ezek a pontok besorolandók másik clusterbe), esetleg egy sem. Az összevonás előfeltétele pedig, hogy megvizsgáljuk a clusterek távolságát a spektrális térben (ld. a clusterezéshez szükséges (b) tényező), és találunk olyan clustereket, amelyek közel vannak egymáshoz. Bizonyos implementációkban az összevonás lehetőségét nem iterációnként vizsgálják, hanem csak a leállási feltétel teljesülése után, az algoritmus végén.

## 6.4. A felügyelt osztályozás folyamata

Miután lefutott a clusterezési algoritmus, kialakultak az inputadatrendszer *spektrális alosztályai (spektrális adatosztályai)*. A megkülönböztetésüknek az az alapja, hogy a különböző spektrális alosztályokhoz tartozó képpontok (és a nekik megfelelő földfelszíni területek) a sugárzási értékben, vagyis spektrálisan különböznek. Az osztályozási folyamatban viszont az a végső cél, hogy a felhasználó

által meghatározott, a felhasználói feladat szempontjából érdekes szempontok szerint különválasztott *tematikus osztályokba* (*információs osztályokba, tematikus kategóriákba*) soroljuk be a képpontokat, illetve a földfelszín területeit. A távérzékeléses elemzés értékét és használhatóságát nagyon megnöveli, hogy a spektrális alosztályok és a tematikus osztályok között rendszerint jól meghatározható, egyszerű kapcsolat van.

Azt a módszert, amikor a referenciaadatokból közvetlenül határozzuk meg a tematikus osztályok tulajdonságait, *felügyelt osztályozásnak* nevezzük, ugyanis az elemző ekkor tulajdonképpen a referenciaadatok biztosításával „felügyeli” az osztályokhoz tartozó diszkriminánsfüggvények kialakulását. A clusterezés ezzel szemben *felügyelet nélküli osztályozás*, ekkor ugyanis az elemző kevéssé szól bele a spektrális alosztályok kialakulásába, ezt csak az intenzitástérbeli eloszlás határozza meg. (Adott algoritmus esetén legfeljebb a kezdőclusterek darabszámát, kiválasztásuk módját és az algoritmus leállási feltételét, pl. az iterációk számának felső korlátját adja meg.) A felügyelet nélküli osztályozást még egy műveletnek kell követni, melynek során meghatározásra kerül a spektrális alosztályok és a tematikus osztályok kapcsolata. A bevezetett formalizmushoz igazodva, ez az alábbiakban leírtak szerint végezhető el.

A clusterezés lépései során aszerint válogattuk szét a pixeleket, hogy a spektrális térben egy megadott távolságmérték szerint melyek voltak közel egymáshoz. Az ezt követő lépések során normális eloszlások sűrűségfüggvénye alapján végzett osztályozás határozza meg a pixelek besorolását. Ezt nevezzük az alosztályok finomításának, melynek keretében a clusterekből kiindulva iteratív eljárással a kép egyfajta osztályozásainak, illetve az ehhez kapcsolódó normális eloszlások halmazainak sorozatát állítjuk elő. Az utolsó lépésben ezekből az unimodális eloszlásokból fel tudjuk építeni a tematikus kategóriákat meghatározó összetett (multimodális) eloszlásokat.

A clusterezés felügyelet nélküli folyamata után az alosztályok finomításának felügyelt folyamatában már felhasználjuk a referenciaadatokat, melyeket az inputkép méretének megfelelő tematikus raszteres kép formájában illesztünk a rendszerbe:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & \dots & r_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{N1} & \dots & r_{NM} \end{pmatrix} \quad r_{ij} \in [0..K_F],$$

A mátrixelemek értéke az osztályok sorszámán kívül 0 is lehet, ami azt jelenti, hogy az adott helyen nem áll rendelkezésre referenciaadat. Két részre osztva használjuk: a tanuló-referenciaadatokra és a teszt-referenciaadatokra, amelyeket  $R$ -rel azonos méretű mátrixokban tárolunk (rendre  $R^{(\alpha)}$  és  $R^{(\omega)}$ ). Ideális esetben a tanulóadatokat és a tesztadatokat között nincs átfedés, vagyis a referenciaadatok halmazának diszjunkt felbontását adják. Ezt az ideális tulajdonságot a következőképpen írhatjuk le:

$$\forall (i, j) \in [1..N] \times [1..M] : r_{ij} \neq 0 \iff (r_{ij}^{(\alpha)} = r_{ij} \wedge r_{ij}^{(\omega)} = 0) \vee (r_{ij}^{(\alpha)} = 0 \wedge r_{ij}^{(\omega)} = r_{ij})$$

A kép pixeleinek alosztálybesorolását, amely az alosztályok finomításának lépéseiben alakult ki, a clusterbesoroláshoz hasonlóan ábrázolhatjuk:



$$C^{(f)} = \begin{pmatrix} c_{11}^{(f)} & \cdots & c_{1M}^{(f)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{N1}^{(f)} & \cdots & c_{NM}^{(f)} \end{pmatrix} \quad c_{ij}^{(f)} \in [1..K_f],$$

ahol  $K_f$  az alosztályok száma az  $f$ . fázisban, és  $f$  értéke  $G + 1$ -től (a clusterezés utolsó lépését követő lépéstől)  $F - 1$ -ig (a tematikus osztálybesorolást megelőző végső alosztálybesorolásig) terjed.

Az alosztályok finomításának lépései attól függnnek, hogy a clusterek és a későbbi iterációk spektrális alosztályai milyen összefüggést mutatnak a referenciaadatokkal. Ennek vizsgálatára az automatikus gépi és a szakértői feldolgozás során is hasznos eszköz a *kontingenciamátrix*. Soraiban a clusterek, illetve az alosztályok találhatóak, oszlopaiban a referenciaadatok tematikus kategóriái. Az alosztályok finomításánál a referenciaadatok közül a tanulóadatokat használjuk. Egy eleme az alosztály és a referenciaadatok egy kategóriájának metszetébe eső pixelek számát (illetve az általuk lefedett területet) tartalmazza:

$$T^{(f)} \in \mathbb{N}^{[1..K_f] \times [1..K_f]} \quad f \in [G..F - 1] \quad (k \in [1..K_f], l \in [0..K_F])$$

$$t_{kl}^{(f)} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \chi(C_{ij}^{(f)} = k \wedge R_{ij}^{(\alpha)} = l)$$

Az egyes lépésekben elvégezzük az aktuális,  $C^{(f)}$  mátrix által tartalmazott alosztálybesorolás által meghatározott normális eloszlások paraméterbecslését. Az átlagektor és a kovarianciamátrix számításának a 4.1. szakaszban megadott képlete a teljes felvételre vonatkozott. Az alosztályparaméterek becslésénél hasonló a számítás, annyi különbséggel, hogy a képletekben csak az adott alosztályhoz tartozó képpontokat kell figyelembe venni.

A  $b$ . sáv átlaga a  $k$ . alosztályban ( $b \in [1..B]$ ,  $k \in [1..K_f]$ ):

$$\mu_{kb}^{(f)} = \left( \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \chi(C_{ij}^{(f)} = k) v_{ijb} \right) / \left( \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \chi(C_{ij}^{(f)} = k) \right)$$

Az  $a$ . és  $b$ . sáv közötti kovariancia a  $k$ . alosztályban ( $a, b \in [1..B]$ ,  $k \in [1..K_f]$ ):

$$\Sigma_{kab}^{(f)} = \left( \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \chi(C_{ij}^{(f)} = k) (v_{ija} - \mu_a)(v_{jib} - \mu_b) \right) / \left( \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \chi(C_{ij}^{(f)} = k) - 1 \right)$$

A finomítás eredményét akkor tekintjük megfelelőnek, amikor már minden alosztályhoz egyértelműen hozzá tudunk rendelni egy tematikus kategóriát. Ezt az egyes iterációkban kiszámolt kontingenciamátrixok, illetve az alosztályok eloszlásának vizsgálata alapján döntjük el. A végeredmény ismeretében tehát arra a – célként kitűzött – feltételre alapozva végezzük az osztályozást, hogy a tematikus kategóriák normális eloszlású alosztályok kompozíciójaként állnak össze. Minden képpont besorolása két lépésben végezhető. Először egy alosztályba soroljuk be maximum likelihood-döntéssel, az alosztály paraméterei által meghatározott

normális eloszlás sűrűségfüggvénye alapján. A második lépésben az alosztály-sorszám által egyértelműen meghatározott tematikus kategóriához soroljuk a képpontot.

Tekintsük a teljes osztályozási folyamat  $F$ ., utolsó lépésének a tematikus kategóriák hozzárendelését a pixelekhez, az ezt megelőző  $(F - 1)$ . lépését pedig az alosztálybesorolás végeredményének. Az előző bekezdés értelmében megadható egy  $\mathbb{A} : [1..K_{F-1}] \rightarrow [1..K_F]$  függvény az alosztályok végső halmaza és az osztályok (tematikus kategóriák) között, amelynek segítségével a képpontok osztálybesorolását megkaphatjuk a végső alosztálybesorolásból:

$$\forall (i, j) \in [1..N] \times [1..M] : c_{ij}^{(F)} = \mathbb{A}(c_{ij}^{(F-1)}).$$

Viszont általában nincs ilyen megfeleltetés az alosztály-finomítás egymás utáni iterációiban előforduló alosztály-sorszámok között, vagyis a  $c_{ij}^{(f)}$  és a  $c_{ij}^{(f-1)}$  értékek között, ha  $f < F$ .

A pixelek besorolását megadó  $C$  mátrix értékei tehát jelenthetnek clustersorszámot, alosztály-sorszámot vagy osztály-sorszámot attól függően, hogy a teljes folyamat melyik fázisát hajtjuk éppen végre. Az értékek jelentését a következő táblázat foglalja össze.

clustersorszámok	alosztály-sorszámok	osztály-sorszámok
2.   ...   $G$ .	$G + 1$ .   ...   $F - 1$ .	$F$ .

Tehát az első  $G$  lépés a clusterezés iterációinak felel meg. (Azért 2-től indul a táblázat, mert az 1-es index a kezdő clusterközpontokat jelenti, amihez nem tartozik pixelbesorolás, vagyis  $C^{(1)}$ -et nem értelmezzük.) Ezt követi – rendszerint kevés, 2-3 lépésben – az alosztályok finomítása. Az egységes jelölésrendszerbe illeszkedve a végső osztálybesorolást is önálló,  $F$ . sorszámú lépésnek tekintjük.

A 9.1. szakaszban tárgyalt szegmentálás szintén beleilleszthető ebbe a formális keretrendszerbe. Ahogy a 9.1.3. alszakaszban ismertetésre kerül, a szegmentálást tulajdonképpen a teljes feldolgozási folyamat „nulladik” lépésének tekinthetjük.

## 7. fejezet

# A tematikus osztályozás pontosságvizsgálata

A spektrális adatosztályok valószínűségi eloszlással történő leírása a valós gyakorlatok egyik közelítő meghatározása. Egy felvétel osztályozási eredményén a különböző spektrális adatosztályok nyilván nem fednek át, mivel minden képpont egyértelműen az egyik adatosztályba lett besorolva. Azonban a valószínűségi eloszlással történő leírásnál átfedhetnek az osztályok olyan értelemben, hogy adott pixelértéknél több osztály sűrűségfüggvénye is lehet pozitív. Ez az átfedés okozza a tematikus osztályozás tévesztéseit.

Az előzőekből adódóan, a távérzékeléssel megfigyelt földfelszíni objektumok, jelenségek tulajdonságai miatt a tematikus osztályozás szükségszerűen magában hordoz bizonyos mértékű hibát. Azonban elvárás, hogy ez a hiba mérhető, behatárolható legyen, vagyis képpel rendelkezünk az osztályozás minőségéről, illetve a tévesztések előfordulásának arányáról, eloszlásáról. Jelen fejezet két szakasza rendre a tévesztéseknek az osztályozást megelőző előrejelzésével, illetve az osztályozást követő felmérésével foglalkozik.

### 7.1. Az osztályozás hibáinak előrejelzése

Az osztályozási hibák valószínűsége szoros kapcsolatban áll a sűrűségfüggvények átfedő tartománya „alatti” területtel (vagy térrésszel, a mérési adatok dimenziószámától függően). A hiba előfordulásának valószínűségét legtöbbször nem lehet közvetlenül kiszámítani, azonban az osztályokat leíró eloszlások átfedéséből, vagy fordítva, a *szétválaszthatóságukból* következtetni tudunk rá: a szétválaszthatóság fordított viszonyban áll a hibák valószínűségével. A következőkben látni fogjuk, hogy az eloszlások távolságmértékei általános esetben bonyolultak lehetnek, de a normális eloszlás használata jelentősen leegyszerűsíti a képleteket, csökkenti a számításigényt.

Az egyik legegyszerűbb távolságmérték az „*átlagok normalizált különbsége*”, amely egydimenziós esetben alkalmazható, és a képlete:

$$d_{norm}(\omega_k, \omega_l) = \frac{|\mu_k - \mu_l|}{\sigma_k + \sigma_l}$$

Egyik hátrányos tulajdonsága, hogy bármely két eloszlásra 0 az értéke, amelyeknek megegyezik az átlaguk, pedig a sűrűségfüggvények „alatti” átfedő terület, vagyis a hiba valószínűsége függ a szórástól is, illetve az eloszlás esetleges egyéb paramétereitől, tulajdonságaitól. A másik probléma, hogy csak egydimenziós esetben alkalmazható.

A többdimenziós esetben is alkalmazható egyik távolságmérték a *divergencia*. Számítása az ún. *valószínűségi arányból* történik:

$$L_{kl}(\vec{v}) = \frac{p(\vec{v}|\omega_k)}{p(\vec{v}|\omega_l)}$$

Szemléletesen is belátható, hogy minél nagyobb ez a hányados, annál nagyobb valószínűséggel osztályozza helyesen az  $\omega_k$  osztályba tartozó pontokat az eljárás. Kezelhetőbb a számítás a *logaritmikus valószínűségi arány* használatával:

$$L'_{kl}(\vec{v}) = \ln(L_{kl}(\vec{v})) = \ln(p(\vec{v}|\omega_k)) - \ln(p(\vec{v}|\omega_l))$$

Ez alapján az  $\omega_k$  és  $\omega_l$  osztályok közötti divergenciát a következő összeggel definiáljuk:

$$D_{kl} = E(L'_{kl}(\vec{v})|\omega_k) + E(L'_{lk}(\vec{v})|\omega_l),$$

ahol  $E$  a teljes mérési téren vett integrálással számított várható értéket jelöli. Esetünkben a fent bevezetett logaritmikus valószínűségi arány várható értékét számoljuk. Vagyis

$$E(L'_{kl}(\vec{v})|\omega_k) = \int_{\vec{v}} L'_{kl}(\vec{v})p(\vec{v}|\omega_k)d\vec{v},$$

valamint hasonlóan számítható  $E(L'_{lk}(\vec{v})|\omega_l)$  is. Ezt behelyettesítve látható, hogy

$$D_{kl} = \int_{\vec{v}} (p(\vec{v}|\omega_k) - p(\vec{v}|\omega_l)) \ln\left(\frac{p(\vec{v}|\omega_k)}{p(\vec{v}|\omega_l)}\right) d\vec{v}.$$

Szemben az átlagok normalizált különbségével, a divergencia mindig pozitív értékű, amennyiben a két eloszlás nem egyezik meg. Azonos eloszlásokra 0 az értéke. A két paraméternek szimmetrikus a szerepe, felcserélésükkel változatlan a divergencia.

Általános esetben a divergencia kiszámításához a teljes intenzitástéren kell integrálni egy kifejezést, ami várhatóan nem egyszerűbb, mint közvetlenül számolni a hiba valószínűségét. Ha viszont normális eloszlásokra alkalmazzuk, a következővé egyszerűsödik a számítás ( $\omega_k$  paraméterei  $\mu_k$  és  $\Sigma_k$ ,  $\omega_l$ -é  $\mu_l$  és  $\Sigma_l$ ):

$$D_{kl} = \frac{1}{2} \text{tr}((\Sigma_k - \Sigma_l)(\Sigma_l^{-1} - \Sigma_k^{-1})) + \frac{1}{2} \text{tr}((\Sigma_k^{-1} + \Sigma_l^{-1})(\mu_k - \mu_l)(\mu_k - \mu_l)^T)$$

Bár a távolságmértékek célja alapvetően az, hogy a helyes osztályozás mértékét mutatták, de a divergencia nem alkalmas közvetlenül erre a feladatra. Ugyanis a helyes osztályozás mértékének van egy felső határa, azonban a divergencia tetszőlegesen nagy lehet, pl. két dimenzió esetén a normalizált távolság függvényében meredeken emelkedik. Ezért szokás a divergenciának a normalizált

távolság függvényében telítésbe menő formáját, az ún. *transzformált divergenciát* használni:

$$D_{kl}^T = 2 \left( 1 - e^{-D_{kl}/8} \right)$$

Kettőnél több osztály esetére is kiterjeszthető a divergencia fogalma, ekkor a páronkénti értékekből számítjuk az ún. *átlagos divergenciát*:

$$D_{ave} = \sum_{k=1}^{K_F} \sum_{l=1}^{K_F} p(\omega_k) p(\omega_l) D_{kl}$$

Az átlagos divergencia abban az esetben „rosszul” működik, vagyis indokolatlanul magas szétválaszthatóságot jelez, amikor vannak egymástól távoli, de egymáshoz nagyon közeli osztálypárok is: nem jelentkezik az értékében a közeli osztálypárok miatti nagyobb tévesztési valószínűség. Ezt a problémát valamennyire kiküszöböli a Jeffries–Matusita-távolság kettőnél több osztályra kiterjesztett változata.

A Jeffries–Matusita- (JM-) távolság közelítőleg, szemléletesen két osztály sűrűségfüggvényének az átlagos távolságát méri. Formális definíciója a következő:

$$J_{kl} = \int_{\vec{v}} \left( \sqrt{p(\vec{v}|\omega_k)} - \sqrt{p(\vec{v}|\omega_l)} \right)^2 d\vec{v}$$

Normális eloszlásokra a JM-távolságnak is jóval egyszerűbben számítható a képlete:

$$J_{kl} = 2(1 - e^{-\alpha_{kl}}), \text{ ahol}$$

$$\alpha_{kl} = \frac{1}{8}(\mu_k - \mu_l)^T \left( \frac{\Sigma_k + \Sigma_l}{2} \right)^{-1} (\mu_k - \mu_l) + \frac{1}{2} \ln \left( \frac{(\Sigma_k + \Sigma_l)/2}{\sqrt{|\Sigma_k|} \sqrt{|\Sigma_l|}} \right)$$

A JM-távolság értéke nem lehet tetszőlegesen nagy: a normalizált távolság függvényében vizsgálva telítésbe megy, ilyen szempontból alkalmasabb az osztályozás pontosságának a mérésére, mint a divergencia.

Összegzésképpen, a hiba valószínűségét közvetlenül egyik távolságmérték sem adja meg, de segítségükkel határokat lehet rá mondani. A divergenciából csak alsó, míg a JM-távolságból alsó és felső becslést tudunk állítani. Amennyiben  $\omega_k$  és  $\omega_l$  azonos előzetes valószínűségű osztályok, a hiba valószínűségére ( $p_E$ ) az alábbi becslések érvényesek.

$$\frac{1}{8} e^{-D_{kl}/2} < p_E$$

$$\frac{1}{16} (2 - J_{kl})^2 \leq p_E \leq \frac{1}{4} (2 - J_{kl})$$

## 7.2. Az osztályozási eredmény pontosságvizsgálata

Az előző, 7.1. szakasz az osztályozás hibáinak előrejelzéséről szólt, most pedig a konkrét osztályozási eredmények vizsgálata következik a tévesztések, hibák szempontjából. Az osztályozás pontosságának vizsgálatához elsősorban a teszt-referenciaadatokat használjuk fel. Bár a tanuló-referenciaadatok is alkalmazhatók, de mivel közvetlenül részt vettek az alosztályok kialakításában, ezért a valós helyzetnél kedvezőbbet mutathat a velük történő összehasonlítás.

A *tévesztési mátrix* megadja az osztályozás eredményeként kapott és a referenciaadatok által meghatározott tematikus osztályok viszonyát a teljes vizsgált területre összesítve. Szerkezeté és számításának módja megegyezik a kontingenziamátrixéval, azzal a különbséggel, hogy az utolsó fázisban, a végső tematikus osztályokat tartalmazó  $C^{(F)}$  mátrixra számítjuk ki, és az összehasonlítás alapját a teszt-referenciaadatok képezik. A sorai az osztályozás eredményeként kapott tematikus osztályoknak felelnek meg, oszlopai a teszt-referenciaadatok tematikus kategóriáinak. Egy eleme az eredményosztály és a referenciaadatok egy kategóriájának metszetébe eső pixelek számát tartalmazza:

$$T^{(F)} \in \mathbb{N}^{[1..K_F] \times [0..K_F]}$$

$$t_{kl}^{(F)} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \chi(C_{ij}^{(F)} = k \wedge R_{ij}^{(\omega)} = l) \quad (k \in [1..K_F], l \in [0..K_F])$$

Szokás a metszethez tartozó képpontok száma helyett a nekik megfelelő földfelszíni terület nagyságát megadni. A tévesztési mátrixban tehát a főátlóbeli elemek tartalmazzák a helyes osztályozás eredményét, a főátlón kívüli elemek pedig a hibákhoz tartoznak. Az  $l$ . oszlopban a főátlón kívüli elemek az  $\omega_l$  osztályra vonatkozó elsőfajú, kihagyásos hibát tartalmazzák, vagyis a valóságban az  $\omega_l$  osztályhoz tartozó, de valamely más osztályba sorolt pontokat. Az osztályra vonatkozó találati arány alatt a helyesen osztályozott képpontok és a referenciaadatok szerint az osztályhoz tartozó összes képpont arányát értik ( $t_{ll} / \sum_{k=1}^{K_F} t_{kl}$ ). Hasonlóan, a  $k$ . sor főátlón kívüli elemei a másodfajú, beválogatásos hibát mutatják. Egy példát mutat a 7.1. táblázat, melyben a teljes területre vonatkozó, összesített pontosság (találati arány) is szerepel.

A veszteségmátrixból kiindulva több pontossági mértéket is származtathatunk, amelyek a mátrix helyett általában egy számmal jellemzik a pontosságot. Ilyenek pl. a kappa-, a Hellden- és a Short-mérték.

Az osztályozás minőségének vizsgálatára szolgáló másik eszköz a *hibatérkép*, amely nem a teljes területre összesítve, hanem pontról pontra, a hibák területi eloszlását mutatva minősíti az osztályozást. Célja elsősorban vizuális értékelés. Mérete megegyezik az eredeti, illetve az osztályozott kép méretével, és az elemekben olyan tematikus értékek szerepelnek, amelyek a képpont besorolásától és a referenciakategória sorszámától is függenek. Vagyis gyakorlatilag egybeintegreljük a kétféle tematikus sorszámot, és az egyes kombinációkhoz olyan megjelenítést (színt, árnyalatot) választunk, amely megkönnyíti a számunkra kritikus melléosztályozások felismerését, területi beazonosítását, a kevésbé problémás tévesztésektől való megkülönböztetését.

	C0	C1	C3	C4	C10	C12	C13	C14	C22	C27	C40
C1	392	9394	128	93	0	0	0	0	0	22	0
C3	14	1681	522	0	0	0	0	0	2	7	0
C4	51	325	0	207	0	0	0	0	0	0	0
C10	227	218	0	0	3650	1	19	0	73	5	0
C12	19	0	0	0	2	5702	0	0	0	4	6
C13	26	0	0	0	72	43	11476	0	3	0	0
C14	0	0	0	0	0	0	0	981	0	0	0
C22	0	3	0	0	20	0	2	0	2551	17	8
C27	0	3	0	0	0	0	0	0	0	484	0
C40	3	1	30	0	32	0	0	0	13	0	5381

Összesített pontosság

91.8%

7.1. táblázat. Példa pixelenkénti osztályozás tévesztési mátrixára

## 8. fejezet

# A távérzékelte felvételek tematikus kiértékelésének lépései

A statisztikai tematikus osztályozás részletes bemutatása után ebben a fejezetben szélesebb látókörrrel ismertetjük azt a teljes folyamatot, amely egy komplex távérzékelési térképezési feladat megoldásához szükséges. Látni fogjuk, ahogy a korábbi fejezetekben bemutatott lépések – elsősorban az előfeldolgozás, a statisztikai osztályozás és a pontosságvizsgálat – egymásra épülnek.

### 8.1. A célkitűzés megfogalmazása

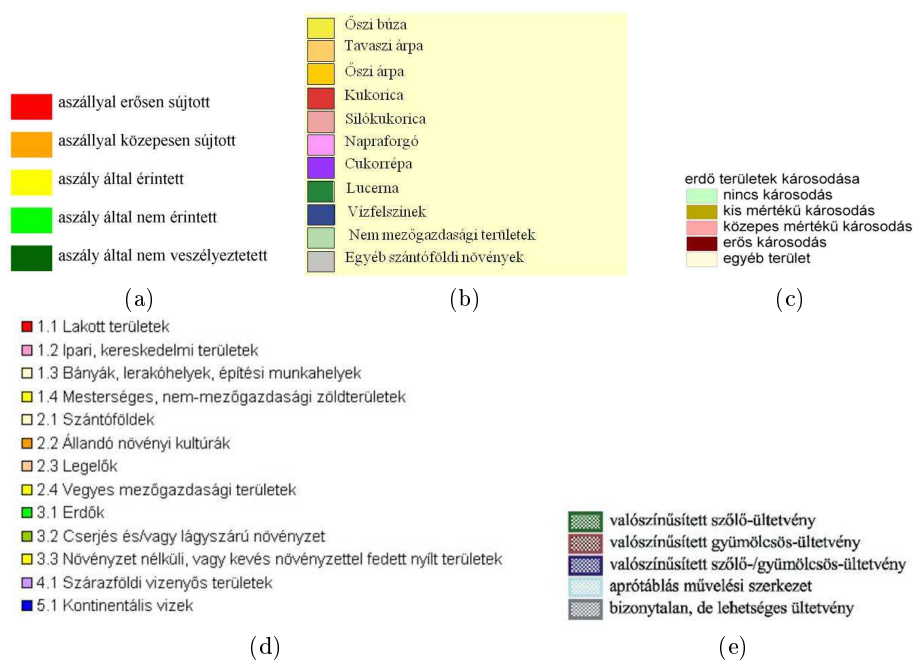
Mint minden feladatot, a távérzékelési felmérést is a cél pontos megfogalmazásával kell kezdeni. A tematikus térképezési feladatoknál a legalapvetőbb kérdés, hogy *mit* szeretnénk felmérni, és milyen tematikus eredményt szeretnénk kapni. Ez magában foglalja a tematikus osztályok halmazának kialakítását. Bár az előadásban és a jegyzetben nagyon sokszor utalunk a növényterképezésre, de a 8.1. ábra néhány példával illusztrálja, hogy sok más kategorizálás is előfordulhat az igényektől függően.

### 8.2. A feladat elemzése, modellalkotás, tervekészítés

A feladat kitűzése után meg kell vizsgálni, hogy a földfelszín, illetve a feltérképezni kívánt objektumok fizikai állapota hogyan feleltethető meg a kialakítandó tematikus kategóriáknak, illetve ezt milyen lépéseken keresztül tudjuk meghatározni. Ehhez a lépéshez tartozik a pénzügyi terv elkészítése is.

Bár a mai alkalmazásokban ritkábban gondolnak bele a felhasználók, hogy a távérzékelte felvételek vizsgálatával lényegében a felszínen érzékelhető fizikai paraméterekre következtethetünk vissza, mert úgy tűnik, hogy a kapcsolatot „készen kapjuk”, de a felvételek megfelelő értelmezéséhez, interpretációjához mégsem szabad ezt figyelmen kívül hagyni. Például lehet, hogy két, eltérő idő-

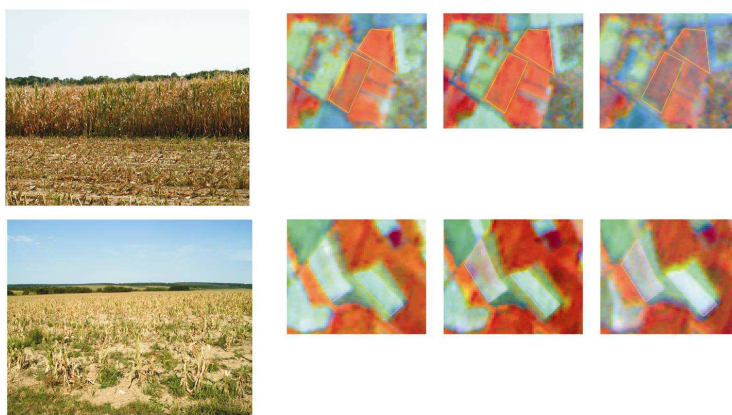




8.1. ábra. Néhány lehetséges kategorizálás: az aszálykár mértéke (a), növényfajok (b), az erdőkárosodás foka (c), a CORINE felszínborítási adatbázis hierarchikus nomenklatúrája (d), a szőlők és gyümölcsösök felméréseinek valószínűségi foltterképeiben alkalmazott jelölések (e).

pontban készült úrfelvétel háromsávós színkompozitján hasonlóan látunk egy területet, azonban ha a két kompozit nem ugyanazokat a spektrális sávokat tartalmazza (pl. az egyik közeli infravörös, vörös, zöld, a másik közeli infravörös, közepes infravörös, vörös – mind a kettőt elterjedten használjuk), akkor téves lehet az a következtetés, hogy a valóságban is hasonló a terület állapota a két időpontban.

A 8.2. ábra egy jól fejlett és egy aszály miatt szinte teljesen kipusztult kukoricatábla példáján illusztrálja a kapcsolatot a fizikai állapot és az úrfelvételek között. A felső felvételi idősoron alapvetően a fejlett növényzet jelenik meg, a száradásra utaló foltok csak a kukorica érésének adott időszakában normális vízvesztéséget jelzik. Az alsó idősoron viszont lényegében csak a talaj jelenik meg, jelezve a minimális növényborítást.



8.2. ábra. Fejlett és aszályal sújtott növényzet megjelenése az úrfelvételeken

### 8.3. A felvételek kiválasztása és beszerzése

A feladat és a fizikai modell ismeretében meg kell határozni, hogy milyen típusú – milyen térbeli, időbeli és spektrális tulajdonságú – felvételekkel érhetjük el a célunkat, illetve hogy a rendelkezésre álló anyagi források, informatikai eszközök, szakképzettség és idő függvényében reálisan milyen felvételek szerezhetők be és dolgozhatók fel. Gyakran kompromisszumot kell kötni a korlátozott anyagiak miatt, vagy amiatt, hogy a célterületre elkészült felvételek egyike sem felel meg maradéktalanul a céljainknak.

A 8.3. ábra az egyik távérzékeléses ellenőrzési körzet superfelbontású fedését mutatja be. A jobb térbeli felbontású, multispektrális komponenssel is rendelkező QuickBird- és Ikonos-felvételek mindegyike felhős volt, és a két felvétel kevésbé felhős darabjából készült mozaik sem fedte le teljesen a körzetet. A kimaradt területen csak a kisebb felbontású pankromatikus EROS-úrfelvétel állt rendelkezésre.

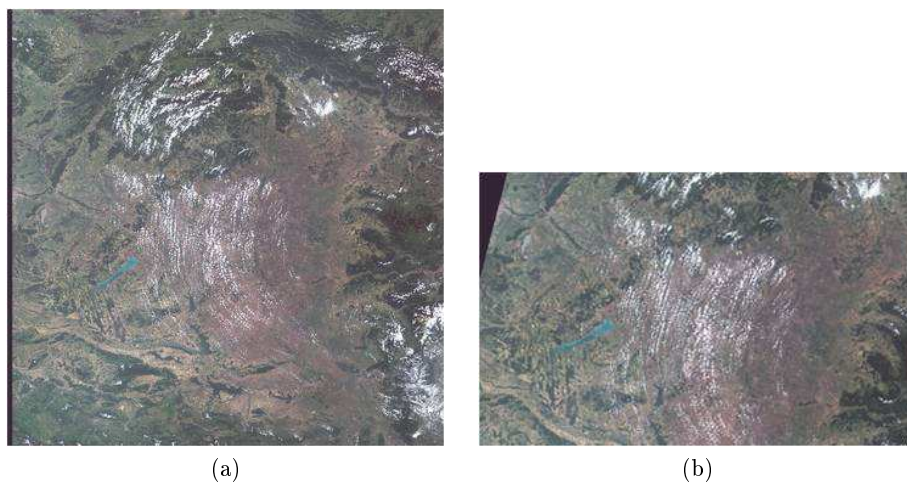


8.3. ábra. A SOM4 távérzékeléses ellenőrzési körzet lefedése szuperfelbontású űrfelvételekkel

## 8.4. A felvételek közös térképi rendszerhez illesztése

A 4.2. szakaszban ismertetett módszerekkel a felhasználni kívánt felvétel(ek)e)t georeferáljuk, majd meghatározott térképi rendszerbe transzformáljuk. Különösen fontos az egységes térképi rendszer, ha több felvételt használunk együttesen – ami a mai alkalmazások többségére jellemző. De akár egy felvétel használata esetén is igaz, hogy az eredményt jellemzően egy adott térképi és vetületi rendszerben szeretnénk kapni, így vagy a feldolgozás elején, vagy valamely későbbi szakaszában szükség van az adatok átvetésére. A geometriai korrekció kiindulási adatát és eredményét illusztrálja a 8.4. ábra.

Magyarország területének feldolgozása során manapság sokat használjuk az Egységes Országos Vetületi Rendszert (EOV), illetve az Egységes Országos Térképezési Rendszert (EOTR). Az EOV a teljes ország területére elfogadható, igen alacsony hossztorzulást eredményez. Az egységességnek és a könnyű kezelhetőségnek köszönhetően egyre inkább átveszi a helyileg esetleg pontosabb, de adott területre szorítózkodó (azon kívül viszont adott esetben nagy torzítású) vetületek szerepét. Az EOV az Osztrák-Magyar Monarchia idején használt három ferdengelyű hengervetület közül a Hengervetület Középső Rendszerének utóda, az ország jelenlegi területéhez optimalizált paraméterekkel. Egy kettős vetítésű szögtartó rendszer, amelynél a vetítés először az ellipszoidról a Gauss-gömbre, majd a Gauss-gömből a megfelelő süllyesztett hengerre történik. A méterben megadott koordináták jellemzője, hogy északi irányban 32000 és 384000 közé, keleti irányban pedig 384000 és 960000 közé esnek. Így nem téveszthető össze a



8.4. ábra. A geometriai korrekció hatása: a nyers, vetületi rendszer nélküli (a) és az Egységes Országos Vetületbe transzformált felvétel (b).

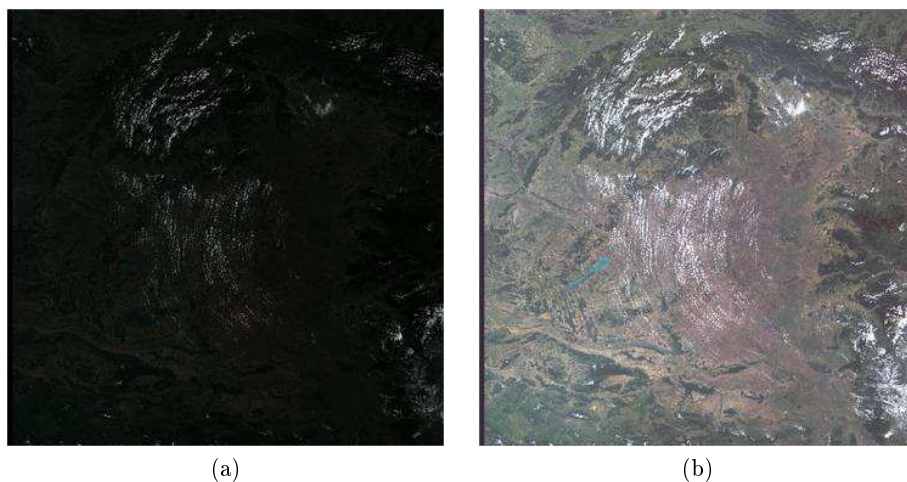
két koordináta. (Ez azért is segítség, mert az EOV hivatalos definíciója a jobbsodrású rendszernek megfelelően az északi irányt felelteti meg az  $X$  tengelynek, a keletit az  $Y$ -nak, míg a mai térinformatikai rendszerekben inkább a fordítottja jellemző).

## 8.5. A felvételek átfogó statisztikai vizsgálata, áttekintés, tájékozódás

Szintén az előfeldolgozás része az intenzitáskorrekció, amelyet a geometriai korrekció előtt vagy után is végrehajthatunk. A 4.1. szakaszban leírt módszereket használjuk. A lépést a felvételek vizsgálatával kezdjük: az általános tájékozódáson kívül pl. kontrasztfokozó műveleteket is alkalmazhatunk a vizuális kiértékelés megkönnyítése érdekében. Az előzetes vizsgálatból a felvételek hibáira, a feldolgozás szempontjából kedvezőtlen tulajdonságaira (pl. felhősség, páráság) is következtethetünk. A 8.5. ábra látványosan mutatja a kontrasztfokozás hatását. Az eredeti felvételen alig látszik a földfelszín, mert a felhők „elhúzzák” a hisztogramot, így az alacsonyabb reflektanciájú területek nagyon sötéten jelennek meg. A felhőtlen részek, a valóban értékes pixelek alapján újraszámolva a hisztogramot, jól látható eredményt kapunk.

## 8.6. Mintaterületek kiválasztása

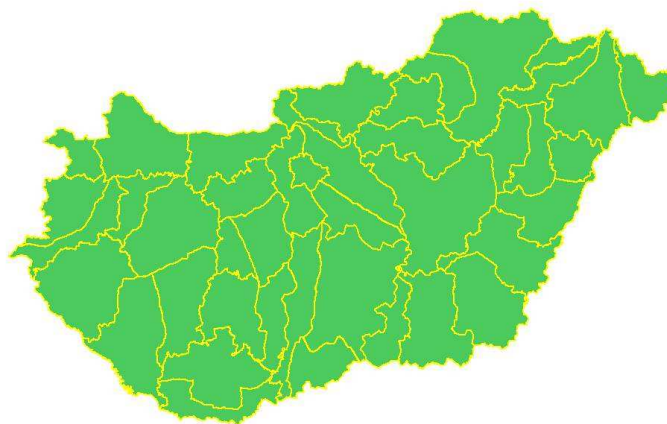
Nagyobb terület osztályozásánál előfordulhat, hogy nem eléggé homogén ahhoz, hogy az osztályozást egyféle paraméterezéssel hajtsuk rajta végre. A heterogenitást okozhatja a talaj, a domborzat, az időjárás, az építkezési, területrendezési szokások, a művelési szerkezet különbözősége. Ilyen esetekben megtehetjük, hogy a teljes területet több, statisztikailag homogén részterületre – strátumokra, régiókra, tartományokra – osztjuk, és a strátumokat külön osztályozzuk, majd a



8.5. ábra. A kontrasztfokozás hatása egy úrfelvétel esetén: a felhők által elhúzott hisztogram alig értékelhető megjelenítést eredményez (a), viszont a felhőtlen részek alapján végezve a számítást, már jól látható a földfelszín (b).

strátumonkénti eredményeket összemozsákolva állítjuk össze a teljes területet lefedő tematikus végeredményt.

A 8.6. ábra bemutatja Magyarországnak a NÖVMON projektben (ld. 10.1. szakasz) alkalmazott strátumfelosztását.



8.6. ábra. Magyarország felosztása strátumokra a NÖVMON projektben

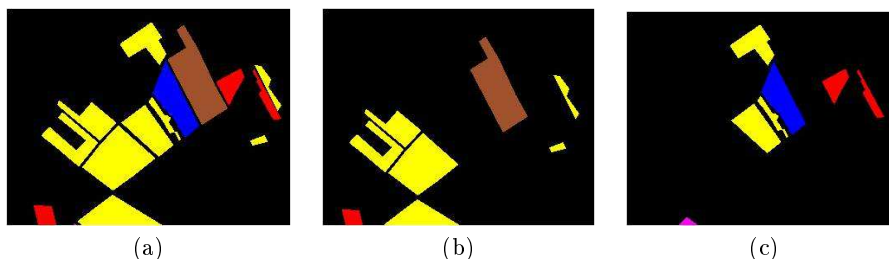
A következő, 8.7-től 8.13-ig terjedő lépéseket minden strátumra el kell végezni. A strátumok feldolgozása egymástól függetlenül, akár párhuzamosan is végezhető.

## 8.7. A szükséges referenciaadatok beszerzése és bevitele

A megfelelő osztályozáshoz szükséges, hogy minden strátumban rendelkezünk kellő mennyiségű referenciaadattal minden tematikus osztályra, mivel a felosztásból következően a referenciaterületeket is csak a tartalmazó strátumon belül használhatjuk.

A referenciaterületek kijelölése után következik a referenciaadatok tényleges begyűjtése. Ez viszonylag költséges és időigényes lépés, mivel legtöbbször tényleges terepi kiszállással oldjuk meg. Továbbá nagyon lényeges a begyűjtött referenciaadatok minőségének ellenőrzése, mert a téves vagy pontatlan adat elronthatja az egész osztályozás paramétereit, így a végeredményét is. A helyszíni mérésekkel gyűjtött referenciaadatokat bevisszük a feldolgozás térinformatikai rendszerébe, és szükség szerinti átalakításokat (pl. vektorból raszterbe történő konverzió) hajtunk végre rajtuk.

A 8.7. ábra egy kis területre mutatja a referenciaadat-gyűjtés eredményét térinformatikai formában. Az a) részára az összes adatot, a b) csak a tanulóterületeket, a c) csak a teszterületeket mutatja. Látható, hogy ebben az esetben sem teljesült maradéktalanul az az ideális kitétel, hogy a tanuló- és teszterületek nem fedhetnek át. Ez főleg kisebb strátumokban, kis elemszámú osztályoknál jellemző.



8.7. ábra. Példa referenciaadatokra: az összes adat együtt (a), a tanuló- (b) és teszterületek (c).

## 8.8. A tanulóterületek spektrális adatanalízise

A kvantitatív kiértékelés előkészítéseként előzetes statisztikai vizsgálatokat hajtunk végre a tanulóterületeken. Megvizsgáljuk az egyes tematikus kategóriák tanulóterületeinek eloszlását a spektrális térben. Egyrészt kiszámíthatjuk az alapstatisztikákat a 4.1.1. alszakasz alapján, másrészt clusterező-eljárást futtathatunk a teszterületek képpontjain a 6.3. alszakaszban leírtak szerint. Így egy mérhető képünk lesz az osztályok szétválaszthatóságáról.

## 8.9. Az adat- és tematikus osztályok összefüggéseinek megállapítása

Ez a lépés kulcsfontosságú a statisztikai osztályozás paramétereinek meghatározása során, ugyanis nagyrészt itt dől el, hogy a felvételek képpontjai hogyan képeződnek le a statisztikai paramétereken keresztül a tematikus célkategóriákra. A teljes felvételre végrehajtjuk a 6.3. alszakaszban ismertetett clusterezést. A kiindulási clusterok számát az előző, 8.8. szakasz eredménye alapján határozzuk meg.

A 8.8. ábra szemléletesen mutatja a clusterezés jelentőségét egy nagyon egyszerű példán keresztül. Egy úrfelvételre minden előzetes referenciaadat felhasználása nélkül felügyelet nélküli osztályozást hajtunk végre, 3 clustert kialakítva. Az 5.1. (a) részábra a teljes eredeti felvételt, míg a (c), (d) és (e) részábrák az eredeti felvételnek az egyes clusterok területére leszűrt részeit tartalmazzák. Annak ellenére, hogy a gyakorlati alkalmazásokban jóval több clustert szoktunk kialakítani, a példánkban már a 3 cluster is kézzelfogható tematikus jelentéssel bír. A részképeket látva megállapíthatjuk, hogy az 1. cluster a kifejtett kultúr-növényzetet, a 3. cluster pedig a talajt, illetve a nagyon fejletlen növényzetet képviseli. Csak a 2. clusterről mondhatjuk, hogy „vegyes” gyűjtőkategória, amelybe a máshová nem illő pixelek sorolódtak. Megjegyezzük, hogy a teljes felvétel, illetve az egyes clusterok intenzitástérbeli eloszlás-képeit az 5.1. szakaszban található 5.1. ábra mutatja, a felvételek megfelelő részalmazait és a hozzájuk tartozó intenzitástérbeli képeket azonos betűkkel (a, c, d, e) jelölve.

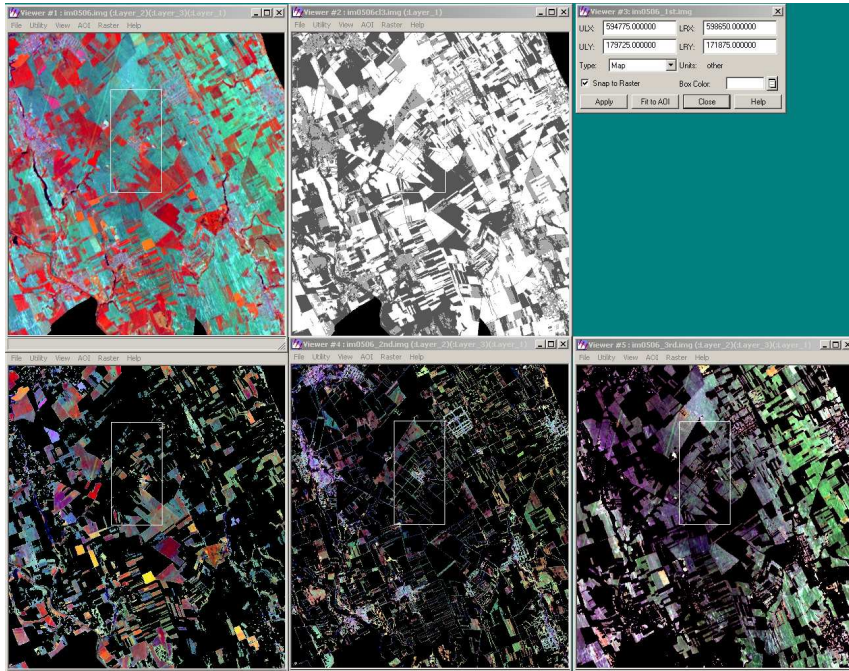
Lényegében hasonló megfeleltetést végzünk a clusterok és a tematikus osztályok között a gyakorlati alkalmazásokban, az alábbi fontos különbségekkel.

- Jóval több clustert használunk, illetve a tematikus osztályok száma is magasabb.
- A tematikus kategóriákhoz tartozó területeket általában nem „ránézéssel”, a távérzékelte adat vizuális vizsgálatával állapítjuk meg, hanem helyszíni adatgyűjtéssel.
- A clusterok és a tematikus osztályok összefüggésének megállapításához a vizuális vizsgálaton túl nagyban igénybe vesszük az számítógépes elemzés nyújtotta lehetőségeket, elsősorban a 6.4. szakaszban bemutatott kontingenciamátrixot, amelynek egy egyszerű esetét mutatja a 8.9. ábra.

Általában a tematikus osztályokat felépítő spektrális alosztályokat határozzuk meg, amelyeknél a kiindulást a clusterok jelentik.

A clusterok, illetve alosztályok és a tematikus osztályok között az alábbi kapcsolatok állhatnak fenn, amelyeket a 6.3. szakaszban röviden már ismertettünk.

- Ideális esetben *egy cluster, illetve spektrális adatosztály pontosan megfelel egy tematikus osztálynak*, vagyis a kontingenciamátrixban van egy olyan domináns érték, amelynek mind a sorában, mind az oszlopában szereplő többi érték elhanyagolhatóan kicsi. Ekkor ez a domináns érték kijelöl egy egymásnak megfelelő alosztályt és tematikus osztályt. Ez az eset igen ritka.
- *Több spektrális adatosztály „épít fel” egy tematikus célosztályt*, vagyis „ $n : 1$ ”-kapcsolat áll fenn. Ekkor több olyan alosztályt találunk, amelyek



(a)	(b)	
(c)	(d)	(e)

8.8. ábra. A clusterek illusztrálása. A részábrák jelentése: (a) – az eredeti űrfelvétel; (b) – a képpontok háromféle kategóriába sorolását megadó ún. clustertérkép; (c) – az 1. kategóriát, a kifejlett kultúrnövényzetet képviselő pixelek; (d) – a 2. kategóriát, a vegyes és átmeneti felszínborítást képviselő pixelek; (e) – a 3. kategóriát, a talajokat képviselő pixelek. A részábrák, illetve betűjelek (a b-től eltekintve) megfelelnek az 5.1. szakaszban található 5.1. ábra intenzitás-térbeli képeinek.



plant code plant növény	1 winter wheat őszi búza	2 spring wheat tav. búza	3 spring barley tav. árpa	4 winter barley őszi árpa	6 oats zab	7 triticale tritikálé	14 alfalfa lucerna	18 rape repece	27 non arable állandó füves	ground data (ha) refter (ha)
class1	0									0
class2	280			3	1	17				301
class3	252	0	0	0	0	0	1	1	1	254
class4	13			4				108	1	126
class5	0			80				1	2	83
class6	24		15				3		6	48
class7	0			93				1	1	95
class8	381		13				1	1	1	396
class9	2						109		12	123

8.9. ábra. Példa a kontingenciamátrixra, ahol a sorok jelölik a cluster-, illetve alosztálysorszámot, az oszlopok a tematikus kategóriák sorszámát.

sorában a kontingenciamátrix 1-1 domináns elemet tartalmaz, méghozzá ugyanabban az oszlopban, vagyis ugyanazt a tematikus kategóriát jelölik ki. Ez a leggyakoribb eset, és teljesen elfogadhatónak tekintjük.

- A gyakorlatban az a kedvezőtlen eset is előfordul, amikor *egy spektrális adatosztály több tematikus célosztályban is fellép*, vagyis „1 :  $n^n$ ”-kapcsolat áll fenn egy alosztály és bizonyos kategóriák között. Ekkor a kontingenciamátrixban az adatosztály sorában több szignifikáns elem található, amelyek oszlopsorszámai kijelölik az érintett tematikus osztályokat. Ezek az esetek okozzák az osztályozási hibákat.
- Szintén kedvezőtlen eset, amikor valamely spektrális alosztály lényegében egyetlen tematikus osztályhoz sem köthető, vagyis a kontingenciamátrixon belül az alosztály sorában nincs szignifikáns elem. Ez annak lehet a következménye, hogy a referencia-adatok között nincs reprezentálva az a terület, amely az adott alosztálynak megfelelő sugárzási paraméterekkel rendelkezik. Megoldás lehet a kiegészítő referencia-adatok gyűjtése.

Ha a kontingenciamátrix alapján azt állapítjuk meg, hogy valamelyik cluster átfedésben áll több tematikus kategóriával is, akkor a clustert szét kell bontani.

## 8.10. A tematikus osztályok spektrális adatjellemzőinek összeállítása

A spektrális alosztályok meghatározásával minden készen áll arra, hogy előállítsuk a statisztikai osztályozás összes bemeneti adatát. Az alosztályok halmazának és az eloszlásuk paramétereinek – átlag, kovarianciamátrix – meghatározásán túl felvehetjük az előzetes (a priori) valószínűségeket, pl. a tanulóterületeken számolt eloszlás alapján. Valamint Bayes-osztályozás használata esetén a veszteségfüggvényt is itt határozhatjuk meg.

Még mielőtt elkezdenénk az osztályozást, ebben a lépésben megvizsgálhatjuk az alosztályok, illetve az általuk felépített osztályok távolságát. Ezzel előzetes képet kaphatunk a várható osztályozási hibákról. Ha már az előrejelzés is jelentős hibákat jósol, érdemes újra elvégezni a clusterezést (8.8. szakasz) nagyobb clusterszámmal, ezzel növelve az alosztályok szétválaszthatóságát.

## 8.11. A tematikus osztályozás elvégzése a tanulóterületre

A bemenő adatok összeállítása után a tanulóterületre végezzük el a statisztikai osztályozást. Optimális esetben minden egyes képpontra a referenciaadatok által meghatározott osztályt kapjuk vissza, azonban ez legtöbbször nem teljesül maradéktalanul. Egyrészt, az alosztályok paramétereinek meghatározása mindig egy közelítés, becslés eredménye, és az eloszlások átfedése miatt is lehetnek tévesztések. Másrészt a referenciaterületek lehatárolásában is lehet minimális pontatlanság. Durva eltérésnek viszont nem szabad előfordulni. Ha mégis szignifikánsan eltér az osztályozás eredménye a referenciaadatok által meghatározott osztályoktól, akkor egyes lépéseket meg kell ismételni, vagyis ebben az esetben is a 8.8. ponthoz kell visszatérni, és szükség szerint kisebb clustereket kell kialakítani.

Megjegyezzük, hogy a számítógépek mai teljesítménye mellett már nem okoz különösebb problémát, hogy egyből a teljes területet osztályozzuk, tehát lényegében nem nyerünk időt azzal, hogy először csak a tanulóterületekre futtatjuk az osztályozást. Azonban a fentiek miatt ekkor is érdemes külön megvizsgálni az osztályozás pontosságát a tanulóterületen.

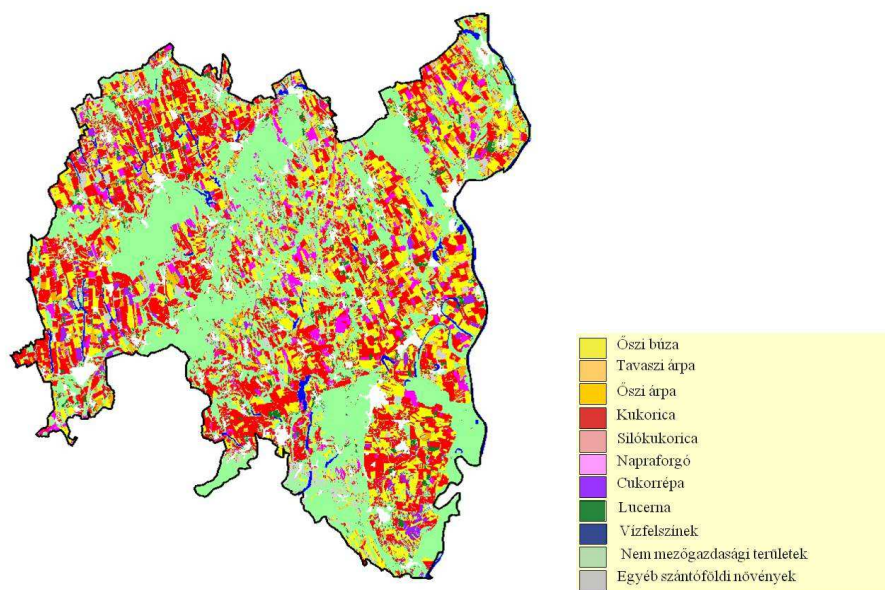
## 8.12. A tematikus osztályozás kiterjeszhetőségének vizsgálata a teszterületen

A tanulóterületek vizsgálata után a teszterületeken is felmérjük az osztályozás pontosságát. Mivel a teszterületek (optimális esetben) függetlenek a tanulóterületektől, az így kapott pontossági mérték, illetve hibaarány reprezentatívabbnak tekinthető, mint az előző pontban kapott. Ha sokkal rosszabb eredményt kapunk, az annak a jele, hogy a kiválasztott tanulóterületek nem jellemzik elég jól a kategóriákat. Ebben az esetben vissza kell lépni a 8.6. vagy 8.8. pontra.

## 8.13. A tematikus osztályozás elvégzése az egész régióra

Amennyiben a referenciaadatokon elvégzett osztályozás eredményét megfelelőnek látjuk, a teljes területre (strátumra) elvégezhetjük az osztályozást. Természetesen ha a 8.8. szakasz végén említettek szerint nem választottuk szét a tanuló-, teszt- és a referenciaadattal nem lefedett területek osztályozását, vagyis egyszerre osztályoztuk a teljes területet, akkor ebben a pontban nincs további teendőnk.

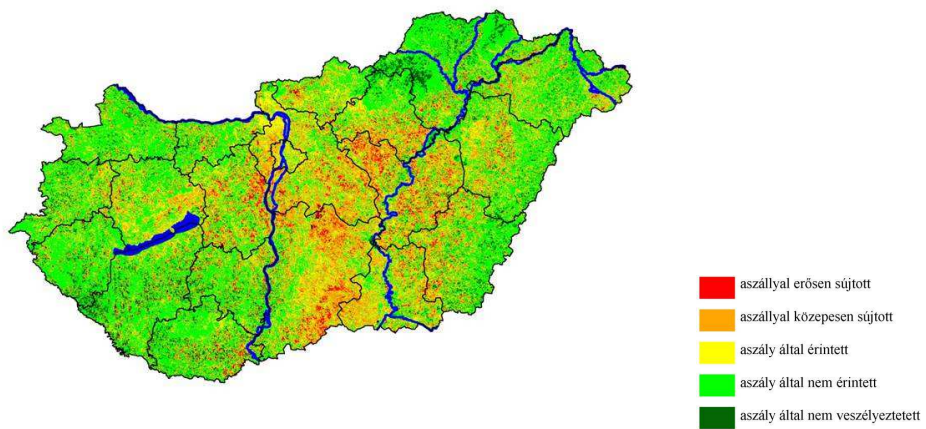
A NÖVMON projekt keretében végzett tematikus osztályozás egy strátumra vonatkozó végeredményét, egy növényterképet láthatunk a 8.10. ábrán.



8.10. ábra. Növényterkép egy strátumra, jobbra a jelmagyarázat.

#### 8.14. Az eredmények megjelenítése képi, térképi és táblázatos formában

Miután az előző ponttal bezárólag lefuttattuk a lépéseket az összes strátumra, a strátumonkénti eredményt összerakva megkapjuk a teljes osztályozandó terület tematikus térképét. Ezen kívül a kategóriánkénti területek alapján táblázatos eredményeket, összesítéseket is származtathatunk. A 8.11. ábra egy országosan összerakott aszályfelmérési eredményt mutat.



8.11. ábra. Országos aszálytérkép

## 9. fejezet

# Válogatott kérdések a képelemzésből

A klasszikusnak is tekinthető statisztikai osztályozás legfontosabb tudnivalói után bemutatunk néhány válogatott kérdést, amelyek valamilyen irányban továbblépést jelentenek az alaplódszertanon túl. Bár a módszerek szervesen kapcsolódnak az ismertetett lépésekhez, de a bemutatásukkal nem akartuk megtörni az elméleti tárgyalást. Jelen fejezetben bemutatott módszerek a digitális képelemzés, a távérzékelés modern eszközeinek tekinthetők.

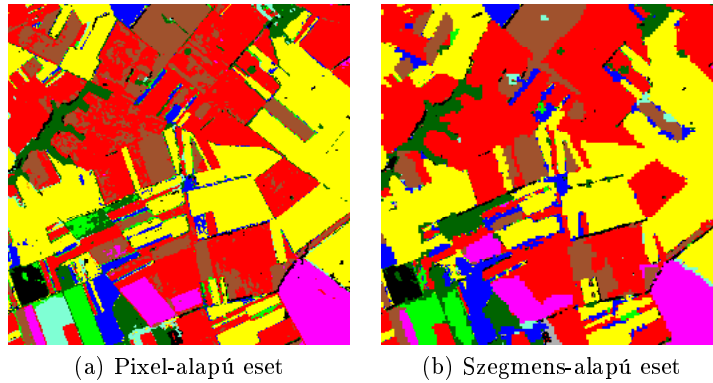
### 9.1. A felvételek szegmensenkénti osztályozása

A 6. és a 7. fejezetekben bemutatott „pontonkénti” osztályozási módszer teljesen figyelmen kívül hagyja a homogén területek (pl. egy épület vagy mezőgazdasági parcella) szomszédos képpontjainak azonosságát vagy hasonlóságát, mivel csak a képpontok intenzitását használja fel.

A távérzékelte képek feldolgozásában, és általában, a digitális képfeldolgozásban több megoldás ismert a képpontalapú osztályozás előbb említett tulajdonságának kiküszöbölésére. A térbeli kapcsolatok kihasználásának legkézenfekvőbb módja a szegmentálás, melynek során egyes pixeleket együtt kezelünk, összevonnak ún. szegmensekbe, és ezekre alkalmazzuk az osztályozás további lépéseit. Bár egyes forrásokban tágabb értelemben használják a „szegmentálás” kifejezést, de jelen jegyzetben csak a térbeli kapcsolatokat is kiaknázó értelmezéssel foglalkozunk.

**A szegmens spektrálisan hasonló, szomszédos képpontok egybefüggő halmaza.** A szegmentálás eredményeként egy tematikus térképet, ún. *szegmenstérképet* kapunk, amely minden egyes képpontra megadja a pontot tartalmazó szegmens sorszámát.

A szegmentálásnak a teljes osztályozás végeredményére gyakorolt hatását a 9.1. ábra szemlélteti. Heterogén területen is megfigyelhető, hogy a szegmentálás jobban „egyben tartja” az egyféle felszínborításhoz, esetünkben ugyanazon mezőgazdasági parcellához tartozó pixeleket. Ugyanakkor a különböző felszínborítások határánál, az átmeneti képpontoknál nem olyan feltűnő a javulás.



9.1. ábra. A kategóriák keveredésének csökkenése a szegmentálás hatására

### 9.1.1. A szekvenciális csatolás módszere

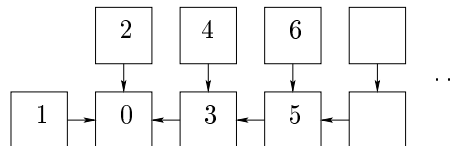
Az alábbiakban bemutatásra kerülő algoritmus Kettig és Landgrebe cikkén ([21]) alapul, amit a szerzők is implementáltak és több ponton továbbfejlesztettek.

A szegmentáló algoritmus első lépésben  $2 \times 2$ -es *cellákra* osztja a képet, majd minden celláról eldönti, hogy homogénnek tekinthető-e. Egy cella homogén, ha minden sávban igaz a következő egyenlőtlenség (ahol  $n$  a cella pixelszáma, esetünkben  $n = 4$ ,  $\bar{x}$  pedig a cellába eső pixelek átlaga):

$$\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)\bar{x}^2} \leq C_H$$

A feltétel azt fejezi ki, hogy a szórás minden sávban egy adott határon alul marad az intenzitások átlagához képest. Az inhomogén cellák pixeljeit nem soroljuk szegmensekbe, míg a homogén cellák bevonásával egy területnövelő algoritmust hajtunk végre.

Az algoritmus fentről lefelé veszi a cellákból álló sorokat, és egy soron belül balról jobbra halad a cellákon. Minden celláról megvizsgálja, hogy milyen összevonási szabállyal lehetne egy már meglévő szegmenshez kapcsolni. A cellák vizsgálatának sorrendjét a 9.2. ábra mutatja, ahol a 0 jelű cellát vizsgáljuk aktuálisan, az 1, 2, 4, 6 jelű cellák pedig már valamelyik szegmens részei (lehet, hogy önmagukban alkotnak szegmenst). A következőkben arról döntünk, hogy a 0-s cella ezek közül melyekhez kapcsolható. Először megvizsgáljuk az összes lehetőséget, utána a lehetséges kapcsolások közül választunk.



9.2. ábra. Cellaösszevonások sorrendje

- Első lépésként az ábra szerint megvizsgáljuk, hogy a 0-ás cellát hozzá lehet-e kapcsolni az 1-es vagy a 2-es cellához.
- Ha egyikhez sem kapcsolható, akkor ezután jobbra lépünk, és azt döntjük el, hogy a 3-as cella hozzacsatolható-e a 4-es cellát tartalmazó szegmenshez, és ha igen, akkor a 0-s cella is kapcsolható-e az így kapott új szegmenshez.
- Ehhez hasonlóan vizsgáljuk a  $6 - 5$ , a  $6 - 5 - 3$ , majd a  $6 - 5 - 3 - 0$  összekapcsolások lehetőségét (mindig feltéve, hogy az előzők teljesülnek).
- A jobbra történő előrettekintés tetszőleges (futási paramétertől függő) mértékben kiterjeszthető, ahogy ezt az ábra is kifejezi.

A megvizsgált csatolási lehetőségek közül azt választjuk, amelynél a korábbi szegmens (az 1, 2, 4, 6... cellák által képviselt szegmensek valamelyike) és az aktuális homogén (0 jelű) cella távolsága a legkisebb. Ha a csatolásban közbenső, áthidaló cellák is részt vesznek, az egymás utáni összevonások során előforduló legnagyobb (cella és szegmens közötti) távolságot vesszük figyelembe. Ha a fentiek közül egyik összevonás sem lehetséges, akkor a cella egy új szegmens kezdetét jelenti.

Az összevonás lehetőségét minden esetben a szegmensekhez tartozó spektrális intenzitások várható értéke és szórása által meghatározott ANOVA-kritériumok segítségével döntjük el. Ha  $x$  egy  $m$  elemű és  $y$  egy  $n$  elemű minta, jelölje  $z$  a ketű összevonásával kapott eloszlást. Minden sávban számítsuk ki a következő mennyiségeket:

$$A_x = \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \quad A_y = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad A = A_x + A_y$$

$$B_x = \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{z})^2 \quad B_y = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{z})^2 \quad B = B_x + B_y$$

A szegmensösszevonást *egy adott sáv szerint* engedélyezzük, ha a következő – (9.1) és (9.2) – egyenlőtlenségek teljesülnek meghatározott  $C_1$  és  $C_2$  értékekre. Két szegmens akkor vonható össze, ha a következő egyenlőtlenségek *minden sávra* teljesülnek.

$$(A/B)^{(m+n)/2} \geq C_1 \quad (9.1)$$

$$\left( \frac{(A_x/m)^{m-1} (A_y/n)^{n-1}}{(A/(m+n))^{m+n-2}} \right)^{1/2} \geq C_2 \quad (9.2)$$

Jól hangolt döntési eljárás eredményeként olyan szegmenstérképet kapunk, amelyen az egybefüggő részek várhatóan ugyanahhoz a felszínborításhoz tartoznak. Egy felszínborításhoz viszont több szegmens is tartozhat, egymástól távol, vagy akár egymás mellett.

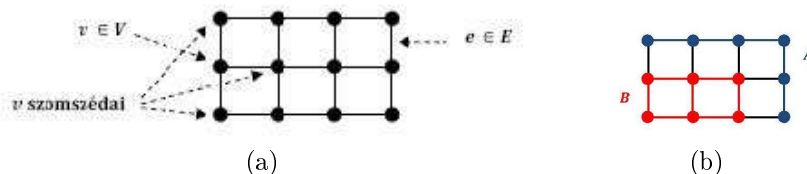
### 9.1.2. További szegmentáló-algoritmusok

Jelen szakaszban röviden felsoroljuk és csoportosítjuk azokat a szegmentáló-algoritmusokat, amelyekkel – vagy saját fejlesztésként, vagy kereskedelmi szoftver részeként – a jegyzet szerzői az ELTE és FÖMI közötti együttműködés keretében, kutatás-fejlesztési gyakorlatukban dolgoztak.

A felvételek és a rajtuk értelmezett szegmentáló-algoritmusokat irányítatlan gráfokként is reprezentálhatjuk. A csúcsok a képpontoknak felelnek meg, az élek pedig a szomszédos képpontoknak megfelelő csúcsokat kötik össze (ld. 9.3. (a) ábra). Az élsúlyokat az általuk összekötött csúcsoknak megfelelő pixelek közötti kapcsolat (hasonlóság vagy különbség) alapján határozhatjuk meg. Pl. az intenzitások lineáris (euklideszi) távolságát adja meg a Gauss-féle súlyfüggvény:

$$\omega(u, v) = e^{-\frac{(I(u)-I(v))^2}{\sigma^2}}$$

A teljes felvételt reprezentáló gráfon belül a szegmensek részgráfoknak felelnek meg. A gráfalapon reprezentált vágás-alapú algoritmusok az ábrázolásban a gráfelmélet vágás-fogalmának megfelelően működnek: az élek halmazát diszjunkt részhalmazokra bontják (ld. 9.3. (b) ábra), így csak az azonos szegmenshez tartozó pixeleket összekötő élek maradnak a gráfban. Az alábbiakban bemutatott algoritmusok egy részét a gráfalapú reprezentációval is megvalósíthatjuk.



9.3. ábra. A gráfalapú szegmentálás szemléltetése. Raszteres felvétel ábrázolása gráfként (a), illetve a szegmensekre vágás ábrázolása a gráf vágásaként (b).

**Az összevonás-alapú, „lentől felfelé”-algoritmusok** a képpontokból indulnak ki. Kezdetben a felvétel minden egyes képpontja önálló szegmenst alkot, és az algoritmus iterációi során a szegmensek fokozatosan összevonásra kerülnek.

- *Szekvenciális csatolásnak* nevezzük a 9.1.1. szakaszban bemutatott algoritmust, amely a szegmensek statisztikai homogenitására épít. A szekvenciális bejárás miatt az időigénye a képméret lineáris függvénye. Az eredeti algoritmus ([21]) komoly hibája a sorrendfüggőség, amely azonban egyes továbbfejlesztési megvalósításokkal bizonyos mértékben csökkenthető.
- A *legjobb összevonás (best merge)* algoritmus ( [1], [38], [37] ) túllép a sorrendfüggőség okozta problémán, ugyanis az összevonás során bármely szomszédos szegmenspárt választhatja, amennyiben az összevonásuk optimális bizonyos kritériumok alapján. Ez egy mohó algoritmus, amely a diszjunkt halmazokon értelmezett adatstruktúrákkal hatékonyan implementálható.
- A *gráfalapú összevonás* algoritmusának ([12]) ötlete a gráfelméletből származik. A szegmenseket a heterogenitásuk, változékonyságuk jellemzi, amelyet formálisan definiálhatunk a gráfokon értelmezett jelölésekkel, a fent



bevezetett gráfalapú ábrázolásmódot használva. Minden iterációs lépésben két szomszédos szegmenst vonunk össze: az éleket csökkenő súly szerint vesszük sorba, és a soron következő él két végpontjához tartozó szegmens összevonásáról születik döntés. Az  $S_i$  és  $S_j$  szegmenseket pontosan akkor vonhatjuk össze, ha teljesül az alábbi feltétel (előre definiált  $k$  konstans mellett):

$$\min \{ \text{het}(S_i) + k/|S_i|, \text{het}(S_j) + k/|S_j| \} > \text{het}(S_i \cup S_j)$$

Az „unió-holvan” adatstruktúrával hatékony megvalósítás készíthető.

- A „*Multiresolution*” és a „*Spectral difference*” szegmentálás ([7]) az eCognition programrendszer összevonást használó beépített algoritmusai. Az előbbi a spektrális tulajdonságokból és alaktényezőkből származó homogenitást vizsgálja, az utóbbi a szomszédos, hasonló intenzitású szegmenseket vonja össze.

**A vágás-alapú, „fentről lefelé”-algoritmusok** fordított irányban működnek. Kezdetben a teljes felvételt egy nagy szegmensnek tekintik. Minden iterációs lépésben az egyik alkalmasan kiválasztott szegmens szétvágásával hoznak létre kisebb szegmenseket.

- A *minimális átlagsúly alapú vágás (minimum mean cut)* algoritmusában ([42]) az élsúlyok arányosak a csúcsaik által meghatározott szegmensek közötti spektrális különbséggel. Távérzékelte felvételekre történő alkalmazás esetén a szegmensek kiegyensúlyozatlan vágása miatt hosszú futásidők adódnak. A  $G = (V, E)$  gráf  $A$  és  $B$  részgráfra való vágásának költségét az alábbi képlet adja meg.

$$\text{Cut}(A, B) = \sum_{u \in A, v \in B, (u, v) \in E} \omega(u, v)$$

A minimális átlagsúly megállapításához a vágás költségét elosztjuk a benne szereplő élek számával.

$$\text{MCut}(A, B) = \text{Cut}(A, B) / \sum_{u \in A, v \in B, (u, v) \in E} 1$$

Ez alapján minimális vágások keresése az irányítatlan gráfban NP-nehéz probléma, de van rá mód, hogy polinomiális idejű algoritmust alkalmazzuk megfelelő transzformációk után.

- A *minimális arány alapú vágás (minimum ratio cut)* algoritmus ([43]) a minimális átlagsúly alapú vágás továbbfejlesztett és általánosított változata. Két súlyfüggvény kerül meghatározásra, és az összevonáshoz használt kritérium a hányadosuk alapján dönt.
- A *normált minimális vágás (normalized cut)* módszere ([36]) szintén a minimális átlagsúly alapú vágásból származik, azonos súlyfüggvényt használ. Amellett, hogy vizsgálataink alapján az itt felsorolt algoritmusok közül a legnagyobb tematikus pontosságot érték el vele, vizuálisan is a legkedvezőbbnek ítéltük az eredményét.

- A negyedelőfák elvét használó „Quadtree” és az eltérő intenzitású részeket tartalmazó szegmenseket elvágó „Contrast split” szegmentálás ([7]) szintén az eCognition programrendszer beépített algoritmusai, amelyek azonban vágást használnak.

A szegmentáló-algoritmusok rugalmasan futtathatók abban az értelemben, hogy a feldolgozás különböző szintjeit képesek kezelni. Az összevonás-alapú eljárások nemcsak a különálló pixelekből, illetve a vágás-alapúak nemcsak a teljes képből, mint egy szegmensből képesek kiindulni, hanem előzetesen már szegmentált képekből is ki lehet indulni. Ekkor az összevonás-alapú eljárások további összevonásokat, a vágás-alapúak újabb vágásokat hajthatnak végre.

A jegyzet szerzőinek kutatócsoportja a legjobb összevonás algoritmusát, a gráfalapú összevonás eljárását és az első három vágás-alapú algoritmust gráf-reprezentációval valósította meg. Ezt hatékonyan támogattak egyes fejlett adatstruktúrák és algoritmusok, ami a futási idők aszimptotikus csökkenését eredményezi – az esetek egy részében elméleti bizonyítással is alátámasztva (ld. [9]).

A mezőgazdasági alkalmazásokban a spektrálisan hasonlóan viselkedő szántóföldi növények elkülönítésénél mutatkoznak meg legjobban a szegmentálás előnyei. A módszer ugyanis kihasználja a parcellák művelési szerkezetből adódó szabályosságát. Például a kukorica és a napraforgó tisztán spektrális tulajdonságok alapján nehezen különíthető el: a hagyományos pixelalapú osztályozásnál előfordul, hogy egy terület, amely a valóságban egy parcella, vegyesen tartalmaz kukoricának és napraforgónak osztályozott pixeleket, szabálytalan elrendezésben. Azonban a szegmentálás a térben közeli, egy parcellához tartozó pixeleket jobban „együtt tudja tartani”. Így lokálisan, a parcellák belsejében valósághibb osztályozási eredményt kapunk. A különböző felszínborítások határánál ellenben előfordul, hogy a képpontonkénti osztályozással kapott eredmény a megfelelőbb. Összességében viszont, mivel a parcellák belső pontjai a meghatározók, általában növekszik a globális pontosság a szegmensalapú módszerrel.

Megjegyezzük, hogy az előző bekezdésben említett „határproblémák” kezelésére mind a szerzők kutatócsoportja által implementált programrendszer, mind az eCognition tartalmazza azt a lehetőséget, hogy a szegmentálás eredményét pixelenkénti osztályozással javítsuk ott, ahol ennek pozitív hatása van az eredményre.

### 9.1.3. A szegmensalapú osztályozás formális tárgyalása

A szegmentálás részletes ismertetésének lezárásaként jelen alszakasz bemutatja az 5–7. fejezetekben bevezetett formális leírás kiterjesztését a szegmensalapú megközelítésre. A 6. fejezetben bemutattuk a clusterezést és osztályozást abban az esetben, amikor képpontonként kezeljük a felvételeket. Azonban ugyanezek a lépések alkalmazhatók szegmensekre is, méghozzá nagyon hasonló eljárásokkal és szinte azonos formalizmussal.

Ekkor kétszeres leképezést alkalmazunk:

- minden képponthez tartozik egy szegmenssorszám,
- minden szegmenssorszámhoz tartozik egy cluster-, illetve alosztály-sorszám.

Ahogy a pixelalapú esetben változhatott az iterációk során, hogy egy képpont melyik clusterhez vagy alosztályhoz tartozott, a szegmensalapú esetben ugyanígy változhat fázisonként, hogy egy szegmens pontjai melyik clusterhez, illetve alosztályhoz tartoznak. De egy fázisban egy szegmens minden pontja ugyanahhoz a clusterhez vagy alosztályhoz tartozik.

A kép pixeljeinek szegmensbesorolása:

$$Z = \begin{pmatrix} z_{11} & \dots & z_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{N1} & \dots & z_{NM} \end{pmatrix} \quad z_{ij} \in [1..S],$$

ahol  $S$  a szegmensek száma.

A szegmenssorszám megfeleltetése a cluster- vagy alosztálysorszámnak az  $f$ . fázisban ( $f \in [2..F]$ ):

$$\mathbb{S}^{(f)} : [1..S] \rightarrow [1..K_f], \text{ vagyis } \forall s \in [1..S] : \mathbb{S}^{(f)}(s) \in [1..K_f]$$

(Emlékeztetőül: azért csak a 2-vel kezdődő értékeket veheti fel  $f$ , mert az 1-es index a kezdő clusterközpontokat jelenti, amihez nem tartozik pixelbesorolás.) Tehát a kép pixeljeire nézve

$$\forall (i, j) \in [1..N] \times [1..M] : c_{ij}^{(f)} = \mathbb{S}^{(f)}(z_{ij}), \text{ ezért } \mathbb{S}^{(f)}(z_{ij}) \in [1..K_f].$$

Mivel a szegmentálást a korábban ismertetett lépések *előtt* hajtjuk végre, és a fentiek alapján beilleszthetjük a többi lépésnél is alkalmazott formális tárgyalásmódba, ezért tekinthetjük úgy, mint az osztályozás „nulladik” fázisát:

$$Z = „C^{(0)}” = \begin{pmatrix} c_{11}^{(0)} & \dots & c_{1M}^{(0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{N1}^{(0)} & \dots & c_{NM}^{(0)} \end{pmatrix} \quad c_{ij}^{(0)} \in [1..S] = „[1..K_0]”$$

Ezzel a jelöléssel minden  $f$  fázisra ( $f \in [2..F]$ ):

$$\mathbb{S}^{(f)}(c_{ij}^{(0)}) = c_{ij}^{(f)},$$

de általában nincs olyan  $\mathbb{C}$  függvény, amelyik az egymás utáni fázisok cluster- vagy alosztálysorszámait feleltetné meg egymásnak, vagyis amelyre minden  $f \in [3..F-1]$  fázisban igaz lenne, hogy

$$\mathbb{C}^{(f)}(c_{ij}^{(f-1)}) = c_{ij}^{(f)}.$$

Így a 6.3. szakasz végén megadott folyamat a következőképpen egészíthető ki:

szegmens- sorszámok	cluster- sorszámok	alosztály- sorszámok	osztály- sorszámok
0.	2.   ...   $G$ .	$G+1.$   ...   $F-1.$	$F$ .

## 9.2. Több forrású adatok integrálása

A távérzékeléses alkalmazásokban a vizsgált jelenségeket leíró modell meghatározása után, különösen numerikus kiértékelés esetén fontos feladat a felhasználható felvételtípusok kiválasztása. Ennek során nagy szerepe van az összes térbeli, időbeli és spektrális tulajdonságnak, amelyeket a 3.1. szakaszban felsoroltunk. Különös figyelmet igényel az az eset, amikor több felvétel felhasználása szükséges, főleg, ha a felvételek eltérő típusúak is lehetnek. A különböző adatforrások együttes felhasználását röviden adatfúzióknak vagy adatintegrációknak nevezik. A két kifejezést hasonló értelemben használják, az utóbbinak esetenként valamivel tágabb jelentést tulajdonítva.

Jelen szakaszban elsősorban a különböző típusú távérzékelési adatok együttes felhasználását tárgyaljuk, amelybe az alkalmazástól függően beletartozhat egy hordozóeszköz különböző szenzorai, vagy akár egy szenzor különböző spektrális sávjában készített felvételek egyesítése.

### 9.2.1. Az űrfelvételek dimenzióinak összefüggése

A dimenziók összefüggésének egyszerű illusztrálására megemlítünk két „elemi” összefüggést, amelyek a látható tartományon túli hullámsávokat is tartalmazó felvételek különböző jellemzői között figyelhető meg. Az összefüggések nem a geometriai tulajdonságokból adódnak (pl. magasabb pálya – nagyobb területi lefedés – nagyobb pixelméret), hanem a távérzékelés fizikai hátterének következményei. Az egyik, hogy a szenzorok szélesebb hullámhossz-tartományt felvételező spektrális sávjában általában nagyobb térbeli felbontást lehet elérni. A másik, hogy a reflektív tartományban nagyobb hullámhosszokon általában kisebb az elérhető térbeli felbontás. Mindkét következmény a szenzorra jutó energiamennyiséggel magyarázható, amely értelemszerűen függ a megfigyelt felszín darab nagyságától és az elektromágneses spektrum vizsgált hullámsáv-tartományától.

Egy képponthez tartozó pixelértéket a földfelszín elemi darabjáról összegyűjtött energiamennyiség határozza meg, amely nyilván a felszín darab nagyságával növekszik. Szélesebb hullámhossz-tartomány esetén kisebb felületdarabról is összegyűlik annyi energia, amennyi összegyűjtéséhez egy keskenyebb, szűrtebb tartomány esetén nagyobb felületdarab lenne szükséges, ami megmagyarázza az első összefüggést.

Hasonló a második összefüggés magyarázata: a Napból a Föld külső légkörére eső sugárzás a  $0,6 \mu\text{m}$  körüli maximum után erősen csökken, és nyilván ezzel együtt csökken a földfelszínről visszavert energia is. Mivel az egységnyi felületen integrált energia mennyisége nagyobb hullámhossz esetén kevesebb, ezért nagyobb felületdarab szükséges ugyanannyi energia összegyűjtéséhez.

Az előző két magyarázatot kiegészítve megjegyezzük, hogy nem közvetlenül a szenzornál mért energia nagysága a lényeges kérdés, hanem a jel és zaj viszonya, vagyis az, hogy a szenzornál fellépő sugárzásban minél nagyobb arányban legyen jelen a földfelszínről visszaverődő sugárzás, és minél kisebb mértékben zavarja meg a máshonnan eredő zaj. A földfelszín megfigyelésénél például a légköri hatások lényegében zajnak tekintendők.

## 9.2.2. Az adatintegráció szintjei

A távérzékelt adatforrások egyesítése különböző szinteken történhet. Ahogy Richards összefoglalja (ld. [34]), az eltérő adatforrások változatos jellemzőket mérhetnek a földfelszínen. Például a multispektrális mérések leginkább a növények pigmentálságáról, a talaj ásványianyag-tartalmáról, a nedvességtartalomról és a sejtszerkezetről adnak információt, míg a hiperspektrális adatok a növények és a talaj részletesebb biokémiai jellemzését teszik lehetővé. A radarfelvételek képpontjainak információtartalmát pedig nagyrészt a dielektromos állandó határozza meg, amely a vízmennyiségtől és bizonyos geometriai jellemzőktől függ.

Ugyanakkor az adatfúzió nem feltétlenül méréseként egyesíti a különböző adatforrásokat, hanem a tematikus kiértékelés egyes fázisaiban kapott eredmények között is értelmezett az egyesítés. Például külön-külön is végrehajthatjuk a tematikus osztályozást az egyes adatforrásokra – adott esetben különböző, az adatforrás jellegéhez illeszkedő kategóriákkal –, és az adatfúzió a kapott tematikus térképek kategóriáinak egyesítését jelenti. Akár mérésszintű, akár kategóriaszintű fúzióról beszélünk, nem feltétlenül numerikusan történik az adatforrások egyesítése.

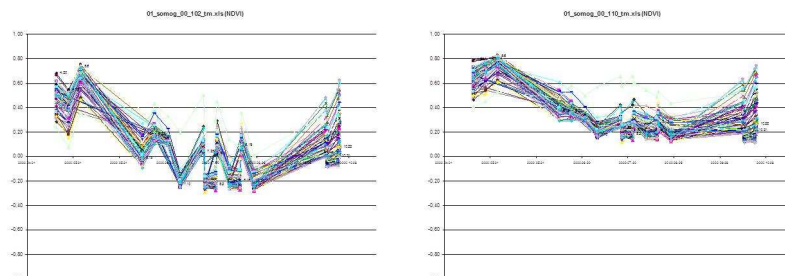
A fentiek illusztrálásának speciális, de gyakran használt esete a több időpontban, azonos paraméterekkel készült úrfelvételek alapján történő tematikus osztályozás.

- Az egyik lehetőség során *az egyes időpontok felvételeinek spektrális sávjából alkotott mátrixokat egyszerűen egymásra rakjuk*, így lényegében egy soksávú felvételt kapunk, amelyet például a többsávú felvételeknél elterjedten alkalmazott statisztikai osztályozással dolgozhatunk fel (figyelve arra, hogy nem feltétlenül azonos az egyes időpontok által lefedett terület).
- A másik lehetőség, hogy *az egyes időpontokra egymástól függetlenül végrehajtottunk egy tematikus osztályozást* olyan célkategóriákkal és olyan pontossággal, amelyet az adott időpontra rendelkezésre álló felvétel megenged, majd az így kapott tematikus térképek kategóriáiból megfelelően meghatározott szabályrendszerrel származtatjuk az egyesített eredményt.

Multimodális kiértékeléssel, vagyis több dimenzió esetén, több adatforrás bevonásával általában nagyobb tematikus pontosság érhető el, mint egy forrású, illetve egy időpontú adat felhasználásával. Ugyanakkor nem érdemes minden határon túl növelni a felhasznált felvételek darabszámát, illetve az egy-egy felvételből figyelembe vett spektrális sávok számát. Ugyanis véges tananyag mellett – márpedig a gyakorlatban véges tananyag áll rendelkezésre – a mérések túlzott komplexitása, dimenziószáma nemhogy nem növeli, de kifejezetten rontja a tematikus pontosságot. Bizonyítható, hogy adott mennyiségű tananyaghoz van egy optimális dimenziószám, amelynél a legnagyobb pontosság érhető el.

A távérzékelt felvételek integrált kiértékelésénél különösen nagy szerepe van a megfelelő előfeldolgozásnak. Fontos, hogy az egy folyamatban felhasznált felvételek egységes geometriai rendszerben legyenek, és radiometriailag is azonos jelentéssel rendelkezzenek a pixelek. Így érzük el, hogy közvetlenül össze lehet vetni a különböző távérzékelt adatokat. Ez nem triviális feladat, különösen az eltérő típusú felvételek esetén. Nem biztos, hogy minden esetben egzaktul végrehajtható: lehet, hogy a szenzorok különbözősége miatt csak bizonyos származtatott mennyiségeket (pl. a növényzet állapotát jelző vegetációs indexeket)

lehet egymással összhangba hozni. Ezt a műveletet *interkalibráció*nak nevezzük. A különböző felvételek interkalibrációjának jelentőségét mutatja a 9.4. ábra.



9.4. ábra. A növényfejlődés követésére felhasznált, Landsat 5 TM és Landsat 7 ETM+ űrfelvételeket használó idősorok. Balra a nyers felvételekből, jobbra a radiometriai korrekción átesett felvételekből számított vegetációs indexek görbéi láthatók.

### 9.3. A texturális mértékek használata

A 9.1. szakaszban a térbeli kapcsolatok kiaknázásának egyik lehetséges módját mutattuk be. De más módja is van annak, hogy a pixeleket ne önmagukban, hanem a környezetükkel együtt értelmezzük. Az elemi felszíndarabok jellemzésére a textúra segítségével is figyelembe vehetjük a környező képpontok sugárzási viszonyait. A *textúra* a pixelek szabályos intenzitás-változása, melynek mértékei a pixel környezetének eltérő vagy azonos (hasonló) intenzitású pixeljeinek az arányából indulnak ki.

A textúra méréséhez is az egyes pixelek környezetét vesszük figyelembe. Két alapvető megközelítést említünk meg a környezet meghatározásához.

1. Egy rögzített környezet, akár egy négyzet alakú maszk pixeljeivel számolunk. Rögzített környezet esetén általában kevesebb pixelt vizsgálunk egyszerre, mint amennyit a szegmentálásnál egy szegmensbe sorolunk.
2. Szegmens-alapú feldolgozás esetén az is egy lehetőség, hogy a már kialakított szegmenseken végezzük a számítást. Az így kapott texturális mértékeket attribútumként hozzárendelhetjük a szegmensekhez.

Az egyik legegyszerűbb texturális mérték a szórás. Ekkor minden pixelhez a megadott környezetbe eső pixelek sávértékeinek a szórását rendeljük (akár egy kiválasztott sáv alapján, vagy több sávból is számolhatunk több dimenziós szórást).

Elterjedten alkalmazzák a GLCM-alapú texturális mértékeket is. A GLCM a Grey Level Co-occurrence Matrix rövidítése, amely szabad fordításban a szürkeségi szintek együvváltozási mátrixát jelenti. Ennek a négyzetes mátrixnak annyi sora és oszlopa van, amennyi szürkeségi szint található a felvétel jellemezni kívánt spektrális sávjában. A mátrix  $P_{ij}$  eleme az olyan szomszédos pixelpárok

számát adja meg, amelyek az  $i$  és  $j$  értékeket veszik fel valamelyik sorrendben. A közvetlenül szomszédos párok helyett az adott távolságban elhelyezkedő képpontokat is tekinthetjük. A mátrixot az elemek számával normalizálva egy tapasztalati valószínűségi eloszláshoz jutunk.

Jól alkalmazhatók a texturális mértékek a természetes és termesztett növényzet felmérésében. A művelt terület, termesztett növényzet általában szabályosabb textúrát mutat, ugyanis a szabályosabb térbeli elrendeződés mellett a növények időbeli fejlődése is egyenletesebb. Azonban meg kell jegyezni, hogy ebben a megközelítésben is rejlik egy bizonyos tévesztési valószínűség. Például, a homogén növényzet elgyomosodása, vagy a mezőgazdasági gépek mozgása egy művelt területen inhomogenitáshoz vezethet, ami rontja az osztályozás pontosságát: a növényzetre nézve elsőfajú, kihagyásos hibát okoz. Továbbá, a fák lombjainak foltja is adhat homogén látványt, ami szintén félreosztályozáshoz vezethet: a növényzet szempontjából ez másodfajú, beválogatásos hibát jelent.

## 9.4. Objektum-alapú felvétel-kiértékelés

Ebben a szakaszban bemutatjuk azt a néhány éve lezajlott paradigmaváltást és következményeit, amelynek során a távérzékeléses feladatmegoldás több összetevője is számottevően változott. A szuperfelbontású (VHR) felvételek elterjedésével olyan problémák megoldására nyílt lehetőség, amelyek újszerűnek mondhatók a hagyományos mezőgazdasági alkalmazásokkal összehasonlítva. Ehhez a felvételek kiértékelésének módszertana is megújult: a szegmensalapú eljárásokra alapozva kialakult az objektum-alapú felvétel-kiértékelés vagy képelemzés (Object-based Image Analysis, OBIA) szemlélete és új piaci szoftverekkel támogatott gyakorlata. Az elmúlt években a jegyzet szerzői több olyan kutatásban, illetve alkalmazásban is részt vettek, amelyekben az objektum-alapú felvétel-kiértékelés összetett eszköztára vezetett el a megoldáshoz.

A szegmens-alapú osztályozás valóban hatékony módszer a távérzékelte felvételeken található felszínborítási kategóriák azonosítására, sok térképezési alkalmazásban sikeresen alkalmazható. Nem állítjuk, hogy szegmentálás nélkül egyáltalán ne lehetne megoldani a feladatokat; számos intézményben a képpontenkénti osztályozás módszerével érnek el kielégítő eredményt. De a következőkben bemutatásra kerülő szempontok miatt a jelenleg elterjedt felvételtípusokat és a felmerülő alkalmazásokat figyelembe véve a szegmens-alapú osztályozás általában pontosabb eredményre vezet, jóval kevesebb emberi munkabefektetést igényel, és az objektum-alapú megközelítésnek, illetve az erre épülő modern szoftveres környezetnek köszönhetően sokkal gazdagabb a felhasználható eszköztár.

Néhány éve még nem lehetett arra számítani, hogy rövidesen olyan változások következnek be a távérzékelés technikai lehetőségeiben, gyakorlatában és szemléletmódjában, amelyekben megnő a szegmens-alapú feldolgozás jelentősége. Ezek a változások azonban 2008-2009 táján már a mindennapi tevékenységünkben mutatkoztak. Azt lehet mondani, hogy egy többszörös paradigmaváltás játszódott le, azáltal, hogy a távérzékelés bizonyos mennyiségi és minőségi összetevői az alábbiak szerint változtak.

- A technikai fejlődés következtében elérhetővé váltak a szuperfelbontású (VHR) felvételek, amelyeknek a képpontmérete 1 m alatti. Az intézeti fel-

adatokban nem csökkent a repülőgépről készített ortofotók szerepe, amelyek felbontását az 50 cm-es vagy kisebb pixelméret jellemzi. Így a nagyfelbontású felvételek 20-30 m-es pixelmérete mellett egyre nagyobb arányban kellett olyan felvételek fogadására és feldolgozására felkészülni, amelyek egy képpont az 1 m<sup>2</sup>-es határ alatti földi méretet jelenít meg.

- A távérzékeléses feladatok jól kialakult világa rövid idő alatt olyan új problémákkal bővült, amelyekben a vizsgált objektumok mérete jóval kisebb, mint a mezőgazdasági parcellák területe, illetve jóval nagyobb képi dinamikát mutatnak, mint a művelt táblák. Példaként említhetők a mezőgazdasági támogatások kapcsán lehatárolandó fák és bokrok, illetve az épület-monitoring részeként felismerendő házak és utak, mint kisebb méretű objektumok. A szabálytalanabb alakokkal rendelkező, inhomogén parlagfű-foltok pedig dinamikusabb képi megjelenést valósítanak meg, mint a megművelt homogén parcellák.

Az említett két egymást erősítő jelenség, vagyis a térbeli felbontás növekedése és a vizsgált elemi objektumok méretcsökkenésének hatása abban is megmutatkozik, hogy az egyedi képpontok önmagukban nehezen értelmezhetők: intenzitásvektoruk alapján nem dönthető el megbízhatóan az, hogy melyik felszíni kategóriába tartoznak. A szuperfelbontású felvételeken az újabb feladatok esetén alapvetően sérül a homogenitás tulajdonsága, amelyre elég biztosan lehetett támaszkodni a korábbi felvételek és a növényterképezés esetében. A megváltozott körülmények mellett alapvetően figyelembe kell venni a szomszédsági relációkat, így a *szegmentálás és a szegmensenkénti kiértékelés már nem opció, hanem a feldolgozás szükséges lépésévé vált.*

A korábbi szegmensalapú felvétel-kiértékelési módszertant két további hatás is érte.

1. Az egyik a mestersége intelligencia oldaláról jött. Ez a diszciplína tudatosan törekszik arra, hogy minden feladat esetén felismerje azt, ha az igazán pontos és értékes megoldásában meghatározó szerepe van az emberi szakértelmnek. Ha valóban ilyen a feladat természete, akkor a számítógépes megoldás eredményessége javítható azzal, ha *a humán szakértelem elemeit be tudjuk építeni a rendszerbe.* A távérzékelte felvételek interpretálása nyilvánvalóan ilyen feladat. Ha az emberi szakértelem részét képező különböző geometriai és texturális jellemzők kinyerésével és felhasználásával bővítjük a képfeldolgozó rendszert, számíthatunk a határfok javulására.
2. A másik hatás, amely a szoftver-technológiától ered, az *„objektumba foglálás” (enkapszuláció)* analógiáját kínálta szakterületünknek. Ennek megfelelően a felvétel egy körülhatárolt részéhez, szegmenséhez attribútumként társítjuk az említett és további szóba jövő jellemzőket.

A változások vázolt folyamata elvezetett a objektum-alapú felvétel-kiértékelés vagy képelemzés (OBIA = Object-based Image Analysis) fogalmának kialakulásához (lásd: [2], [19]). Az elv rövidesen megjelent a szoftverekben is. Például erre épül az eCognition (korábban: Definiens) professzionális képelemző programcsomag ([7]).

Az eCognition számos beépített szegmentáló eljárást tartalmaz, amelyek nem egyeznek meg a jegyzet szerzői által implementáltakkal, azonban a korábban



szerzett tapasztalatok nagyon hasznosnak bizonyultak az új rendszer megismerése és használata során. A beépített algoritmusok részletes leírását ugyan nem adják meg a kézikönyvek, csak a használatukhoz szükséges rövid leírás szerepel. Ilyenek például (eredeti nevükön) a Chessboard, Quadtree, Contrast Split, Spectral Difference és Multiresolution eljárások (ld. 9.1.2. alszakasz). Az eCognition osztályozó eljárásokat is tartalmaz. A kialakított szegmensekre építve az osztályozás során számos olyan jellemzőt képes felhasználni, amelyek a rendszer objektum-alapú jellegét adják; ilyenek például a különféle statisztikák, geometriai és texturális jellemzők. Egy részük egy-egy szegmenst önmagában jellemez, másik részük a szegmensek egymással való viszonyát írja le.

A szegmenseket önmagukban jellemző tulajdonságok között külön megemlítjük a *texturális mértékeket*. Az eCognition biztosítja az előző, 9.3. szakasz elején említett második lehetőséget, vagyis hogy a már kialakított szegmenseken végezzük a számítást. Így például a GLCM-alapú mértékekből is származtathatjuk a szegmensek attribútumait.

Az *adatintegrációval* kapcsolatban az eCognition szoftver két tulajdonságát is megemlítjük.

- Egyrészt, a többsávós felvételek különböző sávjainak, illetve a különböző felvételeknek, sőt, a vektoros adatoknak a kezelését készen tartalmazza a program. Már a szegmentálásnál, a szegmensek kialakítását meghatározó feltételek megfogalmazásánál is hivatkozhatunk az inputként felhasznált összes adatrendszerben tárolt értékekre. A vektoros adatok pedig felhasználhatók a szegmensek kiterjedésének korlátozására.
- Másrészt, a többszintű osztályozás fogalma még az elnevezésekben is megjelenik, ugyanis a pixelek szintjéről kiindulva több hierarchikus szintet alakíthatunk ki, az osztályozás több szinten történhet. A magasabb szintek műveletei hivatkozhatnak az alacsonyabb szinten keletkezett eredményekre. A megfelelően a számolt attribútumok között az „elem”, a „tartalmazás” relációi is megjelennek.

Az eCognition képes az „oszd meg és uralkodj” elve szerint a felvételt és annak kiértékelését részekre bontani, majd a képrészekre számolt részmegoldásokat megfelelően illesztve egyesíteni.

Fontos megjegyezni, hogy a fenti eljárásokat bizonyos elméleti előismeret és gyakorlati jártasság nélkül nem lehet azonnal eredményesen használni.

## 9.5. Speciális spektrális transzformációk és ezek időfüggvényei

A távérzékelte felvételek feldolgozása során az eredeti sávértékekkel való számolás helyett rendszeresen használják a sávok különböző függvényeit, kombinációit, ún. spektrális indexeket. Ezek egy része az intenzitásértékek lineáris kombinációjával és eltolásával keletkezik, amely lényegében az intenzitástér (spektrális tér) transzformációját valósítja meg.

A spektrális index az eredeti sávértékekből származtatott (skalár)mennyiség. Egy részüket vegetációs indexeknek nevezzük, amelyek magasabb értékei jelzik a fejlettebb növényzetet. Kiszámításukhoz több eredeti sáv értékét használjuk,

a számításához használt képlet, illetve az abban szereplő együtthatók függnek a szenzortól. Az index számítása előtt fontos a megfelelő radiometriai korrekció.

A hányados-vegetációs index egyszerűen a közeli infravörös és a látható vörös sávban mért értékek hányadosa, vagyis  $RVI = I_{IR}/I_R$ . Ahogy a fizikai alapoknál ismertettük, a jól fejlett növényzet esetén az elektromágneses sugárzás visszaverése a közeli infravörös sávban magas, míg a látható vörösben alacsony, így a hányados is magas lesz.

A növényfejlődés és aszály felmérésében a leggyakrabban alkalmazott vegetációs indexek a különbségi és a *normalizált különbségi vegetációs index* (Difference Vegetation Index – DVI, illetve Normalized Difference Vegetation Index – NDVI). Számításuk a következőképpen történik:

$$DVI = I_{IR} - I_R \quad NDVI = \frac{I_{IR} - I_R}{I_{IR} + I_R}$$

A *főkomponens-transzformáció* (Karhunen–Loève-transzformáció) célja a spektrális sávok közötti korrelációra építve a távérzékelte adatok dimenziószámának csökkentése úgy, hogy az osztályozás pontossága minél kevésbé csökkenjen. Az eljárás arra épít, hogy a többsávú felvételek intenzitásvektorai nem egyenesen oszlanak el a spektrális térben, a sávpárok között több-kevesebb korreláció áll fenn. Az eljárás új koordináta-rendszerbe transzformálja az adatokat, amelynek koordinátái már lineárisan függetlenek egymástól. Sajátossága, hogy az adatok legnagyobb változatossága, a legnagyobb információ-mennyiség az új koordináta-rendszer első tengelye mentén mérhető, és a sávindex növekedésével csökken az információ mennyisége. A tapasztalatok szerint az elterjedt multispektrális felvételekre végrehajtott főkomponens-transzformáció eredményeként az első 2-3 sávba koncentrálnak a felvételen tárolt információ túlnyomó része, csak elhanyagolható mennyiségű információ marad a többi sávra. A transzformáció közismert lineáris algebrai módszerrel számolható, ugyanis a transzformált koordináta-rendszer az adatokhoz illeszkedő sajátrendszer.

A *Tasseled Cap-transzformáció* (Kauth–Thomas-transzformáció) matematikailag a spektrális téren történő elforgatásként és eltolásként értelmezhető. Segítségével a műholdfelvételek úgy alakíthatók át, hogy a dimenziószám csökkentése mellett a felszintértékezés szempontjából lényeges részletek emelkednek ki. A multispektrális felvételekre vonatkozó megfigyelés, hogy a talaj képpontjai a spektrális térben a dimenziószámtól függően egy egyenes, illetve egy ellipszis vagy ellipszoid, az ún. talajvonal mentén helyezkednek el. A növények pedig erre merőlegesen: minél fejlettebb, minél jobban fedi a növényzet a talajt, annál távolabbra a talajvonaltól. Alapvetően ehhez a szerkezethez igazodva transzformálja a felvételt az eljárás. Az eredmény komponensei a konkrét intenzitásoktól elvonatkoztatott fizikai mennyiségek: fényesség (brightness), zöldesség (greenness), nedvesség (wetness), párásság (humidity). A zöldesség időbeli változása nagyon jól leírja a növények fejlődését. Az időgörbék jellegzetes pontjai megfelelnek a fontos növényfejlődési fázisoknak. A zöldességnek – de a többi vegetációs indexnek is – fontos szerepe van a növényfejlődés vizsgálatában, az aszály felmérésében és a várható termés előrejelzésében.

A főkomponens-transzformáció és a Tasseled Cap-transzformáció hasonló jellegű, de van közöttük néhány alapvető különbség. A főkomponens-transzformáció jellemzői a következők:

1. Minden felvételre külön számítjuk a transzformációs mátrixot a sajátvektorok és sajátértékek meghatározásával.
2. Az előbbiek miatt számításigényesebb.
3. Az eredmény új koordináta-rendszerének első néhány (2-3) tengelye meghatározó az információtartalomra nézve. Ilyen szempontból optimális a tengelyek megválasztása.

A Tasseled Cap-transzformáció pedig a következő tulajdonságokkal rendelkezik:

1. Adott szenzorra egységes transzformációs mátrixot használhatunk.
2. Emiatt egyszerűbb a kiszámítása.
3. Az új koordináta-rendszer tengelyei „kézzelfogható” fizikai jellemzőknek felel meg. Megválasztásuk „átlagos” felvételeknél közel optimális az információtartalomra nézve.

## 10. fejezet

# Távérzékelési projektek

Ebben a fejezetben a Földmérési és Távérzékelési Intézet egyes operatív távérzékelési alkalmazásait mutatjuk be, amelyek jól illusztrálják az elméleti ismeretek gyakorlati felhasználását. Minden projekt ismertetését két részre bontjuk az alábbi tagolás mentén:

1. **Általános áttekintés:** Először egy általános áttekintést adunk a programokról, a szervezeti, szabályozási háttér bemutatásával és a távérzékeléses megoldás általános ismertetésével.
2. **Távérzékeléses módszertan:** Ezután ismertetjük a távérzékeléses kiértékelés módszertanát, vagyis az adott projektben alkalmazott elméleti hátteret, a felhasznált és eredményül kapott adatrendszereket, az elméleti feladat informatikai megoldását, a megoldás pontosságát és hatékonyságát, az esetleges továbbfejlesztési lehetőségeket. Mivel egy kifejlesztett módszer a befoglaló projekttől függetlenül is megmarad szellemi terméként, ezért a módszertan leírásánál általában jelen időt használunk a (már) nem futó projektek esetében is.

Az ismertetésre kerülő projektek nagyrészt a mezőgazdasághoz kötődnek. Általában jellemző rájuk, hogy erősen építenek a különböző típusú úrfelvételek együttes alkalmazására. A feladat rendszerint a növényzet állapotának vagy fejlődésének a figyelése. Az idődimenzió kiaknázása egyrészt a különböző felszínborítási kategóriák megkülönböztetésében, másrészt a növényfejlődés értékelésében fontos. Ez alól csak az árvízmonitoring a kivétel, amely azonban mégis beleillik a projektek sorozatába, ugyanis az idődimenzió fontossága az árvízmonitoringnál mutatkozik meg a legnyilvánvalóbban.

### 10.1. Országos Szántóföldi Növénymonitoring és Termésbecslés (NÖVMON)

#### Általános áttekintés

A távérzékelés mezőgazdasági alkalmazásainak megalapozásaként a FÖMI-nél 1980-ban indult a Mezőgazdasági Távérzékelési Program (MTPROG). A program évei alatti kb. 300 emberévnnyi kutatási és fejlesztési munka befektetésének

köszönhetően a digitális képfeldolgozás, a térinformatika, a távérzékelte felvételek feldolgozása és mezőgazdasági célú alkalmazása nemzetközileg is elismert szintre emelkedett. Az így megalapozott tudományos, technikai, szakértői és infrastrukturális bázisra épültek a további programok.

Az MTPROG keretein belül 1983-ban először néhány gazdaságra, majd nagyobb területi egységekre, és 1984-ben Hajdú-Bihar megye teljes területére történt távérzékeléses növényterület-felmérés. 1986-tól a kutatás előterébe került a növényfejlődés felmérése multitemporális távérzékelte adatok alapján. 1993-tól között az Országos Műszaki Fejlesztési Bizottság (OMFB), a Földművelésügyi és Vidékfejlesztési Minisztérium (FVM) és a FÖMI közötti kapcsolat keretében több nemzetközi projektben való részvétel mellett (pl. MERA) az operatív monitoring megalapozása történt.

1997-től 7 évig operatíván működött az Országos Távérzékeléses Szántóföldi Növénymonitoring és Termésbecslés program (NÖVMON). **A 8 gazdaságilag legelterjedtebb fő szántóföldi növény országos és megyei területének meghatározását, valamint a várható hozamok aratás előtti mérését, termésbecslését végezte** az FVM részére. A szolgáltatott adatok a gazdasági tervezés döntéseit támogatták.

Az előre rögzített jelentésnapár szerint átadott jelentések a számszerű adatok mellett a területfelméréshez kapcsolódóan vetésszerkezeti térképeket, a hozambecsléshez kapcsolódóan pedig a hozam területi eloszlását mutató térképeket tartalmazták.

A program 7 operatív éve bebizonyította, hogy a fő szántóföldi növények megfigyelésének egyedi, innovatív eszköze. Pontosabb, objektívebb az ismert földi módszereknél. A megyei és országos területre eredményt biztosító operatív hozambecslési módszer alkalmazásánál figyelembe kell venni azt a – kiindulási adatokból adódó – korlátozást, hogy a minimális terület mintegy 5000 ha növényenként, a becsült érték az ezen belüli átlaghozam. Ugyanakkor a modell megfelelő részletességű úrfelvételek alkalmazásával gazdaság-, sőt, akár táblaszintű hozambecslésre is alkalmazható.

### **Távérzékeléses módszertan**

A NÖVMON-ban alkalmazott módszer a képelemzést, alakfelismerést eszközként használó modellre épít: nem maguk a képelemzési eszközök dominánsak a megoldás módjában, hanem a felmért jelenségek szervesen beépülnek a modellbe. A jelenségek tulajdonságai – például a felmérés tárgyát képező növényfajok időbeli viselkedése, a célterületek közötti különbségek – már a modell kialakításában megjelentek.

A felmérés **többféle típusú műholdfelvétel együttes kiértékelésén alapul**. A földi módszerekkel szemben a műholdfelvételek a teljes vizsgált területen mutatják a földfelszín állapotát és a növénytakaró fejlődését, és nagyon alacsony a felmérés fajlagos költsége. **A szántóföldi növények feltérképezése, a területük mérése 20-30 m-es képpontméretű, 0,01-0,1 ha-os földfelszíni részletességet biztosító nagyfelbontású úrfelvételekkel valósul meg** (Landsat TM/ETM+, IRS 1C/1D LISS, NOAA AVHRR), amelyek az éven belül több alkalmas időpontban készülnek. A növénytérképezés a statisztikai osztályozásra épülő szokásos képelemzési lánc – előfeldolgozás, Maximum Likelihood-döntés, pontosságvizsgálat – felhasználásával történik. A folyamat egyes lépéseit a 10.1. ábra mutatja be.

Megemlítjük, hogy bár a 4. szakaszban leírtak szerint akkor mondhatjuk, hogy a numerikus kiértékelést egységes térbeli és radiometriai rendszerben lévő felvételekre alkalmazzuk, ha korrekten elvégezzük a teljes geometriai és légköri korrekciót, azonban a NÖVMON program kialakulása és végrehajtása nem épült a légköri korrekció teljes megvalósítására. Bizonyos paraméterek nem voltak ismertek, illetve egyes módszertani részek hosszabb fejlesztést igényeltek volna, így a növényterképezés végül ezek beépítése nélkül valósult meg. Az elemzések azt igazolták, hogy ez az egyszerűsítés nem rontotta le számottevően a kapott eredmények pontosságát, viszont időben és a befektetett kapacitásban sokat lehetett nyerni.

**A növények fejlődésének követéséhez és a hozambecsléshez** a nagyfelbontású felvételeken kívül **kb. 1 km-es képpontméretű, 120 ha-os részletességet biztosító, naponta többször készülő kisfelbontású űrfelvételek kerülnek felhasználásra.** A kis térbeli felbontású, de sűrűn rendelkezésre álló adatból a növényterkép segítségével nyerjük ki az egyes növényekhez tartozó időgörbét, amelyekből végső soron a hozamot számoljuk. A NOAA AVHRR-űrfelvételek közvetlen vétele 1998 óta a FÖMI-nél üzembe helyezett saját vevőállomással valósul meg.

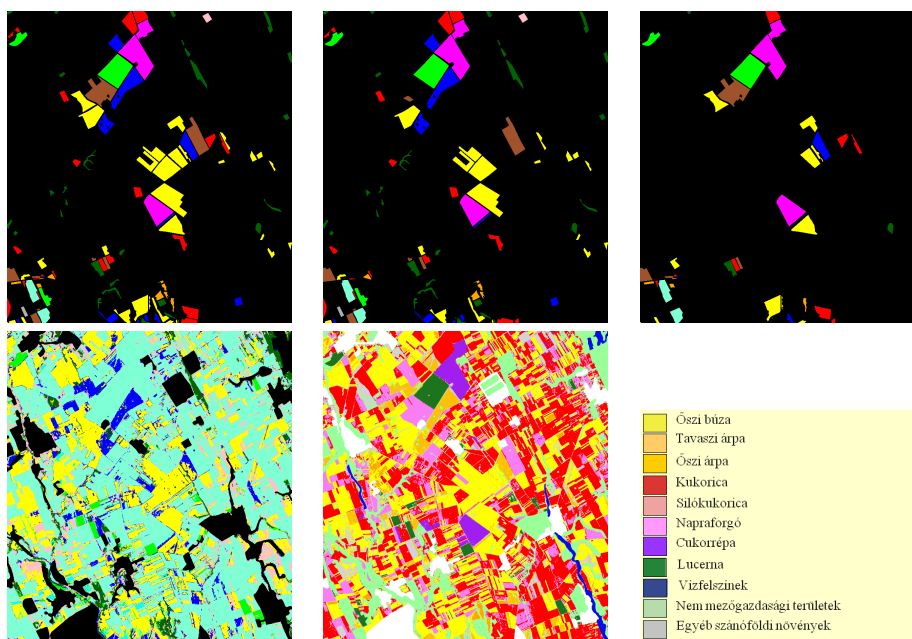
A területfelmérési eljárás betanításához és a hozambecslés kalibrációjához referencia-adatok gyűjtése történik a vizsgált terület kis részén, kb. a 2-4%-án. A hagyományos terepi adatgyűjtés eredménye térinformatikai rendszerbe illesztve kerül további felhasználásra.

A NÖVMON-ban kapott hozameredmények pontosságát alátámasztja, hogy kisebb területi egységeken (a gazdaságok azonos növénnyel művelt parcelláinak együttesén) lettek kalibrálva, mint amelyekre az outputot megadjuk (megye). Ez azt jelenti, hogy a gazdaságok egyes természetű növényeire vizsgáljuk a távérzékeléses mérőszám és a (gazdaságoktól kapott) hozamadat viszonyát, és az így eredményezett viszonyt használjuk fel az „éles” becslésnél. Ez pontosabb módszer, mintha egy megyei szintű távérzékeléses mérőszámot hasonlítottunk volna a hivatalos megyei hozamadattal, mert amennyiben már az elemi területekre megfelelő a hozam becslése, a relatív pontosság az elemi területekre kapott eredmények összesítésével sem romlik el.

## 10.2. A Mezőgazdasági Parcella-azonosító Rendszer (MePAR)

### Általános áttekintés

2004-től, Magyarország EU-csatlakozásától kezdve a területalapú mezőgazdasági és vidékfejlesztési támogatások kezelésének egyik legfontosabb alrendszere a Mezőgazdasági Parcella-azonosító Rendszer (MePAR). A vonatkozó tanácsi rendelet értelmében a mezőgazdasági parcellák azonosítását és pontos területmérését lehetővé tevő MePAR térinformatikai rendszerben történő kialakítása a támogatások kifizetésének előfeltétele. A Magyarországon megvalósított MePAR-ban **a táblák azonosításának alapegységei a fizikai blokkok, amelyek kialakítása elsősorban térképhelyes légifelvételek (ortofotók) alapján történt.** A MePAR az Integrált Igazgatási és Ellenőrzési Rendszer (IIER) egyik legfontosabb alrendszere. Kialakítása, üzemeltetése, felújítása és használata az EU-s és az ez alapján létrehozott nemzeti szabályozás alapján történik. Az IIER



10.1. ábra. A NÖVMON osztályozási folyamatának illusztrációja egy mintaterületen. Felső sor: balra a referencia-adatok, középen a referencia-adatokból a tanulóterület, jobbra a teszterület. Alsó sor: balra egy köztes, csak a kalászosokra vonatkozó osztályozási eredmény (értelemszerűen csökkentett tematikus tartalommal, kevesebb célosztállyal), középen az időszak végén készült, minden növényt tartalmazó osztályozási eredmény, jobbra a hozzá tartozó jelkulcs.

felső szintű működtetése a kifizető-ügynökség feladata, amely Magyarországon a Mezőgazdasági és Vidékfejlesztési Hivatal (MVH). Az EU-s támogatások forrása korábban az Európai Mezőgazdasági Orientációs és Garanciaalap (EMOGA) volt, jelenleg pedig az Európai Mezőgazdasági Garanciaalap (EMGA) és az Európai Mezőgazdasági Vidékfejlesztési Alap (EMVA).

A területalapú támogatások kezelésével kapcsolatban a MePAR-nak sokrétű a feladata. A támogatási igényekhez tartozó térképi és táblázatos dokumentumok alapja. Segítséget nyújt a támogatás alapjául szolgáló terület földrajzi azonosításához, nagyságának meghatározásához. A beadott igénylések IIER-ben folyó adminisztratív ellenőrzéséhez biztosítja a területadatokat. Az adminisztratív ellenőrzés feladata a területi túligénylések, kettős igénylések előszűrése, az egyes kifizetési jogcímeken belül és a különböző jogcímek között. A fizikai ellenőrzésekhez – vagyis a helyszíni és a távérzékeléses ellenőrzéshez – a MePAR biztosítja a digitális térképi alapot. A vidékfejlesztési támogatásokra vonatkozó pályázati dokumentumok kezelésének is a MePAR a térinformatikai alapja. Az eddigieken felül a kifizető-ügynökség további feladatokat rendelhet a MePAR-hoz.

A MePAR alapegységei a fizikai blokkok, melyek ismérve, hogy a mezőgazdasági művelés szempontjából stabilak, a földfelszínen is beazonosítható határokkal rendelkeznek (pl. út, vasút, csatorna, árok, erdősáv), és a felszínborításuk kellően homogén. A MePAR alapadat-rendszere a fizikai blokkok egyedi azonosítójából, határaiból, területnagyságából, a blokkokon belüli nem támogatható területek határaiból, nagyságából, a blokkok nettó támogatható területéből, valamint a kialakítás alapjául szolgáló ortofotókból áll össze. A MePAR része a tájékoztatót segítő réteggként megjelenített, a földrészletek határait és helyrajzi számaikat tartalmazó kataszteri (ingatlan-nyilvántartási) fedvény is.

A mintegy 374000 fizikai blokk az ország teljes területét (9,3 millió ha) lefedi. Átlagos méretük (bruttó területük) 25 ha. Összesen kb. 5,5 millió ha támogatható terület van az országban, amely blokkonként mintegy 15 ha-os átlagot jelent, beleszámítva az átlagba a tényleges támogatható területtel nem rendelkező és igényeltség hiányában adminisztratív módon nullázott (bezárt) blokkokat is. A tényleges támogatható területtel rendelkező és nem bezárt blokkok halmazán mintegy 26 ha a támogatható terület átlaga.

A MePAR alapadat-rendszerére a különböző kifizetési jogcímekhez tartozó támogatási jogosultságokat rögzítő tematikus rétegek épülnek. Ezek pl. a Kedvezőtlen Adottságú Területek (KAT), Magas Természeti Értékű Területek (MTÉT), Nitrátérzékeny területek, NATURA 2000-területek és a szélerózió-veszélyeztetett területek.

A MePAR kiépítését, majd az üzemeltetését, programszerű felújítását, változásvezetését és a kérelemcsomagok részét képező blokkterkép-melléletek évenként történő előállítását a FÖMI végezte, végzi.

A jogi szabályozás **a blokkrendszer módosításának három alapvető módját** határozza meg. Az első **az ügyfél kérésére induló változásvezetés**. Az MVH és a FÖMI a saját hatáskörében is felülvizsgálhatja a fizikai blokkokat, és kezdeményezhet változtatást, ez a **hivatalból induló felülvizsgálat**. A harmadik lehetőség az évenkénti, ortofotó alapján történő **programszerű felújítás**.

A MePAR hazai megvalósítása minőségében az EU-átlag közelében jár, több kisebb innovatív lépést téve a kialakítás során, és több jó megoldást keresztülvive a rendszer használatában érdekelt ügyfelek és hivatali résztvevők bevezeté-



sében. A használatot nagyban megnehezíti, ha nem történik meg rendszeresen az ortofotó-fedvény felújítása. Állandóan aktuális továbbfejlesztési lehetőség az automatikus kiértékelési lépések bevezetése, a támogatási jogcímeiktől függő elemek hozzáadása pedig ezen felül jogilag előírt kötelezettség is.

### **Távérzékeléses módszertan**

A kiépítés legfontosabb képi adatforrását az ortofotók képezik, melyek kora, aktualitása alapvetően meghatározza a MePAR minőségét. A földhasználat változásának megfelelő ütemű követése céljából a vonatkozó EU-s rendelet korlátot szab az ortofotó korára, ami szükségessé teszi a légifelvételek, és általuk a MePAR rendszeres megújítását. A kiépítés során az 1:10000-es méretarányú topográfiai térképek segítik az időben állandó határolóelemek azonosítását. A nagyfelbontású űrfelvételek több évre rendelkezésre álló időszora pedig a földhasználati kategóriák azonosításában és a határolóelemek megtalálásában segít.

A MePAR üzemeltetésében jelenleg kisebb az automatikus kiértékelési módszerek szerepe, inkább a térinformatikai rendszerben történő vizuális elemzésen alapul.

A MePAR a felhasznált képi adatrendszerek szempontjából kissé eltér a többi programtól, ugyanis az általában használt, az infravörös tartomány több intervallumát is átfogó űrfelvételek helyett alapvetően a spektrálisan kevésbé gazdag légifelvételekre épül. Ez megfelel az alapvető céljainak, ugyanis a minden kérelmet érintő feladatokhoz, vagyis a kérelembeadáshoz és az adminisztratív ellenőrzéshez szükséges térinformatikai tartalomhoz elégséges tematikus információt szolgáltatnak. Ugyanakkor kellően nagy a légifelvételek által biztosított területi lefedettség.

A kérelmek fizikai ellenőrzése szempontjából ugyanakkor már sokkal nagyobb szerepe van az űrfelvételek által biztosított több spektrális információnak, ugyanis itt jóval részletesebb tematika szerint kell értékelni a felszínt. A fizikai ellenőrzés viszont nem teljes körű.

A használt módszertan szempontjából érdemes összehasonlítani a MePAR kiépítését és változásvezetését a NÖVMON programmal. Utóbbi erősen épít az űrfelvételek spektrális tartalmára, de az eredmény térinformatikai rendszerben történő tárolásának a NÖVMON célját tekintve tulajdonképpen nincs nagy jelentősége. A MePAR feladatai a jelenleg használt módszerek mellett távérzékeléses szempontból egyszerűbbek, viszont alapvető fontosságú a fejlett térinformatikai tárolás, feldolgozás. Egyrészt, a kérelmezésben és ellenőrzésben is több helyen szükséges, hogy a MePAR térinformatikai formában álljon rendelkezésre. Másrészt, a MePAR időbeli változásának a nyilvántartása, követése, az évek közötti változások dokumentálása, az erről szóló tájékoztatás is a vektoros térinformatikai adatrendszeren végezhető el megfelelően.

Az utóbbi pár évben a MePAR sokat fejlődött az ún. felszínborítási fedvény kialakítása által, amely a támogatható és nem támogatható területek lehatárolásánál egy sokkal nagyobb tematikus részletességű lehatárolás. A felszínborítás (land cover) alatt általában a földfelszín fizikai kategóriáinak a lehatárolását értjük, szemben a földhasználattal (land use), amely az ember által végzett tevékenységektől függő, tematikusan általában jóval finomabb felosztás. A kettő között elég nehéz meghúzni egy éles határt. A távérzékeléses alkalmazásokhoz kapcsolódva a szakemberek elsősorban az EU-s CORINE Land Cover-t értik

felszínborítás alatt. A MePAR-os felszínborítás viszont közelebb áll a földhasználathoz.

A CORINE- és a MePAR-felszínborításban közös, hogy a kategóriák hierarchikus rendszert alkotnak. A CORINE-ban a felső szintű kategóriák: (1) Mesterséges felszínek, (2) Mezőgazdasági területek, (3) Erdők és természetközeli területek, (4) Vizenyős területek, (5) Vízfelületek. Ezzel szemben a MePAR-felszínborítás kategóriái a rendszer céljából és kialakulásának történetéből adódóan már a legfelső szinten is a mezőgazdasági támogatathatóság szerint különülnek el, másrészt a MePAR-felszínborításban jóval erősebb a földhasználat súlya. Évekkel ezelőtt a MePAR-ban csak a támogatható és nem támogatható területek különültek el vektorosan. De az azóta eltelt időszakban a módszertan fejlődésének, a sokkal finomabb lehatárolási technológiának és a megjelent tematikus rétegeknek köszönhetően a tematikus és a térbeli pontosság is sokat javult.

### 10.3. Távérzékeléses támogatás-ellenőrzés

#### Általános áttekintés

A MePAR kiépítése és üzemeltetése mellett, ahhoz szorosan kapcsolódva a másik jelentős távérzékelési program a mezőgazdasági támogatások távérzékeléses ellenőrzése. A gazdálkodók az általuk művelt területekre általában évenként nyújtanak be támogatási kérelmet. A támogatások és ellenőrzésük rendszerét szintén az EU-s jogszabályokon alapuló hazai rendeletek határozzák meg. A teljeskörű adminisztratív ellenőrzés mellett a kérelmek egy bizonyos részét fizikai ellenőrzésnek vetik alá, amelynek egyik módja a „klasszikus” helyszíni ellenőrzés, a másik a távérzékelés. Magyarországon a fizikai ellenőrzéseknek mintegy 80%-a távérzékeléssel történik. Ezt a feladatot a FÖMI végzi, az MVH és az EU Egyesített Kutatóközpontja (Directorate General Joint Research Centre, DG JRC) közvetlen szakmai felügyelete mellett. A módszertan megalapozása nagy mértékben a 2000-tól 2003-ig folyt, nemzeti területalapú támogatások ellenőrzése során történt.

A MePAR-on, mint referencia-rendszeren benyújtott területalapú támogatási kérelmek két fő jogcímre vonatkoznak: az Egységes Területalapú Támogatásra (Single Area Payment Scheme, SAPS) és a Kiegészítő Nemzeti Támogatásra (Top-Up). Ezekon kívül néhány más támogatási jogcím távérzékeléssel ellenőrizhető feltételeit is vizsgáljuk. A támogatási kérelmet benyújtó gazdálkodók minden parcellája meg kell, hogy feleljen a Helyes Mezőgazdasági és Környezeti Állapot (HMKÁ; Good Agricultural and Environmental Conditions, GAEC) feltételeinek is.

A benyújtott kérelemcsomagok táblázatos és térképi részből állnak. Utóbbin a parcellákról készített vázrajz található. A kérelmek kezelése, ezen belül az elektronikus formában történő tárolás az MVH feladata. 2008-tól kezdve teljes körűen működik az elektronikus kérelembeadás, amely a táblázatos és térképi adatokra is vonatkozik. A távérzékeléses ellenőrzés ún. ellenőrzési körzeteken belül történik, vagyis nem az ország teljes területén elosztva, hanem több kisebb területre koncentrálva. Az országosan beadott mintegy 180000-200000 kérelemnek évente kb. a 4-5%-a esik távérzékeléses ellenőrzés alá, amely EU-n belül viszonylag nagy elemszámú mintát jelent. Az ellenőrzési körzeteken belül

kiválasztott kérelmek táblázatos adatait és a térinformatikai formában tárolt parcellarajzokat az MVH elektronikus úton adja át a FÖMI-nek.

A tényleges távérzékelés ellenőrzés során minden parcellára alapvetően a következő három feltétel ellenőrzése történik: megfelel-e a kért növény a tényleges hasznosításnak, helyes-e, illetve pontos-e a kérelmezett terület, és megfelel-e a parcella a fent említett HMKÁ-nak. A tényleges távérzékelés ellenőrzés, vagyis a Számítógéppel Segített Felvétel-kiértékelés (Computer-aided Photo-interpretation, CAPI) legtöbbször vizuális kiértékeléssel történik, amelyet egy saját fejlesztésű, ArcView-alapú szoftverrel és az automatikus feladat-kiosztást támogató központi adatbázissal hajtunk végre.

Bizonyos esetekben az űrfelvételek nem elegendők ahhoz, hogy egy-egy parcellánál megállapítsuk a tényleges növényzetet. Ezeket a parcellákat ún. gyors helyszíni szemlével (rapid field visit, RFV) vizsgáljuk, amely a távérzékelés ellenőrzés részének tekintendő. A FÖMI-nél alkalmazott, GPS-t és térinformatikai rendszert használó megoldás általában magába foglalja a pontos területmérést is.

A parcellaszinten hozott döntések teljes kérelmekre történő összesítése után az eredményeket alfanumerikus adatbázisban és térinformatikai adatokként adja át a FÖMI az MVH-nak.

A Magyarországon működő ellenőrzési rendszerben jó a pontosság és a hibák dokumentálása. A pontatlanságnak felhasználói szempontból más a hatása, mint a növénymonitoring esetében: az utóbbi nagy területre ad összesített eredményt, amelyet az egy-egy parcellánál előforduló hiba nem befolyásol jelentősen. A támogatás-ellenőrzésnél azonban a parcelláknak már mintegy 1%-ánál hibás döntést okozó módszer már veszélyes lenne az esetleges fellebbezések kezelhetetlenül nagy száma miatt. Továbbfejlesztési lehetőség az automatizált lépések számának növelése.

### **Távérzékeléses módszertan**

A támogatás-ellenőrzés a távérzékeléses feladat vonatkozásában vizuális módszernek minősül. Bár a teljes rendszert jelentősen támogatják fejlett automatikus szoftverek, de a parcellaszintű döntések meghozatalában a vizuális interpretációé a főszerep. A növény vizsgálatához általában nagyfelbontású (HR) űrfelvételek időszora kerül felhasználásra, mivel a különböző növények elkülönítéséhez a vegetációs időszakon belül több időpontban is ismerni kell a felszín sugárzását. A megfelelő pontosságú területméréshez pedig szuperfelbontású (VHR) űrfelvételeket használunk, mivel a legújabb technikai szabályozásnak már csak ezek felelnek meg. A szuperfelbontású űrfelvételeknek egyre nagyobb a szerepe a növényfelismerésben is: gazdag térbeli információt hordoznak, így a mintázat felismerésében jelentős segítséget adnak. Extrém időjárási körülmények esetén, pl. aszályos időszakban előfordulhat, hogy már a növény jelenléte is csak VHR-en ismerhető fel. A HMKÁ-feltételek vizsgálatához mind a kétféle űrfelvételt felhasználjuk, ezen kívül a digitális terepmodellből (DTM) számított lejtőkategória-térkép is szükséges az egyik feltétel ellenőrzéséhez.

A támogatás-ellenőrzésen belül végrehajtott interpretáció és a NÖVMON programban az osztályozás a végeredmény szempontjából hasonlóknak tűnik, az eredmény mindkettőnél a megfigyelt növény egy bizonyos felszíndarabon. Azonban részletesebben megvizsgálva két alapvető különbség van közöttük módszertanilag, valamint a bemeneti és kimeneti adatok szempontjából:

- A növényterképezésnél az űrfelvételek és a növények (mintaterületek alapján meghatározott) spektrális tulajdonságai alapján kell minden egyes területdarabról eldönteni az ott található tényleges növényt. A támogatás-ellenőrzésnél jóval egyszerűbb a feladat, itt a kérelemben szereplő állítás igazságtartalmát kell megállapítani, vagyis hogy lehetséges-e a területen a kérelmezett növény előfordulása.
- A támogatás-ellenőrzés feladata annyiban azonban bonyolultabb, hogy jóval több tematikus kategóriával dolgozik, 100-nál több növényt kell elkülöníteni, míg a NÖVMON végeredményében csak a 8 fő növény szerepel, így elég ezekre koncentrálni.

## 10.4. Katasztrófa-monitoring

A katasztrófa-felmérésen belül három fő projektet ismertetünk: az árvíz-, a belvív- és aszályfelmérést. Bár a három felmérés különböző távérzékeléses módszerekkel történik, de a projektek összehasonlítása szempontjából szerencsésebb az együtt, egy szakaszon belül történő tárgyalás.

### Általános áttekintés

A földfelszín állapotának nagy területen történő objektív felmérése által a távérzékelés különösen alkalmas a növényzetre irányuló közvetlen megfigyeléseken túl a természeti csapások, katasztrófák felmérésére is. A megfigyelt katasztrófa-események maguk is közvetetten vagy közvetlenül befolyásolhatják a mezőgazdaságot, a szántóföldi növények fejlődését. A FÖMI távérzékeléses módszerrel 1998 óta végez belvízfelmérést, 2000 óta pedig árvíz- és aszályfelmérést.

**Árvízfelmérés** ♦ A 2000 tavaszán a Körösön és 2001-ben a Felső-Tisza vidékén levonuló árvizek felmérésében és a katasztrófa-helyzet kezelésében, irányításában fontos támogatást nyújtott a távérzékeléses felmérés. Operatív adatokat szolgáltatott az Országos Vízügyi Főigazgatóságnak és az Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóságnak. A FÖMI az előntéstérképeket elektronikus úton, gyakorlatilag késlekedés nélkül juttatta el az érintett szervezetekhez. Ezzel is segítette a gyors és hatékony védekezést: a gáterősítés helyének és mértékének a meghatározását, a lakott területek, az infrastruktúra, valamint mezőgazdasági területek megvédését.

Az árvízfelmérés operativitásában, a folyamat időbeli követésében nagyon erős, köszönhetően a többféle űrfelvétel felhasználásának. A program innovációs értékét növeli, hogy az eredmények operatív felhasználásra kerültek. Jelentős lépés lenne, ha nemcsak az előntött területek, hanem a vízgyűjtőkben található erdők és mezőgazdasági területek is feltérképezésre kerülnének, ez nagyban növelné a módszer modellezési, előrejelzési erejét.

**Belvízfelmérés** ♦ A távérzékeléses belvízfelmérés 1998 és 2001 között operatív módon zajlott, a FÖMI több alkalommal adott át űrfelvételekből előállított belvíztérképet az FVM részére. A későbbi években inkább kutatási-fejlesztési jelleggel történt belvízfelmérés mind az aktuális, mind a visszamenőleges állapot (egy év korábbi időszak, illetve megelőző évek) feltérképezése, a különböző

típusú távérzékelési adatok felhasználhatóságának, az elérhető pontosságnak a vizsgálatával. A belvízfelmérés során jellemzően inkább egy adott időponthoz tartozó, statikus állapot felmérése történik, azonban felvételi idősor felhasználásával lehetőség van a belvízelöntés kiterjedésének, illetve levonulásának dokumentálására, a kártétel, a növényzetre gyakorolt hatás felmérésére.

Bár alapvetően nem a belvízfelméréshez tartozik, de megemlítjük, hogy a támogatás-ellenőrzésben is szerepe van a tavaszi belvíz észlelésének. Ugyanis magyarázatot adhat a megfigyelt parcellákon a növényzet nem megfelelő fejlődésére és a gyomosodás megjelenésére, segítve, megerősítve az interpretátor döntését és a növényterület megfelelő lehatárolását. Alapvető különbség azonban, hogy a belvízfelméréssel több megyét, vagy akár az egész országot lefedő, standard tematika szerinti belvíztérképet kapunk, a támogatás-ellenőrzésben viszont kisebb területekről, külön-külön az egyes parcellákról hozunk döntést.

Érdemes megemlíteni, hogy 1999-ben a belvíz által okozott károk enyhítésére támogatást lehetett igényelni a területalapú (akkor: földalapú) támogatásokhoz nagyon hasonlóan, és a kárenyhítési kérelmek távérzékeléses ellenőrzésére is sor került. Ennek során a támogatás-ellenőrzéshez nagyon hasonló, vizuális kiértékelésen alapuló módszert került alkalmazásra. A belvízfelmérés eredményét a 2010-es, igen csapadékos évben is felhasználtuk a területalapú támogatásban: a fizikai blokkok belvizes részének felmérésével segítettük az MVH-t a mentességi (vis maior) kérelmek elbírálásában.

Összegezve, a távérzékeléses belvízfelmérés operativitásában, pontosságában igen jelentős. Az innovációs értéke közepes, nagyrészt ismert módszereken alapul. Továbbfejlesztési lehetőség az operativitás növelése, amelyre a kezdetektől voltak tervek, ugyanis a felmérés egy „Belvízvédelmi Rendszer” keretében működött volna.

**Aszályfelmérés** ♦ Az elmúlt évek során egyre változékonyabbá vált az időjárás a vegetáció fejlődése szempontjából. A globális felmérések szerint fokozatosan nő az időjárási szélsőségek gyakorisága. Magyarországon 2010 óta többször előfordult, hogy egy éven belül nagyon csapadékos és nagyon száraz időszakok váltották egymást. 2000-ben és 2003-ban komoly aszály sújtotta az országot, amelynek területi kiterjedését és időbeli alakulását a FÖMI távérzékeléssel felmérte. A kvantitatív kiértékelés eredményeit, amely az aszály térbeli eloszlását mutató térképekből és a növényekre gyakorolt hatás vizsgálatára is kiterjedő szöveges értékelésből áll, az FVM kapta meg. Az aszályfelmérés, illetve az aszályal nem sújtott években a növényfejlődés általános vizsgálata kutatás-fejlesztési jelleggel is folyt, többféle adatrendszer lehetőségeit elemezve.

Az aszályfelmérés – építve a NÖVMON-módszertanra – jó minőségű projektnak számít, az innovációs értéke közepes. A további fejlesztési lehetőségek az új szenzorok bevonásában, azok optimális felhasználásában, illetve a különböző szenzorok adataiból számított vegetációs indexek közötti kapcsolat további analízisében rejlenek.

Az operatív katasztrófa-felmérési projektek mellett, azokat kiegészítve kutatás-fejlesztési szempontból igen jelentős a FÖMI részvétele az Európai Űrügynökség (European Space Agency, ESA) által koordinált programokban. **Az ESA-FÖMI Prodex projekt** (2000-2004) célja a különböző távérzékeléses adatrendszerek felhasználhatóságának, minőségének vizsgálata az árvíz-, belvíz- és aszályfelmérésben. A NÖVMON-ban alkalmazott távérzékeléses adatforrások

kon kívül más típusú űrfelvételek (IRS 1C/1D WiFS, IRS 1P MOS, SPOT Vegetation, ERS SAR) vizsgálata, modellbe integrálása is megtörtént, különös tekintettel az ESA által 2002-ben üzembe helyezett ENVISAT műhold által készített felvételekre. Az ENVISAT műhold 15 spektrális sávban felvételező, a látható és a közeli infravörös tartományt lefedő MERIS szenzora (ld. 3.5. szakasz) új generációs multispektrális szenzornak számított a projekt végrehajtásának időszakában. A Prodex projekt sikeres lezárása után, annak folytatásaként indult az ESA PECS (Programme for European Co-operating States) projekt (2004–2007.), célja az ENVISAT műhold további szenzorai alkalmazhatóságának vizsgálata kiterjesztett mintaterületre és időszakra.

### Távérzékeléses módszertan

**Árvízfelismerés** ♦ A felismeréshez a FÖMI lehetőség szerint **minden elérhető nagy-, közepes- és kislebontású multispektrális űrfelvételeket**, illetve bizonyos mértékben még **radarfelvételeket is felhasznál**, mivel az idő a legfontosabb szempont. Ez egyrészt a kellő gyakoriságú megfigyelésnek, másrészt a felvételkészítés időpontjától a felismerés eredményéig tartó folyamat gyors átfutásának az igényét indukálta. A FÖMI az űrfelvételekből rendszerint **vizuális kiértékeléssel vezeti le az előtérképeket**.

Az árvíz-monitoringban az idődimenzió kettős szerepet játszik, két szempontból is fontos. Egyrészt, az árvízhelyzet folyamatos monitorozásához gyakori felvételezés szükséges. Másrészt, a képeknek a vétel után nagyon rövid időn belül rendelkezésre kell állni a további feldolgozáshoz. Az árvízfelismerési programokban lényegében minden rendelkezésre álló és alkalmas műholdfelvétel felhasználásra került, beleértve a termális sávot is lefedő felvételeket, valamint a radarképeket. Az idődimenzió fontossága meghaladja a spektrális tulajdonságokét és a térbeli felbontását. Ugyanis a nyílt vízfelszín a felvételek többségén a lefedett hullámsávoktól függetlenül könnyen felismerhető. Valamint az általában használt űrfelvételek tartományában gyakorlatilag minden felvételtípus pixelmérete megfelel a monitorozás követelményeinek.

Fontos és ígéretes továbbfejlesztési irány a mikrohullámú távérzékelés, vagyis a radarfelvételek használatának erősítése, annál is inkább, mert az árvizes időszakban jellemző felhőborítás nagyban akadályozza az optikai sávú távérzékelés alkalmazását.

**Belvízfelismerés** ♦ A belvízfelismerésben **az űrfelvételek széles skálája használható**. A felhasznált felvételtípus egyrészt a kialakított térkép térbeli felbontását határozza meg, ennek megfelelően beszélhetünk kislebontású (120 ha részletességű), közepes felbontású (3,6 ha részletességű) és nagyfelbontású (0,1 ha részletességű) térképekről. Másrészt a térképeken alkalmazható tematikus kategóriák is függenek a felvételtípustól, vagyis azon túl, hogy külön kategóriákként jelennek meg a nyílt belvízfoltok, a vízzel átitatott talajok és a belvíz által érintett növényzet, az utóbbi két kategóriában az érintettség mértéke a felvételtípustól függő finomsággal térképezhető. **A belvíztérkép elkészítése a Maximum Likelihood-döntésen és pontosságvizsgálaton alapuló statisztikai képelemzési módszertan felhasználásával történt.**

Korlátként megemlíthető, hogy a növények belvíz-érintettségű fokozata, a hatás kimutatása még kevés kategóriánál, fokozatnál is nagyon nehéz. A belvíz-érintettség fokozatait ugyanis nehéz statisztikailag tematikus kategóriákként jel-

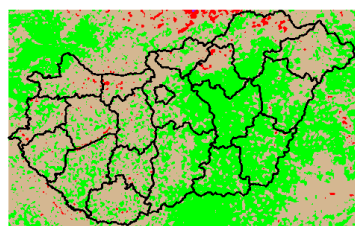
lemezni, mivel jellemzően nem alkotnak egymástól elkülönülő csoportokat a spektrális térben, inkább fokozatos átmenet jellemzi a belvízzel kevésbé vagy jobban érintett növényzetet.

**Aszályfelmérés ♦ A távérzékeléses aszályfelmérés numerikus, kvantitatív módszereket használ.** Két alapvető módszertani eleme a vegetációs indexek használata és a referencia-időszakkal történő összehasonlítás.

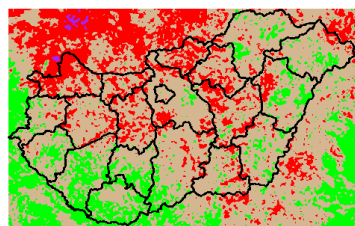
1. A vegetációs index az eredeti sávértékekből származtatott (skalár) mennyiség, amelynek magasabb értékei jelzik a fejlettebb vegetációt. Kiszámításukhoz több eredeti sáv értékét használjuk, a számításához használt képlet, illetve az abban szereplő együtthatók függenek a szenzortól. Az index számítása előtt fontos a megfelelő radiometriai korrekció. Az aszályfelmérésben elsősorban alkalmazott vegetációs indexek az NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, Normalizált Különbségi Vegetációs Index) és az MGVI (MERIS Global Vegetation Index).
2. Az aszály területi eloszlásának vizsgálata a vizsgálandó időszakra vonatkozó indextérkép és egy referencia-időszakra vonatkozó indextérkép összehasonlításával történik. A referencia-időszak több évet is átfoghat, azonban az éveken belül mindig ugyanazt az időintervallumot – rendszerint egy hét vagy tíz nap – tekintjük. Az eredményeket a 10.2. ábrán látható évenkénti országos aszálytérképek és megyénkénti indexgörbék mutatják.

Az aszály felmérésének fizikai háttere és a megvalósítás módszere nagyon hasonlít a növényfejlődés megfigyeléséhez, de azt mondhatjuk, hogy egy nagyságrenddel „durvább”, generalizáltabb.

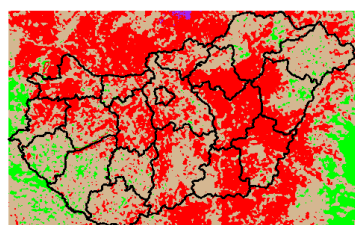
- **Az aszály felméréséhez kifelbontású felvételek** (NOAA AVHRR, SPOT Vegetation, ENVISAT MERIS, esetleg a közepes felbontású IRS WiFS vagy AWiFS) **idősorait használjuk.** Tehát a felvételek képpontmérete is nagyobb, mint a növénytérképezésnél, így általában többféle felszínborítást is tartalmaz egy pixel. Az esetek egy részében a felmérés során használt elemi felszínadarab mérete is nagyobb, mint a felhasznált műholdfelvételek képpontmérete. Az aszályfelmérés nagyobb terület integrált állapotát vizsgálja.
- Másrészt, általában nem növény-specifikus, hanem a vegetáció általános állapotáról ad képet. Ezzel együtt megemlítjük, hogy vizsgáltunk növény-specifikus időgörbéket is azokon a helyeken, ahol nagy kiterjedésben volt jelen egy-egy növény.
- Szintén egy nagyságrenddel generalizáltabb az idődimenzió szerepe, ami azt jelenti, hogy a mérési értékeket hosszabb periódusokban vizsgáljuk, vagyis rendszerint egy hetet vagy egy dekádöt (10 napot) tekintünk egy egységnek. Bár a monitorozáshoz kellően sűrű felvételi idősorra van szükség egy vizsgált perióduson belül, de a különböző napokhoz tartozó pixelértékeket nem külön-külön kezeljük, hanem a periódusra összesítjük. Ezzel áthidalhatjuk azt a problémát, hogy nem minden napon áll rendelkezésre használható távérzékeléses adat, illetve a különböző periódusoknak nem ugyanazokra a napjaira van érdemi mérési eredményünk.



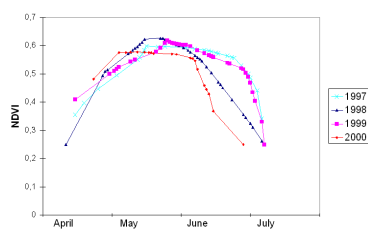
1991



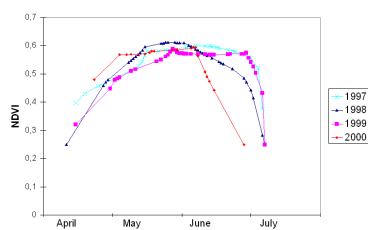
1993



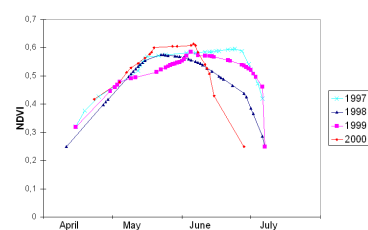
2000



Jász-Nagykun-Szolnok



Hajdú-Bihar



Tolna

10.2. ábra. Az aszályfelmérés eredményei. Bal oldalon az aszály térbeli eloszlását mutató évenkénti országos térképek, jobb oldalon a megyénként átlagolt többéves indexgörbék láthatók.



## 10.5. Parlagfű felmérése távérzékeléssel

### Általános áttekintés

Az utóbbi évtizedben igen jelentős egészségügyi problémákat okoz az allergén gyomnövények, ezen belül elsősorban a parlagfű által termelt pollen. Magyarország mezőgazdasági területeinek túlnyomó részén előfordul (ebből becslések szerint kb. 5-700 ezer hektáron súlyos a fertőzés), a pollenterhelés nagy része ezekről a területekről származik. Az ország lakosságának kb. a negyedrésze szenved valamilyen allergiás megbetegedésben, és bár nincs rá kimutatás, de valószínűsíthető, hogy a betegeknek több, mint a felét parlagfű-allergia is érinti. Jelentős pénzüsszegbe, több milliárd forintba kerül a tüneti kezelésre alkalmas gyógyszerek alkalmazása. Mindezeket egybevéve nyilvánvaló, hogy fontos feladattá lépett elő a növény irtása, terjedésének megakadályozása a lakosság és egyes intézmények részéről is.

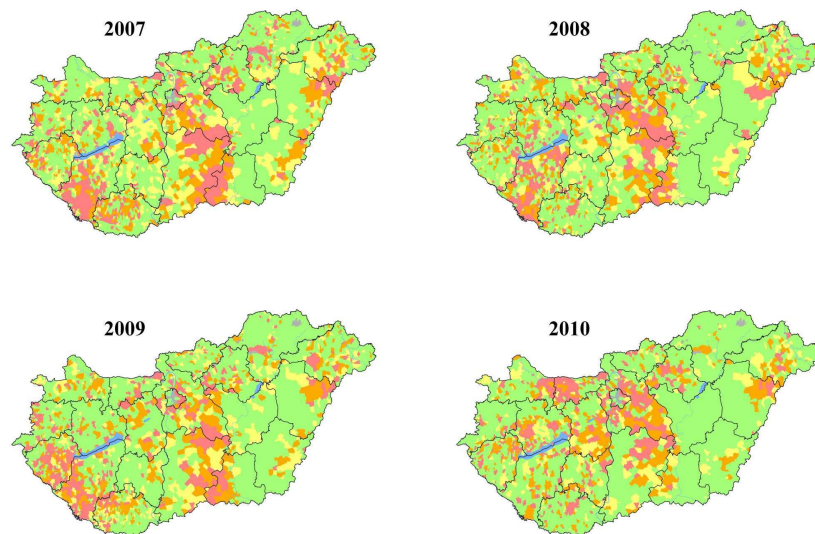
2005-ben radikális változás történt a parlagfű elleni védekezésben, amelyet a jogi szabályozás – a növényvédelemről szóló 2000. évi XXXV. törvény – módosítása tett lehetővé. Más intézmények mellett a FÖMI is több ponton szerepet kapott a védekezés lebonyolításában, elsősorban a sok évre visszanyúló távérzékeléses tapasztalatai alapján. A FÖMI általános intézményi háttere átfogja a távérzékelésen kívül a térképészetet, térinformatikát, a GPS-technikát, a légitelvezést, a földügyi informatikát (ingatlan-nyilvántartás és földhasználati nyilvántartás), amelyeknek együttesen köszönhető, hogy a védekezés több pontján is aktív, kezdeményező szerepet vállalhatott.

2005-ben első lépésként egy visszamenőleges vizsgálat történt a 2004-es évre vonatkozóan. 2005-ben második, fontosabb lépésként az aktuális állapot vizsgálata, a parlagfű fejlődését figyelembe vevő, kellő időben történő mentesítés támogatása következett, illetve ez a tevékenység folytatódott 2006-ban is. A valós idejű mentesítés általános folyamatában az első lépés a felderítés, amely történhet lakossági bejelentés, a Növény- és Talajvédelmi Szolgálat (NTSZ) helyszíni bejárása és távérzékeléses felmérés alapján. Ezt követi a földhivatalok által végrehajtott, a parlagfű-foltok térbeli helyét és az érintett földrészeket pontosan meghatározó helyszíni mérés. A helyszíni mérés alapján határozat készül, és az érintett területek közzétételre kerülnek. Majd igen rövid időn belül megindulhat a tényleges mentesítés, vagyis a parlagfű eltávolítása, az NTSZ irányításával, melynek költségeit utólag a földtulajdonos vagy -használó köteles megfizetni.

2005-ben és 2006-ban a valós idejű védekezésnek három fázisa volt, a parlagfű fő megjelenési időszakainak, illetve a hatékony irtás megfelelő periódusainak megfelelően. Az első fázis az elhanyagolt területeken megjelenő parlagfűre koncentrált, a második a kalászos-növények tarlójára, a harmadik, távérzékelési szempontból nehezebben kezelhető fázis pedig a kapásokban, elsősorban napraforgóban megjelenő parlagfűre.

A távérzékeléses felderítés kétféle térinformatikai adatrendszerrel eredményez. Az egyik egy **veszélyeztetettségi térkép**, amely kétféle területi bontásban készül – **településenként és fizikai blokkonként** –, és az adott területet minősíti egy négyfokozatú skálán a rajta talált parlagfűfoltok és a teljes (mezőgazdasági) terület aránya alapján (ld. 10.3. ábra). Utóbbi térkép nyilvánosan hozzáférhető a FÖMI honlapján, mivel célja a lakosság tájékoztatása a saját hatáskörben elvégzett mentesítés hatékonyabbá tétele érdekében.

A másik kapott adatrendszer a **felderített foltok tételes állománya**,



10.3. ábra. A parlagfű-fertőzöttség településenkénti eloszlását mutató térképek (zöld: nagyon gyenge, citromsárga: gyenge, narancssárga: közepes, piros: erős)

amely az illetékes földhivatalhoz kerül, ahol a foltok alapján helyszíni ellenőrzést hajtanak végre, és amennyiben az ellenőrzés időpontjában megfigyelhető a parlagfű-borítás, eljárást indítanak. A tényleges helyszíni ellenőrzést megelőzi egy útvonaltervezés a térinformatikai adatok alapján. A távérzékeléssel és más módszerekkel felderített foltokra végrehajtott eljárásokhoz jelentős folyamatszervezési és térinformatikai támogatást nyújt a FÖMI által üzemeltetett központi Parlagfű-szerver (Parlagfű-információs Rendszer, PIR). A szerver összeköti a földhivatalok, az NTSZ (illetve utódintézményei, az MgSzH, illetve később a NÉBIH és a Kormányhivatalok) és a FÖMI munkáját, biztosítja a papíralapú eljárásoknál sokkal gyorsabb azonnali elektronikus adatcserét, és a folyamatrészekhez igazodó adatbeviteli, (GPS-szel támogatott) térinformatikai és jegyzőkönyv-készítési, lekérdezési lehetőségeket biztosít.

A parlagfű-felmérési programról összegezve elmondhatjuk, hogy módszertanában és operativitásában kiemelkedő – a parlagfű nehéz beazonosíthatósága miatt más felszín-térképezési feladatokhoz képest is. Jelentős az innovációs értéke: mind a távérzékeléses felmérés, mind a folyamatvezérelt központi térinformatikai szerver fontos újítás a korábbi módszerekhez képest. A parlagfű nehezebb felismerhetősége azonban nyilvánvalóan a találati pontosságot is csökkenti, ezen a területen további fejlesztésre szorul a módszer, valamint a feldolgozás sebességének növelése is előnyös lenne annak érdekében, hogy a fertőzött területek felderítése és mentesítése mindig a kellő időpontban történhessen meg.

#### Távérzékeléses módszertan

A távérzékeléses felmérés a felhasznált felvételek tulajdonságaiból adódóan csak **egy bizonyos mérethatár – általában 0,8 ha – feletti parlagfű-foltok**

**megbízható kimutatására alkalmas.** Ez azonban nem rontja le jelentősen a hatékonyságát, ugyanis a pollenterhelés legnagyobb része a külterületi szántókról származik, amelyekre a parlagfű-területeknek kb. 80%-a esik. Ezekben a területeken jellemzően nagyobb összefüggő parlagfű-foltok találhatóak, amelyek nagyobb képpontméretű űrfelvételeken is beazonosíthatók. A másik fontos szempont a távérzékelés használatával kapcsolatban, hogy a parlagfű fejlődése időben is nagyon változatos lehet: bár a növekedés és a virágzás kezdete köthető az év egyes időszakaihoz (jellegzetes időszaka van az elhanyagolt területeken, a kalászos tarlón és a kapásokban történő megjelenésnek), ezen belül viszont több hetes eltérések is előfordulhatnak. A parlagfű megjelenését azonban pár napos pontossággal kell követni a hatékony védekezéshez. Míg a termesztett szántóföldi növények általában szabályos táblákban helyezkednek el – ezt a tényt fel is használjuk az azonosításukhoz a térbeli elrendezést figyelembe vevő módszerekkel, például szegmentálással –, addig a parlagfű, és általában a gyomnövények eloszlására éppen a szabálytalanság jellemző. A parlagfű tehát időben és térben is szabálytalanul viselkedik a termesztett növényekhez képest. Ez egyrészt önmagában megnehezíti a felismerését, másrészt viszont éppen **a szabálytalanság teszi lehetővé a kultúrnövényektől való elkülönítést, a kultúrnövények tábláiban a parlagfű-foltok detektálását.**

A kimutatás során – részben a fentebb említett, időben és térben szabálytalan fejlődés miatt – nem hatékony a „klasszikus”, maximum likelihood-döntéssel alapuló osztályozási módszertan. Ehelyett **a növény fejlődésének időbeli menetére jobban építő, több felvétel beépítését lehetővé tevő és a felvételek konkrét időpontjától jobban függő feltételeken alapuló összetett osztályozási módszertan használható.** Az űrfelvételek kvantitatív kiértékelése és az eredmények validációja helyszíni adatgyűjtéssel történik meg.

A parlagfű-foltok távérzékeléses kimutatása alapvetően a „hagyományos” nagyfelbontású felvételek – elsősorban Landsat TM és IRS LISS – felhasználásával történik. Ezekben felül nagyon fontos szerepe van az IRS P6 és R2 műholdak AWiFS szenzora által készített felvételeknek, amelyek 60 m-es térbeli felbontással jól használhatók a 20-30 m-es pixelméretű nagyfelbontású felvételekhez integrálva. A szenzor nagy területi lefedése és viszonylag gyakori visszatérése miatt kellően sűrű távérzékeléses adatsor összeállítását teszik lehetővé abban az – éven belüli korlátos – időszakban, amikor van értelme végrehajtani a parlagfű-mentesítést. 2005-ben összesen mintegy 80 űrfelvétel felhasználására került sor, amelyek segítségével lényegében az ország teljes területére keletkezett távérzékeléses felderítési eredmény.

2009-ben a FÖMI tett egy kísérletet a szuperfelbontású (VHR) felvételek parlagfű-monitorozásba történő bevonására. Míg a hagyományos módszertan feladata a parlagfüves táblák felismerése nagy területen történő mintavételezéssel, addig a szuperfelbontású felvételek felhasználásának célja a fertőzöttnek bizonyult táblákban a parlagfű-foltok pontos lehatárolása és dokumentálása. Ezzel a klasszikus helyszíni mérések terhe csökkenthető. Bár ezt a fajta felmérést bonyolult lenne országos méretben kivitelezni, de kisebb mintaterületeken a továbbiakban is végrehajtható. A kísérleti projekt eredményeként megállapítható, hogy a szuperfelbontású felvételek térbeli tulajdonságaira, ezen belül elsősorban a textúra felismerhetőségére, a kultúrnövények szabályos és a parlagfű szabálytalan mintázatának elkülönítésére alapozva hatékonyan elvégezhető a parlagfű-foltok elkülönítése a táblákon belül.

2011-ben pedig a szuperfelbontású felvételek objektum-orientált feldolgozá-

sának irányába történtek lépések, amely a térbeli információ, a textúra kiaknázásának lehetősége miatt ígéretes lehetőségnek látszott. A kísérletben nem volt cél a „hagyományos” pixelalapú módszernél jobb eredményt előállítás – a pontosságvizsgálat lépésében a szegmensalapú osztályozás eredményét a pixelalapú eredmény volt az összehasonlítási alap, referencia. A szegmentálás és az osztályozás több iterációban történt, különböző növényfajok és felszínborítási kategóriák felismerését megcélözva. Az egyes növényfajok elemzésén belül fontos lépés volt a parcellák belsejében található, parlagnál jelenlétéből származó inhomogenitások kimutatása. A kísérlet eredményeként bebizonyosodott, hogy egyféle szegmentálási módszer, nevezetesen a Multiresolution Segmentation alkalmazásával – az alaktényezőt nagy súllyal figyelembe véve – elérhetjük a kívánt eredményt. A teljes osztályozási folyamat végeredményeként összességében mintegy 90%-os egyezés volt megfigyelhető a pixelalapú eredményhez képest.

## 10.6. Gyapjaslepke kártételének kimutatása

### Általános áttekintés

2004-től kezdve a FÖMI munkájában jelentős figyelmet kapott a gyapjaslepke hernyója által okozott kár, amely elsősorban az erdőterületeket sújtja. Az okozott kár közvetlenül a levélzet, a lombkorona elvesztése, amely közvetetten növedékvesztést, a faanyag minőségének romlását, a magtermés kimaradását, esetleg teljes fák elpusztulását okozza. A lombzat elvesztése a fák vízmegtartó képességét drasztikus mértékben lecsökkenti, emiatt fokozódik a talajerózió, illetve egyéb negatív változások következnek be a talaj szerkezetében, összetételében. A károsítás áterjedhet az erdőkkel szomszédos mezőgazdasági területekre is. A gyapjaslepke hernyójának inváziója így közvetetten a teljes erdei állatvilágra, valamint emberi vonatkozásban az egészségkárosító hatáson túl egyebek között az idegenforgalomra is negatívan hat.

A kártétel monitorozását azzal tudja nagy mértékben támogatni a **távérzékelés**, hogy **nagy területről ad egységes, átfogó képet, kellő időben. Az űrfelvételeken látható, vegetációt érintő, a rágáskárt valószínűsítő jelek alapján** az illetékes hatóságok a veszélyeztetettnek jelölt területekre koncentrálnak **helyszíni vizsgálattal fel tudják mérni a tényleges kár jellegét és súlyosságát**, és meg tudják tenni a kellő intézkedéseket.

Az űrfelvételekkel történő monitorozás 2004-ben kezdődött kísérleti jelleggel, az Erdészeti Tudományos Intézettel (ERTI) együttműködve, majd 2005-ben és 2006-ban is folytatódott. A két év vizsgálatai elsősorban a Balaton térségére irányultak, különböző területi lefedéssel. 2006-ban az Északi-Középhegység erdői károsodtak a legsúlyosabban, így a vizsgálatok is inkább erre a területre koncentráálódtak a Balaton térségén kívül.

A 2004-ben, 2005-ben és 2006-ban is végrehajtott regionális vizsgálat nagy és közepes felbontású űrfelvételek felhasználásával történt. A növényterképezésben általánosan használt nagyfelbontású űrfelvételek mellett 2004-ben IRS WiFS, 2005-ben és 2006-ban pedig IRS AWiFS felvételek kerültek alkalmazásra. Mind a három évben használtunk ENVISAT MERIS űrfelvételeket is, amelyek a 15 spektrális sávnak – ezen belül főleg a vörös tartományban elhelyezkedő 3 és az infravörös tartományt lefedő 4 sávnak – köszönhetően különösen alkalma-

sak a lombvesztés kimutatására a klorofill-elnyelés (fotoszintézis) csökkenésén keresztül.

2005-ben ezen kívül kistérségi vizsgálat is történt Balatonboglár környékén egy szuperfelbontású IKONOS felvétel segítségével, amely az erdők monitorozásán túl lehetővé tette a szomszédos mezőgazdasági területek – elsősorban szőlők, gyümölcsösök – károsodásának felmérését.

### **Távérzékeléses módszertan**

**A gyapjaslepke kártételének vizsgálata az aktuális állapot és egy (vagy több) referencia-időpont összehasonlításával történik.** A referencia-állapot alapján követhető a rágáskár kiterjedésének térbeli alakulása, illetve az invázió megszűnése után a növényzet regenerálódása. **A referencia-időpont általában egy olyan időpont a vizsgálat évében, amikor már lombosak a fák, de nem kezdődött meg a károsodás.** Felhasználhatók azonban korábbi évek adatai is, amellyel az összehasonlítás stabilabbá, kevésbé helyspecifikussá tehető. Az úrfelvételek által tükrözött és a helyszínen észlelhető állapot egymásnak való megfeleltetése terepi kalibrációs mérésekkel történik, GPS-szel felszerelt integrált térinformatikai rendszer segítségével. Amennyiben kifejezetten csak az erdőterületek vizsgálata a cél, a felmért terület a CORINE felszínborítási adatbázis alapján szűkíthető. A felmérés eredménye egy tematikus térkép, amelyen a kategóriák a károsodás mértékének felelnek meg. **Előállítás az eddigi gyakorlatban a klasszikus, maximum likelihood-döntéson alapuló osztályozási módszertannal, valamint vegetációs index időbeli (éven belüli, illetve különböző évek közötti) változását felhasználó módszertannal is történt.**

A gyapjaslepke hernyója által okozott rágáskár távérzékeléssel történő felmérése egyedi, innovatív kezdeményezés. Korlátai között említhető, hogy a fák távérzékeléssel kimutatott lombvesztése nem utal egyértelműen a gyapjaspille okozott kárra, más tényező is okozhatja, emiatt szükséges a helyszíni megerősítés. A kísérleti, kutatási eredmények utáni lehetséges továbbfejlesztés a felmérések operatívvá tétele.

## 11. fejezet

# Távérzékelési alkalmazások fejlesztése

A korábbi fejezetek elméleti és gyakorlati megfontolásai megadják a megfelelő háttérrel távérzékeléses alkalmazások megvalósításához. Mint látható, számos különböző algoritmus kap szerepet az elemzés során, illetve az elemzés egyes lépései különböző módszerekkel valósíthatók meg, a paraméterezésről nem is beszélve. Emiatt az elemzést ténylegesen folyamatként kell megvalósítanunk, amelynek egyes lépéseit külön-külön szabályozhatjuk, paraméterezhetjük.

Mivel sok esetben komplex számításokat végzünk, illetve nagy mennyiségű adattal dolgozunk, a hatékonyságra is nagy hangsúlyt kell fektetnünk. A folyamat végrehajtása során nem mindig tárolhatjuk el a teljes köztes állapotát egy felvételnél, sőt nagy felbontású felvételek esetén eleve nem tárolhatjuk a teljes adathalmazt a memóriában.

Természetesen nem kell alapjaiból felépítenünk a szoftvert, hiszen számos programkönyvtár, alkalmazás-fejlesztési csomag áll rendelkezésünkre, amelyre a szoftverünket építhetjük. Ilyen népszerű programcsomagok a GDAL / OGR<sup>1</sup>, illetve az Orfeo Toolbox<sup>2</sup>. A direkt térinformatikai/távérzékelési könyvtárak mellett a pusztán képelemzéssel foglalkozó megoldások (pl. OpenCV<sup>3</sup>, ImageJ<sup>4</sup>) is jól használhatóak egyes feladatoknál.

Ebben a fejezetben az alapoktól indulva betekintünk a távérzékelési alkalmazások fejlesztésébe, kezdve az adatmodellezéssel, illetve az adatok tárolásának legnépszerűbb megoldásaival, folytatva az algoritmusok és folyamatok megvalósításának megoldásaival néhány konkrét feladaton keresztül.

Az alkalmazásokat az *AEGIS keretrendszer* [15] segítségével valósítjuk meg. Az AEGIS programcsomag az ELTE Informatikai Karán fejlesztett térinformatikai adatkezelő és feldolgozó könyvtár, amely elsősorban oktatási és kutatási célokat szolgál. Megvalósításában fontos szempont az áttekinthetőség, általánosítás, illetve az ipari szabványok betartása, így megfelelő környezetet biztosít a megoldások megismerésére. A rendszert objektumorientált szemléletmóddal, .NET<sup>5</sup>,

<sup>1</sup> <http://www.gdal.org/>

<sup>2</sup> <http://orfeo-toolbox.org/otb/>

<sup>3</sup> <http://opencv.org/>

<sup>4</sup> <http://imagej.nih.gov/ij/>

<sup>5</sup> <http://www.microsoft.com/net>

illetve Mono<sup>6</sup> keretrendszerekben implementáljuk, C# programozási nyelven, ami köszönhető egyaránt a C# nyelv könnyen elsajátítható, jól értelmezhető szintaxisának és kódolási konvencióinak, valamint a keretrendszer által nyújtott szolgáltatások sokaságának.

## 11.1. Adatkezelés és modellezés

Távérzékelési adatok kapcsán elsősorban a raszteres tartalomra gondolunk, de emellett számos kiegészítő adattal kell dolgoznunk, például a vetületi és leíró információkkal, vagy a feldolgozás során keletkezett vektoros adatokkal (pl. részterület kijelölések). Fontos az is, hogy a pixelek nem csupán intenzitásértékekkel, de térbeli koordinátával is rendelkeznek.

Bár a képi tartalom számítógépes ábrázolása eléggé egyértelmű, a további információk együttes kezelése már több megfontolást igényel. Ugyan számos szabvány áll rendelkezésre tér adatok modellezése kapcsán, raszteres térinformatikai adatok leképezésére nincs általánosan bevett megoldás, ezért némileg más megoldásokra támaszkodva, némileg egyéni koncepciók alapján kell gondolkoznunk.

A térinformatikai rendszerek jelentős része az *Open Geospatial Consortium*<sup>7</sup> (OGC) szabványaira támaszkodik. Az OGC számos megoldást kínál, ám elsősorban a vektoros megoldásokra koncentrálva. Az adatábrázolás kapcsán az elsődleges formátum a *Simple Feature Access (SFA)* szabvány, amely egy objektumorientált hierarchiában definiálja a tér adatok reprezentációjának módját [20]. Ebben a szabványban az őosztály a geometria (*Geometry*), amely megadja a minden alakzatra alkalmazható elemzési (pl. egyenlőség, tartalmazás, metszés, átfedés), illetve transzformációs műveleteket (pl. unió, különbség, puffereles, konvex burok). A *Geometry* leszármazottai a pont, szakaszsorozat, poligon, illetve a háromszögrács definiálják a vektoros alakzatok megjelenéseit az egyes koordinátadimenziókban.

Egy másik fontos szabvány a *Spatial Referencing by Coordinates (SRC)*, amely a vetületi rendszerek és vetítések egységes leképezését tartalmazza [3]. A vetületi rendszerek, és közöttük lévő átalakítások is külön csoportokba vannak sorolva, a transzformációs algoritmusok pedig paraméterezhetőek a konkrét vetületnek megfelelően. Mivel számos vetület és transzformáció ismert, az azonosítás végett egy közös adatbázist hozott létre az *OGP Geomatics Committee*<sup>8</sup>, avagy korábbi nevén *EPSG*, ahol egyedi azonosítók alapján történik az egyes elemek kezelése. Az EPSG kódok számos alkalmazásban, illetve adatformátumban biztosítják a vetületek beazonosítását.

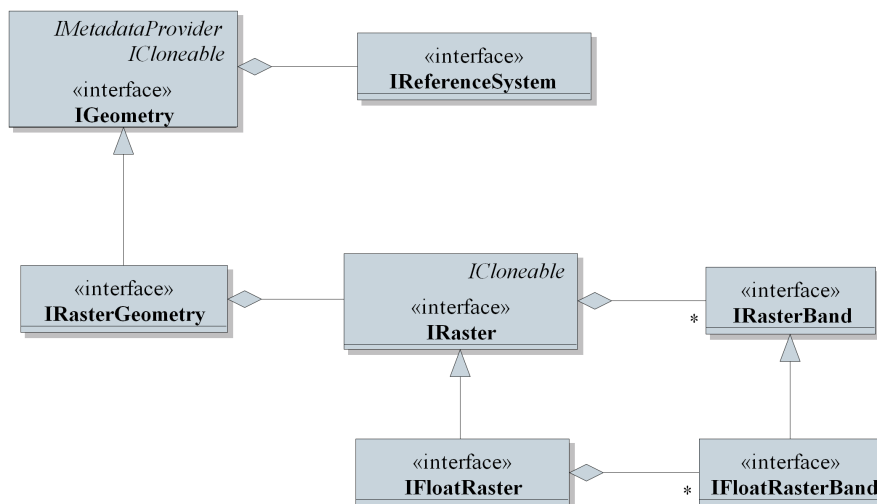
Az AEGIS keretrendszer mind az SFA, mind az SRC szabványokra támaszkodik, efelett biztosítja a további nem térbeli segédinformációk, a *metaadatok* megőrzését, valamint raszteres tartalmak kezelését. Annak érdekében, hogy a rendszer egy közös adatmodellel dolgozhasson, a raszteres tartalmat a rendszer az SFA modellen belül tárolja, speciálisan *RasterGeometry* néven. Geometriailag a kép egy poligon formájában jelenik meg, amelyre rávetítjük a raszteres pixeleket, mint textúrát. Maga a *Raster*, mint külön lekérdezhető objektum természetesen lehetőséget ad képpontként történő műveletvégzésre. Mivel a táv-

<sup>6</sup> <http://www.mono-project.com/>

<sup>7</sup> <http://www.opengeospatial.org/>

<sup>8</sup> <http://www.epsg.org/>

érzékelésben nem csak egész, hanem valós intenzitásértékekkel is dolgozni kell (pl. spektrális indexek számítása során), speciálisan a **Raster** lehet egész, illetve valós műveletekkel is ellátva a megfelelő interfész (**IRaster**, **IFloatRaster**) megvalósításával. Ez a megközelítés látható a 11.1 ábrán.



11.1. ábra. Az AEGIS raszterkezelési adatmodellje

Ebben a modellben a raszteres tartalom térben, illetve képileg is kezelhető, és nem okoz gondot az esetleges vektoros tartalommal való együttműködés (pl. feldolgozandó terület kijelölése). Ehhez egy egységes topológiai modellt biztosítunk, ahol a képi tartalmat is átképezzük topológiai gráf alapú reprezentációra, a [44]-ben vázolt koncepció alapján, így a térbeli műveletek egységen megfogalmazhatóak, és nincs szükség speciális esetekre.

## 11.2. Adattárolási megoldások

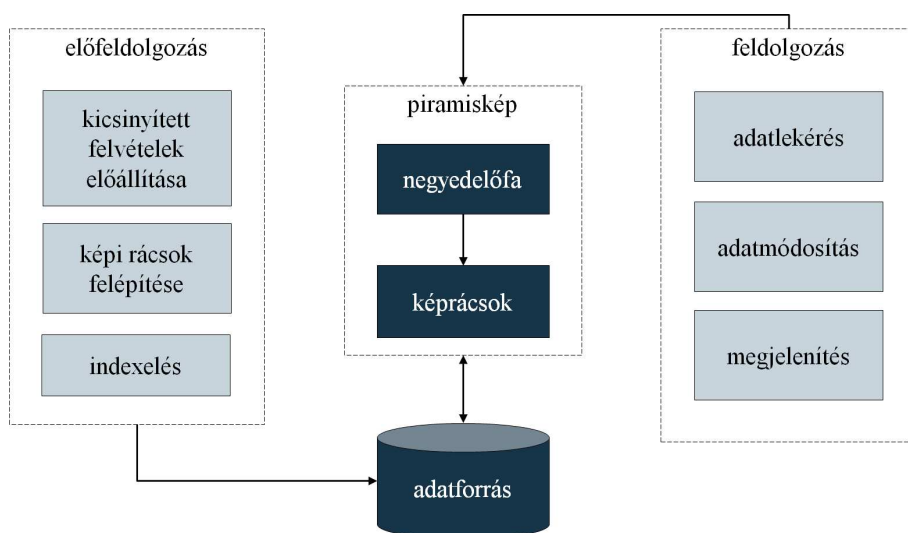
A távérzékelt felvételek, mint minden képi tartalom, bináris formában kerül tárolásra mind fájlként, mind adatbázisbeli tartalomként. Képi tartalomra számos fájlformátum adott, a legnépszerűbbek (JPEG, GIF, PNG) azonban korántsem alkalmasak távérzékelt felvételek tárolására. Ha távérzékelt felvételt akarunk tárolni, a következő követelményeknek kell eleget tennünk.

- Biztosítani kell tetszőleges sok sáv tárolásának lehetőségét, hogy a multispektrális felvételek kezelése ne okozzon problémát. A legtöbb formátum tárolási módszere sajnos kimondottan az RGB formátumra optimalizált.
- Támogatnia kell sávonként nagyobb radiometriai felbontásokat, illetve a különböző sávok más felbontásban történő tárolását. A felvételező rendszerek gyakorta rögzítenek 16 bites felbontású információt egyes sávokra (sőt, ennél nagyobb radiometriai felbontás is előfordul), míg sok képformátum megelégszik a 8 bites vagy kisebb (sávonkénti) színmélységgel, amely az emberi szem számára megfelelő felbontást nyújt.



- Amennyiben adattömörítést alkalmaz, biztosítani kell a veszteségmentes tömörítés lehetőségét az adatvesztés elkerülésére.
- Biztosítani kell a képi tartalom mellett tetszőleges leíró adat eltárolását, elsősorban a földrajzi információkat, de számos egyéb skaláris, illetve szöveges leíró adat is hasznos lehet a későbbiek során.
- Nagy felbontású felvételek esetén hasznos, ha lehetőséget ad piramisrétegek tárolására, illetve előállítására. A piramisrétegek az eredeti felvétel kicsinyített formái, amelyek lehetőséget adnak a programoknak a gyors betöltésre, illetve megjelenítésre.

Amennyiben a formátum nem támogatja a piramisrétegek tárolását, képi tartalom részleges lekérdezését, célszerű a feldolgozás előkészítéseként a tárolás és a lekérdezések optimalizálása céljából létrehozni a kicsinyített felvételeket, és a teljes képi tartalmat megfelelő méretű – a memóriában könnyen kezelhető – rácsoakra bontani. A rácsokat piramisbeli pozíciójuk alapján indexelhetjük, *negyedelőfa* (*quadtree*) [13] segítségével, így a későbbiekben könnyen elvégezhető a részképek lekérdezése (lásd 11.2 ábra).



11.2. ábra. A távérzékelt felvételek előkészítése feldolgozásra. Előfeldolgozás alatt itt a tárolás és a lekérdezések optimalizálása érdekében elvégzett előkészítési műveleteket értjük.

Kimondottan távérzékelt felvételek tárolására több formátum is adott, amelyek lehetnek általánosan használhatóak, úgymint a *GeoTIFF*, adott szoftverhez kötöttek, mint az *ERDAS Imagine Image Format*, vagy adott feladatra specifikált, ilyenek a nyers bináris formátumok, a *BIL*, *BIP* és *BSQ*. A bináris képi fájlok mellett előfordulhatnak különböző segédfájlok, amelyek bináris, vagy szöveges tartalmat tárolnak. Ilyen lehet a vetületi rendszer, vagy a kép metaadatai. Ezek szintén lehetnek szabványos formátumban, pl. vetületi rendszerek esetén a *Well-known text* (WKT) formátum, amely az SFA szabványban definiált.

Adatbázisbeli tárolás esetén bár szinte minden adatbázis-kezelő támogatja a bináris (blob) információt, ez önmagában nem ad lehetőséget képfeldolgozási, illetve térinformatikai műveletek végrehajtására. Erre speciális tárolási formátum szükséges, úgymint az *Oracle GeoRaster*, vagy a *PostGIS Raster*. Míg előbbi meglehetősen komplex, és jelentős rendszerbeli ismereteket igényel, a PostGIS adatformátuma igyekszik egy egyszerűbb, könnyen elsajátítható mechanizmust kínálni, így ezt vizsgáljuk meg alaposabban a későbbiekben.

Az AEGIS rendszerben köszönhetően az adatkezelés egységesítésének, a tárolási megoldások uniform kezelése is megoldott. Az adatfolyamokat feldolgozó olvasó (*GeometryStreamReader*) és író (*GeometryStreamWriter*) típusok biztosítják a feldolgozás általános kereteit, specializációik pedig a konkrét formátumok kezelését. A feldolgozás történhet egy lépésben, illetve részlegesen is, pl. raszteres tartalom esetén akár soronként, vagy pixelenként olvashatjuk/írhatjuk a tartalmat. Ehhez a rendszer a helyettes (proxy) tervminta [14] alkalmazásával biztosít olyan osztályokat, amelyek csak felhasználásuk esetén olvassák, illetve írják az egyes képrészeket (*OnDemandRaster*), így nem kerül a teljes kép a memóriába. Persze, mivel formátumonként változó, hogy mennyi tartalmat érdemes egy lépésben olvasni, illetve a memóriában tartani, ezért formátumonként külön kell megvalósítani a beolvasás, illetve gyorsítótárkezelés módját.

### 11.2.1. A nyers bináris képformátum

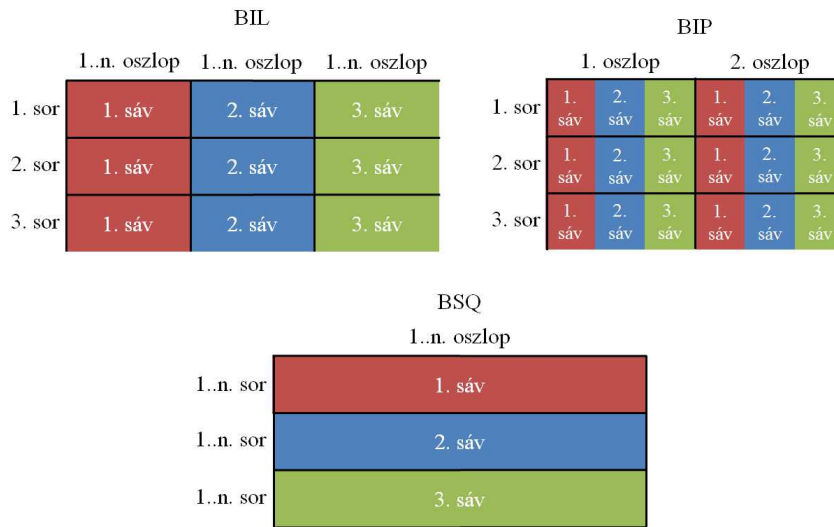
Mínt hogy a raszteres kép leírható a pixelek spektrális értékeivel, a legegyszerűbb megoldás a raszteres információ tárolására a pixelértékek egymás utáni kiírása. Mivel nem alkalmaz semmilyen kódolást, tömörítést, és a teljes fájl csak képi adatokat tárol, az egyes értékek fájlban belüli pozíciója könnyen kiszámolható, ami nagyon rugalmas keresést, beolvasást eredményez. Ennek köszönhetően a gyakorlatban inkább a nagy felbontású, főleg hiperspektrális felvételek tárolására alkalmazzák. Természetesen tömörítés híján a fajlméret könnyen megnőhet, akár több gigabájtos fájlokkal is találkozhatunk, így az olvasók rendszerint csak egyes fájlrészeket dolgoznak fel, nem a teljes tartalmat.

Igazából nem is egy formátumról, hanem formátum csoportról beszélünk. Bár minden esetben a képpontok a bal felső saroktól sorfolytonosan helyezkednek el a fájlban, az egyes sávok elhelyezése különbözőképpen oldható meg, így 3 variánsa is elterjedt. Ezek szerkezete látható a 11.3 ábrán.

- *Band interleaved by pixel*<sup>9</sup> (*BIP*) esetén a sávok pixelenként váltakoznak, így először az első sor első pixelének összes sávbeli értékét olvashatjuk, majd a az első sor második pixelét, és így tovább. A formátum akkor hasznos, amikor egyes képrészekkel dolgozunk, de valamennyi sáv adataira szükségünk van.
- *Band interleaved by line*<sup>10</sup> (*BIL*) a leggyakoribb megoldás, amelyben a képet sorokra bontjuk, majd az egyes sorokat sávonként rögzítjük. Azaz a fájl elején az első sor első sávjának értékei találhatóak, majd az első sáv második sávjának értékei, majd a további sávok, és ezt követi a második sor ugyanilyen sorrendben. Ez a sorrendiség akkor hasznos, amikor a sávokkal külön-külön dolgozunk, hiszen így mindig megfelelő mennyiségű adatot tudunk egyszerre olvasni a fájlból.

<sup>9</sup><http://www.digitalpreservation.gov/formats/fdd/fdd000305.shtml>

<sup>10</sup><http://www.digitalpreservation.gov/formats/fdd/fdd000304.shtml>



11.3. ábra. A BIL, BIP és BSQ formátumok bináris tárolása

- *Band sequential*<sup>11</sup> (*BSQ*) formátumban a sávokat helyezzük egymás után, azaz először az első sáv összes értékét olvashatjuk, majd a második sávét. Ez a megoldás szintén akkor hasznos, ha a sávokkal külön dolgozunk, és nagy mennyiségű adatot (egy sornál többet) szeretnénk egyszerre beolvasni a memóriába.

A bináris formátum olvasóknak tehát különös tekintettel kell lenniük a hatékony beolvasásra, és arra, hogy kihasználják a megadott formátum előnyeit. Ugyanakkor nem csak ez jelent kihívást, hanem a leíró adatok beolvasása is. Mivel a fájl maga csak a képi adatokat tartalmazza, a további információk egy külön fejlécfájlban találhatóak (pl. képméret, radiometriai felbontás, földrajzi koordináták). A fejlécfájl egy szöveges állomány, formátuma viszont többféle lehet (a legelterjedtebb az ESRI formátum, de számos más cég definiált saját megoldást), ezért sokszor külön, kézzel kell feldolgozni, és a kép olvasásához megadni a megfelelő paramétereket. Emellett további segédfájlok is kísérhetik a raszttert, pl. vetületi fájl WKT formátumban.

### 11.2.2. A GeoTIFF formátum

A GeoTIFF<sup>12</sup> formátum, mint a neve is jelzi, a *TIFF* formátum egy specializációja. Az eredeti nevén *Tagged Image File Format*, azaz címkézett képformátum fő erényei, hogy rendkívüli testreszabhatóságot biztosít a képi tartalom leírására, illetve alkalmas tetszőleges további leíró információ tárolható benne.

A TIFF formátum alapját moduláris szerkezete biztosítja, ugyanis az információkat azonosítókkal (címkékkel) ellátott mezőkben tárolja. Minden címke meghatározott tartalmat jelöl, a címkék pedig egy képfájl leíró táblában (*Image*

<sup>11</sup> <http://www.digitalpreservation.gov/formats/fdd/fdd000289.shtml>

<sup>12</sup> <http://trac.osgeo.org/geotiff/>

*File Directory, IFD*) helyezkednek el. A címkék egyrészt képi információkat tárolnak (pl. kép mérete, felbontása, sávok száma, szintere, tömörítése, elhelyezkedése a fájlban belül), másrészt tetszőleges további információt (skaláris, illetve szöveges értéket) tárolhat. A képi információk úgynevezett *strip*-ekben találhatóak. Egy *strip* tartalmazhatja a teljes képet, de egy képet több *strip*-be is fel lehet osztani. Utóbbi előnye, hogy amennyiben a tartalmat párhuzamosan, vagy elosztottan dolgozzuk fel, az egyes *strip*-ek kezelése egymástól függetlenül történhet. Több tömörítési megoldás is támogatott, illetve lehetőség van veszteségmentes tömörítésre is (pl. módosított Huffman kódolás, illetve LZW). Egy fájlban több IFD is elhelyezkedhet, amelyek különböző képek információit tárolják. Emellett alkalmas arra is, hogy nagyobb felbontású felvételeket részekre, úgynevezett *tile*-okra osszon.

A GeoTIFF formátum annyiban bővíti az eredeti szabványt, hogy a térbeli információk címkékben történő tárolását szabályozza. Így lényegében a GeoTIFF fájlok teljesen kompatibilisek a TIFF formátummal, és szinte bármely képnézegető programmal megtekinthetők. 3 bejegyzés (*GeoKeyDirectoryTag*, *ProjectionInfoTag*, *CoordSystemInfoTag*) segítségével tárolhatjuk el a vetületi információkat, további 3 (*ModelPixelScaleTag*, *ModelTransformationTag*, *ModelTiepointTag*) pedig a kép földrajzi elhelyezkedésére vonatkozó adatokat írhatjuk le.

A GeoTIFF összesen két koordináta-rendszert különböztet meg, a *raszterteret* (*raster space*), amely a képi pixeleket indexeli, illetve a *modellteret* (*model space*), amely a földrajzi koordinátákat tárolja. Utóbbihoz való hozzárendelésnek két módja is van. A kép felfogható úgy, hogy az egyes pixelértékek földrajzi koordinátáit adjuk meg (*PixelIsPoint*), vagy úgy, hogy a pixelek területet ábrázolnak, és azok sarokkoordinátáit kapcsoljuk a modell koordinátákhoz (*PixelIsArea*).

A formátum a vetületi rendszereket EPSG kódok alapján adja meg, illetve egyedi rendszerben lehetőséget ad a transzformációs paraméterek megadására, sőt egyedi vetítés esetén a transzformációs polinom közvetlen definiálására.

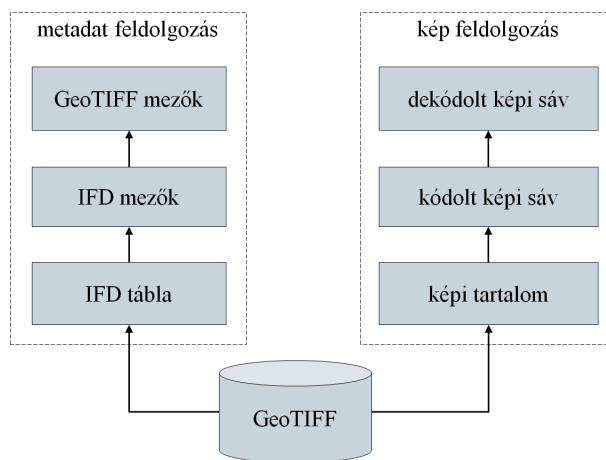
Amennyiben GeoTIFF olvasót valósítunk meg, szorítkozhatunk a TIFF szabvány alapvető elemeire (baseline TIFF), illetve támogathatunk számos kiegészítést, például a piramisképek kezelése. Ügyelni kell arra, hogy bizonyos szoftverek nem teljesen szabványos TIFF fájlokat állítanak elő (pl. kötelező tag kihagyása az IFD-ből), de a hiányzó információk minden esetben előállítható egyéb adatok alapján. A fájl feldolgozása során elsőként az IFD táblákat olvassuk ki, és amennyiben a kép több részből áll, mindig csak a szükséges képrészeket töltjük be. Amennyiben a képünk tömörítést használ, két lépésben célszerű a beolvasást elvégezni (ügyelve a két lépés közötti megfelelő gyorsítótárhasználatra).

Összesítve tehát elmondható, hogy a GeoTIFF formátum feldolgozása a leíró adatok és a képi tartalom szintjén is több lépésből áll, ahogy ez az 11.4 ábrán is látható.

### 11.2.3. A PostGIS raszter

A PostgreSQL/PostGIS<sup>13</sup> adatbázis-kezelő szintén az SFA szabványra épülve építi fel a téradatokat tárolását, amihez a raszter típust külön illesztették hozzá. A rendszer a raszteres tartalmat a GDAL programcsomag segítségével tölti be,

<sup>13</sup><http://postgis.net/>



11.4. ábra. A GeoTIFF feldolgozás lépései

illetve lehetőséget ad a raszteres fájl adatbázison kívüli tárolására is, ekkor is a GDAL funkcióit veszi igénybe.

Magában az adatbázisban a kép *raster* típusként kerül tárolásra az adatbázis-táblában. Az ilyen típusú oszlopok igazából hivatkozások egy külön táblára (*Raster data table*), amely több oszlopban tárolja az adatokat, egyikben a képi tartalmat binárisan, BSQ formában, míg a többiben a tulajdonságokat (pl. méret, felbontás) és a vetületi rendszert. Ezen felül egy további tábla (*Raster column table*) azonosítja be az adatbázisban tárolt raszteres táblákat, illetve leíró tulajdonságaikat. A táblán belüli raszterekre nincs semmilyen megszorítás, így egy gyűjteménybe bármilyen tartalom bekerülhet.

A raszterre létrehozható piramiskép, illetve maszk, amelyeket az alkalmazások később figyelembe vehetnek. A rendszer azt is lehetővé teszi, hogy bármilyen, az SFA szabványban definiált, és vektoros tartalomra alkalmazható térbeli művelet ugyanolyan módon alkalmazható raszterre is, beleértve az átalakítást WKT/WKB formátumra. Természetesen a művelet végrehajtáshoz a raszteres tartalmat a rendszernek át kell alakítania gráfos formára, így ezek végrehajtása költséges művelet. A műveletek akkor is futtathatóak, ha a rasztert az adatbázison kívül tároljuk, ekkor a beépített GDAL programkönyvtár felelős a művelet lefuttatásáért, és az eredmény betöltéséért.

### 11.3. Távérzékelési műveletek megvalósítása

A térinformatikai, távérzékelési rendszerekben a végrehajtható műveletek köre mindig kritikus kérdés. Vektoros alakzatok esetén a műveletek jórészt a térbeli átalakításokra, elemzésekre korlátozódnak, raszteres esetben azonban főleg a képelemző műveletek kapnak hangsúlyt.

A műveleteket a végrehajtás helye szerint két csoportba sorolhatjuk, a helyben történő feldolgozásra (*in-place*), valamint egy másik felvételre történő leképezésre (*out-place*). A térbeli műveletek, valamint a képi műveletek egy része is a második csoportba sorolható, de egyes képi műveletek helyben is megvaló-

síthatóak, ami a memóriahatékonyaság szempontjából fontos – hiszen nem kell újabb területet lefoglalnunk az eredményképnek.

A műveleteket munkaterülete (*working space*) – az egy lépés végrehajtásához szükséges forrásadatok mennyisége – szerint négy csoportot különböztetünk meg:

- *Lokális művelet*: a forrásnak egy képpontjával dolgozik, amelyet a cél egy képpontjává alakít át. Nevezhetjük képpontonkénti műveletnek is. A leg-egyszerűbb képi transzformációk – mint az invertálás, küszöbölés – lokális műveletek.
- *Fokális művelet*: a forrásnak több képpontjával dolgozik, amelyek egy adott képpont valamilyen sugarú környezetén belül helyezkednek el, és ezek alapján állítja elő az eredménykép egy képpontját. A geometriai transzformációk jelentős része, illetve egyes képi műveletek, pl. a különböző szűrők alkalmazása is ebbe a körbe tartozik.
- *Regionális művelet*: a forrásnak több képpontjával dolgozik, amelyek egy adott képpont valamilyen sugarú környezetén belül helyezkednek el, és ezek alapján állítja elő az eredményképben képpontok egy csoportját. Ide sorolható a szegmentáló algoritmusok jelentős része.
- *Globális művelet*: a teljes forrás ismerete alapján alakítja ki az eredményképet. A legtöbb klaszterező algoritmus ebbe a csoportba sorolható, hiszen a klaszterek kialakítása során nem veszik figyelembe a képpont elhelyezkedését a képen belül, csak annak spektrális jellemzőit.

A munkaterületek szerint ezen felül még megkülönböztethetők az egy sávon, illetve több sávon dolgozó algoritmusok. Míg sok művelet sávonként elvégezhető, bizonyos műveletek, pl. a spektrális indexek számítása több sávbeli információ alapján alakítja ki az eredményképet. Speciális esetben egy adott művelet dolgozhat több forrásképpel is (pl. adatfúzió esetén), vagy több eredményképet is előállíthat. Ezen utóbbi tényezők az implementációs megoldásokra általában kevesebb befolyással bírnak.

A munkaterület elsősorban az algoritmusok párhuzamosítása során játszik szerepet. A lokális, fokális műveletek könnyen párhuzamosíthatók anélkül, hogy bármilyen konkrét információknak lenne a műveletről, hiszen az egyes képpontok kiértékelése független egymástól. Ennek megfelelően tetszőleges sok párhuzamos folyamatot indíthatunk, amelyeknek megadjuk a kép – vagy a kijelölt terület – egyes részeit. Regionális műveletek esetén már célszerű egymást átfedő területekre bontanunk a felvételt, és a kapott eredményeket összefuttatni. Ez sok esetben elegendőnek bizonyul, de nem tud tetszőlegesen nagy területeket lefedni. Egy globális művelet is sok esetben elvégezhető részképeken, de az eredményeket itt már mindenképpen össze kell futtatni, amelynek módszere már a konkrét algoritmustól függ.

Az általános megfontolásokon túl tekintsük végig térbeli, illetve képi transzformációk egyes implementációs jellemzőit.

### 11.3.1. Térbeli műveletek

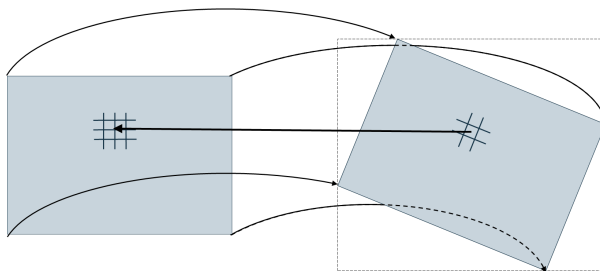
A szabványos térbeli műveletek már az SFA szabványban definiáltak, így a legtöbb térinformatikai programcsomagban, illetve térbeli adatbázis-kezelőben (pl.

PostGIS, Oracle) találkozhatunk velük. Ezeket a műveletek két csoportra bontjuk: relációs műveletek (pl. egyenlőség, metszés, átfedés vizsgálat), valamint elemzési műveletek (pl. távolságmérés, unióképzés, puffer előállítás, konvex határoló geometria visszaadása). A műveletek a szabványban csak vektoros esetre definiáltak, de a raszterre is kiterjeszthetők, amennyiben a rendszer kezeli annak gráfes reprezentációját [44].

A szabványban megadott funkciók mellett természetesen tetszőleges térbeli átalakítást végezhetünk. Ezek közül a legegyszerűbbek a lineáris (*affin*) transzformációk, pl. az eltolás, forgatás, méretezés és ferdítés. Magasabb fokú polinomokkal történő leképezések is definiálhatók, pl. a 4.2. szakaszban említett georeferálás kapcsán. A számításokat mátrixos formában valósítjuk meg, és kiszámítjuk az inverz transzformációt (mátrixot) is, ami azért szükséges, mert nem a forráspixelexre alkalmazzuk a leképezést, hanem a célkoordinátákon haladunk végig, és adjuk meg – az inverz leképezés segítségével –, melyik forráskoordináta tartozik hozzá, így összetettebb leképezések esetén nem fordulhatnak elő „hézagok” az eredményképben. Természetesen amennyiben nem egyértelmű a megfeleltetés, újramintavételezést kell végeznünk (lásd 4.2. szakasz), amelyre több módszer is adott. Magát az eredményképet ekkor 4 lépésben állíthatjuk össze, amelyek a következők.

1. Transzformációs mátrix előállítása.
2. Eredménykép dimenzióinak meghatározása a sarokpontok transzformációjával.
3. Inverz transzformációs mátrix meghatározása.
4. Eredménykép bejárása, és minden képpontjának leképezése az inverz transzformáció, valamint újramintavételezés segítségével.

Ez a kétirányú leképezés látható a 11.5 ábrán.



11.5. ábra. A geometriai transzformáció kétirányú leképezése

A térbeli átalakítások általában fokális műveletek, így könnyen párhuzamosíthatók. A megvalósításuk során mindenképpen szükség lesz mátrixos alakok tárolására, illetve mátrix inverz számítására alkalmas numerikus módszerrel, pl. *Gauss-eliminációval*. A transzformáció számítható is, amennyiben a forráskoordináták mellett a célkoordinátákat adjuk meg – célszerűen a négy sarokpontra – a transzformációs polinom szintén numerikus módszerrel számítható.

### 11.3.2. Képi műveletek

A képi műveletek – mint azt az előző fejezetekben olvashattuk – jórészt a teljes felvételt, vagy egy behatárolt részterületét érintő transzformációk, amelyeket általában előre definiált algoritmusok megfelelő paraméterezésével valósítunk meg. A távérzékelési alkalmazásokat tehát elsősorban erre a funkcionalitásra kell felkészítenünk, nem olyan manuális képi műveletekre („rajzolásra”), amelyek a szokványos képszerkesztő programokban találunk.

Részterületet általában lefedő poligon megadásával, vagy képi maszkkal tudunk definiálni, amely a gyakorlatban *érdeklődési terület* (*area of interest, AOI*) névvel jelölünk. Az AOI poligont ráillesztjük a képre, azaz meghatározzuk, mely képpontok találhatóak részben, vagy egészben a poligon határain belül, a többi képponton nem futtatjuk le a műveletet.

Ezen felül a képelemzési módszerek paraméterezése jórészt skaláris, emiatt könnyen beilleszthető a végrehajtó algoritmusba. Bizonyos algoritmusok megengedik a használt metrikák megadását függvények formájában. Ezek használata jóval rugalmasabb megközelítést ad, például felüldefiniálhatjuk a geometriai leképezés távolságmérését, vagy szürkeskálázásnál az egyes spektrális sávok hangsúlyát.

Amennyiben nem lokális műveletet futtatunk, sokszor szembekerülünk a képi dimenziókon túli koordináta lekérdezésekkel. Pl. konvolúciós szűrők szélső sorban/oszlopban történő alkalmazása esetén. Ebben az esetben a legkényelmesebb az alapértékkel történő számolás, de tekinthetjük a képet ciklikusnak is, ekkor az utolsó sor után ismét az első sor értékeit vesszük figyelembe. Sajnos a legtöbb esetben mindkét módszer rontja a kapott értékeket, ezért inkább a szélső sorok/oszlopok értékeit terjesszük ki a képi tartományon túlra. Ez természetesen nem jelenti a kép fizikai átméretezését a memóriában, pusztán egy olyan képpont lekérdezést kell definiálnunk, amely a hozzá legközelebb eső képpont értéket adja vissza:  $I(x, y) = v_{ij}$ , ahol  $i = \max(1, \min(x, N))$ ,  $j = \max(1, \min(y, M))$ ,  $v$  egy  $N \times M$  méretű felvétel.

Sok esetben a műveletek nem csak a felvétel, de képi statisztikák alapján is dolgoznak. Alapvető képi statisztika a hisztogram (lásd 4.1.1. alszakasz), amely számos képi transzformáció kiindulási pontját képezi, illetve segít globális képi információk (pl. szórás) kinyerésében. Hisztogramok könnyen ábrázolhatóak tömbösen, amennyiben a felvétel sztenderd nem negatív számok értéket tárolja. Amennyiben negatív, vagy valós értékekkel rendelkezik, akkor használhatunk asszociatív tömböt a megvalósításra. Utóbbi akkor is célszerű, ha a felvétel különösen nagy radiometriai felbontással rendelkezik, hiszen egy 16 bites radiometriai felbontásnak megfelelő hisztogram  $2^{16} = 65536$  hosszú, amely könnyen tárolható a memóriában is, de 32, illetve 64 bites felbontás esetén ez már praktikusán nem alkalmazható.

A hisztogram létrehozható a képpel együtt, és a memóriában tárolható, a kép módosítása során könnyen karbantartható, hiszen minden egyes pixelen történő változtatás rögtön bejegyezhető a hisztogramba is. A tárolás természetesen nem szükséges, helytakarékosági okokból utólagosan is számolható, ekkor azonban a teljes képet be kell járnunk az intenzitásinformációk lekérdezése végett, ami időigényes lehet. A hisztogram alapú statisztikák előállítására már alapvetően nem műveletigényes, így futás közben könnyen elvégezhető.

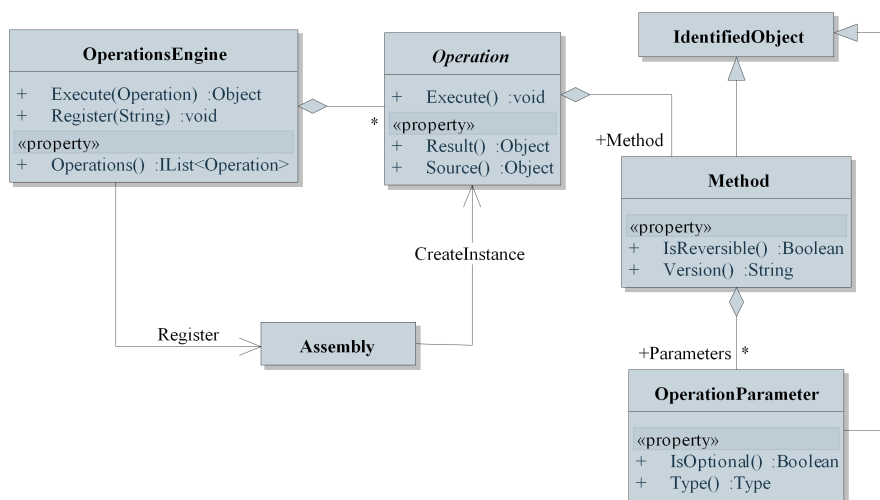


### 11.3.3. Műveletek egységes modellezése

Az egységes adatmodellhez hasonlóan adható egységes modell a térinformatikai, távérzékelési műveletek megvalósítására, végrehajtására is. Az Open Geospatial Consortium egy ilyen egységes hívási modellt definiált a *Web Processing Services* számára, amely szabványosítja a térinformatikai műveletek szolgáltatás alapú végrehajtását.

Az AEGIS keretrendszer ezt a modellt bővítette, és alkalmazta a feldolgozási műveletek egységes megadására. Az egységes modell következtében a rendszer könnyen intézheti a lehetséges műveletek regisztrációját és betöltését, valamint dinamikus végrehajtását, automatikus párhuzamosítás mellett. Ezekhez a funkciókhoz a rendszer egyfelől a .NET keretrendszer reflexiós modelljét használja, amely lehetővé teszi típusinformációk futás közbeni lekérését. Emellett az egyes műveleteket (*Operation*), és azok tulajdonságait leíró objektumok segítségével tárolja.

Ezek a leíró objektum definiálják a művelet (*OperationMethod*) és paramétereinek (*OperationMethodParameter*) tulajdonságait adják meg – úgymint név, munkaterület, invertálhatóság, paraméterek típusai és megszorításai –, és ez alapján a rendszer ellenőrizheti a végrehajtás körülményeit – beleértve párhuzamosítási lehetőségeket –, illetve a felhasználói felület megfelelő formában kérheti be a művelet paramétereit. A tevékenységeket egy végrehajtó motor (*OperationsEngine*) felügyeli. Az architektúra egy egyszerűsített vázát a 11.6. ábra mutatja.



11.6. ábra. Az AEGIS műveletvégrehajtási környezet

A műveletek végrehajtásához elég a megfelelő műveleti azonosítót, illetve a konkrét paramétereket átadnunk. A műveleti modell nem csupán egy művelet, hanem egy teljes munkafolyamat végrehajtását is lehetővé teszi, egyszerűen több művelet adatait adjuk meg a rendszernek. Annak érdekében, hogy a közttes műveletek eredményei ne kerüljenek tárolásra, a rendszer a korábban említett (*OnDemandRaster*) osztályt használja fel. Így egy munkafolyamat végrehajtásá-

hoz elég az utolsó műveletet futtatnunk, amely az előző műveleteket rekurzívan végrehajtja a megfelelő képi tartalomra.

## 11.4. Esettanulmányok

A továbbiakban egyes műveletek megvalósítási példáit vesszük végig, amely az AEGIS keretrendszer segítségével, C# programozási nyelven kerültek megvalósításra. Az egyes példák forráskódjai szabadon elérhetőek és letölthetőek a <http://aegis.inf.elte.hu/tfe/> címről. A programkódok betöltésére javasolt a Microsoft Visual Studio 2013 fejlesztőkörnyezet használata. A lefordított programok konzol alkalmazások, amelyek a további futtatási instrukciókat a konzol felületen adják meg. Az algoritmusok számos opcionális paraméterrel rendelkeznek, amelyek megadása nem kötelező, ekkor az alapértékek kerülnek felhasználásra.

### 11.4.1. Mintaillesztés alapú georeferálás

A georeferálást (lásd 4.2 .szakasz) végezhetjük manuális, illetve automatikus módon. Az automatikus módszerek általában mintaillesztést hajtanak végre, referált adatokból kiindulva. Esetünkben *chip-matching* alapú illesztést hajtunk végre, azaz a referált mintakép egyes részeit kiemeljük, majd ezeket a referálandó képre illesztve kapjuk meg a koordinátapárokat. A koordinátapárok alapján felírjuk a transzformációs polinomot, majd végrehajtjuk a geometriai transzformációt.

Az algoritmus magját a `ChipMatchingReferenceSystemTransformation` osztály biztosítja, amelynek bemenete a georeferálandó kép, paraméterei a georeferált kép (`ReferencedRaster`), a chip méret (`ChipSize`, opcionális), a chipek száma (`ChipCount`, opcionális), a chip kiválasztás függvénye (`ChipExtractionFunction`, opcionális), mintaillesztő függvény (`ChipMatchingFunction`, opcionális), transzformációk polinom fokszáma (`TransformationDegree`, opcionális), valamint a mintavételezés (`Resampling`, opcionális). Ha a megadott fokszámhoz alacsony chip-számot adtunk meg, az algoritmus automatikusan növeli azt.

Az algoritmus a megadott függvény alapján kiválogatja a chipeket, alapértelmezés szerint 10 darab,  $15 \times 15$  méretű chip-et. A chipek kiválogatásánál lineárisan bejárja a képet, és alkalmazza a kiválasztó függvényt, alapesetben az intenzitásértékek szórását számítva, és a legnagyobb értékkel rendelkező chip-eket, és azok vetületi koordinátáit tárolja el. A chipeket illeszti a forrás képhez, azokat az illesztési pontokat választva, ahol minimális az eltérés a chip-pel. Az így kapott pontpárokat egy lineáris egyenletrendszerbe illeszti, majd LU felbontás (`LUdecomposition`) segítségével megadja a (másodfokú) polinom együtthatóit, majd az inverz leképezés együtthatóit. Ezt követően a 11.3.1 alszakaszban leírtaknak megfelelően végrehajtódik a sarokpontok transzformációja, majd a megadott mintavételezési módszerrel (alapértelmezés szerint négyzetes illesztéssel) kitölti az eredményképet.

### 11.4.2. Hisztogram-kiegyenlítés

A hisztogram kiegyenlítés egy alapvető kontrasztfokozási módszer, amely a hisztogram eloszlásfüggvénye (*cumulative distribution function*, *CDF*) alapján

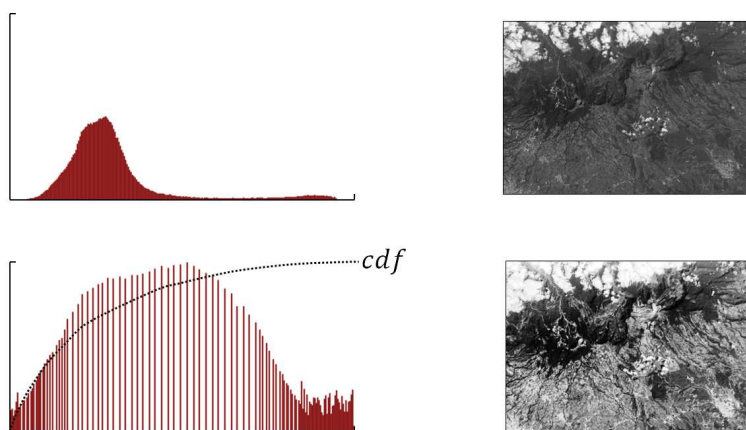
transzformálja az egyes intenzitásértékeket. Legyen  $v$  egy  $R$  radiometriai felbontású,  $N \times M$  méretű felvétel,  $I : (1..N) \times (1..M) \mapsto [0..2^{R-1}]$  intenzitásfüggvénnyel,  $H : [0..2^{R-1}] \mapsto \mathbb{N}$  hisztogramértékekkel (egy adott sávban), ekkor

$$CDF(i) = \sum_{j=0}^i \frac{H(j)}{N \times M}$$

a hisztogram eloszlásfüggvénye, a korrigált intenzitásértékek ( $I'$ ) pedig a

$$I'(x, y) = \frac{CDF(I(x, y)) - CDF(I_{min})}{CDF(I_{max}) - CDF(I_{min})} \cdot 2^R$$

képlettel számíthatóak, ahol  $I_{min}$  a felvétel minimális,  $I_{max}$  a felvétel maximális intenzitásértéke (a feldolgozott sávban). A 11.7 ábra egy példát mutat a hisztogramkiegyenlítésre.



11.7. ábra. Egy felvétel és hisztogramja a kiegyenlítés előtt, illetve után

A megvalósításban a kiegyenlítést a `HistogramEqualization` osztály biztosítja, amelynek bemenete az eredeti felvétel. Amennyiben nem az eloszlásfüggvényt szeretnénk használni, opcionálisan megadható más függvény is a kiegyenlítésre (`HistogramEqualizationFunction`), illetve lehetőség van a transzformálandó sáv indexe (`RasterBandNumber`), illetve a mintavételezési terület (`AreaOfInterest`) megadására is. A területkijelölés esetén csak a megadott tartományon belüli intenzitásértékeket veszi figyelembe az eljárás. Az algoritmus lekérdezi a képi hisztogramot – amelyet eleve tárol a `Raster` objektum a teljes képre –, majd alkalmazza a kiegyenlítő függvényt minden képpontra – a megadott sávban.

Ez egy lokális művelet, így a végrehajtást a rendszer automatikusan párhuzamosítja.

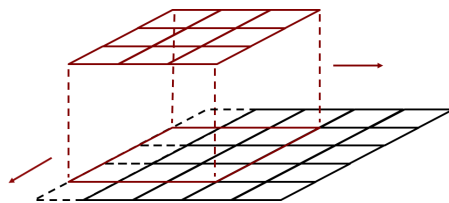
### 11.4.3. Konvolúciós szűrés

Mint a 4.1.3. szakaszban olvasható, a képi, vagy konvolúciós szűrők alkalmazása számos feladatban alkalmazható – úgymint élesítés, homályosítás, éldetektá-

lás, sarokdetektálás. A szűrő súlymátrixát, vagy más néven *kernel*jét, esetleg additív és multiplikatív tényezőt cserélve különböző hatásokat érhetünk el.

Ennek megfelelően a gyakorlatban is célszerű egy közös osztály (`ConvolutionFiltering`) alá helyezni a folyamatot, amelynek paraméterei a súlymátrix (`FilterKernel`), additív érték (`FilterOffset`, opcionális), illetve multiplikatív érték (`FilterFactor`). Amennyiben nem szeretnénk a súlymátrix kiszámítását manuálisan elvégezni, könnyen specializálhatunk bizonyos szűrőkre (pl. `BoxFilter`, `SobelFilter`, `GaussianBlurFilter`), ahol csak a szűrő méretét kell megadnunk (`FilterKernelSize`), magát a súlymátrixot az algoritmus számolja.

Mivel a szűrés egy fokális művelet, a kép szélső képpontjainak kiszámításához ki kell terjesztenünk a felvételt, az értékek lekéréséhez a `GetNearestValue` műveletét használjuk, amely a legközelebbi szélső értéket adja vissza túlindexelés esetén. Így például egy  $3 \times 3$ -as szűrő alkalmazása esetén egy-egy további oszlopot/sort adunk meg, ahogy ez a 11.8 ábrán látható.



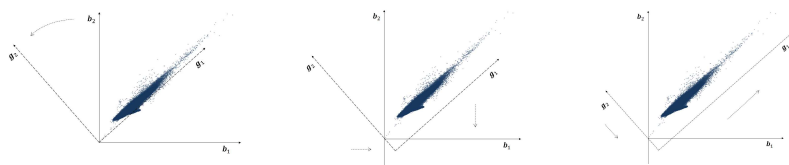
11.8. ábra. A kép kiterjesztése (szaggatottan jelölve) a konvolúciós szűrő alkalmazásához

#### 11.4.4. Főkomponens elemzés

A *főkomponens elemzés* (*principal component analysis*) során a felvétel intenzitásterét (lásd az 5.1. szakaszt) transzformáljuk. A feladat az összefüggő, azaz erősen korrelálódó sávok szétválasztása, hogy későbbi transzformációk az egyes sávokon ne legyenek hatással a másik sáv értékeire. Az elemzés során tulajdonképpen a koordinátarendszert transzformáljuk lineárisan olyan módon, hogy az új koordinátarendszerben a spektrális vektorok jóval nagyobb szórással, és kisebb korrelációval rendelkezzenek.

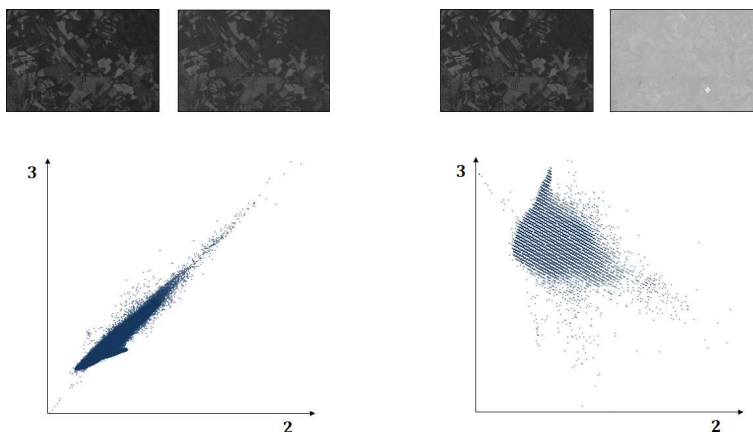
A transzformáció leírható a  $y = Gx$  mátrixegyenlettel, ahol  $x$ ,  $y$  spektrális vektorok,  $G$  a transzformációs mátrix, amelynek vektorai ( $g_i$  az  $i$ . dimenzióban) adják az új koordinátarendszer tengelyeit. A transzformáció során először elforgatjuk a koordináta rendszert, majd amennyiben szükséges, eltoljuk az origóját, illetve növeljük/csökkentjük a koordináta egyenesek méreteit. Ez a három lépés látható a 11.9 ábrán.

Az algoritmus futtatását a `PrincipalComponentAnalysis` osztály valósítja meg, amely a bemenő kép mellett a vizsgálandó sávok indexeit (`BandNumbers`) fogadja. Először kiszámítja a megfelelő statisztikákat a spektrális sávokra (kovariancia, korreláció), majd ennek megfelelően végrehajtja a sávok transzformációját képpontonként. Bár a statisztikák számítása globális, a transzformáció maga lokális, ezért a transzformációs mátrix kiszámítását követően az algoritmus párhuzamosan futtatja a folyamatot. Lényegében már kezdetben párhuzamosan



11.9. ábra. A főkomponens elemzés lépései

indul a végrehajtás, de az egyes folyamatok bevárják, amíg az előzetes számítások megtörténtek. A 11.10 ábra mutatja egy példafelvétel 2. és 3. sávjának transzformációját.



11.10. ábra. Egy felvétel 2. és 3. sávjának transzformáció előtti és utáni intenzitásstere, illetve spektrális értékei

#### 11.4.5. Szegmens alapú tematikus osztályozás

A szegmens alapú tematikus osztályozás számos módszerrel történhet, ahogy a 9.1. szakaszban olvasható. Az osztályozásban nem csupán az eredeti intenzitásértékek, de származtatott információk (pl. átlag, szórás) is felhasználhatóak.

Az osztályozás már a végrehajtás tekintetében egy komplett folyamat, hiszen diszkrét elkülönülő részekre bontható – szegmentálásra, klaszterezésre, valamint az osztályozásra –, emiatt az implementációban is különböző osztályok felelnek az egyes fázisokért. Esetünkben a szekvenciális csatolás alapú szegmentálást használtunk, valamint maximum likelihood alapú klaszterezést. A munkafolyamat lépései így a következők:

1. Szekvenciális csatolás (**SequentialCouplingSegmentation**). Az eljárásnak megadható a homogenitási korlát (**HomogeneityThreshold**), vagy az ANOVA kritériumok alsó és felső korlátja (**AnovaLowerThreshold**, **AnovaUpperThreshold**). Amennyiben minden paramétert szolgáltatunk, úgy mindegyik kritériumot figyelembe veszi a művelet. Amennyiben nem

adunk meg paramétert, az ANOVA kritériumok kerülnek alkalmazásra, az alapértelmezett korlátok alapján.

2. Maximum likelihood klaszterezés (`MaximumLikelihoodClustering`). Az eljárás opcionális paramétere a klaszterek minimális, illetve maximális száma (`MinimumClusterCount`, `MaximumClusterCount`), ezek megadása nélkül a klaszterek száma csak a maximum likelihood feltételektől függ.
3. Osztályozás tanulóterület alapján (`ReferenceBasedClassification`). Az eredmény egy rasteres eredményt ad, amelynek metaadataiban az egyes osztályok intenzitásértékei, valamint a besorolt képpontok száma is eltárolódnak, így ezeket külön felhasználhatjuk. A műveletnek megadhatjuk a tanulóterületet (`ReferenceRaster`), amelynek a bemenő kép tartományán belül kell lennie. Az értékek hozzárendelése a referenciaterület alapján történik, így a kapott osztályok intenzitásértékei is azzal megegyezőek lesznek. Az eljárás az alapértéket adja a referenciaterületen nem jelölt klaszterértékeknek.

Természetesen a folyamat összeállítása után a 11.3.3. alszakaszban leírtaknak megfelelően elég magát az osztályozó algoritmust futtatnunk, amely rekurzívan elvégzi a szegmentálás és klaszterezés lépéseit.

# Irodalomjegyzék

- [1] Beaulieu, J. M. and Goldberg, M.: Hierarchy in Picture Segmentation: A Stepwise Optimization Approach, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, **11(2)** (1989), 150–163.
- [2] Blaschke, T., S. Lang and G. Hay (Eds.), Object-Based Image Analysis, Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications, Series: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Springer, 2008, ISBN 978-3-540-77057-2.
- [3] Cooper, P. (ed.): The OpenGIS Abstract Specification - Topic 2: Spatial referencing by coordinates, version 4. Open Geospatial Consortium, 2010.
- [4] Csornai G., dr. Dalia O.: *Távérzékelés*. Főiskolai jegyzet. EFE FFFK, Székesfehérvár, 1991.
- [5] Csornai G., Dalia O., Farkasfalvy J., Nádor G.: Crop inventory studies using Landsat data on large area in Hungary. In: *Applications of Remote Sensing in Agriculture*, 159–165, Butterworths, 1990.
- [6] G. Csornai, I. László, G. Mikus, G. Nádor, I. Hubik, K. Lipták, M. Antal, K. Ócsai, I. Fekete, D. Gera: The Possibilities of New Satellite Image Types in the Control of Area-based Subsidies and in Ragweed Monitoring System. *Remote Sensing for Science, Education, and Natural and Cultural Heritage – Proceedings of the 30th Symposium of EARSeL* (ISBN 978-3-00-033435-1), EARSeL, 2010 (pp. 699-706)
- [7] *Definiens eCognition Developer 8, Reference Book*. Definiens AG, München, 2009.
- [8] Dezső B.: Optimization methods in remote sensing and geoinformatics. Ph.D. Dissertation (Supervisor: Dr. István Fekete), Eötvös Loránd University, Faculty of Informatics, Doctoral School of Informatics, Budapest, 2012.
- [9] Dezső B., Giachetta R., László I., Fekete I.: Experimental study on graph-based image segmentation methods in the classification of satellite images. *EARSeL eProceedings*, Vol. 11, 2012. (pp. 12–24.)
- [10] Fekete I., Dezső B., László I., Ócsai K.: A szegmentálás szerepe az úrfelvételek tematikus osztályozásában. In: *Informatika a felsőoktatásban 2008*, Debrecen 2008.

- [11] Fekete I., Farkasfalvy J.: Automatic segmentation of multispectral digital images. In: *5th Conference of Program Designers*, ELTE, Budapest, 1989.
- [12] Felzenszwalb, P. F. and Huttenlocher, D. P.: Efficient Graph-Based Image Segmentation, *Int. J. Comput. Vis.*, **59**, no. 2 (2004), 167–181.
- [13] Finkel, R. A., Bentley, J. L.: Quad trees – a data structure for retrieval on composite keys. *Acta Informatica*, 4 (1). Springer, 1974.
- [14] Gamma, E., Helm, R., Johnson, R., Vlissides, J.: *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*. Addison-Wesley Professional, 1994.
- [15] R. Giachetta, I. László and Cs. L. Bálint: Towards the new open source GIS platform AEGIS. In: Degbelo, A. et al. (eds.): *GI Zeitgeist 2012 – Proceedings of the Young Researchers Forum on Geographic Information Science*, 11-22, 2012.
- [16] Giachetta R., László I., Elek I., Fekete I., Gera D.: Térinformatikai oktatás és kutatás-fejlesztés az ELTE Informatikai Karán. In: Cser L., Herdon M. (szerk.): *Informatika a felsőoktatásban 2011 konferencia Debrecen, 2011. augusztus 24-26.*, ISBN 978-963-473-461-1. (pp. 420-427)
- [17] Giachetta R., László I., Elek I., Fekete I., Gera D.: Térinformatikai oktatás és kutatás-fejlesztés az ELTE Informatikai Karán (GIS Education and Research at Eötvös Loránd University, Faculty of Informatics). *Agrárinformatika Folyóirat*. 2011. 2. évfolyam 1. szám (Journal of Agricultural Informatics. 2011 Vol. 2, No. 1)
- [18] Goodrum, G., Kidwell, K. B., Winston, W. (eds.): *NOAA KLM User's Guide with NOAA N, N' Supplement*. U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, NESDIS, 2000.
- [19] Hay, G.J. and G. Castilla, Object-based image analysis: Strengths, weaknesses, opportunities and threats, in: *1st International Conference on Object-based Image Analysis*, Salzburg, 2006.
- [20] Herring, J. R. (ed.): *OpenGIS Implementation Standard for Geographic Information: Simple Feature Access – Common Architecture*, version 1.2.1. Open Geospatial Consortium, 2011.
- [21] Kettig, R. L., Landgrebe, D. A.: Classification of Multispectral Image Data by Extraction and Classification of Homogeneous Object. In: *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 14(1):19–26, 1976.
- [22] I. László: The integration of remote sensing and GIS data in the control of agricultural subsidies in Hungary. In: *Towards Horizon 2020: Earth Observation and Social Perspectives – Proceedings of the 33rd Symposium of EARSeL* (ISBN 978-88-89693-34-6), EARSeL, 2013 (pp. 589-598)
- [23] László I., Csornai G.: Távérzékelte felvételek elemzése. Egyetemi előadás diasora. Elérhetőség az ELTE IK honlapján: <http://www.inf.elte.hu/karunkrol/digitkonyv/Lapok/2011jegyzettamogatás.aspx>; a tárgyfelelős oktató honlapján: [http://people.inf.elte.hu/fekete/taverzekeles/eloadasok\\_2013/](http://people.inf.elte.hu/fekete/taverzekeles/eloadasok_2013/)



- [24] László I., Dezső B., I. Fekete, Gera D., Roberto G., László I.: Object-based Image Analysis in Remote Sensing Applications Using Various Segmentation Techniques. *Annales Univ. Sci. Budapest, Sectio Computatorica* Vol. 37 (2012) 103–120. Selected papers of 9th Joint Conference on Mathematics and Computer Science (MaCS) 2012 February 9-12, 2012, Siófok, Hungary
- [25] László I., Dezső B., Fekete I., Pröhle T.: A Fully Segment-Based Method for the Classification of Satellite Images. In: *Proceedings of the 10th Symposium on Programming Languages and Software Tools (SPLST)*, ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 2007.
- [26] László I., Dezső B., Fekete I., Pröhle T.: A Fully Segment-Based Method for the Classification of Satellite Images. In: *Annales Univ. Sci. Budapest., Sectio Computatorica*, 30 (2009) 157–174.
- [27] László I., Nádor G., Fekete I., Csornai G., Kocsis A.: A segment-based classification method for satellite images. In: 5th International Conference on Applied Informatics, Eger, 2001.
- [28] László I., Ócsai K., Gera D., Giachetta R., Fekete I.: Object-Based Image Analysis of Pasture with Trees and Red Mud Spill. In: L. Halounová (Ed.): Remote Sensing and Geoinformation not only for Scientific Cooperation - Proceedings of the 31st Symposium of EARSeL, (ISBN 978-80-01-04868-9), EARSeL 2011. (pp. 423-431)
- [29] László I., Pröhle T., Fekete I., Csornai G.: A method for classifying satellite images using segments. In: *Annales Univ. Sci. Budapest., Sectio Computatorica*, 23 (2004) 163–178.
- [30] Nádor G., Csornai G., Kocsis A.: Methods of accuracy assessment of thematic vegetation mapping by remote sensing. In: *7th Seminar on Earth and Meteorological Observations by Satellites*, Budapest, 1997 (in Hungarian)
- [31] G. Nádor, I. László: Comparative analysis of Pléiades and other VHR images in quantitative and visual evaluation. In: *Towards Horizon 2020: Earth Observation and Social Perspectives – Proceedings of the 33rd Symposium of EARSeL* (ISBN 978-88-89693-34-6), EARSeL, 2013 (pp. 111-122)
- [32] McCloy, K. R.: *Resource Management Information Systems: Remote Sensing, GIS and Modelling — 2nd edition*. Taylor&Francis, 2006.
- [33] Mihály Sz.: A magyarországi geodéziai vonatkozási és vetületi rendszerek leíró katalógusa. *Geodézia és Kartográfia*, 1994/4. szám, 198–203. Budapest, 1994.
- [34] Richards, J. A.: *Remote Sensing Digital Image Analysis — An Introduction*. ISBN 978-3-642-30061-5, e-ISBN 978-3-642-30062-2, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
- [35] Richards, J. A.: *Remote Sensing with Imaging Radar*. ISBN 978-3-642-02019-3, e-ISBN 978-3-642-02020-9, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

- [36] Shi, J. and Malik, J.: Normalized Cuts and Image Segmentation, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, **22**, no. 8 (2000), 888–905.
- [37] Schoenmakers, R.: *Integrated methodology for segmentation of large optical satellite images in land applications of remote sensing*. Joint Research Centre, 1995.
- [38] Tilton, J. C.: Image segmentation by Iterative Parallel Region Growing and Splitting, in: *Proc. of the International Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS89)*, (1989), 2235–2238.
- [39] Wald, L.: A European proposal for terms of reference in data fusion. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXII, Part 7, 651-654, 1998.
- [40] Wald, L.: Some terms of reference in data fusion. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, **37**, 3, 1190-1193, 1999.
- [41] Wald, L.: *Data Fusion: Definitions and Architectures - Fusion of images of different spatial resolutions*. L'Ecole des Mines de Paris, 2002.
- [42] Wang, S. and Siskind, J. M.: Image Segmentation with Minimum Mean Cut. In: *8<sup>th</sup> IEEE International Conference on Computer Vision*, **1** (2001) 517.
- [43] Wang, S. and Siskind, J. M.: Image Segmentation with Ratio Cut. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **25**, no. 6, 675–690.
- [44] Winter, S. & Frank, A.: Topology in Raster and Vector Representation. *GeoInformatica*, 4 (1), pp. 35-65. Springer, 2000.