



SAPIENTIA
ERDÉLYI MAGYAR
TUDOMÁNYEGYETEM
SEPSISZENTGYÖRGYI KAR



SEBESTYÉN TIHAMÉR-TIBOR

TÁVÉRZÉKELES, FOTOGRAMMETRIA ÉS TÉRINFORMATIKA INTEGRÁLT MEGKÖZELÍTÉSBEN

Scientia Kiadó | 2026

Sebestyén Tihamér-Tibor

Távérzékelés, fotogrammetria
és térinformatika integrált
megközelítésben



SAPIENTIA ERDÉLYI MAGYAR TUDOMÁNYEGYETEM
SEPSISZENTGYÖRGYI KAR
ÉLETTUDOMÁNYI TANSZÉK

Sebestyén Tihamér-Tibor

Távérzékelés, fotogrammetria és térinformatika integrált megközelítésben

| Scientia Kiadó |
| Kolozsvár · 2026 |



DOI: 10.47745/SAPVOL.2026.01

Felelős kiadó:

Sorbán Angella

Lektor:

Király Géza (Sopron)

Borítóterv:

Tipotéka Kft.

Kiadói koordinátor:

Szabó Beáta

A szakmai felelősséget teljes mértékben a szerkesztők, illetve a szerző vállalja.

Első magyar nyelvű kiadás: 2026

© Scientia 2026

Minden jog fenntartva, beleértve a sokszorosítás, a nyilvános előadás, a rádió- és televízióadás, valamint a fordítás jogát, az egyes fejezeteket illetően is.

ISBN: 978-606-975-111-4

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	17
1.1. A tantárgy célja és alkalmazási területei az erdészetben	17
1.2. Történeti áttekintés: a távérzékelés és fotogrammetria fejlődése a kezdetektől napjainkig	18
1.2.1. A kezdetek – 19. század	18
1.2.2. A repülés és a légi fényképezés kora – 20. század eleje	19
1.2.3. A második világháború utáni technológiai robbanás	20
1.2.4. A műholdas távérzékelés fejlődése	22
1.2.5. A digitális képfeldolgozás és GIS-integráció – az 1990-es évektől	23
1.2.6. A nagy felbontású, kereskedelmi műholdak és a drónforradalom – 2000-től	25
1.2.7. A mesterséges intelligencia, felhőalapú elemzés és nyílt adatplatformok – jelen és jövő	27
1.3. Alapfogalmak és definíciók	28
2. TÁVÉRZÉKELÉS	33
2.1. A távérzékelés tudományos és technikai alapjai	33
2.1.1. A távérzékelés folyamata	35
2.1.2. A távérzékelés két fő típusa	38
2.2. Az elektromágneses sugárzás és kölcsönhatása a felszínnel	41
2.2.1. A sugárzás fizikai törvényei	43
2.2.2. Elektromágneses energia: alapfogalmak	43
2.3. Távérzékelési platformok és szenzortípusok	48
2.4. Felbontások és azok szerepe	48
2.4.1. Térbeli felbontás	48
2.4.2. Spektrális felbontás	49
2.4.3. Radiometriai felbontás	53
2.4.4. Időbeli felbontás	54
2.5. Távérzékelési adatok észlelése és feldolgozása	58
2.5.1. Geometriai korrekció a távérzékelte adatokban	58
2.5.2. A légköri torzítás korrekciója	63
2.5.3. Radiometriai korrekció	65
2.5.4. Fotografikus (analog) érzékelés	67
2.5.5. Elektronikus (digitális) érzékelés	67
2.5.6. Képi megjelenítés és adatfeldolgozás	68

2.5.7. Képjavítások	69
2.5.8. Képosztályozás	70
2.6. A távérzékelés alkalmazhatósága és korlátai az erdőgazdálkodásban. . .	72
3. MŰHOLDAS TÁVÉRZÉKELÉS	75
3.1. A műholdas rendszerek pályatípusaik alapján	75
3.1.1. Alacsony Föld körüli pálya (LEO – Low Earth Orbit)	77
3.1.2. Nagyon alacsony pálya (VLEO – Very Low Earth Orbit).	79
3.1.3. Közepes pálya (MEO – Medium Earth Orbit)	81
3.1.4. Geostacionárius pálya (GEO – Geostationary Orbit)	82
3.1.5. Földszinkron pálya (GSO – Geosynchronous Orbit)	85
3.1.6. Magasan excentrikus pályák (HEO – Highly Elliptical Orbit).. .	87
3.1.7. A Molnyija- és Tundra-pályák mint önálló kategóriák	89
3.1.8. Poláris pálya (PO – Polar Orbit)	91
3.1.9. Napszinkron pálya (SSO – Sun Synchronous Orbit)	95
3.1.10. Napkelte–napnyugta pálya/terminátorkövető pálya (Down-Dusk/Sunrise – Sunset Orbit).	96
3.1.11. Egyenlítői pálya (EQO – Equatorial Orbit)	98
3.1.12. Dőlt pályák (IO – Inclined Orbit).	99
3.2. Jelentősebb műholdrendszerek és távérzékelési aspektusai	100
3.2.1. Nagy felbontású optikai sávú távérzékelési műholdak	100
3.2.2. Szuperspektrális műholdak	101
3.2.3. Hiperspektrális távérzékeléses műholdak	102
3.2.4. Landsat műholdprogram (USA).	105
3.2.5. A Landsat műholdak erdészeti jelentősége és gyakorlati alkalmazása	109
3.2.6. Sentinel műholdcsalád (Európai Űrügynökség – ESA).	117
3.3. Műholdas lézerszkennelő rendszerek és erdészeti alkalmazásuk. . .	125
3.3.1. A NASA GEDI bemutatása	125
3.3.2. Lézeres magasságmérés globális léptékben	128
3.4. Egyéb globális és regionális műholdrendszerek szerepe a távérzékelésben és erdészeti alkalmazásokban	129
3.5. Romániai erdőmonitoring-rendszerek	133
4. FOTOGRAMMETRIA	135
4.1. A fotogrammetria fogalma, célja.	135
4.1.1. A fotogrammetria fejlődése	136
4.2. Kapcsolódása más szakterületekhez (pl. térinformatika, geodézia, távérzékelés)	144
4.2.1. Kapcsolata a térinformatikával (GIS)	144
4.2.2. Kapcsolata a geodéziával	145
4.2.3. Kapcsolata a távérzékeléssel	146
4.3. A fotogrammetria osztályozása.	146

4.3.1. Az eredmények felhasználási területe szerint	146
4.3.2. A felvételek készítésének módja szerint	148
4.3.3. A felhasznált technológia és a képek megjelenítési módja szerint	150
4.3.4. A felvételek feldolgozásának módja szerint	151
4.4. A fotogrammetria típusai	163
4.4.1. Geometriai és tematikus információk	163
4.4.2. Spektrális felbontás	165
4.4.3. Földi, légi és űrfotogrammetria	167
4.4.4. Síkfotogrammetria és térfotogrammetria	170
4.5. Fotogrammetriai eljárások	173
4.5.1. Analóg fotogrammetriai kiértékelés	173
4.5.2. Analitikus fotogrammetriai kiértékelés	174
4.5.3. Digitális fotogrammetriai kiértékelés	174
4.5.4. UAV-fotogrammetriai kiértékelés	174
4.5.5. Integrált LiDAR-fotogrammetriai kiértékelés	178
4.6. Képtípusok és képalkotás	191
4.6.1. Analóg és digitális képek jellemzői	191
4.7. A képpontok koordináta-rendszerei	193
4.7.1. Képkoordináta-rendszerek típusai	193
4.7.2. Koordináta-rendszerek közötti transzformációk	196
4.7.3. Koordináták szerepe a térbeli rekonstruálásban	196
4.8. Terepmodell (DTM, DSM) előállítása légi fotókból	196
4.8.1. A digitális terepmodellek típusai és szerkezete	197
4.8.2. A DTM előállításának módszerei	197
4.8.3. A DTM minőségének meghatározói	198
4.8.4. Domborzatmodell elkészítése szintvonalak digitalizálásával	199
4.9. Erdészetre alkalmazott példák	203
4.9.1. A fotogrammetria alkalmazása a romániai erdészetben	203
4.9.2. Domborzatmodellezés lombtalan állapotban	204
4.9.3. Faállomány-paraméterek meghatározása lombos időszakban	205
4.9.4. Egészségügyi felmérés fotogrammetriai módszerekkel	207
5. TÉRINFORMATIKA	211
5.1. A térinformatika fejlődése	211
5.2. A térinformatika és alkalmazási területei	214
5.2.1. A geoinformatika alkalmazási lehetőségei az agrármérnöki oktatásban	215
5.2.2. Geoinformatika az erdészmérnöki oktatásban	216
5.3. Térinformatikai rendszerek és eszközök	218
5.4. Adat és információ a térinformatikában	220
5.5. Grafikus adatmodellek	222
5.5.1. Vektoros adatmodell	224

5.5.2. Raszteres adatmodell	233
5.6. Térinformatikai szoftverek áttekintése és jelentősége	242
5.6.1. Az ESRI ArcGIS/ArcINFO térinformatikai szoftver bemutatása	242
Irodalomjegyzék	249
Ábrajegyzék	257
Táblázatjegyzék	263
Rövidítések jegyzéke.	265
Rezumat: Teledetectia, fotogrammetria si geoinformatica într-o abordare integrată	267
Abstract: Remote Sensing, Photogrammetry and Geoinformatics in an Integrated Approach	269
A szerzőről.	271

CUPRINS

1. INTRODUCERE	17
1.1. Scopul disciplinei și domeniile de aplicare în silvicultură	17
1.2. Prezentare istorică: evoluția teledetecției și fotogrammetriei de la începuturi până în prezent	18
1.2.1. Începuturile – secolul al XIX-lea	18
1.2.2. Epoca aviației și a fotografiei aeriene – începutul secolului XX	19
1.2.3. Explozia tehnologică de după al Doilea Război Mondial	20
1.2.4. Dezvoltarea teledetecției satelitare	22
1.2.5. Procesarea digitală a imaginilor și integrarea GIS – din anii 1990	23
1.2.6. Sateliți comerciali cu rezoluție înaltă și revoluția dronelor – după 2000	25
1.2.7. Inteligența artificială, analiza în cloud și platformele de date deschise – prezent și viitor	27
1.3. Noțiuni și definiții de bază	28
2. TELEDETECȚIE	33
2.1. Bazele științifice și tehnice ale teledetecției	33
2.1.1. Procesul de teledetecție	35
2.1.2. Cele două tipuri principale de teledetecție	38
2.2. Radiația electromagnetică și interacțiunea acesteia cu suprafața terestră	41
2.2.1. Legile fizice ale radiației	43
2.2.2. Energia electromagnetică: concepte de bază	43
2.3. Platforme de teledetecție și tipuri de senzori	48
2.4. Rezoluții și rolul acestora	48
2.4.1. Rezoluția spațială	48
2.4.2. Rezoluția spectrală	49
2.4.3. Rezoluția radiometrică	53
2.4.4. Rezoluția temporală	54
2.5. Achiziția și prelucrarea datelor de teledetecție	58
2.5.1. Corecția geometrică în datele teledetectate	58
2.5.2. Corecția distorsiunilor atmosferice	63
2.5.3. Corecția radiometrică	65
2.5.4. Senzori fotografici (analogici)	67
2.5.5. Senzori electronici (digitali)	67
2.5.6. Afișarea imaginilor și procesarea datelor	68

2.5.7. Îmbunătățirea imaginilor	69
2.5.8. Clasificarea imaginilor	70
2.6. Aplicabilitatea și limitele teledetecției în silvicultură.	72
3. TELEDETECTIE SATELITARĂ	75
3.1. Sisteme satelitare în funcție de tipul orbitelor	75
3.1.1. Orbită joasă (LEO – Low Earth Orbit)	77
3.1.2. Orbită foarte joasă (VLEO – Very Low Earth Orbit)	79
3.1.3. Orbită medie (MEO – Medium Earth Orbit)	81
3.1.4. Orbită geostaționară (GEO – Geostationary Orbit)	82
3.1.5. Orbită geosincronă (GSO – Geosynchronous Orbit)	85
3.1.6. Orbite extrem de excentrice (HEO – Highly Elliptical Orbit)	87
3.1.7. Orbitele Molniya și Tundra ca categorii distincte	89
3.1.8. Orbită polară (PO – Polar Orbit)	91
3.1.9. Orbită heliosincronă (SSO – Sun Synchronous Orbit)	95
3.1.10. Orbită zori-crepuscul/orbită terminator (Dawn–Dusk/ Sunrise–Sunset Orbit).	96
3.1.11. Orbită ecuatorială (EQO – Equatorial Orbit)	98
3.1.12. Orbite înclinate (IO – Inclined Orbit)	99
3.2. Sisteme satelitare importante și aspecte ale teledetecției	100
3.2.1. Sateliți optici cu rezoluție înaltă	100
3.2.2. Sateliți superspectrali	101
3.2.3. Sateliți hiperspectrali	102
3.2.4. Programul satelitar Landsat (SUA).	105
3.2.5. Importanța și aplicabilitatea sateliților Landsat în silvicultură	109
3.2.6. Familia de sateliți Sentinel (Agenția Spațială Europeană – ESA)	117
3.3. Sisteme de scanare laser satelitară și aplicațiile lor în silvicultură	125
3.3.1. Prezentarea NASA GEDI	125
3.3.2. Măsurători laser altimetrice la scară globală	128
3.4. Alte sisteme satelitare globale și regionale în teledetecție și aplicații forestiere	129
3.5. Sisteme românești de monitorizare forestieră	133
4. FOTOGRAMMETRIE	135
4.1. Definiția și scopul fotogrammetriei	135
4.1.1. Evoluția fotogrammetriei	136
4.2. Legături cu alte domenii (GIS, geodezie, teledetecție)	144
4.2.1. Relația cu sistemele informaționale geografice (GIS)	144
4.2.2. Relația cu geodezia	145
4.2.3. Relația cu teledetecția	146
4.3. Clasificarea fotogrammetriei	146

4.3.1. După domeniile de utilizare a rezultatelor	146
4.3.2. După modul de realizare a imaginilor	148
4.3.3. După tehnologia utilizată și modul de afișare a imaginilor . .	150
4.3.4. După metoda de procesare a imaginilor	151
4.4. Tipuri de fotogrammetrie	163
4.4.1. Informații geometrice și tematice	163
4.4.2. Rezoluția spectrală	165
4.4.3. Fotogrammetrie terestră, aeriană și satelitară	167
4.4.4. Fotogrammetrie plană și fotogrammetrie stereo	170
4.5. Procedee fotogrammetrice	173
4.5.1. Evaluare fotogrammetrică analogică	173
4.5.2. Evaluare fotogrammetrică analitică	174
4.5.3. Evaluare fotogrammetrică digitală	174
4.5.4. Evaluare fotogrammetrică UAV	174
4.5.5. Evaluare integrată LiDAR–fotogrammetrie	178
4.6. Tipuri de imagini și formarea acestora	191
4.6.1. Caracteristicile imaginilor analogice și digitale	191
4.7. Sistemele de coordonate ale pixelilor	193
4.7.1. Tipuri de sisteme de coordonate ale imaginii	193
4.7.2. Transformări între sisteme de coordonate	196
4.7.3. Rolul coordonatelor în reconstrucția spațială	196
4.8. Generarea modelelor digitale ale terenului (DTM, DSM) din imagini aeriene	196
4.8.1. Tipuri și structură ale modelelor digitale ale terenului	197
4.8.2. Metode de generare a DTM-urilor	197
4.8.3. Factorii care influențează calitatea DTM	198
4.8.4. Realizarea modelului de relief prin digitalizarea curbelor de nivel	199
4.9. Exemple aplicate în silvicultură	203
4.9.1. Fotogrammetria în silvicultura românească	203
4.9.2. Modelarea terenului în perioada fără frunziș	204
4.9.3. Determinarea parametrilor arboretului în perioada cu frunziș	205
4.9.4. Evaluări fitosanitare prin metode fotogrammetrice	207
5. GEOMATICĂ/SISTEME INFORMAȚIONALE GEOGRAFICE (GIS)	211
5.1. Evoluția geomaticii	211
5.2. Domeniile de aplicare ale geomaticii	214
5.2.1. Aplicații ale geoinformaticii în învățământul agronomic . .	215
5.2.2. Geoinformatica în învățământul silvic	216
5.3. Sisteme și instrumente GIS	218
5.4. Date și informații în GIS	220
5.5. Modele de date grafice	222

5.5.1. Modelul de date vectorial	224
5.5.2. Modelul de date raster	233
5.6. Prezentare generală și importanța software-ului GIS	242
5.6.1. Prezentarea software-ului ESRI ArcGIS/ArcINFO	242
Bibliografie	249
Lista figurilor	255
Lista tabelelor	261
Lista abrevierilor	263
Rezumat: Teledetecția, fotogrammetria și geoinformatică într-o abordare integrată	265
Abstract: Remote Sensing, Photogrammetry and Geoinformatics in an Integrated Approach	267
Despre autor	269

CONTENTS

1. INTRODUCTION	17
1.1. The purpose of the subject and its applications in forestry	17
1.2. Historical overview: The development of remote sensing and photogrammetry from the beginnings to the present	18
1.2.1. The beginnings – 19 th century	18
1.2.2. The era of aviation and aerial photography – Early 20 th century	19
1.2.3. The technological boom after World War II	20
1.2.4. The development of satellite remote sensing	22
1.2.5. Digital image processing and GIS integration – From the 1990s	23
1.2.6. High-resolution commercial satellites and the drone revolution – From 2000	25
1.2.7. Artificial intelligence, cloud-based analysis and open data platforms – Present and future	27
1.3. Basic concepts and definitions	28
2. REMOTE SENSING	33
2.1. Scientific and technical foundations of remote sensing	33
2.1.1. The remote sensing process	35
2.1.2. The two main types of remote sensing	38
2.2. Electromagnetic radiation and its interaction with the Earth's surface	41
2.2.1. The physical laws of radiation	43
2.2.2. Electromagnetic energy: Basic concepts	43
2.3. Remote sensing platforms and sensor types	48
2.4. Resolutions and their role	48
2.4.1. Spatial resolution	48
2.4.2. Spectral resolution	49
2.4.3. Radiometric resolution	53
2.4.4. Temporal resolution	54
2.5. Acquisition and processing of remotely sensed data	58
2.5.1. Geometric correction of remotely sensed data	58
2.5.2. Atmospheric distortion correction	63
2.5.3. Radiometric correction	65
2.5.4. Photographic (analogue) sensing	67
2.5.5. Electronic (digital) sensing	67
2.5.6. Image display and data processing	68

2.5.7. Image enhancement	69
2.5.8. Image classification	70
2.6. Applicability and limitations of remote sensing in forest management	72
3. SATELLITE REMOTE SENSING	75
3.1. Satellite systems by orbit type	75
3.1.1. Low Earth Orbit (LEO)	77
3.1.2. Very Low Earth Orbit (VLEO).	79
3.1.3. Medium Earth Orbit (MEO)	81
3.1.4. Geostationary Orbit (GEO)	82
3.1.5. Geosynchronous Orbit (GSO)	85
3.1.6. Highly Elliptical Orbits (HEO).	87
3.1.7. Molniya and Tundra orbits as distinct categories	89
3.1.8. Polar Orbit (PO)	91
3.1.9. Sun-Synchronous Orbit (SSO).	95
3.1.10. Dawn–Dusk / Sunrise–Sunset Orbit	96
3.1.11. Equatorial Orbit (EQO)	98
3.1.12. Inclined Orbits (IO)	99
3.2. Major satellite systems and remote sensing aspects	100
3.2.1. High-resolution optical remote sensing satellites	100
3.2.2. Superspectral satellites	101
3.2.3. Hyperspectral remote sensing satellites	102
3.2.4. The Landsat satellite program (USA).	105
3.2.5. The importance and applications of Landsat satellites in forestry	109
3.2.6. The Sentinel satellite family (European Space Agency – ESA)	117
3.3. Satellite laser scanning systems and their forestry applications . . .	125
3.3.1. Introduction to NASA GEDI	125
3.3.2. Laser altimetry at global scale	128
3.4. Other global and regional satellite systems in remote sensing and forestry applications	129
3.5. Romanian forest monitoring systems	133
4. PHOTOGRAMMETRY	135
4.1. Definition and purpose of photogrammetry	135
4.1.1. Development of photogrammetry	136
4.2. Connections with other disciplines (GIS, geodesy, remote sensing) .	144
4.2.1. Relationship with Geographic Information Systems (GIS). . .	144
4.2.2. Relationship with geodesy	145
4.2.3. Relationship with remote sensing	146
4.3. Classification of photogrammetry	146

4.3.1. According to the application fields of the results	146
4.3.2. According to the method of image acquisition	148
4.3.3. According to the technology used and the method of image presentation	150
4.3.4. According to the method of image processing	151
4.4. Types of photogrammetry	163
4.4.1. Geometric and thematic information	163
4.4.2. Spectral resolution	165
4.4.3. Terrestrial, aerial, and satellite photogrammetry	167
4.4.4. Planar photogrammetry and stereophotogrammetry	170
4.5. Photogrammetric procedures	173
4.5.1. Analogue photogrammetric evaluation	173
4.5.2. Analytical photogrammetric evaluation	174
4.5.3. Digital photogrammetric evaluation	174
4.5.4. UAV photogrammetric evaluation	174
4.5.5. Integrated LiDAR–photogrammetric evaluation	178
4.6. Image types and image formation	191
4.6.1. Characteristics of analogue and digital images	191
4.7. Pixel coordinate systems	193
4.7.1. Types of image coordinate systems	193
4.7.2. Transformations between coordinate systems	196
4.7.3. The role of coordinates in spatial reconstruction	196
4.8. Generation of digital terrain models (DTM, DSM) from aerial photographs	196
4.8.1. Types and structure of digital terrain models	197
4.8.2. Methods for generating DTMs	197
4.8.3. Factors influencing DTM quality	198
4.8.4. Creating terrain models by digitizing contour lines	199
4.9. Forestry-related examples	203
4.9.1. Application of photogrammetry in Romanian forestry	203
4.9.2. Terrain modelling during leaf-off season	204
4.9.3. Determination of stand parameters during leaf-on season	205
4.9.4. Health assessment using photogrammetric methods	207
5. GEOMATICS / GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS (GIS)	211
5.1. The development of geomatics	211
5.2. Applications of geomatics	214
5.2.1. Applications of geoinformatics in agricultural engineering education	215
5.2.2. Geoinformatics in forestry engineering education	216
5.3. GIS systems and tools	218
5.4. Data and information in GIS	220
5.5. Graphic data models	222

5.5.1. Vector data model	224
5.5.2. Raster data model	233
5.6. Overview and significance of GIS software	242
5.6.1. Presentation of ESRI ArcGIS/ArcINFO software	242
References	249
List of Figures	255
List of Tables	261
List of Abbreviations	263
Rezumat: Teledetecția, fotogrammetria și geoinformatică într-o abordare integrată	265
Abstract: Remote Sensing, Photogrammetry, and Geoinformatics in an Integrated Approach	267
About the Author	269

BEVEZETÉS

1.1. A tantárgy célja és alkalmazási területei az erdészetben

A távérzékelés és a fotogrammetria olyan műszaki és tudományos eszköztárat kínálnak, amelyek segítségével a földfelszín – különös tekintettel az erdők – jellemzői és változásai nagy pontossággal, gyorsan és objektíven vizsgálhatók. E módszerek lehetővé teszik a területi adatok beszerzését emberi jelenlét nélkül, repülőgépekről, műholdakról vagy drónokról történő képalkotás útján. Az utóbbi évtizedek technológiai fejlődése (pl. nagy felbontású szenzorok, ingyenes műholdképadatok, nyílt forráskódú GIS-szoftverek) elérhetővé tette a távérzékelést gyakorló szakemberek – így az erdőmérnökök – számára is.

A tantárgy célkitűzései két irányba mutatnak előre:

– Elméleti alapozás: a hallgatók megismerik a távérzékelés és a fotogrammetria fizikai, geometriai és technológiai alapjait, valamint az alkalmazott eszközöket és adatforrásokat.

– Gyakorlati kompetenciák kialakítása: a hallgatók képessé válnak légi fotók és műholdfelvételek értelmezésére, elemzésére, illetve erdészeti célú felhasználására, továbbá elsajátítják a GIS-rendszerek alapvető használatát.

A képzés során kiemelt figyelmet kap a szoftveres feldolgozás (pl. QGIS, ArcGIS), valamint az adatértelmezés és térbeli döntéstámogatás gyakorlása is.

Alkalmazási területek az erdészetben

A távérzékelés és fotogrammetria alkalmazása az erdőgazdálkodásban széles körű. Az alábbiakban a legfontosabb felhasználási területeket ismertetjük az 1. táblázatban.

1. táblázat. *A távérzékelés alkalmazási területei az erdészetben*

Alkalmazási terület	Leírás / cél	Kapcsolódó módszerek / eszközök
Erdőleltár és állományfelvétel	Fajösszetétel, záródás, magasság, koronafelszín és biomassa meghatározása	Légifotó-elemzés, drónfelvételek, LiDAR, multispektrális képek
Erdőállapot-monitoring	Betegségek, károsodás, kiritkulás és száradás detektálása	NDVI/vegetációs indexek, idősoros műholdképek

Alkalmazási terület	Leírás / cél	Kapcsolódó módszerek / eszközök
Erdőtűz-megelőzés és követés	Tűzveszélyességi zónák azonosítása, kiegészített területek felmérése	Hőkamerás felvételek, Sentinel-2, MODIS, domborzatmodell
Erdősítések és vágásterületek	Ültetvények követése, letermelt területek lokalizálása, regeneráció mérése	Légi fotók idősora, változásdetektálás (change detection)
Élőhely-térképezés, természetvédelem	Védett területek állapotkövetése, erdei biodiverzitás megfigyelése	Nagy felbontású multispektrális képek, klaszteranalízis
Terepmodell-alapú elemzések	Lejtés, kitettség, erózióérzékenység, vízfolyások elemzése	DTM, DSM, lejtéselemzés, vízgyűjtők GIS-elemzése
Kataszteri és térinformatikai felhasználás	Erdőrészelek azonosítása, jogi és gazdasági térképezés	Térinformatikai adatbázisok (ArcGIS, QGIS), digitális térképek

A távérzékelés és a fotogrammetria nem csupán korszerű technikai eszközök, hanem stratégiai fontosságú támogatórendszerek az erdőgazdálkodásban. Hozzájárulnak az objektív adatalapú döntéshozatalhoz, a fenntartható erdőhasználatához és az ökológiai monitoringhoz. A tantárgy során megszerzett tudás és készségek lehetővé teszik a hallgatók számára, hogy a jövőben sikeresen integrálják ezeket az eszközöket szakmai tevékenységükbe.

1.2. Történeti áttekintés: a távérzékelés és fotogrammetria fejlődése a kezdetektől napjainkig

A távérzékelés, azaz a Föld felszínének vagy más objektumok távoli érzékelése anélkül, hogy közvetlen fizikai kapcsolatba kerülnénk velük, mára a földtudományok, az agrártudományok, a környezetvédelem és természetesen az erdőszet egyik alapvető információforrásává vált. Bár a modern műholdas rendszerek és digitális képelemző szoftverek mai alkalmazásai egyértelműen csúcstechnológiát képviselnek, a távérzékelés fejlődése több mint másfél évszázados múltra tekint vissza.

Az alábbi fejezetben kronologikus rendben tekintjük át a távérzékelés történetét, különös hangsúlyt fektetve a technológiai mérföldkövekre és azok erdőszeti alkalmazásaira.

1.2.1. A kezdetek – 19. század

A távérzékelés története szorosan összefonódik a fotogrammetria fejlődésével, amely a fényképek alapján történő mérés tudományát és gyakorlatát jelenti. A 19. század közepén, a fotográfia technikai feltételeinek megjelenésével pár-

huzamosan, a kutatók és mérnökök figyelme egyre inkább a magasból történő képalkotás lehetőségeire irányult.

Az első ismert légi fotót 1858-ban készítette Gaspard-Félix Tournachon – ismertebb nevén Nadar – Párizs fölött, egy hőlégballonról. Ez a felvétel, amely mára ikonikus jelentőségű, tekinthető a távérzékelés kezdetének. A fotózás és a repülés kombinációja új perspektívát nyitott a térképezés és a területi vizsgálatok előtt, bár a kezdeti időkben ezek az alkalmazások még elsősorban kísérleti jellegűek voltak.

A 19. század utolsó harmadában már rendszeresen használtak magasból készült felvételeket katonai célokra. Az amerikai polgárháború során például megjelentek az első, hírszerzési célból alkalmazott légi fotók, amelyek az ellenséges csapatmozgások és táborhelyek feltérképezését szolgálták. Ezek az adatok még nem voltak nagy pontosságúak, de alapjaiban változtatták meg a hadászati térképezést.

Egyre kifinomultabb módszerek és eszközök jöttek létre, és a századfordulóra a fotogrammetria már nem csupán elméleti lehetőségként, hanem gyakorlati eszközként is megjelent. Az 1880-as évektől kezdődően a geodéziai térképezés során egyre gyakrabban alkalmaztak légi fotókat, elsősorban városi környezetek dokumentálására. Az első szabályos fotogrammetriai mérési eljárások is ebben az időszakban alakultak ki, amelyeket főként katonai, városrendezési és topográfiai célokra használtak.

Az erdészetben ezek a korai fejlesztések még nem jelentek meg közvetlen módon, azonban már ekkor lefektetésre kerültek azok az elméleti és technikai alapok, amelyek később lehetővé tették az erdei területek légi fotós feltérképezését, valamint az állományhatárok, utak, vízfolyások pontos megjelenítését.

1.2.2. A repülés és a légi fényképezés kora – 20. század eleje

A 20. század eleje döntő fordulatot jelentett a távérzékelés fejlődésében, különösen a légi fényképezés területén. A repülőgép mint új technikai eszköz lehetővé tette, hogy az addig nehézkesen, ballonnal vagy sárkánnyal készített, magasból történő fényképezést jóval megbízhatóbb és precízebb módon lehessen elvégezni. A motorizált repülés 1903-as megszületését követően néhány évvel már megjelentek az első olyan felvételek, amelyeket kifejezetten katonai és térképezési céllal készítettek repülőgépről.

Az I. világháború (1914–1918) alatt a légi fényképezés tömegesen került alkalmazásra. A hadszíntereken szerzett tapasztalatok bizonyították, hogy a magasból készített képek hatékony eszközei lehetnek a terepi viszonyok felmérésének és az ellenség mozgásának nyomon követésére. A háború alatt gyors fejlődésen ment keresztül a kameratechnika: megjelentek a nagyobb felbontású objektívek, a stabilizáló rendszerek, valamint a repülőgépre integrált fényképező

berendezések, amelyek lehetővé tették az egymást átfedő képsorozatok – az ún. sztereopárok – készítését.

A háborút követően ezek a technológiák áttértek a polgári szférára is. Az 1920-as és 1930-as években megkezdődött a fotogrammetria tudományos rendszerezése és intézményesült oktatása. A sztereoszkopikus fotóelemzés módszerei lehetővé tették a terep háromdimenziós megjelenítését és a magasságkülönbségek mérését. A fotogrammetriai kiértékelő műszerek, például az analitikus sztereoplotterek vagy optikai vetítőgépek forradalmasították a térképészeti gyakorlatot. A domborzati modellek készítése, a kontúrvonalak felvétele, valamint a különféle földhasználati kategóriák azonosítása a légi képek alapján már ekkor bevett gyakorlattá vált.

Az erdészetben is megjelentek az első célzott alkalmazások. Az 1930-as évektől kezdődően egyes országok – különösen Németország, Svédország és az Egyesült Államok – erdőmérnökei már használták a sztereoszkopikus légi fotókat állományhatárok meghatározására, az állománytípusok osztályozására, valamint a fakitermelés tervezésére. Noha az ilyen jellegű felhasználás még viszonylag szűk körű volt, világossá vált, hogy a légi felvételek alkalmasak lehetnek a nagy léptékű erdészeti térképek megbízható elkészítésére.

A két világháború közötti időszakban egyre nagyobb figyelmet kaptak a képpárokon alapuló magassági mérések, illetve az olyan domborzatmodellek létrehozása, amelyek alapját képezhették erdőgazdálkodási terveknek vagy vízgyűjtő-gazdálkodási programoknak. Emellett az egyre pontosabb képfeldolgozási technikák és a nagyobb térképezési pontosság hozzájárultak ahhoz, hogy a fotogrammetria már ne csupán kiegészítő eszköz, hanem elsődleges információforrás legyen a természetes környezet felmérésében.

A repülés térhódítása tehát nem csak gyorsabb és nagyobb területre kiterjedő adatgyűjtést tett lehetővé, hanem elindította a légi felvételen alapuló távérzékelés széles körű, tudományosan megalapozott alkalmazását. Ez a korszak szolgáltat alapul a későbbi – műholdas – távérzékelési rendszerek kibontakozásának is.

1.2.3. A második világháború utáni technológiai robbanás

A második világháború nemcsak geopolitikai, hanem technológiai szempontból is fordulópontot jelentett az emberiség történetében. A katonai fejlesztések hatalmas lendületet adtak a fényképezés, az optikai rendszerek, a repüléstechnika és a távközlés fejlődésének. E háborús technológiák jelentős része a konfliktus lezárultával hamarosan megjelent a civil szférában is, és alapvetően megváltoztatta a térinformatikai és távérzékelési gyakorlatot.

A háború során kifejlesztett kamerarendszerek – nagy felbontású, gyors zárszerkezettel és filmcserélő rendszerrel felszerelt berendezések – a háború után a térképezési célú repülések során kerültek alkalmazásra. A fejlettebb kamerák révén már nemcsak vízszintes információkat lehetett nyerni a képekből, hanem

lehetőség nyílt a magasság és a domborzat precíz leképezésére is. A sztereó képpáros fotogrammetria technikája, amely az 1930-as években még kísérleti fázisban volt, a negyvenes-ötvenes évek során rutinszerű gyakorlattá vált. A fotogrammetriai laboratóriumok világszerte elkezdtek alkalmazni az analitikus kiértékelést, és megjelentek az első elektromechanikus számítógépek is a mérések támogatására.

Az 1950-es évek végétől kezdve egyre nagyobb érdeklődés övezte a különböző spektrális tartományok – főként az infravörös – távérzékelési célú alkalmazását. A kutatók ráébredtek arra, hogy a növényzet, a talaj és más természetes felszínek sajátos reflektanciamintázatot mutatnak a nem látható hullámhosszokon is. Ez a felismerés vezetett a multispektrális távérzékelés tudományának és technikájának kialakulásához.

A földi és légi platformokon működtetett multispektrális szenzorokat először mezőgazdasági és környezetvédelmi célokra használták, de hamar kiderült, hogy kiválóan alkalmasak az erdők egészségi állapotának felmérésére is. Az infravörös sávban például a lombos vegetáció erőteljes reflektanciát mutat, így az élő növényzet könnyen megkülönböztethető az elhalt vagy sérült területektől. Ez különösen hasznosnak bizonyult a szárazság, rovarfertőzés vagy tűzkárok által érintett erdők monitorozásában.

A hidegháborús időszak során – különösen a Szputnyik-1 műhold 1957-es sikeres pályára állítása után – a világ figyelme egyre inkább az űrtechnológia és az ebből származtatható földmegfigyelés lehetőségei felé fordult. Bár az első műholdak még nem szolgáltak klasszikus értelemben vett távérzékelési célokat, egyértelművé vált, hogy a világűrből történő megfigyelés alapvetően új dimenziókat nyit meg a Föld megismerésében. A későbbi műholdprogramok már célzottan távérzékelési célokat szolgáltak, de ezek fejlesztéséhez a háború utáni technikai alapok és tudományos felismerések elengedhetetlenül szükségesek voltak.

Az erdészeti szempontjából ebben az időszakban már megjelentek azok az alkalmazások, amelyek megalapozták a későbbi, műholdalapú monitoringrendszerek használatát. A légi felvételek alapján készült térképek például lehetővé tették a vágásterületek pontos dokumentálását, az állományhatárok meghatározását, valamint az infrastruktúra (utak, vízfolyások) digitális nyilvántartását. A sztereó képpáros elemzéssel meghatározott koronamagasságok és állománysűrűségek alapján megbízható biomassa- és volumenbecslések váltak lehetővé.

A második világháború utáni időszak tehát a technológiai innovációk robanásszerű terjedését hozta magával a távérzékelés minden területén. A légi fényképezés és fotogrammetria alkalmazása standard eljárássá vált a térképezési, agrár- és környezetvédelmi területeken, és fokozatosan integrálódott az erdészeti gyakorlatba is. Ezek a technikai és módszertani fejlesztések elengedhetetlenek voltak ahhoz, hogy a később induló műholdas távérzékelési programok megbízható háttérrel induljanak el – olyan programokkal, amelyek a mai napig alapját képezik az erdők globális megfigyelésének és védelmének.

1.2.4. A műholdas távérzékelés fejlődése

Az űrkorszak hajnalán az emberiség figyelme egyre inkább a világűrből történő megfigyelés irányába fordult. A Szputnyik–1 műhold 1957-es pályára állítása nemcsak tudományos áttörést, hanem politikai és technológiai versenyfutást is elindított a világ nagyhatalmai között. A kezdeti műholdas rendszerek még főként kommunikációs és meteorológiai célokat szolgáltak, azonban hamar világossá vált, hogy az űrből történő földmegfigyelés – azaz a műholdas távérzékelés – óriási potenciállal bír a környezeti változások nyomon követésében, a földhasználat elemzésében, valamint az erdészeti erőforrások globális monitorozásában.

A műholdas távérzékelés történetében mérföldkőnek számít az amerikai NASA által indított LANDSAT-program, amelynek első tagját, a Landsat–1 műholdat 1972. július 23-án bocsátották Föld körüli pályára. A műhold a Multispectral Scanner System (MSS) nevű szenzorral volt felszerelve, amely öt különböző spektrális sávban rögzített adatokat, 80 méteres térbeli felbontással. Noha ez a felbontás ma már viszonylag durvának számít, az akkori viszonyok között forradalmi újítást jelentett, hiszen először vált lehetővé a teljes bolygó szisztematikus, több spektrális sávban történő monitorozása.

A Landsat-program következő műholdjai – különösen a Landsat–4 és Landsat–5 – már a fejlettebb Thematic Mapper (TM) szenzorral működtek, amely hét spektrális sávot és 30 méteres térbeli felbontást biztosított. Ezzel lehetővé vált a földfelszín alaposabb és részletesebb vizsgálata, beleértve a különböző növényfajtákat, talajformákat és felszíni víztestek megkülönböztetését is. A spektrális osztályozás segítségével automatizáltan lehetett azonosítani a különféle felszínborítási kategóriákat, mint például a lombhullató és tűlevelű erdők, mezőgazdasági területek, városias környezet vagy vízfelületek.

A műholdas képek alkalmazásának egyik legnagyobb előnye a széles lefedettség és a rendszeres újramérés lehetősége. A Landsat-műholdak körülbelül 16 napos visszatérési ciklusban rögzítik a Föld felszínéről származó adatokat, ami lehetővé teszi az idősoros elemzéseket, például az erdőterületek csökkenésének vagy regenerálódásának vizsgálatát. A világ különböző pontjain ekkor kezdtek kialakulni az első, távérzékelésen alapuló földhasználati adatbázisok, amelyek elsősorban kormányzati, kutatási és környezetvédelmi célokat szolgáltak.

Az 1980-as években újabb műholdas platformok jelentek meg, amelyek tovább növelték az elérhető adatok mennyiségét és sokféleségét. A francia SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre) műholdcsalád 1986-tól kezdődően már 10 méteres térbeli felbontással készített pankromatikus felvételeket, ami új lehetőségeket teremtett a részletes topográfiai térképezés, valamint a kis léptékű erdészeti vizsgálatok számára. A SPOT-adatok különösen népszerűvé váltak Európában, ahol a térbeli felbontás és az elérhető spektrális tartományok kombinációja jól illeszkedett az alkalmazásokhoz (Ducros 2025).

A műholdas távérzékelés ekkor már nem csupán tudományos kutatásokra szolgált, hanem egyre gyakrabban használták gazdasági, közigazgatási és környezetpolitikai döntések megalapozására is. A mezőgazdasági támogatások ellenőrzése, a természetvédelmi területek védettségi szintjének ellenőrzése, valamint a katasztrófavédelem (pl. árvizek, erdőtüzek) reakcióidejének csökkentése mind-mind olyan területek, ahol a műholdas képek rutinszerűen alkalmazásra kerültek.

Az erdészeti szempontjából a műholdas távérzékelés egyik legjelentősebb előnye a nagy területi egységek gyors és viszonylag költséghatékony monitorozása. Az 1970-es és 1980-as években az erdészeti hatóságok és kutatóintézetek világszerte elkezdték alkalmazni a Landsat- és SPOT-képeket a fakitermelések dokumentálására, a tarvágások lokalizálására, valamint a természetes regeneráció és az újraerdősítés folyamatának nyomon követésére. Ezen túlmenően, a spektrális indexek – különösen az NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – bevezetése révén lehetővé vált a vegetáció zöldtömegének, egészségi állapotának és sűrűségének objektív, kvantitatív mérése.

A műholdas távérzékelés egyik fontos sajátossága, hogy a képi információkat mindig időpont szerint rögzíti, így az adatok nemcsak térbeli, hanem időbeli viszonyításra is alkalmasak. Ennek köszönhetően a műholdfelvételek kiválóan alkalmazhatók változásdetektálási célokra: megfigyelhetők például az erdőhatár eltolódásai, az urbanizáció következményei, vagy a klímaváltozás hatására bekövetkező szerkezeti átalakulások.

A nyolcvanas évek második felétől a kereskedelmi célú műholdas rendszerek megjelenésével még szélesebb körű felhasználás vált lehetővé. Az amerikai NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) által üzemeltetett AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) rendszer például bár csak durva (~1 km) térbeli felbontással rendelkezett, de napi többszöri adatgyűjtést tett lehetővé, így kiválóan alkalmas volt globális erdőborítottsági és biomassza-modellek készítésére.

Összességében elmondható, hogy a műholdas távérzékelés megjelenése új korszakot nyitott a földfelszín és különösen az erdei ökoszisztémák megfigyelésében. A Landsat és más korai műholdprogramok megteremtették azt a technológiai és metodológiai alapot, amelyre a későbbi nagy felbontású, automatizált, mesterséges intelligenciával támogatott rendszerek épülnek.

1.2.5. A digitális képfeldolgozás és GIS-integráció – az 1990-es évektől

A távérzékelés fejlődésének következő meghatározó szakasza az 1990-es évektől kezdődően bontakozott ki, amikor a digitális technológiák robbanásszerű térnyerése új dimenziókat nyitott a képadatok feldolgozásában és értelmezésében. A korábbi analóg filmek és optikai kiértékelő eszközök fokozatosan háttérbe szorultak, és helyüket átvették a digitális szenzorokkal készített képek,

valamint a számítógépes feldolgozást végző szoftverek. Ez az átmenet nemcsak a távérzékelés technikai oldalát érintette, hanem jelentős hatással volt az adatok térinformatikai környezetben való hasznosítására is.

A digitális képfeldolgozás megjelenésével lehetővé vált a távérzékelési adatok komplex statisztikai, matematikai és algoritmikus elemzése. Az ilyen feldolgozási műveletek közé tartozik a zajszűrés, a geometriai és radiometriai korrekciók, a spektrális osztályozás, valamint az objektumalapú képelemzés. A klaszikus kézi kiértékelést egyre inkább felváltották az automatikus, szabályalapú és tanuló algoritmusokat alkalmazó eljárások. Az ilyen módszerek nemcsak gyorsabbak, hanem egységesebbek és replikálhatók is, ami különösen fontos a nagy területű erdészeti monitoring esetében.

Az 1990-es évek egyik kulcsfontosságú fejlesztése volt a térinformatikai rendszerek (GIS) integrációja a távérzékelte adatok feldolgozásába. A GIS-rendszerek lehetővé tették, hogy a képi információkat más, nem képalapú földrajzi adatforrásokkal – például terepi mérésekkel, domborzatmodellekkel, kataszteri információkkal vagy demográfiai adatokkal – együtt, egységes rendszerben lehessen kezelni és értelmezni. Ez az integráció új távlatokat nyitott a környezeti modellezésben, az ökológiai hálózatok vizsgálatában, valamint a fenntartható erdőgazdálkodás tervezésében.

Ebben az időszakban számos korszerű szoftvercsomag jelent meg a piacon, amelyek kifejezetten a távérzékelte adatok digitális feldolgozására és GIS-környezetbe való illesztésére készültek. Ilyen például az ERDAS Imagine, az ENVI, valamint a széles körben használt ArcGIS. Ezek a rendszerek lehetővé tették a raszteres adatok manipulálását, az indexek számítását, a többidőpontú képek összevetését, valamint tematikus térképek előállítását. A szoftveres környezet fejlődése párhuzamosan zajlott az adatok térbeli felbontásának javulásával és a sávszám (azaz a spektrális felbontás) növekedésével (ERDA 2025).

A digitális feldolgozás és a GIS integrációja különösen nagy hatással volt az erdészeti alkalmazásokra. Az automatizált osztályozási módszerek révén lehetővé vált az állománytípusok, a koronazáródás, valamint a vegetációs aktivitás térképi megjelenítése. A különböző spektrális indexek (pl. NDVI, SAVI, EVI) segítettek az erdők egészségi állapotának kvantitatív értékelését, amely különösen fontos az éghajlatváltozás hatásainak monitorozása és az erdőpusztulás korai észlelése szempontjából.

A GIS-rendszerek révén új lehetőségek nyíltak a lejtéstanulmányok, vízgyűjtő-analízisek, erózióérzékenységi térképek készítésére, amelyek a tervezési és döntéstámogatási folyamatokban kulcsfontosságúvá váltak. A digitális domborzatmodellek (DTM és DSM) integrálásával a térbeli modellezés részletgazdagabbá és pontosabbá vált, így a térinformatikai elemzések képesek lettek figyelembe venni a terület topográfiai viszonyait is. Ez különösen fontos az erdőgazdálkodásban, ahol a lejtés, a kitettség és az elérhetőség meghatározza a fahasználat módját és intenzitását.

Ezzel párhuzamosan az adatok tárolásának és hozzáférésének módja is jelentősen átalakult. A digitális adatok már nem igényeltek nagy terjedelmű fizikai tárolóeszközöket, hanem egyre inkább hálózati és szerveralapú rendszerek felé tolódott el az adattárolás és -megosztás gyakorlata. Az 1990-es évek végére már elérhetővé váltak az első nyílt hozzáférésű távérzékelési adatbázisok, amelyek lehetővé tették, hogy a felhasználók világszerte hozzáférjenek Landsat-képekhez vagy más műholdas archívumokhoz. Ez a nyitottság elősegítette a tudományos közösségek közötti együttműködést és a reprodukálható elemzések elterjedését.

Az erdőmérnöki képzés és kutatás szempontjából e korszak hatása alapvetőnek tekinthető. A digitális távérzékelési eszközök és a GIS-rendszerek bevonása a tananyagba és a szakmai gyakorlatba lehetővé tette, hogy az erdészeti döntések mindinkább adatalapú és modellezett alapokon szülessenek meg. A térbeli adatvizualizáció, a digitális térképkészítés, valamint a prediktív ökológiai modellek alkalmazása új szintre emelte az erdőgazdálkodás szakszerűségét és hatékonyságát.

Összefoglalásként elmondható, hogy a digitális képfeldolgozás és a GIS integrációja nem csupán technológiai fejlesztésként jelent meg, hanem egy új, összekapcsolt gondolkodásmódot is meghonosított a térbeli információk feldolgozásában és felhasználásában. Ez a szemlélet napjainkban is meghatározó az erdészeti távérzékelés és térinformatikai elemzések minden szintjén.

1.2.6. A nagy felbontású, kereskedelmi műholdak és a drónforradalom – 2000-től

A 21. század eleje újabb mérföldkövet jelentett a távérzékelés fejlődésében. A digitalizáció mellett ekkor jelentek meg azok a nagy felbontású, kereskedelmi célú műholdrendszerek, amelyek képesek voltak részletgazdag, akár 1 méternél is jobb térbeli felbontású képeket szolgáltatni. Emellett megkezdődött a pilóta nélküli repülőgépek, azaz a drónok robbanásszerű elterjedése, ami forradalmasította a lokális távérzékelés gyakorlatát.

A 2000-es évek elején a kereskedelmi szférában elsőként az IKONOS műhold kínált 1 méteres pánkromatikus és 4 méteres multispektrális felbontású adatokat a felhasználók számára. Ezt követték olyan rendszerek, mint a QuickBird, GeoEye vagy a WorldView sorozat, amelyek egyre nagyobb felbontást és bővülő spektrális tartományokat kínáltak. Ezek a műholdak különösen értékkessé váltak várostervezési, mezőgazdasági monitoring és biztonságpolitikai célokra, de az erdészet számára is új lehetőségeket teremtettek.

A nagy felbontású műholdas képek lehetővé tették például az állománystruktúra részletesebb feltérképezését, a koronamagasságok becslését árnyék- és textúraanalízis alapján, valamint az egyes fák elkülönítését heterogén erdőtársulásokban. A képfeldolgozási algoritmusok fejlődésével, különösen az objektumalapú képelemzés (Object-Based Image Analysis, OBIA) révén, ezek az adatok alkalmassá váltak automatizált fafajazonosításra és korosztályi osztályozásra is. Továbbá, a nagy felbontásnak köszönhetően

pontosan detektálhatók voltak olyan finom változások is, mint a szélkárok, vízmosságok vagy illegális fakitermelések.

Ezzel párhuzamosan megindult a pilóta nélküli repülő rendszerek – közismert nevükön drónok – rohamos fejlődése és terjedése. A kezdetben főként katonai célokat szolgáló technológia néhány év alatt elérhetővé vált a civil felhasználók számára is. A drónok, melyek kis méretük és viszonylag alacsony áruk miatt kiválóan alkalmazhatók helyi szintű megfigyelésekre, hamar népszerűvé váltak a térinformatikai és környezetkutató szakmai és civil közösségek körében.

Az erdészeti különösen sokat profitált a dróntechnológia elterjedéséből. A drónnal végzett felmérések lehetővé tették az állományok részletes, centiméteres felbontású vizsgálatát, beleértve a koronazáródás térképezését, a fák magasságának meghatározását, a vágásterületek dokumentálását vagy az újraterelítési területek nyomon követését. A multispektrális és hőkamerával felszerelt drónok révén pedig még pontosabb információ nyerhető a fák egészségi állapotáról, stressztűréséről és fotoszintetikus aktivitásáról.

A drónok másik nagy előnye a gyors reakcióidő. Egy-egy vihar, jégeső vagy erdőtüz után a terület állapota akár néhány órán belül felmérhető, így lehetőség nyílik a gyors beavatkozásra és a veszteségek minimalizálására. Emellett a drónokkal készült felvételek jól integrálhatók a digitális domborzatmodellekkel, valamint a térinformatikai adatbázisokkal, így a lokális távérzékelés eredményei közvetlenül hasznosíthatók a hosszú távú erdőgazdálkodási tervekben.

Technológiai szempontból jelentős előrelépést jelentett az is, hogy a drónfelvételek feldolgozása mára egyszerűsödött és automatizálódott. Olyan szoftverek, mint az Agisoft Metashape, Pix4D vagy DroneDeploy, lehetővé teszik a fotogrammetriai alapú 3D modellrekonstrukciót, ortofotók előállítását, koronamagasság-térképek készítését, valamint pontfelhők generálását. Ezek az adatformátumok könnyedén betölthetők GIS-rendszerekbe, így a drónnal készített adatok gyorsan beépíthetők a mindennapi erdészeti gyakorlatba.

Nem elhanyagolható az a szempont sem, hogy a nagy felbontású műholdak és a drónok megjelenésével új követelmények is jelentkeztek az adatkezelés, -tárolás és -feldolgozás terén. Az óriási mennyiségű nyers adat rendszerezése, a redundanciák szűrése és a különféle forrásból származó képek integrálása új kihívások elé állította a szakembereket. A válasz ezekre a kihívásokra egyértelműen a felhőalapú adattárolás és feldolgozás irányába mutatott, amely napjainkban egyre inkább alapvető elvárás a hatékony adathasználathoz.

Összegzésként elmondható, hogy a 21. század első évtizedeiben a távérzékelés új korszakba lépett. A műholdas nagy felbontású képek révén globális léptékű, mégis részletes megfigyelések váltak lehetővé, míg a dróntechnológia az operatív, gyors és helyi szintű információszerzést forradalmasította. Mindkét eszközcsoporthoz integrálása a térinformatikai rendszerekbe az erdőgazdálkodásban új távlatokat nyitott a precíziós tervezés, a döntéstámogatás és az ökológiai monitoring terén.

1.2.7. A mesterséges intelligencia, felhőalapú elemzés és nyílt adatplatformok – jelen és jövő

Az elmúlt évtizedek technológiai fejlődése révén a távérzékelés nem csupán új adatgyűjtési lehetőségekkel bővült, hanem alapvetően átalakult az adatok feldolgozásának, elemzésének és megosztásának módja is. A digitális képfeldolgozás, a térinformatikai rendszerek és a nagy felbontású adatok elérhetősége után újabb forradalmi lépésként jelent meg a mesterséges intelligencia (MI), a felhőalapú számítási környezetek és a nyílt hozzáférésű adatplatformok gyors térnyerése.

A mesterséges intelligencia – különösen a gépi tanulás és a mélytanulás módszerei – lehetővé teszik, hogy a távérzékelési adatokból automatizált módon, emberi beavatkozás nélkül vonjunk ki összetett információkat. A klasszikus spektrális osztályozások helyét fokozatosan átvették az olyan algoritmusok, mint a random forest, a support vector machine (SVM), illetve a konvolúciós neurális hálózatok (CNN). Ezek az MI-alapú módszerek nem csupán a spektrális jellemzőket, hanem a textúra, a geometriai alakzatok, sőt, az idősoros viselkedés alapján is képesek osztályozni és predikciókat végezni.

Az erdészeti gyakorlatban ez a fejlődés különösen hasznosnak bizonyult, hiszen lehetővé tette a fajok automatikus megkülönböztetését, az állományok koronaszintű feltérképezését, vagy akár az invazív fajok terjedésének észlelését is. A mesterséges intelligencia továbbá alkalmas olyan prediktív modellek létrehozására, amelyek például előre jelzik az erdőtűzvesztélyt, az erdőpusztulás valószínűségét vagy a klímaváltozás hatásait az adott állományokra. Ezek a modellek a távérzékelésből származó adatokat gyakran más típusú információval – meteorológiai, topográfiai, talajtani vagy társadalmi-gazdasági adatokkal – kombinálják.

A számítási teljesítmény megnövekedésével párhuzamosan jelent meg az igény az adatok felhőalapú feldolgozására, amelynek célja, hogy a felhasználók ne legyenek a saját eszközparkjuk kapacitásaihoz kötve. A felhőalapú platformok lehetővé teszik, hogy akár óriási mennyiségű műholdas adatot, többévtényi idősorokat és komplex algoritmusokat is futtathassunk internetkapcsolaton keresztül. Ennek egyik legismertebb példája a Google Earth Engine (GEE), amely hozzáférést biztosít több petabájtnyi távérzékelte adathoz (pl. Landsat, MODIS, Sentinel), valamint eszközöket kínál ezek feldolgozására, vizualizálására és közzétételére.

A GEE és hasonló platformok különösen előnyösek az oktatásban, kutatásban és nemzetközi projektekben, mivel decentralizált, gyors és interaktív feldolgozási lehetőségeket biztosítanak. Az erdészeti területén ez lehetővé teszi például országos vagy regionális szintű erdőborítási térképek automatikus frissítését, degradációs folyamatok nyomon követését vagy a zöld infrastruktúra állapotának elemzését. Emellett ezek a rendszerek jelentősen hozzájárulnak az átláthatósághoz és a reprodukálhatósághoz, hiszen az elemzések kódja és adatforrásai megoszthatók más felhasználókkal.

E fejlődési irány fontos eleme a nyílt adatpolitika, amelyet az Európai Unió és számos más ország is aktívan támogat. A Copernicus program keretében működő Sentinel műholdak – köztük a Sentinel-1 (radar) és Sentinel-2 (optikai multispektrális) platformok – teljes adatkészlete ingyenesen hozzáférhető. Ez nemcsak a kutatás számára kínál új lehetőségeket, hanem az operatív erdőgazdálkodásban dolgozó szakemberek, kisvállalkozások és önkormányzatok számára is. A nyílt hozzáférés elterjedése jelentősen csökkenti a belépési küszöböt a távérzékelési technológiák alkalmazásához, és elősegíti az innovációt, különösen a kisebb országok és közösségek körében.

A jövő távérzékelési rendszerei várhatóan még inkább automatizáltak, prediktívek és interaktívak lesznek. A mesterséges intelligenciával támogatott elemzőrendszerek egyre nagyobb mértékben képesek lesznek valós időben észlelni változásokat, jelezni kockázatokat, és támogatni a gyors döntéshozatalt. A globális éghajlatváltozás, a biodiverzitás csökkenése és az emberi terjeszkedés jelentette kihívások miatt egyre nagyobb szükség lesz arra, hogy az erdők állapotáról naprakész, pontos és széles körben elérhető információ álljon rendelkezésre.

A következő évtizedekben tehát a távérzékelés egyre inkább intelligens megfigyelőrendszerré alakul át, amely képes tanulni, előre jelezni és reagálni is. Az ilyen rendszerek kulcsszerepet játszanak majd az adaptív erdőgazdálkodásban, az ökológiai krízisek felismerésében, valamint az állami és nemzetközi környezetvédelmi politikák megalapozásában. Az erdőmérnökök feladata a jövőben nem csupán a terepi megfigyelés, hanem a térinformatikai és mesterséges intelligencia eszközeinek alkalmazása és értelmezése is lesz, ezáltal a szakterület hatékonyan tud reagálni a 21. század kihívásaira.

1.3. Alapfogalmak és definíciók

A távérzékelés és a fotogrammetria tudományos és alkalmazott gyakorlata során számos olyan szakkifejezést és alapfogalmat használunk, amelyek pontos megértése elengedhetetlen a tantárgy elsajátításához. E fogalmak egy része technikai természetű, más részük a mérés technika, a geoinformatika vagy a környezettudomány területéről származik, de mindegyik fontos szerepet játszik abban, hogy a hallgatók helyesen értelmezzék a módszereket, adatokat és elemzéseket. Az alábbiakban a legfontosabb fogalmakat tematikusan, magyarázatokkal ellátva ismertetjük.

Távérzékelés (Remote Sensing)

A távérzékelés olyan adatgyűjtési módszer, amely során a megfigyelt objektummal nincs közvetlen fizikai kapcsolat. Az információt elektromágneses sugárzás – például látható fény, infravörös vagy mikrohullám – közvetítésével szerezjük meg. A távérzékelés lehet aktív vagy passzív:

- *Passzív távérzékelés* esetén az eszköz (pl. műhold, szenzor) a Nap által kibocsátott és a felszínről visszavert vagy kisugárzott elektromágneses energiát érzékeli.
- *Aktív távérzékelés* során a mérőrendszer maga bocsát ki sugárzást (pl. radar, LiDAR), majd érzékeli annak visszaverődését.

Fotogrammetria (Photogrammetry)

A fotogrammetria a képfelvételek alapján végzett geometriai mérések és térképkészítés tudománya. Célja a térbeli objektumok alakjának, méretének és helyzetének meghatározása fényképek segítségével. A fotogrammetria lehet:

- *egyszerű képértékelés* (vizuális, nem metrikus),
- *sztereofotogrammetria*, amikor két átfedő képből háromdimenziós információt nyerünk ki (pl. domborzat),
- *digitális fotogrammetria*, amely számítógépes képelemzésen alapul, gyakran automatikus mérésekkel.

Képalkotó platform (Platform)

Az a hordozóeszköz, amelyen a távérzékelő szenzor elhelyezkedik. Lehet:

- *földfelszíni* (pl. állványra szerelt kamera),
- *légi* (pl. repülőgép, drón),
- *űrbeli* (pl. műhold).

A platform jellemzői (repülési magasság, sebesség, stabilitás) nagymértékben befolyásolják a rögzített adatok minőségét és felhasználhatóságát.

Szenzor (Sensor)

A szenzor az a műszer, amely érzékeli és rögzíti az elektromágneses sugárzást. Lehet:

- *analóg* (filmalapú),
- *digitális* (digitális képpontokat rögzít – pixelek).

Fontos paraméterei: spektrális tartomány, térbeli felbontás, radiometriai felbontás, időbeli felbontás.

Elektromágneses spektrum (Electromagnetic Spectrum)

Az elektromágneses spektrum az elektromágneses sugárzás teljes hullámhossztartományát foglalja magában. A távérzékelésben leggyakrabban használt és vizsgált elektromágneses sávok a 4. táblázatban vannak részletezve.

A növényzet például a közeli infravörös tartományban erősen reflektál, így ez segíti az egészségi állapot vizsgálatát.

Felbontás (Resolution)

A távérzékelési rendszerek egyik legfontosabb jellemzője. Négy típusát különböztetjük meg:

- *térbeli felbontás*: a legkisebb földi objektum, amely még elkülöníthető (mértékegysége általában méter/pixel),
- *spektrális felbontás*: az érzékelő által megkülönböztetett spektrális sávok száma és szélessége,
- *radiometriai felbontás*: a rendszer érzékenysége a sugárzás intenzitásában mutató különbségekre (pl. 8 bites = 256 szint),
- *időbeli felbontás*: megmutatja, milyen gyakran tér vissza a műhold egy adott terület fölé.

Spektrális jelleggörbe (Spectral Signature)

Az egyes felszíni elemek (pl. fák, gyepek, víz, aszfalt) egyedi módon reflektálják vagy nyelik el az elektromágneses sugárzást különböző hullámhosszokon. Ez az egyedi válasz a spektrális jelleggörbe, amely alapján a képosztályozás történik.

Képosztályozás (Classification)

Az a folyamat, amely során a távérzékelési adatokat tematikus kategóriákba soroljuk. Lehet:

- *felügyelt (supervised)*: ismert mintaterületek alapján tanított algoritmus használata,
- *felügyelet nélküli (unsupervised)*: a számítógép automatikusan csoportosítja a pixeleket spektrális hasonlóság alapján.

A cél például különböző erdőtüpusok, vágásterületek, vízfelületek vagy beépített területek elkülönítése.

Sztereopár (Stereop couple)

Két, átfedésben készített légi felvétel, amelyeket sztereoszkóppal vagy digitálisan feldolgozva háromdimenziós hatású képpárrá alakíthatunk. A sztereopárok segítségével meghatározhatók a terep domborzati viszonyai és az objektumok magassága.

Ortofotó (Orthophoto)

Geometriailag korrigált légi felvétel vagy műholdkép, amely méretarányosan pontos, így térképként használható. Az ortorektifikálás során figyelembe vesszük a kameradőlés, terepmagasság és szenzormozgás torzító hatásait.

Digitális domborzatmodell (DTM) és felszínmodell (DSM)

- DTM (Digital Terrain Model): a csupasz talajfelszínt modellezi, növényzet és épületek nélkül.
- DSM (Digital Surface Model): a teljes felszínt modellezi, beleértve a fák koronáját, épületeket, egyéb objektumokat.

Ezek a modellek alapvető fontosságúak az erdőmagasság, kitettség, vízlefolyás, eróziós hajlam stb. meghatározásához.

GIS – Földrajzi Információs Rendszer (Geographycal Inforamational System)

A GIS (Geographic Information System) egy olyan számítógépes rendszer, amely térbeli (földrajzi koordinátákhoz kötött) adatokat gyűjt, tárol, kezel, elemez és vizualizál. A GIS lehetővé teszi a távérzékelésből származó adatok más típusú információkkal való integrációját (pl. kataszteri adatok, terepi felmérések, domborzati modellek).

NDVI-index (Normalized Difference Vegetation Index)

A leggyakrabban használt vegetációs index, amely a növényzet egészségi állapotának becslésére szolgál. Képlete:

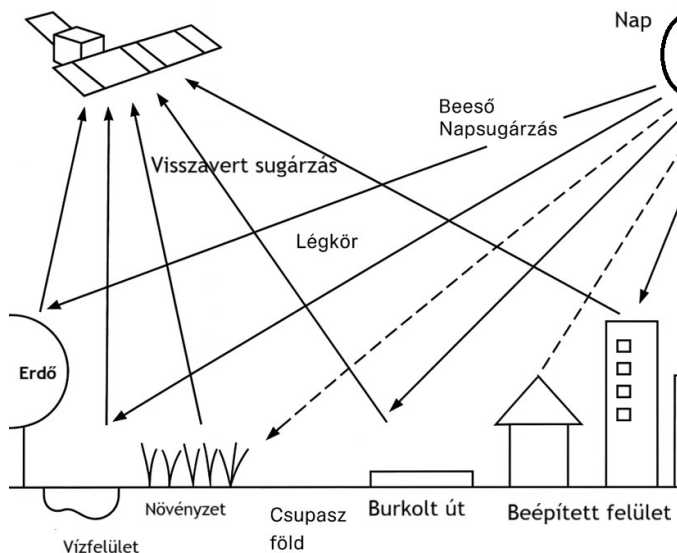
$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$$

Értékei -1 és $+1$ között mozognak. Magas érték ($0,6-0,9$) dús vegetációra, alacsony vagy negatív érték ($0,1$ vagy kevesebb) vízre vagy beépített felületekre utal.

TÁVÉRZÉKELÉS

2.1. A távérzékelés tudományos és technikai alapjai

A távérzékelés mint tudományág és gyakorlati eszköztár azon a fizikai elven alapul, hogy a földi objektumok kölcsönhatásba lépnek az elektromágneses sugárzással. Legtöbb esetben a Naptól származó besugárzásra a különböző felületek (erdő, vízfelület, csupasz föld, épületek stb.) tulajdonságaikból fakadóan különböző módon reagálnak. E kölcsönhatás – amely lehet elnyelés, visszaverődés vagy kibocsátás – megfigyelhető és rögzíthető különböző távolságokból, például műholdakról vagy repülő eszközökről. A távérzékelés alapvető célja az, hogy ezen sugárzási sajátosságokat kvantitatív és kvalitatív módon értelmezve információt nyerjünk a felszín borításáról, állapotáról és változásairól (1. ábra).



1. ábra. A távérzékelés különböző fajtái, forrás: saját szerkesztés

A távérzékelés olyan vizsgálati módszerek összességét jelenti, amelyek lehetővé teszik különböző objektumok, felszíninformák vagy egyéb természeti és mesterséges jelenségek megfigyelését és elemzését anélkül, hogy a mérőeszköz közvetlen

fizikai kapcsolatban állna a vizsgálat tárgyával. Ezek az eljárások olyan szenzorokra és műszaki eszközökre épülnek, amelyek képesek érzékelni, mérni és rögzíteni a vizsgált objektumokról származó sugárzást, hullámokat vagy egyéb jeleket.

A távérzékelés egyik legegyszerűbb, de mégis szemléletes példája maga az olvasás folyamata. Ebben az esetben az emberi szem viselkedik érzékeny szenzorként, amely feldolgozza a papírról visszaverődő fényt – az elektromágneses spektrum látható tartományában –, és ennek alapján különböztetjük meg a sötét (betűk) és világos (háttér) felületeket. Az így szerzett vizuális adatokat az agy interpretálja, és nem csupán formákként, hanem értelmes szimbólumokként – betűként, szavakként és mondatként – azonosítja. Ezáltal az érzékelés révén információvá alakul a nyers adat.

Ez az analógia rávilágít arra, hogy a távérzékelés a szó szoros értelmében is egyfajta „olvasás”: a természet vagy az emberi tevékenység nyomainak, jeleinek értelmezése különféle érzékelőrendszerek segítségével. A „szöveg” ebben az esetben lehet a Föld felszínének hőmérséklet-eloszlása, a vegetáció spektrális jellemzői, a felszíni vizek kiterjedése, vagy akár az urbanizált térségek morfológiája.

A korszerű távérzékelési rendszerek különféle típusú szenzorokat alkalmaznak: optikai, infravörös, mikrohullámú, radarrendszerek, valamint akusztikus érzékelők is szerepet játszhatnak az adatgyűjtésben. Az általuk szolgáltatott adatok lehetnek passzívok – amikor a szenzor a természetes vagy mesterséges forrásból származó sugárzást érzékeli –, vagy aktívok – amikor maga a mérőeszköz bocsát ki jelet, és ennek a visszaverődéséből vonunk le következtetéseket.

A távérzékelte adatok rendkívül sokféle fizikai paramétert képesek leképezni. Például:

- Gravimetrikus mérések során a graviméterek a gravitációs tér kis intenzitásbeli változásait detektálják, melyek információt nyújthatnak a Föld belső szerkezetéről vagy geológiai anomáliákról.
- Akusztikus távérzékelés esetén – például hajókon használt szonár (SONAR) rendszerekben – hanghullámokat bocsátanak ki, majd a visszaverődő hullámokat elemzik, ezáltal meghatározva a tengerfenék mélységét és alakját.
- Elektromágneses távérzékelés – beleértve a műholdas és légi felvételeket – a földfelszínről visszavert vagy kibocsátott elektromágneses sugárzás spektrális tulajdonságait méri. Ilyen módszerekkel nyomon követhetők például a vegetációs indexek (pl. NDVI), a felszíni hőmérséklet, a víztestek kiterjedése vagy akár a légköri összetétel.

A távérzékelés tehát nemcsak térbeli távolságot képes áthidalni, hanem lehetőséget ad időbeli változások nyomon követésére is. A rendszeres mérési ciklusok révén idősort alkothatunk, melyek alapján megfigyelhető például a klímaváltozás hatása, a földhasználat változása vagy a természeti katasztrófák (árvizek, aszályok, erdőtűz) következményei.

Összegzésként elmondható, hogy a távérzékelés egy komplex információ-szerzési folyamat, amelyben a fizikai jelek – legyenek azok fény, hang, gravitáció

vagy hő – strukturált adathalmazokká válnak, melyeket az ember, szoftver vagy mesterséges intelligencia elemez, és ezáltal értelmezhető, döntéstámogató információ keletkezik. A természet „szövegét” olvassuk – de immár nem csak szemmel, hanem korszerű technológiákon keresztül.

2.1.1. A távérzékelés folyamata

A távérzékelés egy komplex, többlépcsős folyamat, amely során a Föld felszínéről vagy más objektumokról nyert információk elektromágneses sugárzás útján kerülnek rögzítésre, majd feldolgozás után alkalmazási célokra felhasználásra. Az alábbi részletes bemutatás lépésről lépésre mutatja be a távérzékelés teljes folyamatát, az energia eredetétől a gyakorlati alkalmazásokig (2. ábra).

A. Energiaforrás

A távérzékelés minden esetben energia jelenlétét feltételezi, amely kölcsönhatásba lép a vizsgált felszínnel. A leggyakoribb és legfontosabb energiaforrás a Nap, amely elektromágneses sugárzást bocsát ki a teljes spektrumban. Ez a sugárzás éri el a Föld felszínét, majd különböző módon viselkedik attól függően, hogy milyen felszíni elemre érkezik (pl. növényzet, víz, talaj, beépített terület).

A távérzékelési rendszerek azonban nem csak a Nap sugárzását használhatják. Aktív rendszerek (részletesebben a 2.1.2. fejezetben) – mint például a LiDAR (fényalapú radar) vagy a radar (pl. Sentinel-1) – saját energiát bocsátanak ki, amely visszaverődés után visszaérkezik a szenzorhoz. Ez különösen hasznos olyan esetekben, amikor a napfény nem elegendő (éjszakai megfigyelés, felhős időjárás).

B. Elektromágneses sugárzás

Az energia továbbítása elektromágneses hullámok formájában történik, amelyek különböző hullámhossztartományokban terjednek. A távérzékelés szempontjából fontos spektrális tartományokat a 4. táblázat szemlélteti. A különböző objektumok különböző módon nyelik el, verik vissza vagy bocsátják ki ezeket a sugárzásokat, ami lehetővé teszi az azonosításukat, osztályozásukat.

C. Felszíni kölcsönhatás

Amikor az elektromágneses sugárzás eléri a felszínt, többféle kölcsönhatás történhet:

1. Reflektálódás (visszaverődés): a sugárzás visszaverődik a felszíni objektumokról. A növényzet például erősen reflektál a közeli infravörös sávban, de elnyeli a vörös fényt.

2. Abszorpció (elnyelés): az anyag elnyeli az energiát, ami hővé alakulhat, vagy kémiai folyamatokat indíthat el.
3. Áteresztés (transzmisszió): a sugárzás áthatol az objektumon (pl. áttetsző jég, vízréteg esetén).
4. Az, hogy a sugárzás milyen arányban verődik vissza, nyelődik el vagy halad át, az adott felszín szerkezeti, anyagbeli és nedvességi tulajdonságaitól függ. Ezeket a viselkedéseket összességében spektrális reflektanciának nevezzük, amely a távérzékelés alapját képezi.

D. Szenzor

A kölcsönhatás után visszaverődő vagy kibocsátott elektromágneses jelet a **szenzor** érzékeli és rögzíti. A szenzor lehet optikai (pl. Landsat, Sentinel-2), termikus, radaros (pl. Sentinel-1) vagy lézerszkennér (LiDAR).

A szenzor működési jellemzői határozzák meg:

- a térbeli felbontást (mekkora területet képvisel egy pixel),
- a spektrális felbontást (hány sávot és milyen hullámhosszakat mér),
- a radiometriai felbontást (az intenzitásértékek érzékenysége),
- valamint az időbeli felbontást (milyen gyakran érhető el adat ugyanarról a területről).

Ezek a tulajdonságok meghatározzák a távérzékelés alkalmazhatóságát különböző szakterületeken, így az erdőszetben is.

E. Adatközlés

A szenzor által rögzített jelek először digitális adatokká alakulnak, majd azok tárolásra és továbbításra kerülnek. Műhold esetén ez gyakran rádióhullámokon keresztül történik, amely során a műhold a begyűjtött adatokat a Földön található vevőállomásokra továbbítja.

Az adatközlés során figyelni kell az adatbiztonságra, torzításmentességre, a késleltetés minimalizálására, valamint a metaadatok (pl. időpont, szenzorbeállítások, földrajzi hely) pontos rögzítésére. Ezek nélkülözhetetlenek a későbbi értelmezéshez és integrációhoz.

F. Adatelemzés, -feldolgozás

A nyers távérzékelési adatok feldolgozása több lépcsőben történik:

1. előfeldolgozás: geometriai, radiometriai, atmoszférikus korrekciók,
2. képi szűrések: zajcsökkentés, élsimítás, textúraelemzés,
3. indexképzés: pl. NDVI, SAVI, EVI, vízindexek, égésindexek,
4. osztályozás: automatikus vagy félautomatikus eljárásokkal (felügyelt/felügyelet nélküli),

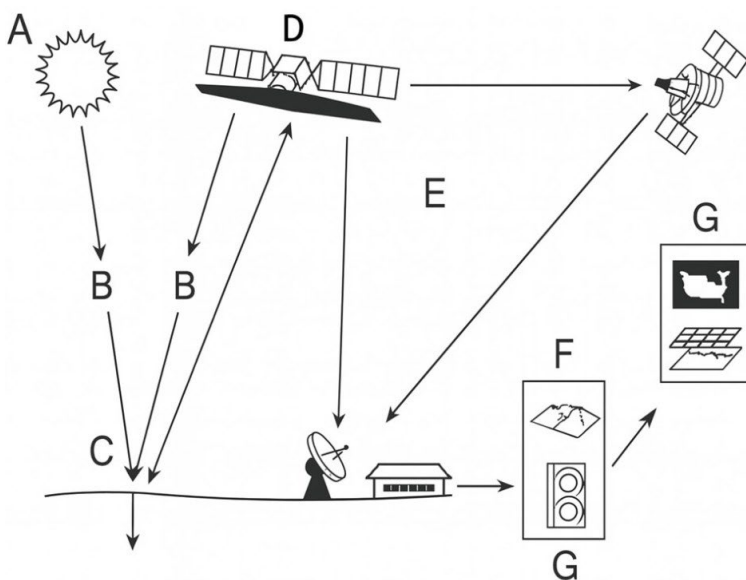
5. térbeli elemzés: lejtés, domborzat, távolság, útvonaltervezés,
6. idősoros vizsgálat: változások detektálása, trendek meghatározása.

A modern feldolgozási eljárások gyakran használnak mesterséges intelligencián alapuló módszereket, valamint térinformatikai integrációt (GIS), amely lehetővé teszi a más típusú adatokkal való kombinálást (pl. kataszteri térképek, tulajdonviszonyok, természetvédelmi határok).

G. Alkalmazások

A feldolgozott adatok végül gyakorlati felhasználásra kerülnek különböző szakterületeken. Az erdőszetben például a következő alkalmazások a leggyakoribbak:

- erdőleltár: koronamagasság, záródás, fajösszetétel becslése,
- monitoring: egészségi állapot követése, erdőtüzek, kórokozók hatásainak feltérképezése,
- degradációdetektálás: tarvágások, illegális fakitermelések azonosítása,
- vízgazdálkodás: vízgyűjtők monitoringja, eróziós zónák feltérképezése,
- erdősisítés: új telepítések nyomon követése,
- változásdetektálás: idősoros vizsgálatok alapján történő elemzések (pl. 1990–2025 közötti erdőborítási változások),
- élőhelyvédelem: természetvédelmi értékek állapotának vizsgálata, zavarások nyomon követése.



2. ábra. A távérzékelés folyamata, forrás: saját szerkesztés

Összegzés

A távérzékelés folyamata egy energián alapuló, fizikai-technológiai láncolat, amely a Nap vagy más forrásból származó elektromágneses sugárzás felhasználásával információt nyer a felszín objektumairól. A kölcsönhatás eredményeként visszaverődő sugárzást a szenzorok érzékelik, majd az adatátvitel és -feldolgozás révén a felhasználó számára értelmezhető formában jelennek meg. E folyamat megbízható működése biztosítja azt, hogy a távérzékelés alkalmazható legyen a valós világ változásainak térbeli és időbeli nyomon követésére, különösen az olyan komplex és érzékeny rendszerek esetében, mint az erdők.

2.1.2. A távérzékelés két fő típusa

A távérzékelés során különbséget kell tenni passzív és aktív rendszerek között. A passzív rendszerek – mint például a legtöbb optikai műhold – a Nap által kisugárzott fényt detektálják, míg az aktív rendszerek (pl. radar, LiDAR) maguk bocsátanak ki elektromágneses jelet, és a visszaverődést mérik.

A passzív távérzékelési rendszerek a természetes fényforrásból – jellemzően a Naptól – érkező elektromágneses sugárzást és annak a felszínről visszaverődő vagy kibocsátott részét érzékelik. A passzív rendszerek működése tehát szorosan függ a napfény intenzitásától, beesési szögétől és a légköri viszonyoktól (pl. felhőzet, por, aeroszolk) (3. ábra).

A passzív távérzékelési rendszerek leggyakrabban a látható, közeli infravörös és rövidhullámú infravörös tartományokban dolgoznak, de léteznek termális infravörös szenzorok is, amelyek a felszín által kisugárzott hősugárzást mérik. Az ilyen rendszerek lehetnek műholdas (pl. Landsat, Sentinel-2, MODIS) vagy légi alapú (fotókamerák, multispektrális szenzorok drónra vagy repülőre szerelve).

Jellemzők:

- Sugárzás forrása: Nap (vagy termális kisugárzás esetén maga az objektum).
- Előnyök: nagy terület lefedése, több spektrális tartomány vizsgálata, széles körű elérhetőség.
- Hátrányok: felhőérzékenység, nappali megfigyelésre korlátozódás, időjárás-függőség.

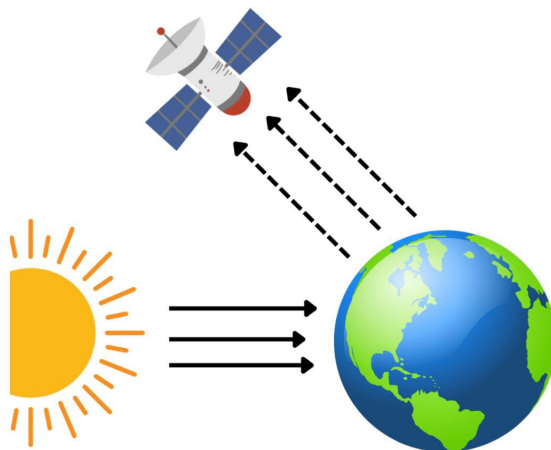
Alkalmazások az erdészetben:

- erdőborítás térképezése és osztályozása,
- vegetációs indexek számítása (NDVI, SAVI, EVI),
- fás növényzet egészségi állapotának vizsgálata,
- idősoros változások elemzése (pl. tarvágások, regeneráció),
- faj- vagy korosztály szerinti osztályozás, amennyiben spektrálisan elkülönülnek.

Példák passzív műholdas rendszerekre:

- Landsat (NASA/USGS): 30 m-es felbontás, 1972 óta,

- Sentinel-2 (ESA): 10–20 m felbontás, több spektrális sáv,
- MODIS (NASA): globális skála, napi frissítés, 250–1000 m felbontás.



3. ábra. *Passzív távérzékelés, forrás: Equator 2023*

Az aktív rendszerek – szemben a passzív rendszerekkel – saját maguk bocsátanak ki elektromágneses sugárzást, majd mérik a visszaverődő jelet. Ezáltal függetlenek a természetes fényviszonyoktól, így működésük napszaktól, időjárástól, felhőborítástól nagyrészt független. Az aktív rendszerek a távérzékelés egyre fontosabb eszközeivé váltak az erdészetben is (4. ábra).

A két legismertebb aktív technológia:

a) Radar (Radio Detection and Ranging)

A radar elektromágneses hullámokat – jellemzően mikrohullámú tartományban – bocsát ki, és érzékeli, hogy azok hogyan verődnek vissza a felszínről. A visszaverődés mértéke és időzítése alapján meghatározható a felszín távolsága, érdessége, nedvességtartalma és szerkezete.

- Előnye: felhőn és növényzeten is áthatol; éjjel-nappal használható.
- Hátránya: a kép spektrálisan kevésbé informatív, a szokásos vizuális elemzés nehezebb.

Példa:

Sentinel-1 (ESA): C-sávú radar, 10 m-es felbontással, kifejezetten erdészeti és mezőgazdasági monitorozásra optimalizálva.

b) LiDAR (Light Detection and Ranging)

A LiDAR egy lézerimpulzuson alapuló technológia, amely rendkívül pontos háromdimenziós (3D) térképeket képes készíteni. A lézernyalábok visszaverődé-

se alapján meghatározható a koronaszint, a törzsszint, sőt a talajfelszín is a sűrű vegetáció alatt.

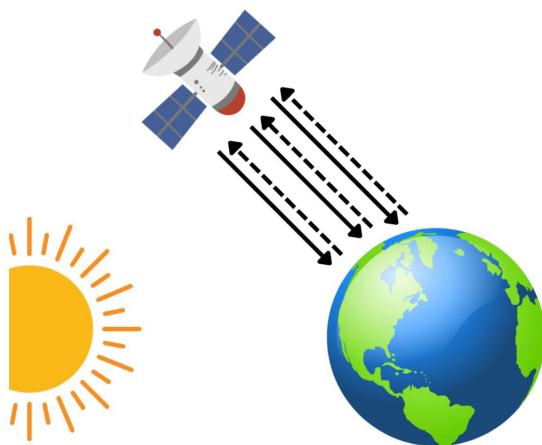
- Előnye: részletes 3D szerkezeti információk, még zárt állományokban is.
- Hátránya: költségesebb, és nagy adatmértéket generál.

Alkalmazásai erdészetben:

- faegyedek magasságának mérése,
- térfogatszámítás, állománysűrűség becslése,
- domborzatmodellek készítése zárt erdők alatt is.

Példák:

- légi LiDAR: repülőről vagy drónról működtetett rendszer,
- földi LiDAR: állványról, pl. törzsvastagság, és szerkezeti felmérésre.



4. ábra. Aktív távérzékelés, forrás: Equator 2023

Összegzőként elmondható, hogy a távérzékelés két fő típusa – passzív és aktív – egymást kiegészítő módszertani és technológiai eszköztárat képvisel (2. táblázat). A passzív rendszerek spektrálisan gazdag képi információt nyújtanak, míg az aktív rendszerek kiváló szerkezeti, magassági és időjárás-független adatokat biztosítanak. Az erdészetben mindkét típusnak helye van: attól függően, hogy az adott cél egy állomány záródásának értékelése, vagy éppen egy koronaszintű szerkezeti elemzés, eltérő rendszerek alkalmazása szükséges. A modern szemléltető erdészeti távérzékelés a két technológia szinergiájára épül.

Emellett még a modern távérzékelési tevékenységekben egyre gyakrabban alkalmazzák a passzív és aktív rendszerek kombinációját. Ezt nevezik adatfúzió-nak, amelynek célja az egyes módszerek erősségeinek egyesítése és a hiányosságok kompenzálása.

2. táblázat. *Összehasonlító áttekintés a passzív és aktív rendszerek tekintetében*

Tulajdonság	Passzív rendszerek	Aktív rendszerek
Energiaforrás	Külső (Nap)	Belső (saját generátor)
Működés napszaktól függ	Igen	Nem
Felhőérzékenység	Magas	Alacsony
Tipikus hullámhosszak	VIS, NIR, SWIR, TIR	Mikrohullámú (radar), lézer (LiDAR)
3D adatgyűjtés képessége	Korlátozott	Nagyon jó (pl. LiDAR)
Spektrális információ	Részletes	Korlátozott
Tipikus alkalmazás	Borítás, vegetáció, osztályozás	Magasság, szerkezet, terepmodellezés

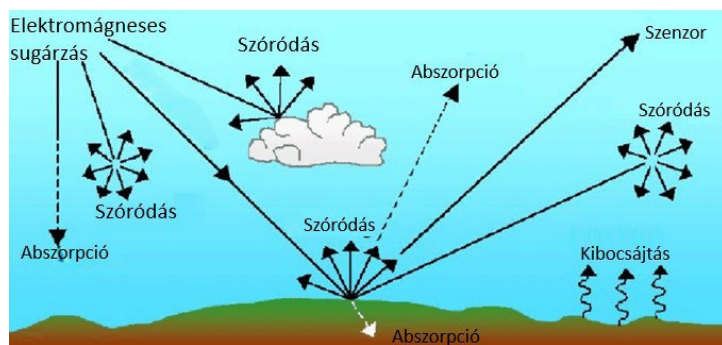
Például a Sentinel-2 (optikai, passzív) és Sentinel-1 (radar, aktív) kombinálása lehetővé teszi, hogy egy adott erdőrészlet spektrális és szerkezeti információi együttesen álljanak rendelkezésre. A LiDAR és multispektrális képek együttes feldolgozása lehetővé teszi a fajazonosítást és a biomasszabecslést egyaránt.

2.2. Az elektromágneses sugárzás és kölcsönhatása a felszínnel

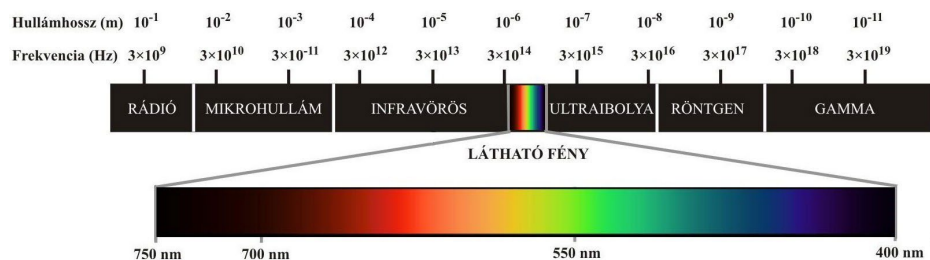
Az elektromágneses sugárzás egy hullámként terjedő energiaforma, amelyet a távérzékelési rendszerek rögzítenek. A spektrum különböző részein elhelyezkedő hullámhosszak eltérő módon reagálnak a felszín különböző anyagaira. A teljes elektromágneses hullámhossztartomány (spektrum) nem használható fel műholdas távérzékelésre. Ennek oka, hogy a Föld légköre hat az elektromágneses sugárzásra. A légkörön való áthaladás közben a sugárzás a légkör alkotórészein megtörhet (szóródhat), azokról visszaverődhet, ill. elnyelődhet. Mindhárom jelenség függ a sugárzás hullámhosszától és a sugárzással kölcsönhatásba kerülő légköri részecske anyagi minőségétől, valamint a sugárzás légkörben megtett útjától (Vágó–Seres–Hegedűs 2011) (5. ábra).

Az erdészeti távérzékelés szempontjából a spektrális tartományok értéktartományai a 4. táblázatban vannak részletezve. A legfontosabbak:

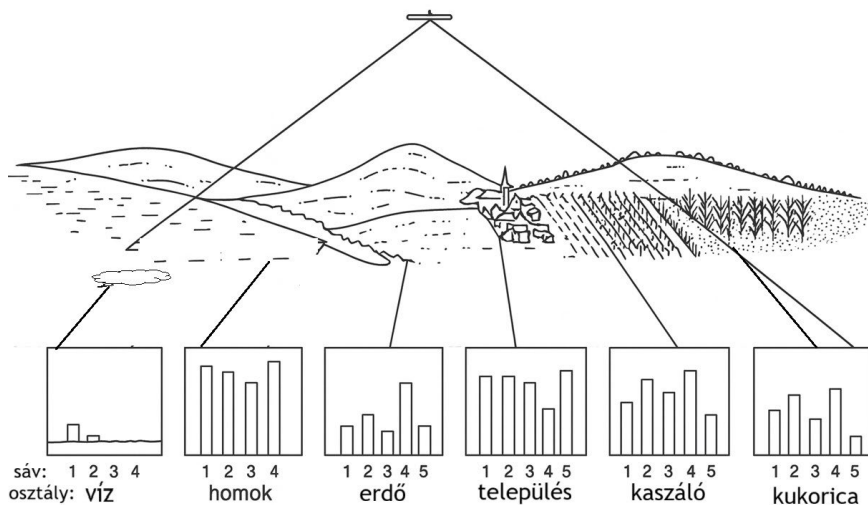
- Látható fény – az emberi szem által érzékelt tartomány. A zöld vegetáció általában a zöld tartományban reflektál, míg a kék és vörös tartományban elnyel.
- Közeli infravörös – a vegetáció rendkívül erősen visszaveri ezt a tartományt, ezért kiváló indikátora a levélfelület állapotának és sűrűségének.
- Rövidhullámú infravörös (SWIR): információt nyújt a növények víztartalmáról.
- Termikus infravörös: a felszín hőmérsékletét méri, ritkábban használt erdészeti célokra, de például tüzesetek detektálására kiváló (6. ábra).



5. ábra. Elektromágneses sugárzás útja, saját szerkesztés



6. ábra. Az elektromágneses spektrum, forrás: Hopp–Kemény–Smausz Kolumbán–Morvai–Ónodi–Degovics 2015



7. ábra. Multispektrális szenzor rögzítette spektrális jelleggörbék, forrás: Csornai–László 2011 alapján saját szerkesztés

A különböző felszínborítási típusok (pl. lombos erdő, tűlevelű erdő, fás legelő, homok, vízfelület, település, mezőgazdasági területek, kopár terület) sajátos spektrális „ujjlenyomattal” rendelkeznek – ezt nevezzük spektrális jelleggörbének –, amely alapján az osztályozási algoritmusok el tudják különíteni őket egymástól (7. ábra).

2.2.1. A sugárzás fizikai törvényei

A távérzékelés alapját minden esetben a sugárzó energia képezi. A vizsgálatokhoz szükséges energiát vagy a természetes források (elsősorban a Nap), vagy mesterséges eszközök (például lézer, radar) bocsátják ki. Ezek az energiaforrások **elektromágneses sugárzást** generálnak, amely képes a térben terjedni, kölcsönhatásba lépni a felszíni objektumokkal, majd visszaverődve, elnyelődve vagy áthaladva információt szolgáltatni a felszín fizikai és biológiai tulajdonságairól.

2.2.2. Elektromágneses energia: alapfogalmak

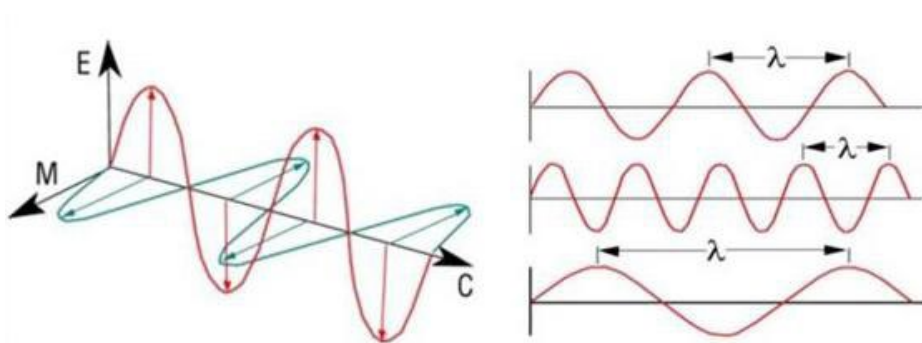
Az elektromágneses sugárzás az energia egyik formája, amely térben **szinusz alakú hullámként** terjed, és nem igényel közvetítő közeget (vákuumban is halad). A hullám jellemzőit az alábbi három paraméterrel írhatjuk le:

- **Hullámhossz (λ):** a hullám két azonos fázisú pontja közötti távolság, amelyet általában nanométerben (nm) vagy mikrométerben (μm) adunk meg. A hullámhossz határozza meg a sugárzás színét (a látható tartományban), illetve az adott anyaghoz való kölcsönhatás természetét. Jelen egyetemi jegyzetben következetesen a nanométerben kifejezett értékeket használjuk, a félreértések elkerülése érdekében.
- **Frekvencia (ν):** az egységnyi idő alatt áthaladó hullámok száma, mértékegysége hertz (Hz). A frekvencia és a hullámhossz között inverz kapcsolat van.
- **Terjedési sebesség (c):** az elektromágneses hullám sebessége vákuumban állandó, kb. 3×10^8 m/s. A sebesség, frekvencia és hullámhossz kapcsolata:

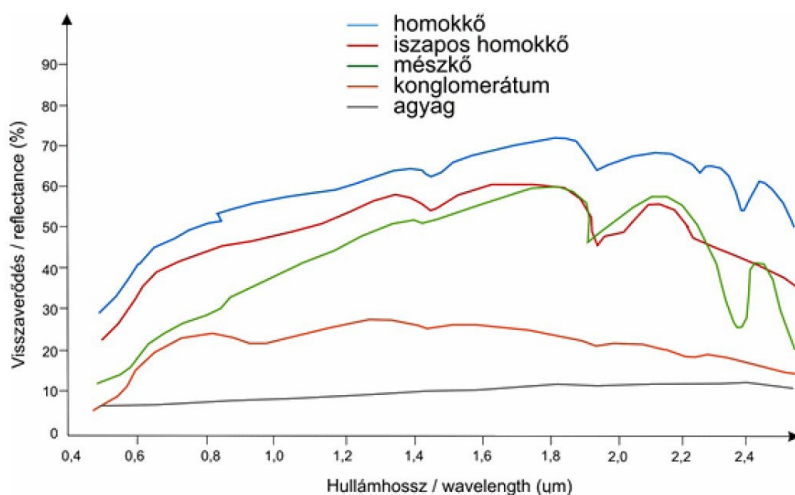
$$c = \lambda \times \nu$$

Ez az összefüggés mutatja, hogy minél rövidebb a hullámhossz, annál nagyobb a frekvenciája, és fordítva (8. ábra).

Nem csupán a légkör összetevőire igaz, hogy különböző anyagi tulajdonságaik szerint eltérően reagálnak az elektromágneses sugárzás különféle hullámhossztartományjaiban, hanem ugyanez érvényes a Föld felszínének anyagaira és a rajta található természetes vagy mesterséges tereptárgyakra is. A különböző típusú felszíni objektumok – mint például ásványok, kőzetek (9. ábra), talajfajták, növényzet, vízfelszínek, mesterséges burkolatok vagy építmények – eltérő mértékben képesek visszaverni, elnyelni vagy áteresztetni a rájuk eső elektromágneses sugárzást, és ezek a különbségek minden hullámhossztartományban sajátos mintázatot mutatnak.



8. ábra. Az elektromágneses hullám összetevő. E – elektromágnes tér; M – mágneses tér; C – fénysebesség, λ – hullámhossz, forrás: Verőné Wojtaszek 2010



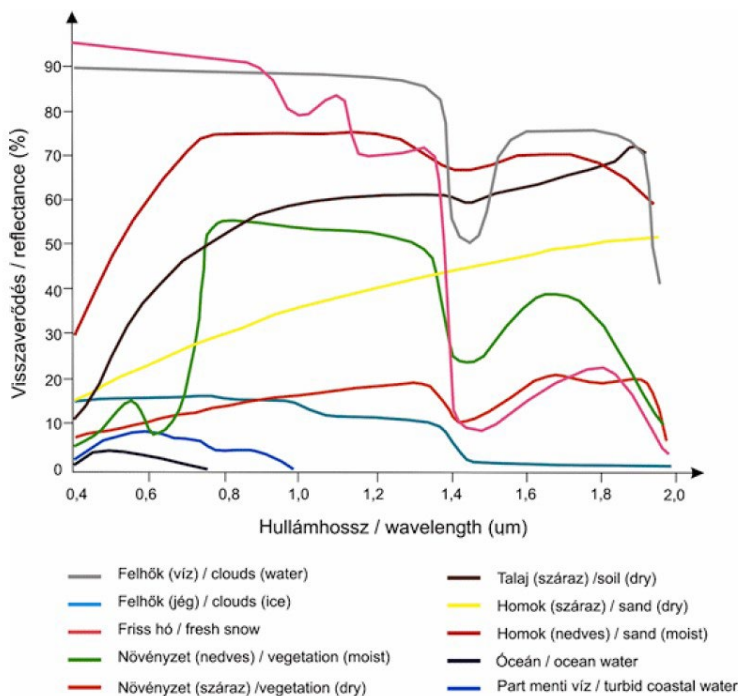
9. ábra. Különböző közet elektromágneses sugárzást visszaverő tulajdonságai a hullámhossz függvényében, forrás: Vágó et al. 2009

Ez a spektrális visszaverődési jellemző – az úgynevezett reflektancia-görbe – egyfajta „ujjlenyomata” az adott anyagnak. A spektrális jelleggörbe alapján tehát megbízhatóan azonosítható, hogy egy adott pixel milyen felszínborítást vagy objektumot reprezentál a műholdfelvételen. Például a zöld növényzet erősen visszaveri a közeli infravörös sugárzást, míg az aszfaltburkolat vagy a vízfelület sokkal kisebb mértékben (10. ábra).

A modern távérzékelési rendszerek – különösen a multispektrális és hiperspektrális műholdak – éppen ezeket az eltérő spektrális válaszokat használják ki a felszíni objektumok elkülönítéséhez és tematikus térképek előállításához.

E módszer segítségével nemcsak a felszínborítás típusát lehet meghatározni, hanem akár olyan finom különbségek is kimutathatók, mint a növényzet egészségi állapota, a talaj nedvességtartalma vagy az épületszerkezetek anyaga.

Ez a fizikai alap az, amelyre a távérzékelés mint tudomány és alkalmazástechnika épül: az elektromágneses spektrum különböző tartományában végzett észlelések lehetővé teszik a felszín részletes és sokoldalú vizsgálatát – anélkül, hogy közvetlenül érintkeznénk vele.



10. ábra. Különböző közegek elektromágneses sugárzást visszaverő tulajdonságai a hullámhossz függvényében, forrás: Vágó et al. 2009

Természetes és mesterséges energiaforrások

A távérzékelés során alkalmazott energiaforrásokat két fő csoportra oszthatjuk:

a) Természetes energiaforrások

- Nap: A legjelentősebb természetes forrás. Az általa kibocsátott energia főként az ultraibolya, látható és közeli infravörös tartományban koncentrálódik.
- Földfelszín és felszíni objektumok: A felszíni testek – például a talaj, a növényzet vagy a víz – maguk is képesek termikus (hő) sugárzást kibocsátani. Ez a sugárzás elsősorban a termális infravörös tartományban figyelhető meg.

b) Mesterséges energiaforrások

- Radar: Mikro- vagy rádióhullámokat bocsát ki, és érzékeli azok visszaverődését. Alkalmazási területei közé tartozik a topográfia, a mozgásérzékelés és az éjszakai vagy borult időben végzett megfigyelés.
- Lézer (LiDAR): Koherens, nagyon pontos fényimpulzusokat generál, melyek a felszínről visszaverődve lehetővé teszik a háromdimenziós térképek létrehozását.

Ezek az energiaforrások aktív rendszerek alapját képezik, mivel az eszköz maga bocsátja ki a sugárzást, szemben a passzív rendszerekkel, amelyek csak érzékelik a természetes sugárzást.

A sugárzás hullámtermészete

Az elektromágneses sugárzás transzverzális hullám, ami azt jelenti, hogy az elektromos és mágneses mezők egymásra merőlegesen, a haladási irányra is merőlegesen rezegnek (11. ábra). A hullám modellezésére általában szinuszhullámot használunk, amely a sugárzás oszcillációját és energiatartását jól szemlélteti.

A hullámhossz és frekvencia meghatározza, hogy a sugárzás miként lép kölcsönhatásba az anyagokkal:

- a rövidebb hullámhosszak (pl. ultraibolya) energiadúsabbak, de kevésbé hatolnak mélyre,
- a hosszabb hullámhosszak (pl. mikrohullám, radar) kevésbé energikusak, viszont jobban áthatolnak a növényzeti takaráson, ködön vagy felhőn.

A sugárzás eloszlása: Planck-, Wien- és Stefan–Boltzmann-törvény

A természetes testek sugárzásának eloszlását és intenzitását több fizikai törvény is leírja:

Planck-törvény:

Megmutatja, hogy egy adott hőmérsékletű test milyen intenzitással sugároz különböző hullámhosszokon. A hőmérséklet növekedésével nő az összes kisugárzott energia, és a kibocsátott spektrum eltolódik a rövidebb hullámhossz felé.

Wien-féle eltolódási törvény:

A maximális sugárzási intenzitás hullámhossza a test hőmérsékletétől függ:

$$\lambda_{\text{max}} = b / T,$$

ahol:

- λ_{max} = a maximális sugárzási intenzitáshoz tartozó hullámhossz,

- T = abszolút hőmérséklet (Kelvin),
- b = Wien-állandó (kb. $2\,898\,000\text{ nm}\cdot\text{K}$).

Ez a törvény megmagyarázza például, hogy a Nap maximuma a látható fény tartományába esik ($\sim 0,400\text{--}0,700\text{ nm}$), míg a Föld felszíne inkább a termális infravörösben ($7000\text{--}13\,000\text{ nm}$) sugároz.

Stefan–Boltzmann-törvény:

E törvény szerint a sugárzott teljes energia (M) egyenesen arányos a test abszolút hőmérsékletének negyedik hatványával:

$$M = \sigma T^4,$$

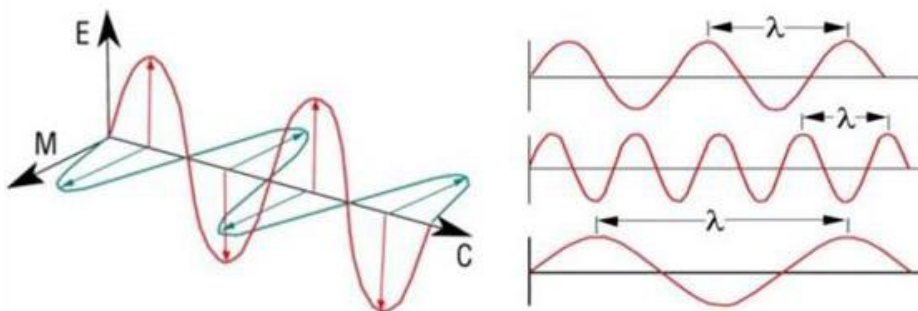
ahol:

- σ = Stefan–Boltzmann-állandó ($5,67 \times 10^{-8}\text{ W/m}^2\cdot\text{K}^4$),
- T = test abszolút hőmérséklete (Kelvin).

Ezen összefüggés alapján számítható ki, mennyi összenergiát sugároz ki például egy talajfelszín adott hőmérsékleten.

Összefoglalás

A távérzékelés elméleti alapját az elektromágneses sugárzás fizikai tulajdonságainak ismerete jelenti. A természetes (pl. Nap, földfelszín) és mesterséges (pl. radar, lézer) energiaforrások által kibocsátott sugárzás viselkedése – hullámhossz, frekvencia, intenzitás – meghatározza, hogy milyen típusú szenzorral és mely spektrális tartományban érdemes a felszínt vizsgálni. A fizikai törvények – különösen a Planck-, Wien- és Stefan–Boltzmann-törvény – biztosítják annak az elméleti háttérét, hogy a különböző testek mikor és hogyan bocsátanak ki mérhető sugárzást. Ezek az ismeretek szükségesek a szenzortervezéshez, a megfelelő hullámhossztartomány kiválasztásához és a mért adatok helyes értelmezéséhez a távérzékelési gyakorlatban.



11. ábra. Az elektromágneses hullám összetevői: E – elektromágnes tér, M – mágneses tér, C – terjedés, λ – hullámhossz, forrás: Verőné Wojtaszek 2010

2.3. Távérzékelési platformok és szenzortípusok

A távérzékelés során alkalmazott rendszerek három fő platformon működnek:

- 1. Műholdak: globális lefedettséget és rendszeres újrafelvételt biztosítanak. Példák: Landsat, Sentinel, WorldView.
- 2. Repülőgépek: közepes területi felbontást és testreszabott repülési magasságot kínálnak. Gyakori légi fényképezéshez.
- 3. Drónok (UAV-ok): kis területeken nagy térbeli és időbeli felbontást biztosítanak. Erdészeti vágásterületek, fiatal állományok, károsodott zónák felmérésére kiváló.

A szenzorok lehetnek pánkromatikusak (egyetlen széles sáv, de magas térbeli felbontás), multispektrálisak (több elkülönített sávban mérnek), hiperspektrálisak (száz vagy több sáv, nagy spektrális felbontással) vagy radar- és lézerszkennerek, amelyek aktív szenzorként működnek.

2.4. Felbontások és azok szerepe

A műholdas távérzékelés egyik legfontosabb technikai jellemzője a felbontás fogalma, amely négy fő kategóriába sorolható: térbeli, spektrális, radiometriai és időbeli felbontás. Ezek együttesen határozzák meg az adatok hasznosíthatóságát és alkalmazási területét.

2.4.1. Térbeli felbontás

A térbeli felbontás megmutatja, hogy a műhold szenzora mekkora földfelszíni területet fed le egyetlen pixelen belül. Ez azt jelenti, hogy minél kisebb egy pixel mérete (pl. 0,5 m), annál részletesebb az adott felvétel, és annál kisebb objektumokat lehet vele azonosítani. (pl. Sentinel-2: 10 m; WorldView: 0,3 m) (3. táblázat).

3. táblázat. A műholdak térbeli felbontása, jellemző alkalmazásai

Műhold	Térbeli felbontás	Jellemző alkalmazás
Sentinel-2 (MSI)	10–60 m	Földhasználat, vegetációmonitoring
Landsat-8 (OLI)	15–100 m	Hosszú távú környezeti vizsgálatok
WorldView-3	0,31 m (pánkromatikus)	Városi térképezés, precíziós mezőgazdaság
Pleiades-1	0,5 m	Infrastruktúra-elemzés, katonai célok
GeoEye-1	0,41 m	Részletes térképezés, biztonságpolitika

A térbeli felbontásnak abban áll a jelentősége, hogy a következő felbontási típusok különböző célú elemzésekre adnak lehetőséget:

- magas térbeli felbontás (0,3–1 m): objektumalapú azonosítás (autók, utak, házak),
- közepes felbontás (10–30 m): mezőgazdasági parcellák, erdőállományok megkülönböztetése,
- alacsony felbontás (>100 m): globális klímamodellezés, bioszféra-monitoring.

A technológia fejlődésével a kereskedelmi és polgári célú távérzékelés is elérte a korábban csak katonai műholdakra jellemző részletességet.

2.4.2. Spektrális felbontás

A távérzékelés egyik alapvető sajátossága, hogy a felszíni objektumokról nem csupán térbeli mintázatokat gyűjt, hanem az elektromágneses sugárzás hullámhossz szerinti viselkedését is rögzíti. A különböző anyagok egyedi módon nyelik el, verik vissza vagy bocsátják ki a sugárzást, és ezek a különbségek a spektrális tartományokban jelennek meg. A spektrális felbontás azt mutatja meg, hogy a szenzor mennyire részletesen képes megkülönböztetni az egyes hullámhosszakokat, vagyis mennyire finoman „látja” az elektromágneses spektrumot. Amíg a térbeli felbontás a földfelszín legkisebb felismerhető objektumainak méretét jelöli, addig a spektrális felbontás a hullámhosszak elkülönítési képességére utal, és közvetlenül befolyásolja az anyagazonosítás pontosságát.

A spektrális felbontás alapvető szerepet játszik a távérzékelési rendszerek információtartalmának meghatározásában. Minél több és minél keskenyebb spektrális sáv áll rendelkezésre, annál részletesebben lehet vizsgálni a felszíni objektumok tulajdonságait. A multispektrális adatok elsősorban felszíntípusok elkülönítésében és általános környezeti vizsgálatokban eredményesek, míg a hiperspektrális rendszerek lehetővé teszik az anyagazonosítás, a diagnosztikai környezetmonitoring és a precíziós mezőgazdaság legmagasabb szintjét.

A távérzékelési rendszerek tervezése során ez a paraméter alapvetően meghatározza a műhold vagy drón által nyújtott információ részletességét. A spektrális felbontás növekedése jelentősen javíthatja a felszíni objektumok megkülönböztethetőségét, ugyanakkor nagyobb adatmértetet, komplexebb feldolgozást és érzékenyebb műszaki megoldásokat igényel. Ennek megértéséhez először a spektrális tartományok és a mérési elvek áttekintése szükséges.

Spektrális tartományok és spektrális felbontás

A spektrális felbontás szorosan kapcsolódik ahhoz, hogy a távérzékelési szenzor az elektromágneses spektrum mely részein és milyen finomsággal végez mérést. A spektrum főbb tartományai a távérzékelés szempontjából a 4. táblázatban tekinthetők át:

4. táblázat. *Az elektromágneses spektrum fő tartományai a távérzékelésben*

Spektrális tartomány	Hullámhossz (nm)	Fő alkalmazási területek
Ultraibolya (UV)	10–400	légköri vizsgálatok, ózonmérés
Látható fény (VIS)	400–700	felszíni elkülönítés, színes megjelenítés
Közei infravörös (NIR)	700–1300	vegetáció-, biomassza-, vízhatár-felismerés
Középső infravörös (SWIR)	1300–3000	víztartalom, ásványok, talajviszonyok
Termális infravörös (TIR)	3000–14000	felszíni hőmérséklet, hőkibocsátás
Mikrohullám	1 mm–1 m	radaros távérzékelés, felszínstruktúra

A spektrális felbontás azt mutatja meg, hogy a szenzor hány különálló sávra bontja a fenti tartományokat, illetve milyen szélességűek ezek a sávok. A sáv szélesség döntő fontosságú, mert minél keskenyebb a sáv, annál finomabb anyagi különbségek érzékelhetők (5. táblázat).

5. táblázat. *Távérzékelési rendszerek spektrális felbontás szerint*

Rendszer típusa	Spektrális sávok száma	Sáv szélesség	Jellemző
Panchromatikus	1 széles sáv	nagyon nagy	alacsony spektrális részletesség, magas térbeli felbontás
Multispektrális	3–13 sáv	közepes szélesség	felszíntípusok elkülönítésére kiváló
Hiperspektrális	>100 sáv	nagyon keskeny	anyagazonosítás, részletes spektrális elemzés

A multispektrális rendszerek a gyakorlatban a legelterjedtebbek (pl. Sentinel-2, Landsat), míg a hiperspektrális rendszerek (pl. PRISMA, EnMAP) elsősorban speciális anyagvizsgálati és környezetdiagnosztikai alkalmazásokhoz alkalmasak.

Spektrális jelleggörbék és a spektrális felbontás szerepe

A felszíni objektumok az elektromágneses sugárzással való kölcsönhatás alapján egyedi spektrális viselkedést mutatnak. Ez a viselkedés grafikus ábrázolásban a spektrális reflektancia-görbe, vagy más néven spektrális jelleggörbe. A spektrális felbontás határozza meg, hogy a szenzor mennyire részletesen képes rögzíteni ezt a görbét (6. táblázat).

Ezek a spektrális különbségek azonban csak akkor használhatók ki teljes mértékben, ha a szenzor kellően finom hullámhosszfelbontással dolgozik. A hiperspektrális rendszerek képesek az egyes anyagokra jellemző keskeny elnyelési sávokat is elkülöníteni.

6. táblázat. *Felszíni objektumokra jellemző spektrális jellegzőrbe*

Objektumtípus	Látható tartomány	NIR-tartomány	SWIR-tartomány
Egészséges vegetáció	erős elnyelés a vörösben	erős visszaverés	víztartalom-érzékeny csúcsok
Száraz talaj	közepes reflektancia	enyhén növekvő reflektancia	ásványokra jellemző abszorpciós pontok
Víz	nagyon alacsony reflektancia	tovább csökken	szinte nulla reflektancia
Városi felszínek	széles skálán változó	anyagtól függően eltérő	csekély víztartalomjelleg

Multispektrális és hiperspektrális rendszerek összehasonlítása

A multispektrális és hiperspektrális megközelítések eltérő előnyökkel és korlátokkal rendelkeznek. Ezek a különbségek jól áttekinthetők a 7. táblázatban.

7. táblázat. *Multi- és hiperspektrális rendszerek összehasonlítása*

Tulajdonság	Multispektrális rendszer	Hiperspektrális rendszer
Sávok száma	4–13	100–400
Spektrális felbontás	közepes	nagyon magas
Anyagazonosítás	általános kategóriák	részletes, fajlagos anyagok
Feldolgozási igény	mérsékelt	rendkívül magas
Adatméret	kicsi–közepes	nagyon nagy
Alkalmazhatóság	általános távérzékelési feladatok	speciális diagnosztikai vizsgálatok

A gyakorlatban a multispektrális adatok széles körben használhatók, míg a hiperspektrális rendszerek olyan esetekben ideálisak, amikor részletes, anyag-szintű felismerés szükséges (pl. ásványtan, precíziós mezőgazdaság, szennyező-anyagok kimutatása).

Spektrális felbontás és adatfeldolgozás

A spektrális felbontás nem csupán a mérési technológiára van hatással, hanem meghatározza az alkalmazható feldolgozási módszereket is. A spektrális sávok mennyisége és finomsága közvetlenül befolyásolja az osztályozási, azonosítási és elemzési eljárások eredményességét.

Spektrális indexek szerepe

A multispektrális adatokra épülő spektrális indexek – például a vegetációs indexek – érzékenyek a sávok helyes elhelyezkedésére. A 8. táblázat néhány gyakran alkalmazott indexet mutat be.

8. táblázat. *A spektrális indexek szerepe*

Index neve	Használt sávok	Fő cél
NDVI	vörös, NIR	vegetációaktivitás, biomassa
EVI	kék, vörös, NIR	növényzet pontosabb analízise
NDWI	NIR, SWIR	víztartalom kimutatása

Minél finomabban meghatározott a spektrális sáv, annál érzékenyebbek és megbízhatóbbak ezek az indexek.

Osztályozási eljárások hatékonysága

A spektrális felbontás határozza meg, hogy a felszíni borítási kategóriák mennyire könnyen különíthetők el egymástól. A modern adatfeldolgozás általában gépi tanulási eljárásokon alapul (pl. Random Forest, Support Vector Machine). Ezek annál jobb eredményt adnak, minél nagyobb a spektrális információtartalom.

Anyagazonosítás

A hiperspektrális rendszerek különösen alkalmasak anyagi tulajdonságok vizsgálatára. A keskeny sávok lehetővé teszik az egyes anyagok jellegzetes abszorpciós csúcsainak felismerését. A 9. táblázat példát mutat be néhány anyag tipikus abszorpciós sávjára.

9. táblázat. *Anyagazonosítás spektrális felbontás segítségével*

Anyag	Jellemző abszorpciós pontok (nm)
Klorofill	430–450, 660–680
Víz	970, 1200, 1450, 1940
Agrominérálok	2200–2350

Ezek a pontok csak keskeny spektrális felbontással detektálhatók pontosan.

A spektrális felbontás technikai vonatkozásai

A spektrális felbontás nemcsak az információtartalmat, hanem a műszaki megoldásokat is befolyásolja. A szenzortervezés során kompromisszumok szükségesek a sáv szélesség, térbeli felbontás és jel-zaj arány között.

Felbontási kompromisszumok

A nagy spektrális felbontás általában kisebb térbeli felbontást eredményez. A panchromatikus sáv például szélesebb hullámsávot használ, ami több fotont gyűjt, így jobb térbeli felbontást tesz lehetővé. A multispektrális és hiperspektrális sávok keskenyebbek, így kevésbé „fényerősek”, ezért a térbeli felbontás csökkenhet.

Jel-zaj arány (SNR)

A keskenyebb sávok érzékenyebbek a zajra, és speciális detektorokat igényelnek. A szenzor minősége és az optikai rendszer kialakítása meghatározza, milyen mértékben képes megbízható jelet rögzíteni a zajos környezetben.

A spektrális felbontás gyakorlati alkalmazásai

A spektrális felbontás szerepe különösen fontos a környezeti, mezőgazdasági és geológiai alkalmazásokban. A 10. táblázat összefoglalja a fő felhasználási területeket.

10. táblázat. Alkalmazási területek

Terület	Spektrális felbontás szerepe
Mezőgazdaság	növényegészségügy, stresszdetektálás, hozambecslés
Erdőgazdálkodás	fajok azonosítása, lombkorona-állapot vizsgálata
Vízgazdálkodás	vízminőség, algavirágzás detektálása
Geológia	ásványtársulások, kőzettípusok elkülönítése
Környezetvédelem	szennyezőanyagok kimutatása
Várostervezés	felszíntípusok térképezése, mesterséges anyagok elkülönítése

Mindezekben a feladatokban a spektrális jelleggörbék finom különbségei te-
szik lehetővé a pontos értelmezést.

Korlátok és kihívások

A spektrális felbontás növekedésével együtt járó hátrányokat is fontos megemlíteni. A nagy adatmérték, a zajérzékenység és a feldolgozás komplexitása mind olyan tényezők, amelyek korlátozzák a hiperspektrális adatok széles körű alkalmazását. Ennek ellenére technológiai fejlődés (például drónos hiperspektrális rendszerek megjelenése, miniaturizált műholdak) folyamatosan csökkenti ezeket az akadályokat.

2.4.3. Radiometriai felbontás

A távérzékelési rendszerek egyik alapvető és gyakran alábecsült paramétere a radiometriai felbontás, amely azt határozza meg, hogy a szenzor milyen finomsággal képes megkülönböztetni a visszavert elektromágneses sugárzás intenzitását egy adott spektrális sávon belül. Míg a térbeli felbontás a leképezett felszíni részletességre, a spektrális felbontás a hullámhosszbontás finomságára vonatkozik, a radiometriai felbontás azt írja le, hogy a szenzor hány különböző fényintenzitási szintet képes numerikusan azonosítani egy adott hullámhossztartományban.

A radiometriai felbontás a digitális képkalkotás világában a szenzor bitmélységével jellemezhető. Egy 8 bites rendszer például $2^8 = 256$ különböző intenzitási értéket tud megkülönböztetni, azaz minden egyes pixel spektrális intenzitását egy 0-tól 255-ig terjedő értékkel kódolja. Ezzel szemben egy 10 bites rendszer 1024, egy 12 bites rendszer pedig már 4096 különböző árnyalatot képes regisztrálni ugyanabban a spektrális sávban. Ez a többlet nemcsak nagyobb dinamika-tartományt eredményez, hanem különösen fontos lehet azokban az alkalmazásokban, ahol finom fényintenzitás-változásoknak is jelentős információtartalma van – például alacsony kontrasztú területek, víztestek, árnyékszónák vagy gyenge visszaverő képességű felszínek vizsgálatánál.

A radiometriai felbontás tehát alapvetően befolyásolja a képminőséget és az interpretálhatóságot. Egy magasabb bitmélységű kép esetében a pixelértékek kisebb változásai is leképezhetők, így lehetővé válik a finom tónuskülönbségek azonosítása és a zajszint csökkentése. Különösen fontos ez akkor, amikor a cél a felszín fizikai vagy biofizikai paramétereinek pontos számszerűsítése, például vegetációs indexek (NDVI), nedvességtartalom, biomassza vagy felszíni hőmérséklet számítása során.

Az alacsony radiometriai felbontás viszont jelentősen korlátozza az adatok használhatóságát, mivel a fényintenzitás-változások „elmosódhatnak” a kvantálás során, azaz több különböző sugárzási érték ugyanabba a digitális osztályba kerülhet. Ez torzíja a statisztikai feldolgozást, csökkenti a klasszifikáció pontosságát, és gátolja a kis intenzitásbeli eltérések felismerését. Ugyanakkor a nagy radiometriai felbontás nagyobb adatmérettel és bonyolultabb tárolási és feldolgozási igényekkel is jár, így nem minden esetben előnyös vagy szükséges.

A modern műholdas szenzorok jelentős része – például a Sentinel-2, Landsat 8 és 9, illetve a WorldView – már 12 bites radiometriai felbontással működik, lehetővé téve a nagyon finom árnyalatbeli különbségek azonosítását. A radiometriai felbontásnak tehát egyre nagyobb szerepe van a nagy dinamikatartományú képkalkotás és a precíziós távérzékelési alkalmazások terjedésével. Ezzel a képességgel a szenzor nemcsak pontosabban képes rögzíteni a felszín sugárzási viszonyait, hanem lehetővé teszi az utófeldolgozás során történő tónuskorrekciót, spektrális modellezést és finomabb osztályozási eljárásokat is.

Összességében elmondható, hogy a radiometriai felbontás nem csupán technikai részlet, hanem az adat minőségének és értelmezhetőségének egyik kulcstényezője. Fejlődése párhuzamosan halad a többi felbontástípus – a térbeli, spektrális és időbeli felbontás – fejlődésével, és nélkülözhetetlen része a korszerű, kvantitatív távérzékelési gyakorlatnak.

2.4.4. Időbeli felbontás

A műholdas távérzékelés negyedik alappillére az időbeli felbontás, amely azt írja le, milyen gyakorisággal képes egy műhold vagy műholdrendszer ugyanazon földfelszíni terület leképezésére. Ez a paraméter meghatározza a távérzékelés

adatok frissességét és időbeli folytonosságát, tehát azt, hogy egy adott jelenség nyomon követéséhez milyen időközönként állnak rendelkezésre új adatok. Minél rövidebb az ismétlődési idő, annál dinamikusabban lehet követni a felszíni változásokat – például vegetációs ciklusokat, vízborítottság változásait, árvizek terjedését, erdőtüzek alakulását vagy épp városfejlődést.

Az időbeli felbontás függ a műhold pályájától, a szenzor látószögétől, a pályák számától és azok fedési mintázatától. Egyetlen műhold esetében az ismétlődési ciklus több nap is lehet – például a Sentinel-2 műholdak esetében ez önállóan 10 nap, de a Sentinel-2A és Sentinel-2B párhuzamos működtetése révén ez az idő 5 napra csökkenthető. A Landsat sorozat esetében az ismétlési idő 16 nap, míg egyes kereskedelmi rendszerek – mint például a PlanetScope nanosatelliták hálózata – naponta is képesek képeket rögzíteni ugyanarról a területről.

Az időbeli felbontás különösen jelentős szerepet játszik az ún. idősoros távérzékelésben, ahol a felszín változásait nem statikusan, egyetlen pillanatképen keresztül, hanem dinamikusán, több időpont egymásutánjában vizsgáljuk. Ilyen jellegű alkalmazások a mezőgazdaságban (növények fenológiai állapotának nyomon követése), környezetvédelemben (mocsaras területek visszahúzódása vagy kiterjedése), vagy éppen a klímaváltozás hatásainak elemzésében (gleccserek zsugorodása, tavak kiszáradása) bírnak kiemelt fontossággal.

Fontos megjegyezni, hogy a műholdak elméleti ismétlődési idejét gyakran módosítja a felhőborítottság: az optikai műholdrendszerek (például Sentinel-2 vagy Landsat) nem képesek „áttörni” a felhőtakarón, így borult idő esetén az adott leképezés használhatatlan lehet. Ez különösen trópusi és hegyvidéki területeken jelent problémát, ahol a valós, használható ismétlődési idő a felhőzottság miatt akár jelentősen megnövekedhet. Az ilyen helyzetek kezelésére többféle megoldás is alkalmazható: például radaros (aktív) távérzékelési adatok bevonása, amelyek érzéketlenek a felhőkre, vagy több különböző műholdrendszer adataiból történő együttes idősoros elemzés (ún. multi-source time series analysis).

A jövő tendenciái egyértelműen a minél magasabb időbeli felbontás irányába mutatnak. A kereskedelmi flották növekedése, az alacsony költségű mikroműholdas rendszerek tömeges fellövése, valamint az automatizált adatfeldolgozás lehetővé teszi, hogy akár naponta több felvétel is készüljön ugyanarról a területről, globális lefedettség mellett. Ezzel egy újfajta távérzékelési paradigma is kialakul, amelyben az adatok nem csak térben és spektrálisan részletesek, hanem valós időben frissülnek, lehetővé téve a gyors döntéshozatalt például katasztrófa-helyzetek esetén.

Az erdészeti alkalmazások gyakran kompromisszumot kívánnak e felbontások között: például egy vágásterület gyors detektálásához nagy térbeli felbontás szükséges, míg egy hosszú távú állapotmonitoringhoz elegendő lehet kisebb felbontású, de gyakrabban elérhető adat.

Összegzőképpen elmondható, hogy az időbeli felbontás kulcsszerepet játszik a felszínfolyamatok megértésében és nyomon követésében. A nagy térbeli

és spektrális részletesség önmagában kevés, ha nem társul hozzá rendszeres, jó időzítésű adatgyűjtés. Az időbeli dimenzió tehát nemcsak technikai jellemző, hanem a műholdas távérzékelés alkalmazhatóságának és gyakorlati hasznosságának egyik meghatározó eleme (11. táblázat).

11. táblázat. *A műholdrendszerek időbeli felbontása*

Műhold / Műholdrendszer	Típus	Időbeli felbontás (visszatérési idő)	Megjegyzés
Landsat-8 / Landsat-9	Optikai	16 nap	Egyazon pályán működnek, de külön időpontban – a visszatérési idő 8 napra is csökkenthető.
Sentinel-2A / 2B	Optikai	5 nap (együttesen)	10 nap egyenként, az 5 napos visszatérési idő az Európai Unió Copernicus programjának része.
PlanetScope (Dove)	Optikai	1 nap	Több száz mikroműhold globális lefedéssel – napi leképezés lehetséges.
SPOT-6 / SPOT-7	Optikai	1–2 nap	A rendszer képes napi szintű felvételkedzítésre célzott lekérdezéssel.
WorldView-2 / 3 / 4	Optikai	1 nap (akár többször is)	Nagy felbontású kereskedelmi műholdak, rugalmas képalkotási lehetőséggel.
IKONOS	Optikai	3 nap	Régebbi kereskedelmi rendszer, már nem aktív.
QuickBird	Optikai	1–3,5 nap	A visszatérési idő függ a szenzor beállításától és a terület földrajzi helyétől.
GeoEye-1	Optikai	≤3 nap	Precíziós leképezés nagy felbontással.
Terra MODIS / Aqua MODIS	Optikai	1–2 nap	Alacsony térbeli, de magas időbeli felbontású globális rendszerek.
PROBA-V	Optikai	1 nap (globális)	Vegetációfigyelés, napi lefedéssel, de alacsony térbeli felbontással.
Envisat MERIS	Optikai	3 nap	Európai rendszer, már nem működik.
Sentinel-1A / 1B	Radar (SAR)	6 nap (együttesen)	Nap- és időjárás-független radaros képalkotás; 12 nap egyenként.
RADARSAT-2	Radar (SAR)	24 nap (alap) / 4–6 nap (targeted)	Célzott területre akár 4-6 napos újraleképezés is elérhető.
TerraSAR-X / TanDEM-X	Radar (SAR)	11 nap (alap) / <2 nap (targeted)	Kiemelkedően jó időbeli felbontás ismételt leképezéseknél.

Végezetül a 12. táblázat egy komplex műhold-összehasonlító mátrix, amely három fő paraméter mentén mutatja be a legfontosabb távérzékelési műhold-rendszereket:

- térbeli felbontás (m): egy pixel mekkora területet fed le a felszínen,
- spektrális felbontás: hány különböző spektrális sávban történik a mérés,
- időbeli felbontás (visszatérési idő): milyen gyakran tér vissza a műhold ugyanarra a helyre (8. táblázat).

12. táblázat. *Távérzékelési műholdrendszerek – felbontási jellemzők összehasonlítása*

Műhold	Térbeli felbontás	Spektrális felbontás	Időbeli felbontás	Megjegyzések
Landsat-8 / 9	15 m (pán), 30 m (MS)	11 sáv	16 nap (8 nap kombinált)	Hosszú idősort biztosító közepes felbontású rendszer.
Sentinel-2A / 2B	10 / 20 / 60 m	13 sáv	5 nap	Szabadon elérhető, vegetáció- és felszínmonitoringra ideális.
WorldView-3	0,3 m (pán), 1,2 m (MS)	29 sáv (8 multispektrális + 16 SWIR + CAVIS)	1 nap	Kiemelkedő térbeli és spektrális felbontás, kereskedelmi.
PlanetScope (Dove)	~3–5 m	4 sáv (RGB + NIR)	1 nap	Napi globális lefedés mikroműholdakkal.
SPOT-6 / 7	1,5 m (pán), 6 m (MS)	4 sáv	1–2 nap	Kereskedelmi célú leképezés, gyors elérhetőséggel.
QuickBird	0,6 m (pán), 2,4 m (MS)	4 sáv	1–3,5 nap	Már nem aktív, de fontos szerepet töltött be a nagy felbontású piacon.
IKONOS	0,8 m (pán), 3,2 m (MS)	4 sáv	3 nap	Az első kereskedelmi nagy felbontású műhold, ma már inaktív.
GeoEye-1	0,41 m (pán), 1,65 m (MS)	4 sáv	≤3 nap	Magas térbeli felbontás precíziós alkalmazásokhoz.
Terra MODIS	250–1000 m	36 sáv	1–2 nap	Nagy spektrális felbontás, globális környezeti monitoring.
PROBA-V	100–300 m	4 sáv	1 nap	Vegetációmonitorozás, kis térbeli, de magas időbeli felbontással.
Envisat MERIS	300 m	15 sáv	3 nap	Tengerszint és klímamonitorozás, már nem működik.
Sentinel-1A / 1B	5–40 m (SAR mód függő)	Mikro-/radar sáv (C-band)	6 nap (együtt)	Időjárás-független leképezés radartechnológiával.
RADARSAT-2	3–100 m	SAR (C-band)	24 nap / 4–6 nap célzott	Kiemelt alkalmazás a mezőgazdaságban és jégterképezésben.
TerraSAR-X / TanDEM-X	1–40 m	SAR (X-band)	11 nap / <2 nap targeted	Precíziós radaros alkalmazásokhoz, domborzatmodellezéshez.

2.5. Távérzékelési adatok észlelése és feldolgozása

Előfeldolgozás

A műholdas távérzékelés során nyert nyers digitális képadatok önmagukban rendszerint nem alkalmasak közvetlen elemzésre, hiszen a szenzortechnológia, az optikai rendszer, az érzékelési geometriák és az atmoszférikus körülmények (pl. felhőzettség) egyaránt befolyásolják a kép geometriai és fotometriai tulajdonságait (12. ábra). Ennek megfelelően az elsődleges lépés minden feldolgozási folyamatban az előfeldolgozás, amely két fő komponensből áll: geometriai és radiometriai korrekcióból.



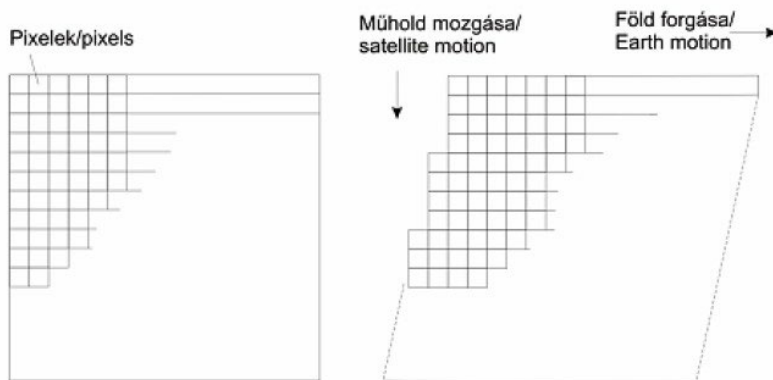
12. ábra. Műholdas felvételek korrekciója és kompozit felvétel készítése, forrás: Aldrich 2023

2.5.1. Geometriai korrekció a távérzékelte adatokban

A távérzékelési adatok nyers formájukban gyakran torzításokat tartalmaznak, amelyek a szenzor mozgásából, a Föld görbületéből, a terep domborzatából, vagy éppen a szenzor és a felszín közötti geometriai viszonyokból adódnak. Ezeket a torzításokat a geometriai korrekció folyamata során távolítjuk el, hogy a képek pontosan illeszkedjenek egy valós térbeli referenciarendszerhez, például egy topográfiai térképhez vagy ortofotóhoz. A geometriai korrekció elengedhetetlen lépés a pontos térinformatikai elemzések, például a változásdetektálás, térbeli osztályozás vagy tematikus térképezés előtt.

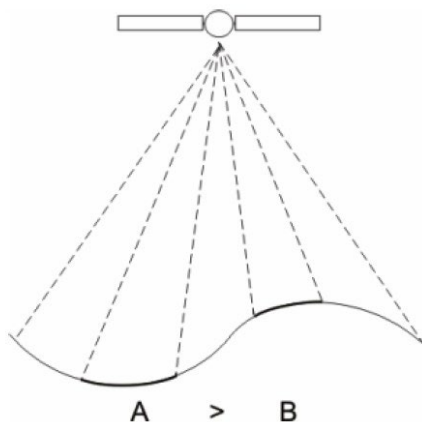
A geometriai torzítások főbb típusai:

- **Platformmozgásból eredő torzítás:** a műholdak és repülőek mozgása (fordulás, billegés, elmozdulás) eltolja a kép helyzetét a Földhöz képest (13. ábra).



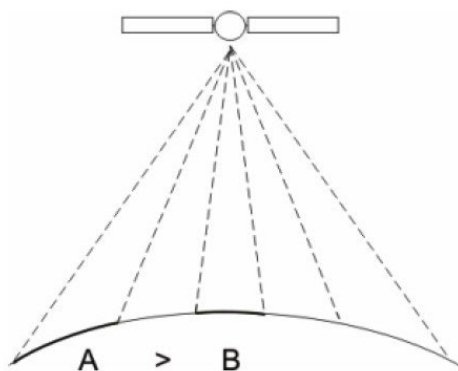
13. ábra. A Föld forgásából eredő torzítás, forrás: Vágó–Seres–Hegedűs 2011

- **Domborzati torzítás:** különösen hegyvidékeken, ahol a felszín magasságkülönbségei eltérő vetítési irányokat eredményeznek (14. ábra).



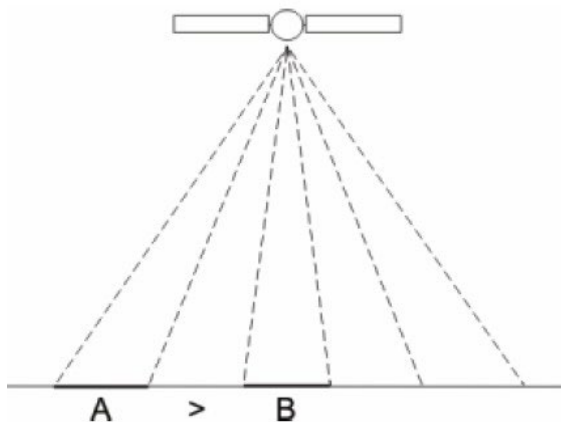
14. ábra. A domborzati torzítás, forrás: Vágó–Seres–Hegedűs 2011

- **Földgömbületi és forgási torzítások:** a Föld alakjából és forgásából származó hibák, amelyek különösen nagy felületű képek esetén jelentkeznek (15. ábra).



15. ábra. A Föld görbületéből származó torzítás,
forrás: Vágó–Seres–Hegedűs 2011

- **Szenzorspecifikus torzítások:** például a vonalpásztázó (pushbroom) vagy mechanikus pásztázó (whiskbroom) rendszerek sajátos hibái.
- **Perspektív leképezésből adódó torzítás:** a műhold elhaladása és a letapogatót terület közötti szögbeli torzítás hibája (16. ábra).



16. ábra. A perspektív leképezésből származó torzítás,
forrás: Vágó–Seres–Hegedűs 2011

A geometriai korrekció lépései:

1. Referenciapontok (GCP – Ground Control Points) meghatározása:
A távérzékelt képen és a referenciatérképen közösen azonosítható, jól körülhatárolható pontokat (pl. útkereszteződés, híd, épület) választunk ki. Ezek a pontok szolgálnak alapul a transzformációhoz.

2. Transzformációs függvény illesztése:
Matematikai modell (pl. lineáris, polinomiális vagy affinitás transzformáció) segítségével a képet átalakítjuk úgy, hogy a GCP-k a referencia-pontokhoz illeszkedjenek. A függvény típusa és fokszáma a torzítások összetettségétől függ.
3. Interpoláció:
Az átalakítás során az eredeti kép pixelei új pozícióba kerülnek, ami miatt új pixelértékeket kell kiszámítani. A leggyakoribb interpolációs módszerek:
 - *Legközelebbi szomszéd (nearest neighbor)*: gyors, de durva eredményt adhat.
 - *Bilineáris interpoláció*: simább képet eredményez.
 - *Köbös konvolúció (cubic convolution)*: legsimább, de számításigényes módszer.
4. Illeszkedés értékelése:
Az ún. RMSE (Root Mean Square Error) segítségével mérjük, hogy a transzformált pontok mennyire illeszkednek a referenciahelyekhez. Elfogadható geometriai korrekció esetén az RMSE értéke néhány pixelnél nem lehet nagyobb.

Ortorektifikáció – a geometriai korrekció speciális esete

A domborzati torzítások kiküszöbölésére ortorektifikációt végzünk, amely során nemcsak a síkbeli transzformáció történik meg, hanem a digitális domborzatmodellt (DTM/DSM) is felhasználjuk. Ennek eredményeként ortofotó készíthető – ez egy geometriailag torzításmentes, térképszerű kép.

Gyakorlati alkalmazások:

- Műholdképek térinformatikai elemzése: például Landsat, Sentinel vagy WorldView képek felhasználása tematikus térképezéshez, változásvizsgálat-hoz.
- Térképi illesztés és mozaikolás: több képből egységes térképi adatbázis építhető.
- Pontos felszínhasználat-elemzés: hibák nélküli felszínosztályozás csak jól korrigált képeken végezhető.

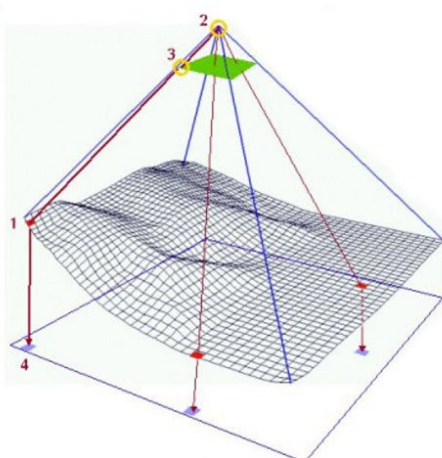
Korszerű megoldások:

A modern feldolgozószoftverek (pl. ERDAS IMAGINE, ENVI, QGIS, SNAP) már félautomatikus vagy automatikus geometriai korrekciót is kínálnak, például előre beépített GCP-adatbázisok vagy globális digitális domborzatmodellek (pl. SRTM, Copernicus DEM) használatával. Egyes szolgáltatók, mint a Copernicus vagy az USGS, már előfeldolgozott, ortorektifikált termékeket kínálnak, így a felhasználók közvetlenül térképekkel dolgozhatnak.

A geometriai korrekció biztosítja, hogy a távérzékelte képadatok megbízható térbeli információkat szolgáltatassanak. Ez a lépés teszi lehetővé a képek térképekkel való kombinálását, az időbeli összehasonlítást és a pontos kvantitatív elemzéseket. A térbeli pontosság a távérzékelés tudományos és gyakorlati hasznosításának egyik sarokköve.

A nyers távérzékelte adatok gyakran különböző torzításokat tartalmaznak, amelyeket a feldolgozás során korrigálni kell.

Az ortorektifikáció célja (17. ábra), hogy a távérzékelte (műholdas vagy légi felvételekből származó) képek torzulásait korrigáljuk, és olyan képet hozunk létre, amely geometriailag helyes, vagyis minden pontja a valós földfelszíni pozíciójának megfelelő helyre kerül. A folyamat különösen fontos térképezésben, földmérésben, településtervezésben, környezetkutatásban.



1. Pixel a digitális domborzatmodellben (magasság)
2. A külső tájékozási elemek paraméterei
3. A képen egy fényességi érték kerül meghatározásra a környező pixelek újra mintavételezése alapján
4. A magasság, a külső tájékozási adatok és a fényességi érték felhasználásával kiszámítják az ortofotóban ennek megfelelő helyet

17. ábra. Az ortorektifikáció folyamata, forrás: saját szerkesztés

1. A terepmodell (DEM) pixeleinek magassági adatai

Az ortorektifikáció egyik alapja a digitális domborzatmodell (DEM).

A DEM minden pixelhez egy magassági értéket tartalmaz.

Ez azért szükséges, mert a domborzat emelkedései és mélyedései torzítják a légi felvételt, a hegycsúcsok például „kifelé dőlnek” a felvételen, hogy ezt kijavítsuk, tudnunk kell, milyen magas egy adott pont.

2. A külső tájékozási elemek (kamera/szenzor paraméterei)

A külső tájékozási elemek határozzák meg, hol volt a kamera vagy műhold a felvétel készítésekor, milyen irányba nézett, hogyan volt elforgatva térben.

Ezeket az adatokat a képen a piramis csúcsa és az onnan lehúzott vetítési vonalak jelképezik.

A külső tájékozási paraméterek segítségével kiszámítható, hogy egy terepi pont mely képponthoz tartozik a nyers felvételen.

3. Fényességi (radiometriai) érték meghatározása újramintavételezéssel

Miután tudjuk, hogy egy terepi pont hol jelenik meg a képen, a következő lépés meghatározni annak fényességi (pixel-) értékét.

Ez újra-mintavételezési eljárásokkal történik: legközelebbi szomszéd, bilineáris interpoláció, köbös konvolúció stb. A cél, hogy a légi felvétel megfelelő pixelének fényességét a valós térbeli ponthoz rendeljük.

4. A pont elhelyezése az ortofotóban

A végső lépésben a következő adatok alapján: magassági érték (DEM), külső tájékozási paraméterek, fényességi érték, a rendszer kiszámítja, hogy a geometriailag helyes ortofotóban hol helyezkedjen el az adott pixel.

Ez eredményezi a torzulásmentes, méretarányhű és térképszerű felhasználásra alkalmas ortofotót.

2.5.2. A légköri torzítás korrekciója

A légköri torzítás a távérzékelési adatok egyik legfontosabb hibaforrása, amely az elektromágneses sugárzás és a légkör kölcsönhatásából ered. A sugárzás, amely a felszínről vagy a felszín felé halad, különböző fizikai folyamatokon megy keresztül a légkörben: szóródik, elnyelődik, esetenként újra kibocsátódik. Mindezek a folyamatok befolyásolják a műholdas vagy légi szenzorok által detektált jelet. A torzítás mértéke függ a légkör pillanatnyi fizikai állapotától – például páratartalom, aeroszolkoncentráció, felhőzet –, valamint a megfigyelési geometria jellemzőitől (napállás, nézési szög, felszíntípus).

A jelenség megértéséhez érdemes végiggondolni a következőt: az azonos felszíni típusokat (például homogén gyepterületeket) elvileg azonos pixelértékekkel kellene ábrázolni a távérzékelte képen. A gyakorlatban azonban a kapott pixelintenzitások kisebb-nagyobb mértékben eltérhetnek, mivel:

- a légkör különböző rétegeiben az elektromágneses sugárzás különböző mértékben gyengül vagy szóródik,
- a felszín felett a levegő összetétele és tulajdonságai térben és időben változnak,
- a különböző hullámhosszokon a légkör másként viselkedik (pl. a kék fény erősebben szóródik, mint az infravörös),
- az észlelés időpontjában jelen lévő vízpára, por vagy egyéb aeroszokok hatása hullámhosszfüggő módon torzíthatja a méréseket.

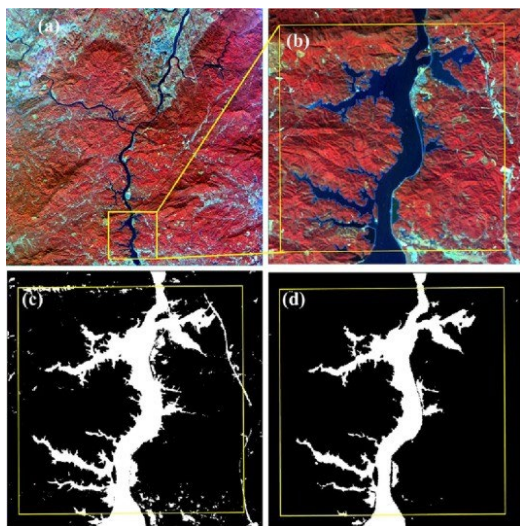
Ezek eredményeként ugyanaz a felszíni objektum – például egy homogén mező – a képen inhomogénnek, foltosnak, texturáltabbnak tűnhet. Ezt az észlelt inhomogenitást nem a felszín valós jellemzői, hanem a légköri viszonyok különbségei idézik elő.

A légköri torzítás minden hullámhossztartományban jelen van, de különösen jelentős a rövidebb hullámhosszakon (pl. látható és közeli infravörös tartományban), ahol a Rayleigh-szórás és az aeroszolszórás dominál. A közép- és termális infravörös tartományban már inkább az elnyelési folyamatok hatnak meghatározó módon (pl. vízpára-abszorpció). A légköri hatások korrekciója ezért elengedhetetlen mind a vizuális interpretáció, mind a numerikus értékelések (pl. NDVI-számítás, osztályozás, időbeli összehasonlítás) megbízhatósága szempontjából.

Korrekciós módszerek

A légköri torzítások csökkentésére többféle módszer áll rendelkezésre:

- Empirikus módszerek: például a *Dark Object Subtraction* (DOS), amely feltételezi, hogy a nagyon sötét objektumok (pl. mély víz) esetén a detektált jel nagy része a légköri szórásból ered (18. ábra).
- Fizikai modelleken alapuló módszerek: például az *6S*, *MODTRAN* vagy *FLAASH* modellek, amelyek részletesen szimulálják a légkör sugárzásmódosító hatásait.
- Automatikus korrekció a feldolgozási láncban: egyes műholdas rendszerek (pl. Sentinel-2, Landsat 8/9) termékeihez már előre alkalmaznak légköri korrekciót (pl. *Level-2A* termékek esetén), amelyeket a felhasználó közvetlenül használhat térképezéshez vagy elemzéshez.



18. ábra. A víz–szárazföld elkülönítésének eredményei a DOSW légköri korrekció előtt és után, (a) A FLX műholdkép DOSW-korrekció utáni változata, (b), (c) és (d) nagyított helyi részleteket mutatnak, (e) A vizuális értelmezés eredménye, forrás: Guo 2024

A légköri torzítás tehát nem csupán technikai részletkérdés, hanem alapvetően meghatározza a távérzékelési adatok minőségét és értelmezhetőségét. A torzítás figyelmen kívül hagyása súlyos hibákhoz vezethet a felszínborítások elemzésében, a változások nyomon követésében vagy a környezeti indikátorok meghatározásában. Ezért a légköri hatások modellezése és korrekciója a távérzékelési feldolgozás egyik legkritikusabb lépése.

2.5.3. Radiometriai korrekció

A radiometriai korrekció célja a nyers távérzékelte adatok sugárzási (radiometriai) értékeinek olyan módosítása, amely révén a mért jelek megfelelnek a valódi felszíni vagy felszínközeli sugárzási viszonyoknak. Ez a folyamat elengedhetetlen ahhoz, hogy a különböző időpontokban, eltérő érzékelőkkel vagy különféle megfigyelési geometriák mellett készült felvételek összehasonlíthatók, elemezhetők és interpretálhatók legyenek.

A nyers (raw) vagy szintetikus (Level-0/1) képadatok pixelértékei általában az érzékelő által detektált digitális számok (Digital Numbers – DN), amelyek még nem fejezik ki közvetlenül a felszínről visszavert vagy kibocsátott elektromágneses sugárzás fizikai mennyiségét. A radiometriai korrekció ezen DN-értékeket alakítja át fizikai paraméterekké, például felszínre visszavert sugárzássá (at-sensor radiance, illetve top-of-atmosphere radiance) vagy felszíni reflektanciává (surface reflectance) (19. ábra).

A radiometriai torzítás főbb forrásai

1. Érzékelő karakterisztikák: minden műszer egyedi válaszgörbével és érzékenységi mintázattal rendelkezik. A szenzor öregedése, kalibrációs eltérései és zajkomponensei (pl. termikus zaj, kvantálási hiba) torzítják a méréseket.
2. Napállás és megvilágítási viszonyok: az azonos felszíni objektum más-más mennyiségű és szögű napfényt kaphat különböző időpontokban, ami jelentősen módosíthatja a visszavert sugárzás mértékét.
3. Nézési geometria és szenzordőlés: a műhold pályája vagy szenzora gyakran nem pontosan nadír irányban (függőlegesen) néz a felszínre. A ferde nézési szög megnöveli a légköri útvonalat és módosítja a visszavert sugárzási mennyiséget.
4. Topográfiai hatások: domborzatos területeken a különböző lejtők és irányultságok eltérő módon verik vissza a sugárzást. Ezt különösen alacsony napállásnál kell figyelembe venni.

Korrekciós lépések

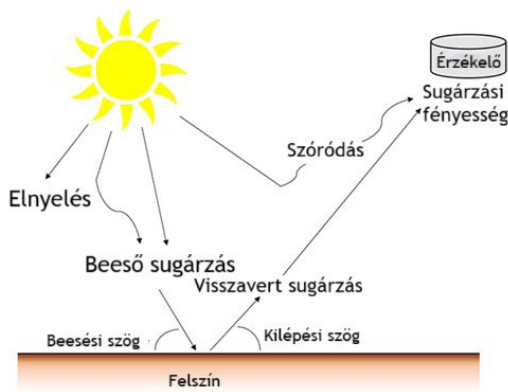
A radiometriai korrekció során az alábbi lépések valósulhatnak meg:

- Digitális számok átalakítása radianciává: ezt az átalakítást az adott szenzorra jellemző kalibrációs együtthatókkal végezzük. Az eredmény a szenzor által érzékelt sugárzási intenzitás fizikai egységeiben (pl. $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$).
- Radiancia átalakítása reflektanciává: mivel a visszavert fény mennyisége függ a napállástól, szükséges a besugárzási értékekkel való normalizálás. Az így számolt top-of-atmosphere (TOA) reflektancia egy dimenzió nélküli érték, amely 0 és 1 közé esik, és az adott hullámhosszon visszavert fény hányadát jelzi.

- Topográfiai normalizálás (ha szükséges): lejtős területeken alkalmazható például a cosine correction vagy Minnaert-korrekció, amelyek figyelembe veszik a domborzat hatását a visszavert sugárzás szögfüggő jellegére.

A radiometriai korrekcióhoz különféle eszközök állnak rendelkezésre:

- Automatikusan előfeldolgozott termékek: számos műholdplatform (pl. Sentinel-2, Landsat 8/9) előre kalibrált adatokat biztosít a felhasználók számára (Level-1C – TOA reflektancia, Level-2A – felszíni reflektancia).
- Kézi vagy szoftveres korrekció: nyers adatok esetén szükség lehet kalibrációs együtthatók, napállás és dőlésadatok felhasználására, amit szoftveres környezetek (pl. ENVI, SNAP, ERDAS Imagine) támogatnak.



19. ábra. Radiometriai torzulások keletkezésének folyamata, forrás: Shippert 2020

A radiometriai korrekció nélkülözhetetlen, ha idősoros elemzést (pl. vegetációdinamika), osztályozást (pl. felszínborítás-térképezés), vagy műholdas adatok összehasonlítását kívánjuk elvégezni különböző időpontokban vagy különböző érzékelők között.

- Atmoszférikus korrekció: a légkörben történő fénytörés és -szóródás hatásának kiszűrése, különösen multispektrális képek esetén.
- Felszínmodell-alapú ortorektifikálás: a képek torzulásainak a domborzat figyelembevételével történő korrigálása.

E lépések révén válik lehetővé, hogy az adatokat megbízhatóan és térben összehasonlítható módon használjuk további elemzésekre.

2.5.4. Fotografikus (analóg) érzékelés

Az elektromágneses sugárzás érzékelése, amely a távérzékelés egyik alapvető eleme, történhet fotografikus (analóg) vagy elektronikus (digitális) úton. Mindkét módszer célja a felszínről visszavert vagy kibocsátott sugárzás észlelése és rögzítése, de technikai megoldásaik, felbontásaik és alkalmazási területeik eltérnek.

A hagyományos fényképezés során fényérzékeny filmanyagot használnak, amely a sugárzást kémiai úton rögzíti. Ez a módszer egyszerű, viszonylag költséghatékony, és kiváló térbeli (geometriai) felbontás érhető el vele, különösen a légi fotók esetében. A filmfelvétel olyan kémiai eljárásokat alkalmaz, melyek lehetővé teszik a nagy felbontású és éles képek rögzítését – ezt főként a fotogrammetriában, topográfiai térképezésben és archív felmérésekben hasznosítják.

A fotografikus rendszerek fő hátránya azonban, hogy rögzítési spektrumuk korlátozott, általában az ultraibolya (UV) és a közeli infravörös (NIR) tartományok közötti sávra terjed ki, és nem alkalmasak a valós idejű vagy multispektrális/hőtartományú adatok rögzítésére.

2.5.5. Elektronikus (digitális) érzékelés

Az elektronikus érzékelők – például CCD (Charge Coupled Device) és CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) szenzorok – az elektromágneses sugárzást elektromos jelekké alakítják át, amelyeket digitális formában tárolnak és dolgoznak fel. Ezek a rendszerek, melyek a modern műholdak és drónok alap-érzékelőit is képezik, szélesebb spektrális érzékenységgel bírnak, és könnyen integrálhatók automatizált feldolgozási láncokba.

Például egy multispektrális érzékelő képes a látható (VIS), közeli infravörös (NIR), rövidhullámú infravörös (SWIR) és hőtartományú (TIR) sávokban is adatokat gyűjteni. Az érzékelők pontosan kalibrálhatók, nagy dinamikatartományal rendelkeznek, és lehetővé teszik az időben sűrű, ismételt méréseket – ez különösen fontos a mezőgazdasági monitorozás, környezetfigyelés és városi hőszigetelés-vizsgálatok során.

A modern elektronikus rendszerek lehetővé teszik az adatok közvetlen átvitelét műholdas vagy rádiós kapcsolaton keresztül, valamint a valós idejű adatfeldolgozást és térképezést.

2.5.6. Képi megjelenítés és adatfeldolgozás

A távérzékelés során fontos megkülönböztetni a „fénykép” és a „kép” fogalmát. A fénykép kifejezést kizárólag a filmen rögzített képekre alkalmazzuk, míg a kép (image) mindenféle képi megjelenítésre – beleértve az elektronikus érzékelőkkel készített hőképeket, multispektrális vagy hiperspektrális felvételeket is – vonatkozik. Így például a hőkamerával készült thermal image nem nevezhető thermal photographnak.

Az adatok megjelenítése és értelmezése kulcsszerepet játszik a távérzékelés alkalmazásában. Az emberi látás korlátai miatt nem minden jellegzetesség ismerhető fel vizuálisan, különösen több spektrumra kiterjedő érzékelés esetén. Ezért preferált a digitális adatformátum, amely lehetővé teszi a képi adatok számítógépes feldolgozását, osztályozását és statisztikai értékelését – például gépi tanulási algoritmusok vagy mélytanulási (deep learning) eljárások alkalmazásával.

Két fő érzékelőtípus: kamera és pásztázó rendszer

A távérzékelő rendszerek működésük szerint két alapvető típusba sorolhatók:

1. Képalkotó rendszer

A képalkotó rendszerek (framing systems) az egész képet egyetlen kitettséggel, egy adott időpillanatban rögzítik. Ilyenek a klasszikus analóg kamerák (pl. KFA-1000 a Resurs-F műholdon) vagy a korai digitális rendszerek, mint a Landsat-1 RBV (Return Beam Vidicon). Az ilyen képek – különösen átfedéssel készítve – lehetővé teszik a sztereofotogrammetria alkalmazását, ahol térhatású képek és domborzati modellek állíthatók elő.

2. Pásztázó (szkennelő) rendszer

A mai modern műholdak többsége – például a Sentinel, Landsat, WorldView vagy PlanetScope rendszerek – lineáris pásztázással (pushbroom) működő elektronikus érzékelőket használnak, amelyek során a mozgó műhold folyamatosan rögzíti a felszínről visszavert sugárzást sávonként, sort követve. Ez a technológia pontosabb kalibrációt és jobb sugárzási dinamikát tesz lehetővé, valamint nagy mennyiségű adat feldolgozását és automatizált osztályozását.

A távérzékelési adatok észlelése ma már túlnyomórészt digitális rendszerekkel történik, melyek lehetővé teszik a multispektrális, termális és akár hiperspektrális megfigyelést is. A klasszikus fotografikus rendszerek szerepe napjainkra szinte kizárólag archív célokra korlátozódik. A digitális távérzékelés térhódítása új dimenziókat nyitott az automatizált környezeti monitorozás, precíziós mezőgazdaság, városfejlesztés és éghajlati alkalmazások terén.

2.5.7. Képjavítások

A digitális távérzékelési képek elemzését megelőzően célszerű olyan eljárásokat alkalmazni, amelyek a kép értelmezhetőségét, információtartalmának kinyerhetőségét jelentősen javítják. Ezeket az előfeldolgozási lépéseket összefoglalóan képjavítási műveleteknek nevezzük, és a képosztályozást megelőzően kerülnek alkalmazásra.

1. Kontrasztjavítás és képélesítés

A legegyszerűbb képjavítási technikák közé tartozik a globális vagy lokális kontrasztnövelés, amelynek célja a kép sötétebb és világosabb tartományai közötti különbség kiemelése. Ezek a módszerek a teljes képdinamikát kiterjesztik a 0–255 digitális értéktartományra (byte típus esetén), vagy éppen kiegyenlítik a világossági eloszlást (pl. hisztogram-kiegyenlítés).

Képélesítő szűrések során az élek körüli lokális intenzitáskülönbségek kiemelésére törekednek, ezzel segítve az objektumhatárok meghatározását. Ezeket általában konvolúciós elven működő fókuszált (fokális) szűrőkkel hajtják végre. A leggyakoribb élesítő szűrő például a Laplace-operátor.

2. Élfelismerés és zajcsökkentés

Az élkiemelő algoritmusok – például Sobel, Prewitt vagy Canny – segítenek meghatározni az objektumhatárokat, amelyek hasznosak lehetnek pl. tematikus határvonalak automatikus detektálásánál (pl. víztestek, úthálózatok vagy lombkoronaszél lehatárolása).

A zajcsökkentés (noise reduction) során a képadatokban található, nem valószínűségi információt hordozó torzulásokat szűrik ki. Ilyen lehet például az impulzus zaj vagy a véletlenszerű spektrális ugrás, amelyek gyakran a szenzor elektronikájából vagy a felvétel készítésének időjárási körülményeiből származnak. A zajcsökkentés során gyakran mediánszűrőt vagy Gauss-alapú simító szűrőket alkalmaznak.

3. Spektrális műveletek – indexek számítása

A multispektrális és hiperspektrális felvételek lehetőséget nyújtanak a különböző sávok kombinálásával előállítható származtatott spektrális indexek kiszámítására. Ezek az indexek célirányosan emelik ki a felszín bizonyos típusait (pl. növényzet, víz, épített környezet).

A legszélesebb körben alkalmazott vegetációs index a NDVI (Normalised Difference Vegetation Index), amely a vegetáció aktivitását és borítottságát jellemzi, ahogyan ez a 4.4.4-es alfejezetben van részletezve.

4. Spektrális transzformációk

A nagy számú sávot tartalmazó adatok (pl. Sentinel-2 – 13 sáv, hiperspektrális rendszerek – akár több száz) esetén gyakran alkalmaznak dimenziócsökkentő transzformációkat, amelyek célja, hogy a legnagyobb információtartalmú sávokat kiválasszák és redundanciát csökkentsenek.

- Főkomponens-analízis (PCA): olyan ortogonális sávokat hoz létre, amelyek a lehető legtöbb variációt magyarázzák meg. Az első 1-2 komponens gyakran elegendő az osztályozáshoz, vagy legalábbis segít a klaszterek elválasztásában.
- Minimum Noise Fraction (MNF) transzformáció: A PCA egy továbbfejlesztett változata, amely először zajszűrést hajt végre, majd csak ezután számítja ki az információs szinteket. Az MNF transzformáció különösen hatékony hiperspektrális adatok esetében.

Mindkét transzformáció nemcsak képosztályozásra, hanem tárgyazonosításra, anyagdetektálásra vagy változásdetektálásra is használható.

2.5.8. Képosztályozás

A távérzékelési képosztályozás célja, hogy a multispektrális vagy hiperspektrális felvételek alapján egyértelműen azonosítható és lehatárolható felszínborítási kategóriák (pl. erdő, mezőgazdasági terület, víztest, beépített terület) jöjjenek létre. A képosztályozás két fő megközelítéssel végezhető: pixelalapú és objektumalapú módon.

Pixelalapú képosztályozás

A hagyományos, pixelenkénti osztályozás során minden egyes képelem (pixel) a saját spektrális értékei – vagyis a különböző sávokban mért intenzitások – alapján kerül besorolásra. A környezeti összefüggéseket (szomszédos pixelek értékei, térbeli mintázat) figyelmen kívül hagyja. Ez a módszer főként kis és közepes felbontású műholdfelvételek (10–500 m pixelméret) esetén alkalmazható, amikor az egyes objektumok nem, vagy csak részben fednek le több pixelt.

Objektumalapú képosztályozás (OBIA – Object-Based Image Analysis)

A modern távérzékelésben egyre inkább elterjedt az objektumalapú elemzés, amely először szegmentálja a képet – vagyis a hasonló tulajdonságú és egymáshoz szomszédos pixelekből képopjektumokat képez –, majd ezeket osztályozza. Az objektumokra vonatkozóan nemcsak spektrális információk állnak rendelkezésre, hanem geometriai (pl. alak, méret), texturális (pl. mintázat) és hierarchi-

kus (pl. környezetbe ágyazottság) jellemzők is, amelyek komplex osztályozási szabályok kialakítását teszik lehetővé.

A szegmentálás történhet rácsalapú (sakktáblaszerű, kvadrátikus osztás) vagy többszintű hierarchikus összevonással (region growing), mely figyelembe veszi a spektrogeometriai hasonlóságokat. Ez utóbbi módszer kiválóan alkalmas nagy felbontású adatok feldolgozására (pl. WorldView, Sentinel-2, UAV-felvételek).

Nem felügyelt osztályozás

A nem felügyelt osztályozási algoritmusok automatikusan, emberi beavatkozás nélkül csoportosítják a képelemeket a spektrális tulajdonságaik alapján. A legismertebb módszerek közé tartozik a:

- K-means klaszterezés,
- ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique).

Ezek az algoritmusok kezdetben véletlenszerű klaszterközpontokat generálnak a tulajdonságtérben, majd az iteratív folyamat során a pixeleket vagy objektumokat a legközelebbi klaszterhez rendelik. A klaszterközpontokat minden lépésben újraszámítják, míg az elmozdulásuk elég kicsivé nem válik. Az így kapott homogén csoportokat a felhasználónak kell értelmeznie és felszínborítási kategóriákhoz rendelnie (pl. klaszter 1 = víz, klaszter 2 = gyepek stb.).

Felügyelt osztályozás

A felügyelt osztályozás során a felhasználó kijelöli a tanítótérületeket (training samples), majd ezek alapján az osztályozó algoritmus megtanulja a felszínborítási kategóriák spektrális jellemzőit. Ezt követően az algoritmus a teljes képre kiterjesztve osztályozza a pixeleket vagy objektumokat. Az osztályozás pontosságát a tesztterületeken végzett összehasonlítás alapján lehet értékelni.

A leggyakrabban használt felügyelt osztályozók:

- Minimum Distance – a középértékek alapján történő legkisebb távolság,
- Maximum Likelihood – valószínűségi eloszlások alapján működik,
- Spectral Angle Mapper (SAM) – a vektortérbeli szögek minimalizálásán alapul,
- Fuzzy osztályozó – a kategóriákhoz való tartozás nem bináris, hanem fokozatos,
- Decision Tree (pl. CART) – rekurzív elválasztással működik,
- Random Forest – több független döntési fa együttes szavazata alapján dönt,
- Support Vector Machine (SVM) – osztályokat többdimenziós határfelületekkel választ el,
- Neural Networks – többretegű tanulóhálózatokon alapuló, mély tanulási algoritmus.

Pontosságértékelés

A felügyelt osztályozások kiértékelése félreosztályozási mátrix (confusion matrix) segítségével történik. Ebben a mátrixban az osztályozott és a valós osztályok közötti egyezéseket és eltéréseket rögzítjük. Az átlóban szereplő elemek a helyesen besorolt területek (true positive), az átlón kívüliek a téves besorolások. A mátrix alapján kiszámíthatók a legfontosabb mérőszámok:

- pontosság (Overall Accuracy),
- kappa-index,
- osztályspecifikus pontosság (Producer's / User's Accuracy).

Példa gyakorlati alkalmazásra: Erdőgazdálkodásban Sentinel-2 adatok alapján végzett felügyelt osztályozás során külön osztályként azonosítható a lombhullató és örökzöld állomány, gyérített vagy fiatalos állomány, illetve természetközeli vagy mesterséges ültetvény. Az NDVI- és texturális jellemzők beépítése az objektumalapú modellbe jelentősen növeli az osztályozás pontosságát.

2.6. A távérzékelés alkalmazhatósága és korlátai az erdőgazdálkodásban

A távérzékelés alkalmazása számos előnyt kínál az erdőgazdálkodás és természetvédelem számára. Ilyenek például a gyorsaság, a nagy terület lefedhetősége, az idősoros elemzés lehetősége, a terepi jelenlét minimalizálása, valamint a térképezés pontosságának javítása.

Ugyanakkor fontos ismerni a módszer korlátait is. A felhőborítottság például nagymértékben zavarja az optikai felvételek használatát. Az árnyékos területeken a spektrális válasz eltorzulhat. A túlzottan heterogén állományokban nehéz lehet az automatikus osztályozás. Továbbá a nagy mennyiségű adat feldolgozása időigényes és számításigényes lehet, ami megfelelő szoftveres és hardveres hátteret igényel.

Alkalmazási előnyök

A távérzékelés legfontosabb előnyei az alábbiakban foglalhatók össze:

- Gyors és rendszeres adatgyűjtés: a műholdas rendszerek (pl. Sentinel, Landsat, MODIS) rendszeres időközönként – napos vagy hetes skálán – új felvételeket biztosítanak, így lehetővé válik az idősoros változások (pl. vegetációdinamika, károsítások) nyomon követése.
- Nagy területű lefedettség: egyes műholdak egyetlen felvétellel több ezer négyzetkilométert képesek lefedni, ami különösen hasznos a regionális vagy országos szintű erdészeti és természetvédelmi elemzések során.

- Idősoros elemzések lehetősége: az archív műholdképek révén több évtizedre visszamenőleg elemezhetők a földhasználati és vegetációs változások, például erdőirtások, erdőfelújítások vagy inváziós fajok terjedése.
- Terepi jelenlét minimalizálása: nehezen megközelíthető vagy veszélyes területek (pl. meredek hegyvidékek, védett zónák) esetében a távérzékelés minimalizálja a terepi munkavégzés szükségességét.
- Térképezési pontosság javítása: a nagy felbontású szenzorok (pl. Sentinel-2, WorldView, PlanetScope) részletes információkat nyújtanak a felszínborításról, lehetővé téve a felszínborítás és erdőtípusok automatikus osztályozását, határok pontos meghatározását.
- Multispektrális és hiperspektrális információk: a különböző hullámhossztartományok segítségével kimutathatók olyan jelenségek, amelyek szabad szemmel nem érzékelhetők, pl. stresszes vegetáció, talajnedvesség, erdőkárók, betegségjelek.
- Integrálhatóság más adatokkal: a távérzékelte adatok más térinformatikai rétegekkel (pl. domborzat, éghajlat, talaj) is kombinálhatók, komplex elemzési lehetőségeket kínálva a természetvédelem és az erdőtervezés számára.

Korlátok és kihívások

A távérzékelés technológiai és környezeti korlátokkal is rendelkezik, melyeket az értelmezés és az alkalmazás során figyelembe kell venni:

- Felhőborítottság: az optikai műholdfelvételeket (pl. Sentinel-2, Landsat-8) nagymértékben zavarja a felhőborítás, különösen a hegyvidéki és párás, csapadékos klímájú térségekben. A gyakori borultság megnehezíti a folyamatos monitorozást, illetve csökkenti az elérhető, használható képek számát.
- Árnyékhathatások: domborzatos területeken a dombárnyék és az erdei árnyékolás torzíthatja a spektrális visszaverődési értékeket. Ez különösen alacsony napállás esetén jelent problémát, és befolyásolhatja a vegetációs indexek pontosságát.
- Vegetációs heterogenitás: Az olyan területeken, ahol a vegetáció nagyon mozaikos, illetve több lombkoronaszintből áll (pl. elegyes vagy természetközeli erdők), az automatikus osztályozási algoritmusok pontossága csökkenhet. Az osztályhatárok elmosódhatnak, és a csoportosítás megbízhatósága gyengülhet.
- Légköri hatások: A légkörön áthaladó sugárzás abszorpciója és szórása (aeroszok, vízgőz) módosíthatja a szenzor által érzékelt értékeket, különösen a kék és vörös hullámhossztartományban. Légköri korrekció alkalmazása nélkül az összehasonlítás nehézkessé válik.
- Földi validáció szükségessége: bár a távérzékelés csökkenti a terepi munka mennyiségét, a felmérések kalibrálásához és validálásához továbbra is szükség van referenciaadatokra (pl. mintaterületek, dendreometriai mérési pontok).

- Adatmennyiség és feldolgozási igény: a nagy tér- és időbeli felbontású adatok feldolgozása számottevő számítási kapacitást és szoftveres háttérrel igényel. A képek előfeldolgozása (korrekciók, osztályozás, vágás, szűrés) és értelmezése gyakran többlépcsős, specializált ismereteket igénylő feladat.
- Korlátozott érzékenység alacsony biomasszánál: a sűrűbb vegetációval borított területeken (pl. zárt lombkorona) a növényzet mennyiségi változásai jól nyomon követhetők, míg a cserjés, gyepvel borított vagy degradált felszínek esetében az NDVI- és egyéb indexek érzékenysége alacsonyabb lehet.
- Technológiai és anyagi akadályok: Bár egyre több ingyenesen elérhető adat érhető el (pl. Copernicus, USGS), a nagy térbeli felbontású (sub-meter) adatok gyakran költségesek. Emellett a professzionális feldolgozószoftverek (pl. ENVI, ERDAS) beszerzése és használata is anyagi és oktatási kihívást jelenthet.

A távérzékelés tehát kiváló eszköztárat biztosít az erdészeti és természetvédelmi célú monitorozáshoz, de alkalmazása nem öncélú és nem teljesen önálló: csak más adatforrásokkal és módszerekkel való integrációval nyújt komplex, megbízható információt a felszín állapotáról. A technológiai fejlődés (pl. mesterséges intelligencián alapuló képfeldolgozás, felhőalapú számítási rendszerek, radar- és lidartechnológiák integrálása) ugyanakkor folyamatosan csökkenti a korlátokat, és új távlatokat nyit a térinformatikai elemzések területén.

MŰHOLDAS TÁVÉRZÉKELÉS

3.1. A műholdas rendszerek pályatípusaik alapján

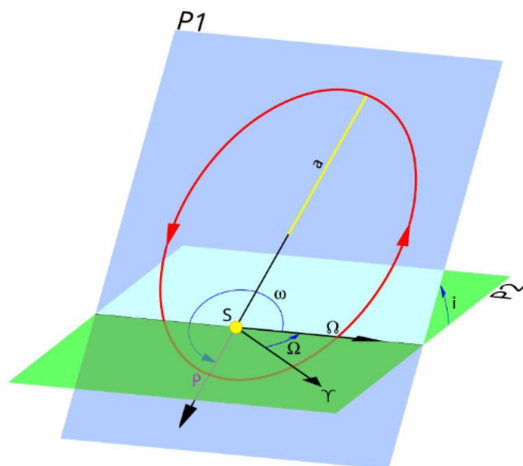
A műholdas távérzékelés, navigáció és kommunikáció alapja a megfelelő pályakonfiguráció megválasztása. A műholdpálya nem csupán azt határozza meg, hogy a fedélzeti szenzorok milyen gyakran és milyen lefedettséggel képesek adatot gyűjteni, hanem azt is, hogy mennyi energia szükséges a pálya fenntartásához, milyen felszínrészek figyelhetők meg rendszeresen, illetve milyen alkalmazási célokra optimális a műhold működése. A pálya megválasztása ezért kritikus rendszertervezési kérdés, amelyet a műhold küldetésprofilja, mérete, élettartama és energetikai korlátai egyaránt befolyásolnak.

A műholdak pályái alapvetően Kepler-féle ellipsziszekkel írhatók le, amelyeket hat fő paraméter definiál: a fél nagytengely, az excentricitás, a dőlési szög, a perigeum argumentuma, a felszálló csomópont hosszúsága, valamint a pályafázis. Mindezek együtt adják meg a műhold mozgását és helyzetét az időben. A pályák azonban nemcsak geometriai tulajdonságaik alapján, hanem funkcionális és alkalmazási szempontok szerint is kategorizálhatók.

A szakirodalomban a műholdpályák csoportosítása többféleképpen történik. A hagyományos felosztás 5-6 alapvető pályatípust különít el (LEO, MEO, GEO, GSO, HEO, SSO), azonban a modern távérzékelés, űripár és orbitális mechanika fejlődése lehetővé tette, hogy részletesebb, akár 10-12 kategóriát is megkülönböztessünk. Ez a fejezet ezt a részletes felosztást mutatja be, beleágyazva az elméleti tudásanyagba, a gyakorlati példákba és a távérzékeléshez kapcsolódó alkalmazásokba.

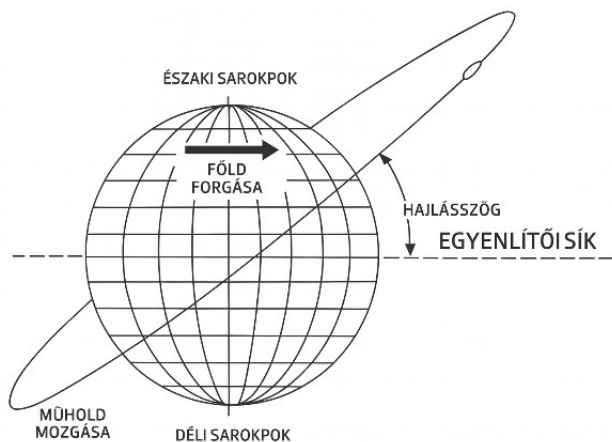
Inklináció

Az inklináció a műholdak pályájának egyik legfontosabb geometriai paramétere, amely a Föld egyenlítői síkja és a műhold keringési síkja által bezárt szöggént értelmezhető. Ez a szög jellemzi, hogy a pálya mennyire tér el az egyenlítőtől. Az inklináció mértéke 0° és 180° között változhat. Egy 0° -os inklinációjú pálya pontosan az egyenlítő mentén halad – ezt ekvatoriális pályának nevezük –, míg a 90° -os inklinációval rendelkező műholdak poláris pályán mozognak, azaz áthaladnak a Föld mindkét sarkvidéke fölött (Riebeek 2009), (20. ábra).



20. ábra. Pályahajlás/inclináció. A $P1$ és $P2$ síkok által bezárt szög (i), forrás: Brandir 2006

Ha az inklináció 0° és 90° közé esik, a műhold az Egyenlítőt észak felé haladva nyugat–délkelet irányban keresztezi, míg 90° és 180° közötti értéknél dél–északnyugat irányú áthaladás történik, ami retrográd mozgásra utal. Például egy 30° -os inklinációjú pálya esetén a műhold által lefedhető felszíni sáv az északi 30° és a déli 30° szélességi körök között helyezkedik el. Az inklináció jellemzően állandó marad egy adott műhold esetén, ami lehetővé teszi az időben ismétlődő megfigyeléseket ugyanazon földrajzi területekről (21. ábra).



21. ábra. Műholdak pályaelemei az egyenlítői koordináta-rendszerben, forrás: Mucsi 2013

A pályák csoportosítása négy fő paraméter mentén történik:

1. Magasság
 - pl. alacsony Föld körüli pálya (LEO), nagyon alacsony pálya (VLEO), közepes pálya (MEO), geostacionárius pálya (GEO) kategóriák.
2. Pályahajlás (inklináció)
 - poláris, egyenlítői, dőlt pályák.
3. Pálya alakja
 - körpálya vagy ellipszis.
4. Pálya szinkronizációja és speciális dinamika
 - napszinkron (SSO), geoszinkron (GSO), terminátor-követő (dawn–dusk) stb.

A küldetésvezérelt (mission-driven) műholdtervezés miatt a pálya mindig kompromisszum különböző követelmények között: időbeli felbontás, térbeli felbontás, energiagazdálkodás, lefedettség, adatátvitel.

Az alábbiakban a legismertebb, átfogó rendszerbe rendezett 12 pályatípus kerül bemutatásra, kifejezetten nagy hangsúlyt fektetve a távérzékelési, topográfiai és geoinformatikai alkalmazások összefüggéseire.

3.1.1. Alacsony Föld körüli pálya (LEO – Low Earth Orbit)

Az alacsony Föld körüli pálya (LEO) a modern távérzékelés és űripár legfontosabb pályatípusa, amelyet 160 és 2000 km közötti magasságú keringési zónaként definiálunk. Ebben a tartományban kering a földmegfigyelő műholdak döntő többsége – többek között a Sentinel-2, Landsat-8/9, Terra, Aqua, valamint a nagy kereskedelmi felbontású rendszerek, mint a WorldView vagy a Pleiades műholdak, illetve az olyan globális kommunikációs konstellációk, mint a Starlink, a OneWeb vagy az Amazon Kuiper rendszere. A LEO-pálya egyik legfontosabb jellemzője a rendkívül rövid keringési idő: egy műhold 90–120 perc alatt kerüli meg a Földet, ami 12–16 teljes fordulatot jelent naponta. A szükséges orbitális sebesség 7,4–7,9 km/s között alakul, és minél alacsonyabban kering a műhold, annál gyorsabban kell mozognia ahhoz, hogy a Föld gravitációs vonzásával szemben stabil pályán maradjon.

A LEO-pályán a műhold még érzékeli a Föld felső légkörének – főként a termoszférának és az exoszférának – a fékező hatását, ami fokozatos pályasüllyedést okoz. Ez különösen a 160–600 km közötti magasságban jelentős, és rendszeres pályakorrekciót igényel, hogy a műhold fenntartsa a kívánt magasságot és inklinációt. Ugyanakkor ez a tulajdonság a műholdak hosszú távú űrszemétkézelése szempontjából előnyös, hiszen a LEO-pályáról üzemképtelenné vált műholdak természetes módon lassan visszatérnek a sűrűbb légkörbe, ahol megsemmisülnek. A Starlink konstelláció ezért szándékosan 550 km körüli magasságban üzemel: ha egy műhold meghibásodik, légköri fékezés hatására automatikusan megsemmisül, így nem halmozódik fel veszélyes űrszemét.

A LEO-pálya egyik legnagyobb előnye a földmegfigyelő rendszerek szempontjából a nagy térbeli felbontás elérése. Mivel a műhold közelebb helyezkedik el a felszínhez, sokkal kisebb földfelszíni terület vetül egyetlen detektor elemre, így az optikai multispektrális műholdak képesek 10–30 méteres felbontásra (Sentinel-2, Landsat), a modern kereskedelmi rendszerek pedig akár 30–50 centiméteres részletességre is (WorldView-4, Pleiades Neo). A rövidebb távolság egyúttal jobb jel-zaj arányt is eredményez: az érzékelőbe érkező visszavert vagy kibocsátott jel erősebb, kevésbé csillapodik, ami különösen előnyös a gyenge spektrális jelek mérésére alkalmas hiperspektrális szenzorok számára. A LEO-pályán működő műholdak energiaigénye is alacsonyabb, hiszen az indításhoz kevesebb energia és üzemanyag szükséges, mint a magasabb MEO- vagy GEO-pályák esetében, és a kommunikációs távolság rövidsége miatt a fedélzeti és földi antennák is kisebb teljesítménnyel működhetnek.

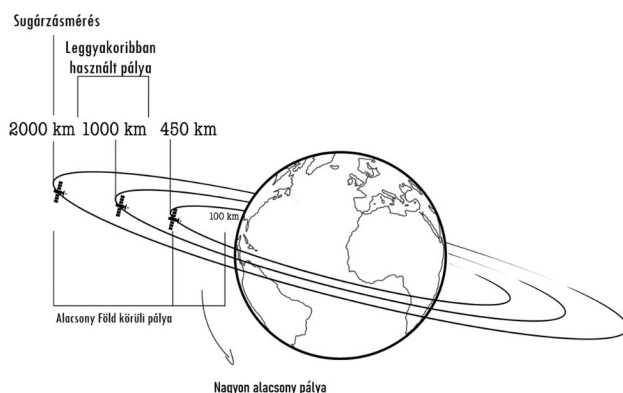
A LEO-pályák nem egységesek; számos altípusuk létezik. A távérzékelő rendszerek egyik leggyakoribb pályatípusa a poláris pálya, amely merőlegesen metszi az Egyenlítőt, és elhalad mindkét pólus felett. A napszinkron pályák – a LEO egyik legfontosabb alcsoportja – különleges pályaelemeiknek köszönhetően mindig ugyanabban a lokális napszakban haladnak el egy adott földrajzi pont felett, így biztosítják a konzisztens megvilágítási viszonyokat, amelyek nélkülözhetetlenek az idősoros elemzésekhez és a változásdetektáláshoz. Létezik úgynevezett dawn–dusk pálya is, amely a terminátorvonal mentén halad, így a műhold folyamatos napfényben van, ami különösen hasznos olyan műszerek számára, amelyek érzékenyek az árnyékolásra vagy nagy energiaellátást igényelnek. Speciális LEO-pályának számít az ISS mintegy 400 km magasságban, 51,6° inklinációval kialakított pályája, amelyet emberek által irányított kísérleti platformként használnak. A kommunikációs konstellációk, például a Starlink, OneWeb és Kuiper által használt pályák szintén a LEO-tartományba esnek, különböző magasságokban és inklinációkban elhelyezett műholdhálózatokkal.

A LEO-pályán mozgó távérzékelő műholdak egyik alapvető előnye a gyakori visszatérés ugyanazon felszínrész fölé. Egy műhold néhány naponta – Sentinel-2 esetében 5 naponta, Landsat esetében 16 naponta – ismét megfigyeli ugyanazt a területet. A nagy konstellációk, mint a PlanetScope vagy a Starlink, akár napi többszöri visszatérést is biztosítanak. Ez rendkívül értékes a környezetvédelem, mezőgazdaság, katasztrófareakció, erdőtüzek korai észlelése, árvízmonitoring vagy urbanizációs folyamatok vizsgálata szempontjából, mivel lehetőséget ad az időben követhető, nagy pontosságú idősorok előállítására. Ennek köszönhetően a LEO-műholdrendszerek a modern földmegfigyelés alaprétégét képezik.

A LEO-pályáknak ugyanakkor vannak korlátai is. A műhold nagy sebessége miatt az érzékelőknek rendkívül gyors és pontos működésre van szükségük, a nagy mennyiségű adatot pedig rövid idő alatt kell továbbítani vagy fedélzeten tárolni. Egy műhold egy időpillanatban csak egy viszonylag keskeny sávot képes leképezni, ezért a globális lefedettséghez szükséges a revisitálás vagy több mű-

holdból álló konstellációk kialakítása. További kihívást jelent az ütközésveszély növekedése: a LEO-térség a legzsúfoltabb az összes pályatípus közül, és az űrszemét folyamatosan növeli a Kessler-szindróma kockázatát.

Összességében a LEO-pálya a távérzékelés és az űrkommunikáció „munkaterülete”: ideális az optikai és radaros érzékelők számára, alkalmas nagy felbontású adatgyűjtésre, és olyan sűrű megfigyelési lehetőséget biztosít, amely a modern környezetgazdálkodás, a katasztrófavédelem, a biztonságpolitika és a tudományos kutatás számára egyaránt elengedhetetlen. A LEO-pályán mozgó műholdak egyesítik a technológiai hatékonyságot, a gazdaságosságot és a kiemelkedő adatminőséget, amiért a földmegfigyelési rendszerek gerincét alkotják napjainkban (22. ábra).



22. ábra. Alacsony Föld körüli pálya, forrás: Grillo 2025

3.1.2. Nagyon alacsony pálya (VLEO – Very Low Earth Orbit)

A nagyon alacsony Föld körüli pályák, vagyis a VLEO-pályák a távérzékelés és az űrtechnológia egyik legdinamikusabban fejlődő területét képviselik. Ezek a pályák a műholdak mindössze 120–300 km magasságban haladnak a Föld felszínétől, vagyis lényegesen közelebb repülnek, mint a hagyományos LEO-műholdak. Ez a közelség számos előnyt, ugyanakkor jelentős technikai kihívást is magában hordoz (23. ábra).

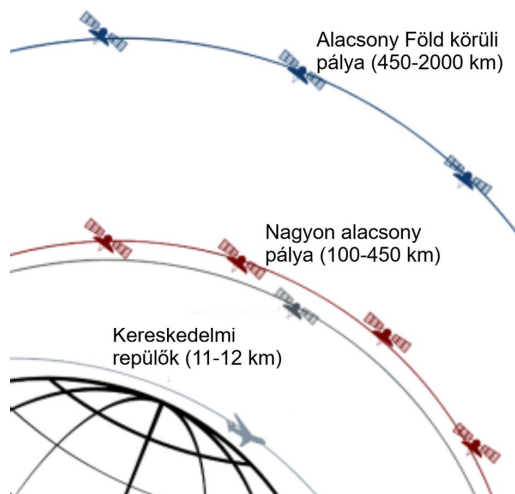
A VLEO-pályák legfontosabb sajátossága az, hogy a műholdak még részben a Föld felső légkörének (thermoszféra) sűrűbb régiójában mozognak. Itt a légköri részecskék száma már elég ahhoz, hogy számottevő atmoszferikus fékező hatást fejtsenek ki, ami folyamatos lassulást okoz a műhold mozgásában. Ennek következménye, hogy a pálya természetes módon gyorsan „leépülne”, ha a műhold nem végezne aktív pályakorrekciókat. A VLEO-t ezért tipikusan rövidebb élettartam jellemzi, és megbízható, nagy hatékonyságú meghajtórendszert igényel ahhoz, hogy hónapokon vagy éveken át a kívánt magasságban maradjon.

Mindazonáltal a VLEO egyik legnagyobb előnye az, hogy a műholdak extrém közelsége lehetővé teszi a hipernagy felbontású képalkotást. Minél kisebb a műhold és a felszín közötti távolság, annál kisebb szenzormérettel vagy optikai apertúrával érhető el olyan felbontás, amit magasabb pályán csak lényegesen nagyobb, költségesebb műholdakkal lehetne megvalósítani. Emiatt a VLEO ideális környezet kísérleti, innovatív szenzortechnológiák kipróbálására. Ilyenek lehetnek például:

- új generációs elektrooptikai szenzorok,
- adaptív optika kisműholdas alkalmazásai,
- atmoszferikus művelődések által korrigált képalkotó rendszerek,
- ultranagy felbontású hiperspektrális szenzorok,
- kisméretű radaros (SAR) képalkotás extrém alacsony pályáról.

A VLEO-pályák jelentős érdeklődést váltottak ki az új űripari szereplők között, mert a felszínhez viszonyított közelség alacsonyabb energiaigényt és gyengébb jelcsillapítást eredményez a kommunikációs rendszerekben. Ez azt jelenti, hogy kisebb teljesítményű adók vagy kisebb antennák is elegendőek lehetnek a megbízható adatkapcsolathoz. Ugyanakkor a légköri fékeződés ellensúlyozására hatékony elektromos meghajtásra – például ionhajtóművekre vagy Hall-effektusú thrusterre – van szükség, amelyek folyamatos tolóerőt biztosítanak a pálya fenntartásához.

Az alacsonyan repülő műholdak emellett jelentősen csökkentik a felszíni képek geometriai hibáit is. A nagyobb szögfelbontás miatt kisebb a parallaxishatás, kevesebb a légkör okozta torzítás, és pontosabb a felszínről visszaverődő jel detektálása. Ezek az adottságok rendkívül értékesek lehetnek várostervezési, infrastruktúra-monitoring, precíziós mezőgazdasági vagy katasztrófaelhárítási alkalmazásokban, ahol a részletgazdag, gyors revisitidejű megfigyelés létfontosságú.



23. ábra. Nagyon alacsony műholdpálya, forrás: Haugh 2024

A VLEO tehát egy olyan új technológiai határterület, amely ötvözi a LEO-pályák előnyeit a felszínhez való közelséggel, miközben komoly mérnöki kihívások elé állítja a műholdfejlesztőket. A folyamatos pályakorrekció igénye, a rövidebb missziós élettartam és a felső légkör változékonysága mind olyan tényezők, amelyek speciális megoldásokat követelnek meg. Mégis, az extrém részletgazdag felvételek és a potenciálisan alacsonyabb költségű kisműholdas rendszerek miatt a VLEO-pályák iránti érdeklődés folyamatosan növekszik, és egyre több kutatóprogram, startup és ürügynökség fordul e pályatípus felé (23. ábra).

3.1.3. Közepes pálya (MEO – Medium Earth Orbit)

A közepes Föld körüli pálya, vagyis a MEO, a 2000 és 35 786 km közötti magasságban elhelyezkedő orbitális régiót jelenti (24. ábra). Ez a magasságtartomány a LEO- és a GEO-pályák között helyezkedik el, és bár a távérzékelésben kevésbé domináns, stratégiaileg kiemelt szerepet tölt be a globális navigációs és időszinkronizációs rendszerek működésében. A MEO-pályákon kering többek között a GPS, a Galileo, a GLONASS és bizonyos mértékben a BeiDou navigációs műholdrendszer is.

A MEO-pályák egyik legfontosabb előnye a stabil, kiszámítható lefedettség és az alacsonyabb pályakarbantartási igény. Mivel a pályamagasság jóval nagyobb, mint a LEO esetében, a légköri fékezés gyakorlatilag megszűnik, így a műholdak hosszú éveken át működhetnek minimális korrekcióval. Emellett a MEO-pályán keringő műholdak jó kompromisszumot kínálnak a látószög és a keringési sebesség között: egy műhold viszonylag nagy földfelszíni területet lát be, ugyanakkor gyorsabban mozog, mint egy geostacionárius műhold.

A MEO-pálya legnagyobb jelentősége mégis a navigációs rendszerek működtetésében mutatkozik meg. A GNSS (Global Navigation Satellite Systems) műholdak azért választják ezt a magasságot, mert innen biztosítható az egész bolygó folyamatos és nagy pontosságú lefedése. Minden GNSS-műhold rendkívül precíz atomórákkal működik, és folyamatosan sugározza saját helyzetét, pályaparamétereit és időjeleket. A Földön működő vevők ezeket a jeleket használják háromszögelésre, ami lehetővé teszi a pozíció-, sebesség- és magasságmérést akár centiméteres pontossággal is.

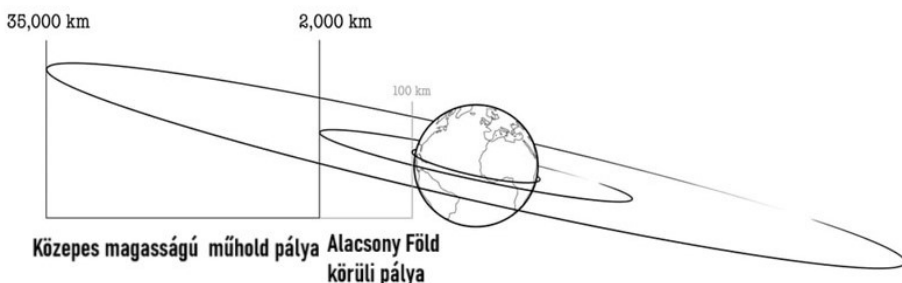
Bár a MEO-pálya önmagában nem tekinthető klasszikus távérzékelési pályának, szerepe mégis meghatározó a távérzékelési adatok feldolgozásában és georeferálásában. Minden optikai, radaros vagy egyéb űrszenzorral készült felvétel csak akkor válik térben értelmezhetővé, ha pontos koordinátákhoz és időbélyegekhöz köthető. A modern műholdak fedélzeti GPS/Galileo-vevői folyamatosan szolgáltatják ezeket az információkat, így válik lehetővé:

- az ortorektifikáció,
- a pontos földrajzi illesztés,
- a platformstabilizáció (pl. attitude determination systems),

- a távérzékelte termékek összehasonlíthatósága hosszú időskálán,
- a többplatformos adatintegráció.

A MEO-pálya másik fontos, bár kevésbé ismert alkalmazási területe az ionoszféra és a felső légkör vizsgálata. A GNSS-jelek áthaladnak az ionoszférán, és a jel késése vagy fázistolódása információt hordoz a felső légköri elektronkoncentrációról. Ezért a MEO-pályán működő rendszerek jelentős mennyiségű, globális lefedettségű geofizikai adatot kínálnak, amelyeket a kutatók többek között geomágneses viharok, naptevékenység és ionoszférikus anomáliák elemzésére használnak fel.

A MEO-pálya tehát egy kulcsfontosságú átmeneti térség: bár a klasszikus földmegfigyelés nem itt zajlik, a modern távérzékelés mégis nagymértékben függ az itt működő rendszerektől. A navigáció, idősinkronizáció, távérzékelési geolokáció és ionoszféra-kutatás mind olyan területek, amelyek alapjaiban határozzák meg az űralapú földmegfigyelés hatékonyságát és pontosságát. Mindez azt jelenti, hogy a MEO-pályák nélkül nem léteznének sem precíz távérzékelési termékek, sem modern adatvezérelt térinformatikai rendszerek, sem globális helymeghatározásra épülő alkalmazások – a mezőgazdaságtól a várostervezésen át az autonóm járműtechnológiáig.



24. ábra. Közepes magasságú műholdpálya, forrás: Grillo 2025

3.1.4. Geostacionárius pálya (GEO – Geostationary Orbit)

A geostacionárius pálya a Föld körüli pályák egyik legkülönlegesebb és legtöbb alkalmazási lehetőséget kínáló típusa. A 35 786 km magasan, az Egyenlítő síkjában keringő műholdak pályaperiódusa pontosan 24 óra, vagyis megegyezik a Föld forgási periódusával. Ennek következtében a műhold a felszínről nézve úgy tűnik, mintha mozdulatlanul lebegne egy adott hosszúsági fok fölött. Ez a rögzített „égi pozíció” teszi a GEO-pályát pótolhatatlanul fontosá a kommunikációs, meteorológiai és műsorszórásra használt műholdak számára (25. ábra).

A geostacionárius pálya egyik kulcselőnye, hogy a műholdak állandó látómezővel rendelkeznek: egyetlen műhold akár egy teljes földrész folyamatos megfigyelésére képes. Ezért használják széles körben televíziós és rádiós mű-

sorszórásra, műholdas internetre, illetve globális kommunikációs infrastruktúrák biztosítására. A műholdkapcsolat stabil, a jelgeometria állandó, így a földi antennákat sem kell folyamatosan követésre kényszeríteni – elég egyszer beállítani őket a műhold pozíciójára. Az a tulajdonság, hogy egyetlen műhold akár egy teljes földrész folyamatos megfigyelésére képes, különösen alkalmassá teszi őket folyamatos és valós idejű megfigyelések végzésére, ami elengedhetetlen az időjárás előrejelzése, a viharsituációk követése és a légköri folyamatok elemzése során (13. táblázat). Így a legfontosabb alkalmazási területe a meteorológia. A Meteosat, GOES, Himawari és Fengyun műholdcsaládok mind ezen a pályán működnek, és képesek percekben belüli ismételt mérésekre. A folyamatos megfigyelési képességnek köszönhetően a meteorológusok valós időben követhetik a légköri folyamatok gyors változásait – a trópusi ciklonok kialakulását, a zivartarcellák fejlődését, a hőhullámok intenzitását vagy a légköri frontok mozgását.

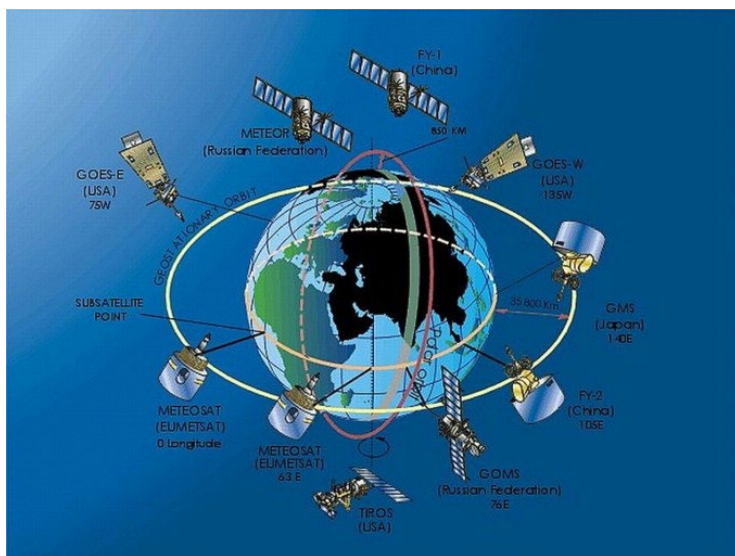
A GEO meteorológiai rendszerek egyik kiemelkedő előnye, hogy óriási területeket képesek lefedni. A Meteosat például Európa, Afrika és az Atlanti-óceán döntő részét is egyszerre látja, míg a GOES-sorozat az egész amerikai kontinenst és a Csendes-óceán jelentős részét. A folyamatos adatfolyam alapvető fontosságú a:

- rövid távú (nowcasting) előrejelzések készítéséhez,
- vihar- és ciklonriasztások kiadásához,
- légköri stabilitási paraméterek követéséhez,
- katasztrófavédelmi döntéstámogatáshoz,
- klímaváltozás hosszú távú nyomon követéséhez.

13. táblázat. Fontosabb geostacionárius meteorológiai műholdrendszerek

Műholdrendszer	Üzemeltető ország/szervezet	Lefedett terület	Aktív/utolsó generációs példák
GOES	USA (NOAA)	Észak- és Dél-Amerika, Atlanti- és Csendes-óceán	GOES-16 (East), GOES-18 (West)
Meteosat	Európa (EUMETSAT)	Európa, Afrika, Atlanti-óceán keleti része	Meteosat-10, Meteosat-11, MTG-I1
Himawari	Japán (JMA)	Kelet-Ázsia, Ausztrália, Csendes-óceán nyugati térsége	Himawari-9
INSAT	India (ISRO)	India, Dél-Ázsia, Indiai-óceán	INSAT-3D, INSAT-3DR
Fengyun (FY-2, FY-4)	Kína (CMA)	Kína, Kelet-Ázsia, Csendes-óceán	FY-4A, FY-4B (második generáció)
Elektro-L	Oroszország (Roszkosmosz, Roshydromet)	Eurázsia, Oroszország, Ázsia, részben Északi-sarkvidék	Elektro-L No.2, Elektro-L No.3
COMS / GK-2A	Dél-Korea (KARI)	Koreai-félsziget, Japán, Délkelet-Ázsia	GK-2A (Chollian-2A)

Műholdrendszer	Üzemeltető ország/szervezet	Lefedett terület	Aktív/utolsó generációs példák
Arabsat / MSG	Arab országok (közös üzemeltetés)	Közel-Kelet, Észak-Afrika, Arab-félsziget	Meteosat 7 (korábban), Meteosat 8 (régí)
AngoSat (terv)	Angola (Roszkoszmosz közreműködéssel)	Afrika középső és déli részei	AngoSat-2 (kommunikációs, nem meteorológiai funkcióval)



25. ábra. Geosztacionárius műholdak, forrás: Shunlin 2020

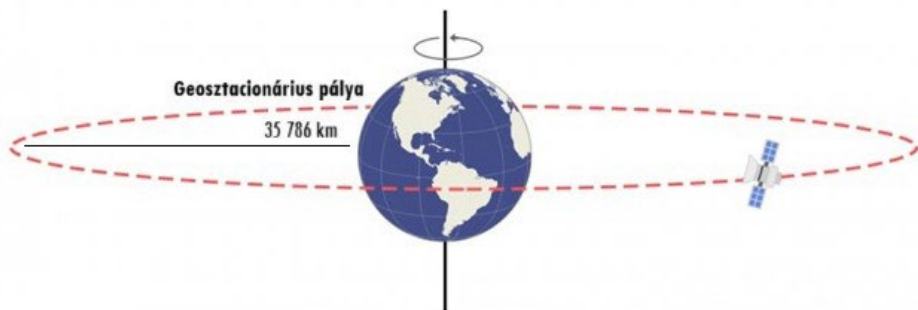
A geosztacionárius műholdak azonban nem csak optikai tartományban készítenek felvételeket. A modern rendszerek a látható fény mellett közeli infravörös, közép-infravörös, hő-infravörös és egyre gyakrabban kísérleti mikrohullámú sávokban is működnek, így a felhők, párolgási folyamatok, légnedvesség és felszíni hőmérséklet monitorozása is megoldható nappal és éjszaka egyaránt.

A GEO-pálya korlátai sem elhanyagolhatók. A nagy magasság miatt a műholdak szeparációs távolsága csekély – az egyenlítő felett egy „műholdgyűrű” alakul ki, amelyben korlátozott a rendelkezésre álló pozíciók száma. A térbeli felbontás is gyengébb, mint a LEO-pályák esetében: az óriási megfigyelési távolság miatt a tipikus optikai felbontás 0,5–2 km között mozog, ami ugyan elegendő meteorológiai célokra, de részletes felszínmegfigyelésre nem alkalmas.

Ennek ellenére a geosztacionárius műholdak szerepe megkerülhetetlen. Egyetlen műholdcsalád sem képes olyan folyamatos, közel valós idejű, globálisan összehangolt megfigyelést nyújtani, mint a GEO-rendszerek. A modern földmegfigyelés így nem csupán a LEO-műholdak részletgazdag adataira épül, hanem a GEO-mű-

holdak stabil, időben nagy felbontású információira is. A két pályatípus kombinációja adja a mai meteorológiai és klimatológiai rendszerek erejét: a LEO-műholdak precíz felszín- és atmoszféraadatokat szolgáltatnak, míg a GEO-műholdak gondoskodnak az állandó, nagy léptékű időbeli nyomon követésről.

A geostacionárius pálya tehát a földmegfigyelés egyik legfontosabb stratégiai térsége: a kommunikáció, a meteorológia és a globális adatáramlás zászlóshajója (26. ábra).



26. ábra. Geosztacionárius pálya, forrás: GIS Geography 2025

3.1.5. Földszinkron pálya (GSO – Geosynchronous Orbit)

A földszinkron pálya a műholdak egyik különleges és stratégiai jelentőségű pályatípusa, amely szoros kapcsolatban áll a geostacionárius pályával, de attól bizonyos kulcsfontosságú sajátosságokban eltér. A GSO lényege, hogy a műhold keringési ideje pontosan 24 óra, azaz megegyezik a Föld tengely körüli forgási periódusával. Ez azt jelenti, hogy a műhold naponta egyszer ugyanazt a pozíciót veszi fel a Föld fölött – viszont, ellentétben a GEO-pályával, nem feltétlenül marad a felszín egy adott pontja felett. A pálya lehet kissé döntött, elnyúlt vagy nem teljesen egyenlítői; ennek következtében a műhold látszólagos mozgást végez az égen, amely jellegzetes nyolcas (analemma) alakú mintázatot rajzol ki.

A földszinkron pálya magassága megegyezik a geostacionárius pályáéval:

35 786 km, azonban a pályahajlás és az excentricitás különbsége miatt a műhold nem fix pontként, hanem egy lassan változó ív mentén jelenik meg az adott földrajzi helyről nézve (27. ábra).

A GSO orbitális geometriájának két jellegzetes esete van:

- Inklinált földszinkron pálya, amelyben a pályahajlás néhány foktól akár 15–20°-ig is terjedhet. Ekkor a műhold észak–déli irányú kilengést végez.
- Excentrikus földszinkron pálya, amelyben a műhold távolsága kissé változik a pálya során, ezért kelet–nyugati irányú kilengések is megjelennek.

A műhold így egy lassan változó mintázatot ír le az égen, de továbbra is biztosítja a nagy területű, folyamatos adatközlést, ezért a GSO-pálya stratégiai

fontosságú a távközlés és időjárás-megfigyelés speciális alkalmazásai szempontjából. Olyan rendszerek esetében alkalmazzák, ahol nem feltétlenül szükséges a teljesen stabil „mozdulatlanság”, de biztosítani kell a közel állandó becélzást és precíz időzítést.

A földszinkron pálya alkalmazásai közül kiemelkedik:

Kommunikációs rendszerek (főleg katonai és speciális polgári alkalmazások)

A földszinkron pályán működő kommunikációs műholdak nagy előnye, hogy a műhold látszólagos helyzete lassan és előre kiszámíthatóan változik, így a földi állomások képesek automatikus követőrendszerekkel stabil kapcsolatot fenntartani. Ha a pálya döntött, akkor a műhold a magas szélességek felett is kedvező láthatóságot biztosít, ami fontos ott, ahol a tiszta GEO „szögmagassága” túl alacsony lenne.

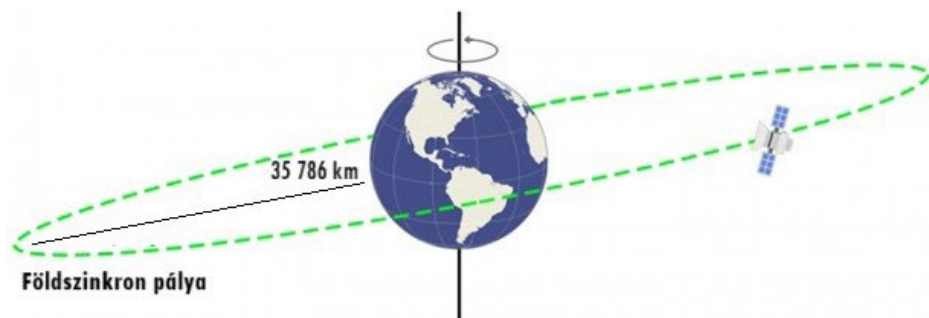
Navigációs rendszerek speciális kiegészítése

A GSO-pályák kiválóan használhatók a meglévő GNSS-rendszerek regionális kiterjesztésére. Erre példa:

- az indiai IRNSS / NavIC, amely GSO- és GEO-műholdak kombinációját alkalmazza,
- valamint egyes katonai kommunikációs rendszerek, amelyek a magasabb szélességeket így tudják lefedni.

Földmegfigyelési és időjárásrendszerek kiegészítő szerepben

Bár a klasszikus meteorológiai műholdak a tiszta GEO-pályán működnek, egyes kísérleti rendszerek a GSO-pálya eltérő geometriáját használják ki, lehetővé téve a magas szélességű területek jobb megfigyelését.



27. ábra. Földszinkron pálya, forrás: GIS Geography 2025

A GSO előnye, hogy a műhold hosszú távon kiszámítható pályát követ, kevesebb pályakarbantartást igényel, mint a teljesen körpályás GEO, és olyan területeket is lefed, amelyek a geostacionárius pályáról kedvezőtlen szögben látszanak. Ugyanakkor a földi antennáknak gyakran követniük kell a műhold moz-

gását, ami bonyolultabb technológiát igényel, és a geometriai torzítás is nagyobb lehet, különösen a képalakító műholdaknál.

A földszinkron pályák tehát a geostacionárius pálya rugalmasabb változatai, amelyek nagy területi lefedettséget, folyamatos adatátvitelt és regionális kiterjesztési lehetőségeket kínálnak. Bár ritkábban alkalmazzák optikai távérzékelésben, a távközlés és navigáció stratégiai rendszerének fontos elemei, különösen ott, ahol a Föld felszínének nagy szélességi tartományait kell kiszolgálni.

3.1.6. Magasan excentrikus pályák (HEO – Highly Elliptical Orbit)

A magasan excentrikus pályák, közismert nevükön HEO-pályák, az űrkutatás praktikus és történeti szempontból is különleges helyet foglalnak el. Ezek a pályák alapvetően ellipszis alakúak, ám a Föld körüli pályák között az egyik legnagyobb excentricitással rendelkeznek: a pálya egyik pontján (perigeumban) a műhold rendkívül közel halad el a Föld felszínéhez, míg az ellentétes oldalon (apogeumban) akár tízszer-húszszor messzebbre is eltávolodhat. Ez a drasztikus különbség jelenti a HEO-pályák legfontosabb sajátosságát és előnyét.

Fizikai és műszaki sajátosságok

A HEO-pályán keringő műholdak mozgása az ellipszis geometriájából fakadóan egyenetlen: a perigeum közelében, ahol a Föld gravitációs vonzása erősebb, a műhold nagyon gyorsan mozog. Ahogy azonban távolodik, az apogeum közelében a sebesség jelentősen lelassul. Ez azt eredményezi, hogy a műhold idejének nagy részét a Földtől távol, lassú mozgással tölti, miközben adott földrajzi terület felett látszólag „hosszan elidőzik” (28. ábra). Éppen ez a tulajdonság teszi a HEO-pályát kiválóan alkalmassá az olyan országok számára, amelyek a magas földrajzi szélességeken helyezkednek el – például Oroszország vagy Kanada –, mivel a geostacionárius pályáról ezek a régiók kedvezőtlen szögben figyelhetők.

A HEO-pályák legismertebb formái a Molnyija- és a Tundra-pályák. A Molnyija-pálya igen nagy excentricitású, körülbelül 12 órás keringési idejű pálya, amelynek pályahajlása $63,4^\circ$, ami stabilitási szempontból optimális. A Tundra-pálya ezzel szemben 24 órás periódussal rendelkezik, vagyis olyan földszinkron pálya, amely nem kör, hanem erősen elnyújtott ellipszis. A Tundra-pályán a műhold minden nap ugyanazt a mintát rajzolja az égre, de idejének nagy részét szintén az északi területek fölött tölti.

Miért különösen értékes a HEO-pálya?

A magasan excentrikus pályák egyik legnagyobb előnye az, hogy a műhold hosszú ideig képes figyelni egy adott régiót anélkül, hogy folyamatos követést vagy nagy energiájú pályamódosításokat igényelne. Míg a geostacionárius mű-

holdak csak az egyenlítői térségeket tudják optimális látószögből vizsgálni, adig a HEO-pályák tökéletes rálátást biztosítanak a magas szélességek területeire. Emiatt az időjárás-monitorozási feladatokban, kommunikációs rendszerekben, regionális adatközzvetítésben és biztonságpolitikai alkalmazásokban egyaránt fontos szerepet játszanak.

Oroszország például évtizedek óta alkalmaz Molnyija-műholdakat kommunikációs lefedettség biztosítására, mivel a GEO-pályán elhelyezett műholdak rálátása a szibériai területekre rendkívül alacsony. A HEO-pálya megoldotta ezt a problémát: a műholdak idejük több mint kétharmadát ezek felett a régiók felett töltik, stabil kommunikációs és megfigyelési lehetőséget adva.

Meteorológiai szempontból a HEO-pályák azért előnyösek, mert az Északi és Déli-sarkvidékek felett állandó, nagy felbontású megfigyelést tesznek lehetővé. Ezeket a területeket a geostacionárius műholdak már csak nagyon lapos szögben látják, ami a felhők, hó- és jégfelszínek elemzését nehezíti. A HEO-pályán lévő meteorológiai műholdak ennél sokkal kedvezőbb rálátást biztosítanak.

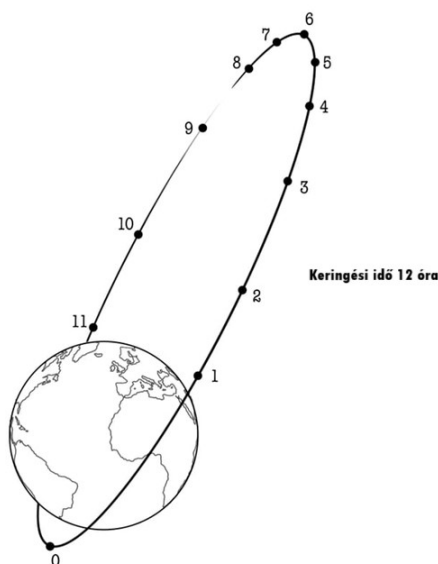
A HEO-pálya távérzékelési előnyei és korlátai

A távérzékelés számára a HEO-pályák (részletezve a 14. táblázatban) egyik legfontosabb előnye az a tulajdonság, hogy a műhold mozgása változó, így az apogeum környékén lassú és hosszú ideig tartó megfigyelést tesz lehetővé. Itt a műhold relatív mozdulatlansága egyfajta „kvázi-geostacionárius” megfigyelési pozíciót biztosít, de sokkal magasabb szélességeken. A poláris régiók folyamatos monitorozása kulcsfontosságú mind a tengeri jég mennyiségének felmérése, mind a sarki légtömegek mozgásának nyomon követése szempontjából.

A pályának azonban vannak korlátai is. A műhold a perigeumhoz érve rendkívül gyorsan mozog, ezért ezen a szakaszon távérzékelési szempontból kevésbé hasznos adatokat szolgáltat. Emellett a nagy excentricitás és az ebből adódó intenzív sebességváltozások bonyolultabb fedélzeti rendszereket és pályaszabályozási algoritmusokat igényelnek. A jelentős sugárzási zónákon (különösen a Van Allen-övek közelében) való áthaladás szintén megnöveli a műszerekre nehezedő terhelést.

14. táblázat. *A HEO-pályák legfontosabb jellemzőinek összefoglaló táblázata*

Jellemző	Leírás
Pálya típusa	Erősen excentrikus, elnyújtott ellipszis
Pályamagasság	Perigeum: 500–1500 km, Apogeum: 30 000–50 000 km
Keringési idő	12 óra (Molnyija), 24 óra (Tundra)
Tipikus pályahajlás	63,4° (optimális stabilitás)
Megfigyelési fókusz	Magas földrajzi szélességek, sarkvidékek
Alkalmazások	Kommunikáció, időjárás-megfigyelés, hírszerzés, navigációs kiegészítés
Előny	Hosszú ideig egy adott régió felett tartózkodik
Hátrány	Perigeumban nagy sebesség, magas sugárzási terhelés



28. ábra. Magasan excentrikus pályán keringő Molnyija, forrás: Grillo 2025

3.1.7. A Molnyija- és Tundra-pályák mint önálló kategóriák

A magasan excentrikus műholdpályák világa különleges helyet foglal el a modern űrtechnológia rendszerében, mert olyan feladatokra kínálnak megoldást, amelyek a hagyományos körpályákról nem valósíthatók meg hatékonyan. A Molnyija- és a Tundra-pálya a HEO-rendszerek két legismertebb formája, és ezek kialakítása mögött kimondottan az a stratégiai felismerés húzódik meg, hogy az északi féltekén fekvő országok – Oroszország, Kanada, valamint a skandináv államok – számára a geostacionárius pálya már nem biztosít megfelelő lefedettséget. Egyenlítő fölötti pozícióból ugyanis a magas szélességek egyre laposabb szögben látszanak, és 70° fölött a kapcsolatok minősége drámaian romlik. Itt válik pótolhatatlanná a Molnyija és a Tundra, amelyek a saját pályáikon lassú apogeumi mozgással képesek a világ ezen zónáit órákon keresztül stabilan, nagy elevációs szögben megfigyelni.

A Molnyija-pálya működésének alapja egy rendkívül elnyújtott ellipszis, amelynek apogeuma nagyjából 39 ezer kilométer magasságba emeli a műholdat, miközben a perigeum körülbelül 1000 kilométerre süllyed. A pályahajlás a híres $63,4^\circ$ -os kritikus inklináció, amely megakadályozza, hogy a Föld lapultságából adódó perturbációk jelentősen elforgassák az ellipszis nagytengelyét. A tizenkét órás periódus lehetővé teszi, hogy a műhold naponta kétszer hosszú időt töltsön a magas szélességek fölött. A lassú apogeumi szakaszban szinte lebeg az északi égbolton, ezért a kapcsolat stabil, az adatátvitel biztonságos, és a földi állomások

számára jól követhető. Ezért vált a Molnyija sokáig a szovjet és később az orosz kommunikációs infrastruktúra alapkövévé, különösen azokon a területeken, ahol a földi kommunikációs hálózat kiépítése rendkívül nehéz vagy gazdaságtalan lett volna (Flores 2021).

A Tundra-pálya ugyanezt a logikát egy másik időszerkezetben alkalmazza (15. táblázat). Itt a keringési idő már 24 óra, tehát a műhold naponta egyszer ismétli pontosan ugyanazt a pozíciót. Az apogeum magassága elérheti az 53 ezer kilométert is, de léteznek enyhébb excentricitású, 46 ezer kilométeres változatok is. A perigeum a Molnyijánál jóval magasabb, gyakran mintegy 20 ezer kilométer körül húzódik. Ez a sajátosság azt eredményezi, hogy a műhold kevésbé merül bele a Van Allen-sugárzási övek belső régióiba, ami kedvezőbb hosszú távú üzemelést tesz lehetővé. A Tundra-pálya hosszú apogeumi tartózkodási ideje és a napi ismétlődés teszi ideálissá az időjárás, kommunikációs és katonai rendszerek számára, ahol a folyamatos vagy majdnem folyamatos lefedettség kulcsfontosságú az északi szélességeken (29. ábra).

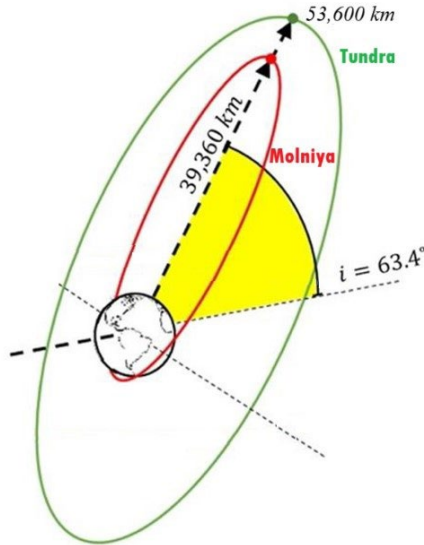
Az északi régiók – Kanada, Alaszka, Grönland, Skandinávia és Oroszország nagy része – számára ezek a pályák tehát nem egyszerűen technológiai érdekességek, hanem létfontosságú infrastrukturális pillérek. Legyen szó regionális kommunikációról, időjárás riasztásokról, sarkvidéki útvonalak monitorozásáról vagy katonai felderítésről, a HEO-műholdak nélkül ezek a térségek kommunikációs és megfigyelési szempontból részben „vakfoltok” lennének.

A pályamegválasztás minden műholdrendszer esetében meghatározza a platform hatékonyságát és adatainak minőségét. A távérzékelésben ez különösen hangsúlyos, hiszen a geometriai felbontás, a jel-zaj arány, a megvilágítási viszonyok stabilitása és az újralátogatási idő mind a pálya paramétereitől függ. A megfelelő pályakonfiguráció gondoskodik arról, hogy egy műhold a kívánt régiót úgy érzékelje, hogy az eredmény használható legyen tudományos, környezetmonitoring, gazdasági vagy akár humanitárius célokra. Emellett a pálya befolyásolja a műhold energiaellátását, termikus környezetét, sugárzási terhelését és üzemidejét is.

A modern műholdas távérzékelés és kommunikáció már nem egyetlen platformra épít. Ehelyett egy olyan komplex ökoszisztéma működik, amelyben a különböző pályatípusok – alacsony Föld körüli, közepes, földszinkron, geostacionárius, napszinkron, poláris és magasan excentrikus konfigurációk – egymást kiegészítve alkotnak egy egységes megfigyelőrendszert. A poláris és SSO-pályák adják a stabil, nagy felbontású optikai és multispektrális adatokat; a geostacionárius pontból érkező információk biztosítják a gyors, folyamatos időjárás megfigyeléseket; a HEO-pályák pedig mindezt kiterjesztik azokra a régiókra, ahol más pályák alig vagy egyáltalán nem működnének. Így a Föld megfigyelése egy sokrétű, egymásra épülő rendszerben valósul meg, amely egyszerre szolgálja a valós idejű döntéstámogatást, a hosszú távú tudományos kutatást és a fenntartható környezetgazdálkodás igényeit.

15. táblázat. Molnyija- és Tundra-pályák

Pálya	Excentricitás	Inklináció	Apogeum	Perigeum	Hasznos idő a magas szélességeken
Molnyija	~0.7	63,4°	399360–39400 km	900–1200 km	~8 óra / 12 órás ciklus
Tundra	kisebb e	63,4°	53600 km	18100 km	hosszú „lebegés” egy pont felett

**29. ábra.** Molniya- és Tundra-műholdpálya, forrás: saját szerkesztés

3.1.8. Poláris pálya (PO – Polar Orbit)

A poláris pálya a Föld körüli műholdpályák egyik legfontosabb és legnagyobb gyakorlati értékkel bíró típusa, amely nélkül a modern távérzékelés, a globális időjárás-előrejelzés vagy a földi erőforrások monitorozása elképzelhetetlen volna. Lényege, hogy a műhold pályasíkja közel merőleges a Föld egyenlítőjére, vagyis a pályahajlás tipikusan 90° körüli. Ennek következtében a műhold minden keringése során áthalad a bolygó északi és déli pólusa felett. A poláris pálya magassága általában 600–800 km között mozog, ami a LEO-pályák viszonylag alacsony tartományába esik, ugyanakkor elegendő magasságot biztosít ahhoz, hogy a műhold a keringések során a Föld teljes felszínét megfigyelhesse (30. ábra).

A poláris pálya legfontosabb sajátossága a globális lefedettség lehetősége. Ahogy a műhold végighalad a Föld egyik pólusától a másikig, addig maga a Föld is elfordul alatta a saját tengelye körül. A két mozgás eredőjeként minden egyes keringés során a műhold más és más hosszúsági kör mentén halad el, és néhány

nap leforgása alatt a teljes bolygófelszínt befedi megfigyeléseivel. Ez tette a poláris pályát az egyik legértékesebb távérzékelési pályatípussá a 20. század második felétől kezdve, amikor a globális környezetmonitoring először valóban megvalósíthatóvá vált.

A poláris pályákra telepített műholdak kiemelkedő szerepet töltenek be a környezetváltozás nyomon követésében. A NOAA műholdjai például több évtizedes idősorokat szolgáltatnak a légköri és felszíni folyamatokról, így a poláris pálya a hosszú távú klímamonitorozás egyik alapvető eszköze. A MetOp meteorológiai műholdak esetében a poláris pálya biztosítja, hogy naponta többször friss, globális légköri profilok álljanak rendelkezésre, amelyek kulcsfontosságúak a numerikus időjárás-előrejelző modellek számára. Ugyanígy működnek a katonai felderítő műholdak is: a poláris pálya lehetővé teszi, hogy a Föld bármely pontja megfigyelhető legyen, nem csak az egyenlítői régiók vagy a mérsékelt övek.

A legtöbbjük napszinkron pályán mozog, vagyis minden áthaladás ugyanabban a helyi napidőben történik, így kiválóan alkalmasak hosszú távú éghajlati és napi időjárási megfigyelésekre (16. táblázat).

16. táblázat. Nemzetközi poláris meteorológiai műholdrendszerek

Műholdrendszer	Üzemeltető ország / szervezet	Pályatípus	Fő célterületek	Aktív / utolsó generációs példák
JPSS (Joint Polar Satellite System)	USA (NOAA / NASA)	Napszinkron, kb. 829 km magasan	Globális (elsősorban É-Amerika előrejelzéseéhez)	Suomi NPP, NOAA-20, NOAA-21
MetOp	Európa (EUMETSAT / ESA)	Napszinkron, hajnali leszálló csomóponttal	Globális, de főként Európa és Afrika	MetOp-A (nyugdíjazott), MetOp-B, MetOp-C
FY-3	Kína (CMA / CNSA)	Napszinkron, több időpontban	Kína, Ázsia, globális lefedés	FY-3C, FY-3D, FY-3E
Meteor-M	Oroszország (Roszkoszmosz / Roshydromet)	Napszinkron, kb. 830 km	Oroszország, Eurázsia, globális	Meteor-M N2, N2-2
NOAA (régi sorozat)	USA (NOAA)	Napszinkron, 1970-es évektől	Globális	NOAA-15, 18, 19 (még aktívak, de elavultak)
DMSP (Defense Meteorological Satellite Program)	USA (U.S. Air Force)	Napszinkron, katonai célú	Globális, katonai alkalmazások	DMSP-F17, F18 (erősen elavultak)
Cubesat / MicroSat kísérletek	Több ország (pl. Svájc, Finnország, India)	Alacsony poláris pálya	Lokális vagy kísérleti felhasználás	pl. Aalto-1 (Finnország), TUBSAT, Megha-Tropiques

Jellemzőik és működési elvük

A poláris pályán keringő meteorológiai műholdak az egész Földet napi rendszerességgel képesek letapogatni. A legtöbb napszinkron pályán kering, vagyis minden áthaladás ugyanabban a helyi napidőben történik – például 13:30-kor délben (descending node). Ez biztosítja a megfigyelések időbeli összehasonlíthatóságát és éghajlati alkalmazhatóságát.

A műholdak haladási sebessége nagy, egy teljes Föld körüli keringést kb. 100 perc alatt végeznek el. Ez alatt egy szűk sávban (kb. 3000 km szélességben) multispektrális és termális szenzorok segítségével mérik a földfelszín, felhők, óceánok, légkör állapotát. A legmodernebb példányok már hiperspektrális szenzorokkal és mikrohullámú radiométerekkel is fel vannak szerelve, amelyek lehetővé teszik a légköri profilok (pl. hőmérséklet, páratartalom) háromdimenziós rekonstrukcióját.

A legfontosabb rendszerek részleteiben

- JPSS (USA): A NOAA és a NASA közös fejlesztése. A jelenlegi aktív műholdak (NOAA-20 és NOAA-21) a Suomi NPP tapasztalatain alapulnak. A rendszer VIRS, CrIS, ATMS és OMPS nevű fejlett műszerekkel rendelkezik, amelyek több mint 20 paramétert figyelnek meg, beleértve a felhőket, aeroszoloikat, felszíni hőmérsékletet és az ózonkoncentrációt. Ezek az adatok az USA napi numerikus időjárás-előrejelzéseinek alapját képezik.
- MetOp (EUMETSAT): Az európai rendszer három aktív műholdja (MetOp-A/B/C) különösen fontos az európai előrejelzésekhez. A műholdak az amerikai és orosz műholdakkal összehangolt pályán repülnek, biztosítva a globális időbeli lefedettséget. A MetOp műholdak egyik sajátossága az ASCAT-műszer, amellyel tengeri szélmezők is megfigyelhetők.
- FY-3 (Kína): A kínai rendszer naponta több időpontban is készít méréseket, ami kivételes sűrűségű adathozamhoz vezet. Az FY-3 sorozat modern spektrométerekkel és radiométerekkel rendelkezik, és a kínai numerikus modellek számára is kritikus adatforrást jelent. Az FY-3E műhold például reggeli áthaladási időpontra van optimalizálva, és a globális rendszer egyik időrészét tölti ki.
- Meteor-M (Oroszország): Az orosz Meteor-M sorozat továbbfejlesztései egyre inkább integrálódnak a globális rendszerbe. A Meteor-M N2 műholdon például többsávos képalkotó spektrométer és mikrohullámú radiométer is található. Bár a rendszer néha technikai problémákkal küzd, jelentős szerepet játszik az Északi-sarkvidék és Szibéria időjárásának megfigyelésében.
- NOAA régi sorozat: A NOAA-15, -18 és -19 műholdak még mindig működnek, de már erősen elavultak. Ezeket részben helyettesítette a JPSS-sorozat, de továbbra is szolgáltatnak adatokat, főként másodlagos vagy tartalék forrásként.

- DMSP (USA, katonai): A DMSP-program a világ leghosszabb ideje működő katonai meteorológiai műholdrendszere. Az utóbbi példányok már elavultak, de még működőképesek, különösen éjszakai megfigyelések (pl. városfények, vulkánkitörések) szempontjából.

A poláris pályán keringő meteorológiai műholdak globális szinten pótolhatatlan szerepet töltenek be a napi időjárás-előrejelzésekben, a klímakutatásban és a környezeti monitoringban. Míg a geostacionárius műholdak egy fix területet figyelnek folyamatosan, a poláris műholdak mozgásuk révén lefedik az egész bolygót, még a sarkvidéki régiókat is, amelyek a klímaváltozás szempontjából kiemelten fontosak. Az együttműködés nemzetközi szinten is jól szervezett: a nagy űrügynökségek (NOAA, EUMETSAT, CMA, Roszkozmosz) összehangolt pályatervezéssel és adatszolgáltatással segítik egymást.

A poláris pályák tehát a globális távérzékelés gerincét alkotják. A műholdak ezen a pályán elegendően közel haladnak a felszínhez ahhoz, hogy jó térbeli felbontást nyújtsanak, ugyanakkor pályájuk geometriája biztosítja az állandó és rendszeres visszatérést minden földrajzi hely fölé. Ez az egyedülálló kombináció teszi lehetővé a folyamatos, időben követhető változásdetektálást: az erdőirtások monitorozását, a gleccserek visszahúzódásának mérését, a légköri aeroszolkok terjedésének vizsgálatát vagy az óceáni hőmérsékleti változások követését.

A poláris pályák használata a katonai felderítésben is kulcsfontosságú. Ezek a műholdak képesek követni a globális eseményeket, legyen szó csapatmozgásokról, rakétakisérletekről vagy a stratégiai jelentőségű infrastruktúrák állapotáról. A poláris pályán keringő felderítő rendszerek évtizedek óta a nagyhatalmak űrstratégiájának elengedhetetlen részei. Ugyanakkor a poláris pálya a civil világban is meghatározó: a Föld természetes erőforrásainak felmérésére, mezőgazdasági területek állapotának elemzésére, városi növekedés követésére és katasztrófahelyzetek monitorozására is ezt a pályatípust használják leggyakrabban.



30. ábra. A poláris pálya, forrás: Thomas 2022

A poláris pálya előnye az állandó, egyetemes megfigyelési képesség, ugyanakkor bizonyos műszaki kihívásokat is magában hordoz. A műholdak a Föld mágneses sarki régiójában fokozott sugárzási terhelésnek vannak kitéve, ami különleges árnyékolási megoldásokat és ellenálló elektronikai rendszereket igényel. Emellett a keringési idő rövidsége – nagyjából 95–100 perc – intenzív adatküldési ciklusokat követel meg, ezért a földi vevőállomások hálózatának is globálisnak kell lennie, vagy a műholdnak fedélzeti adattároló rendszert kell alkalmaznia.

Mindezek ellenére a poláris pálya a földmegfigyelés egyik legfontosabb pillére maradt. Egyedi geometriája és lefedettségi tulajdonsága olyan globális látásmódot biztosít, amely alapján megérthetőek a bolygó rendszerfolyamatai, és hosszú távú adatsorai nélkülözhetetlenek a tudományos kutatásban, a környezetvédelemben és a technológiai fejlesztésekben egyaránt.

3.1.9. Napszinkron pálya (SSO – Sun Synchronous Orbit)

A napszinkron pálya természetes folytatása a poláris pályák világának, de itt a térbeli geometriát egy finoman hangolt időbeli ritmus egészíti ki. Míg a „sima” poláris pályák biztosítják a teljes felszín lefedését, a Sun-Synchronous Orbit (SSO) gondoskodik arról, hogy a műhold ugyanazt a felszíndarabot mindig *azonos helyi napidőben* figyelje meg (31. ábra). Ez a következetesség a fotometriai elemzések alfája és ómegája.

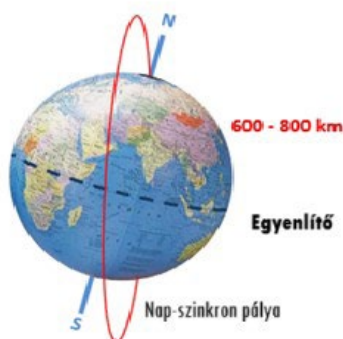
A napszinkron pálya technikai részletei a 17. táblázatban találhatóak. Innen kiderül, hogy nem csupán egy magasba emelt, 98° körüli dőlésszögű poláris pálya, hanem egy finoman „forgatott” pályasík: a Föld Nap körüli keringése miatt a téridő-geometria úgy van beállítva, hogy a pályasík naponta néhány tized fokkal elforduljon kelet felé. Ennek eredménye, hogy a műhold minden áthaladásakor ugyanabban a fényviszonyban „találkozik” a felszínnel. Ez óriási előny, mert a megvilágítás állandósága a multispektrális és hiperspektrális mérések megbízhatóságát adja.

A napszinkron pálya alapvetően 600–900 km magasságban működik, bár a pontos érték a kívánt helyi napidőtől, a szenzor felbontásától és az átfedési igénytől függően módosulhat. A legismertebb SSO-műholdak – Landsat, Sentinel-2, Terra, Aqua – mind ezt a kinematikai előnyt használják ki. A földmegfigyelésben az SSO jelenti azt a stabil „időkaput”, amelyen keresztül hónapokon, éveken át ugyanabban a szögben látjuk a mezőgazdasági parcellák állapotát, a vízminőséget, a városi hőszigetek változását vagy akár az erdőborítás apróbb mozgásait.

Az SSO lényege tehát nem a magasságban vagy a sebességben rejlik, hanem a tökéletesen összehangolt időzítésben. Ez teszi lehetővé, hogy a műholdak „ugyanabban a fényben” lássák a Földet – szó szerint és átvitt értelemben is.

17. táblázat. *Napszinkron pálya összefoglalója*

Jellemző	Napszinkron pálya (SSO)
Pályamagasság	kb. 600–900 km
Pályahajlás	~97–99°, poláris jellegű
Kulcsmechanizmus	A pályasík precessziója követi a Föld Nap körüli mozgását
Helyi idő az áthaladáskor	állandó (pl. 10:30, 13:30 LTAN)
Fő előny	azonos megvilágítás → konzisztens spektrális adatok
Tipikus alkalmazás	multispektrális/hiperspektrális távérzékelés, erdő- és mezőgazdasági monitoring, klímaadatok, felszíni változásokövetés
Ismert műholdak	Landsat, Sentinel-2, SPOT, Terra/Aqua, ICESat

**31. ábra.** *Napszinkron pálya, forrás: saját szerkesztés*

3.1.10. Napkelte–napnyugta pálya/terminátorkövető pálya (Down-Dusk/Sunrise – Sunset Orbit)

A napkelte–napnyugta pálya – gyakran „terminátorkövető pályaként” emlegetik – a napszinkron pályák sajátos és elegáns változata (18. táblázat). Itt a műhold folyamatosan a világos és a sötét félteke határán, a terminátor mentén halad, vagyis mindig abban az átmeneti zónában tartózkodik, ahol a Nap éppen felkel vagy lenyugszik. Ez a különleges helyzet sajátos megvilágítást, állandó szögeket és stabil energiaellátást biztosít.

A pálya legfontosabb előnye, hogy a műhold napelemei gyakorlatilag *folyamatosan optimálisan* kapják a napsugárzást. A Nap alacsony beesési szöge ugyan nem okoz maximális intenzitást, de a stabil, megszakítás nélküli megvilágítás rendkívül hatékony energiafelhasználást eredményez. A pályageometria másik előnye, hogy a felszíni megfigyelésekben minimálisra csökkennek az árnyékolási torzulások: a fény a horizont felől érkezik, egyenletesen, és a megvilágítási viszonyok minden áthaladáskor szinte azonosak maradnak (32. ábra).

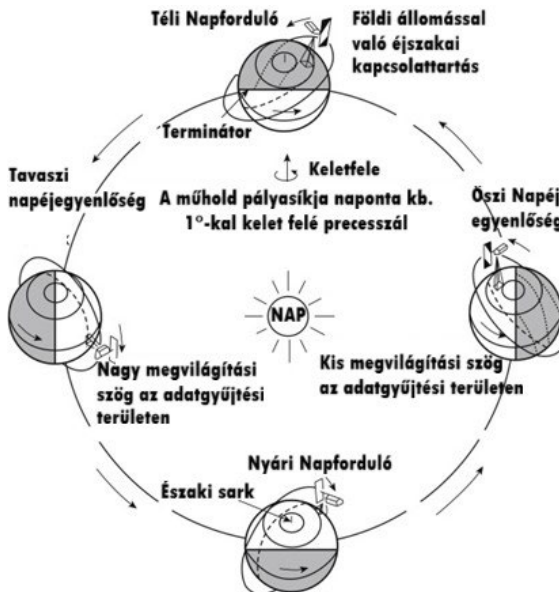
Ez a fajta stabilitás kifejezetten értékes azokban a földtudományi és légköri vizsgálatokban, ahol a fényintenzitás, az aeroszokok szórási tulajdonságai vagy

az elektromágneses mérőműszerek érzékenysége hosszú távon csak úgy értékelhető, ha a megvilágítás állandó. Nem véletlen, hogy több űridőjárás, napszél-megfigyelő és klimatológiai műhold választja ezt a pályát, amikor a cél a fotometriai stabilitás vagy a légkör felső rétegeinek pontos monitorozása.

A terminátorkövető pálya tehát egyfajta „arany középút” a napszinkron és a tisztán poláris pályák között: megőrzi az SSO időbeli konzisztenciáját, de energiagazdaságosabb, és különösen alkalmas a félhomály optikai sajátosságainak kihasználására.

18. táblázat. *Napkelte–napnyugta pálya, avagy terminátorkövető pálya*

Jellemző	Napkelte–napnyugta pálya (Terminator orbit)
Pályatípus	speciális napszinkron pálya
Pályahajlás	~97–99° (poláris jelleg)
Pozíció	folyamatos mozgás a terminátorvonal mentén
Megvilágítás	állandó, alacsony szögű; minimális árnyékhátas
Energiaellátás	nagy hatékonyság, folyamatos napsugárzás
Fő előny	fotometriai stabilitás, elektromágneses műszerek optimális működése
Tipikus alkalmazás	aeroszolkutatás, légköri optika, űridőjárás, magnetoszféravizsgálatok, stabil megvilágítást igénylő földmegfigyelés
Példák	több ESA és NASA tudományos küldetés, pl. TIMED, ICON (részben terminátorközelű konfigurációk)



32. ábra. *Napkelte–napnyugta, avagy terminátorkövető pálya, forrás: saját szerkesztés*

3.1.11. Egyenlítői pálya (EQO – Equatorial Orbit)

Az egyenlítői pálya a műholdas rendszerek egyik legegyszerűbb és leginkább intuitív pályatípusa, hiszen a műhold pontosan a Föld egyenlítője fölött kering, nulla fokos pályahajlással. Ebben a konfigurációban a műhold mozgása teljesen egybeesik az egyenlítő síkjával, így minden keringés során ugyanazt az északi–déli szélességi sávot követi végig. Ez azt jelenti, hogy a műhold nem halad keresztül a magasabb szélességeken, hanem kizárólag a trópusok és a különböző egyenlítőközeli régiók felett nyújt rendszeres lefedettséget (33. ábra).

Mindez különös jelentőséggel bír azokban a térségekben, ahol a felszín feletti légköri folyamatok, a felhőképződés, a vegetációdinamika vagy a part menti ökoszisztémák gyors változásai miatt fontos a gyakori megfigyelés. A trópusi országok számára tehát kifejezetten értékes egy ilyen pálya, mert állandó, sűrű visszatérési gyakoriságot biztosít egy nagyon specifikus, ám rendkívül érzékeny éghajlati és ökológiai zónában. Az egyenlítői pályán mozgó műholdak így megfigyelhetik például a monszunváltozásokat, az erdőirtás mintázatait, a folyók árhullámainak vagy a ciklonok kialakulását és fejlődését egy olyan területen, amely a globális energiakörforgás kulcsa.

Habár a klasszikus távérzékelésben – különösen a globális lefedettséget igénylő rendszerek esetében – ritkábban alkalmazzák, az egyenlítői pálya bizonyos kommunikációs és adatátviteli rendszerek számára kiemelkedően előnyös. A műhold ugyanis az egyenlítő mentén nagyjából állandó relatív pozíciókban mozog a felszín alatt elhelyezkedő régiókhoz képest, így a földi állomások számára egyszerűbb az adatfogás és -továbbítás megszervezése. Ennek következtében a pálya fontos szerepet kap alacsony szélességi körökön működő, regionális kommunikációs hálózatok esetében, ahol nem szükséges teljes bolygósíntű lefedés, ellenben fontos a gyors jelátvitel és az infrastruktúra egyszerű fenntartása.

Összességében az egyenlítői pálya egy szűkebb, de stratégiai jelentőségű alkalmazási területet szolgál ki. Egyszerre kínál technikai előnyöket a kommunikációs rendszereknek és egyedülálló megfigyelési lehetőséget a trópusi övekben zajló környezeti változások követésére – különösen olyan országok számára, amelyeknek kritikus jelentőségű a rendszeres monitoring, ám nem áll rendelkezésükre komplex, poláris vagy napszinkron műholdflotta.



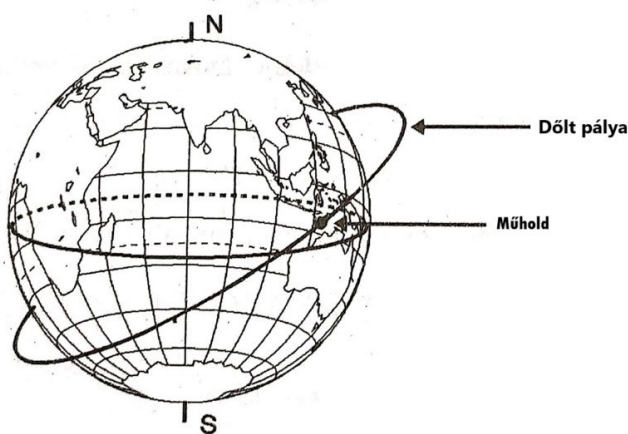
33. ábra. Egyenlítői pálya, forrás: saját szerkesztés

3.1.12. Dőlt pályák (IO – Inclined Orbit)

A dőlt pályák – vagyis az Inclined Orbit (IO) konfigurációk – különleges átmenetet képviselnek a klasszikus geostacionárius pályák és az alacsonyabb inklinációjú, kevésbé stabilan „egy hely fölött álló” pályák között. Alapvetően olyan GEO- vagy GSO-műholdakról van szó, amelyek valamilyen okból – leggyakrabban az üzemanyagkészlet csökkenése miatt – már nem képesek fenntartani a tökéletesen egyenlítői, 0° inklinációjú geostacionárius helyzetüket. Ehelyett a műhold pályasíkja lassan elkezd „dőlni”, vagyis minden egyes kör során enyhén észak felé, majd dél felé halad, az égi pályán pedig egy jellegzetes, nyolcas alakú analemma-görbét rajzol a Föld egy kiválasztott pontja fölött (34. ábra).

Ez a pályatípus nem csupán a műholdak élettartamának végső fázisában válik fontossá, hanem tudatos üzemeltetési stratégia is lehet. A geostacionárius pozíció fenntartása ugyanis folyamatos pályakorrekciót igényel, különösen ami az inklináció stabilizálását illeti. A gravitációs perturbációk – például az egyenlítői kidudorodásból eredő J2-hatás vagy a Hold és a Nap tömegvonzása – folyamatosan igyekeznek „kilökni” a műholdat az egyenlítő síkjából. A szigorúan nulla fokos pályahajlás megtartása jelentős üzemanyag-fogyasztással jár, amely egy idő után a hasznos üzemidő végét is jelentheti.

Ha viszont a műholdat dőlt pályáján hagyják tovább működni, az üzemeltetés költségei és az energiabefektetés lényegesen csökkennek. A műhold továbbra is teljes értékűen képes kommunikációs feladatokat ellátni, különösen akkor, ha a földi állomások képesek követni az így mozgó műholdat, például mozgatható antennarendszerekkel. A pályahajlás növekedésével ugyan a műhold már nem marad pontosan egy adott felszíni pont fölött, de a kommunikáció nem szűnik meg – a lefedettség mintázata egyszerűen dinamikusabbá válik.



34. ábra. Dőlt pálya illusztrációja, forrás: saját szerkesztés

A modern kommunikációs szektorban ez a megközelítés egyre gyakoribb. A nagy értékű geostacionárius műholdak üzemidejének meghosszabbítására ideális megoldás, különösen akkor, amikor a fedélzeti üzemanyag már csak minimális pályakorrekciókra elegendő. Ebben az üzemmódban a műhold havi vagy éves skálán egyre nagyobb dőlt pályára kerül, és így akár évekkal tovább képes szolgáltatásokat nyújtani, mielőtt véglegesen a temetői pályára (graveyard orbit) emelnék.

A dőlt pályák tehát egyfajta „második életet” biztosítanak a geostacionárius műholdaknak, miközben technikailag egyszerűbb, energiahatékonyabb üzemeltetést tesznek lehetővé. A megoldás különösen jól illeszthető olyan régiókhoz, ahol a földi infrastruktúra alkalmazkodni tud a mozgás követéséhez, illetve ahol az enyhén változó lefedettség sem rontja a szolgáltatás minőségét jelentősen.

3.2. Jelentősebb műholdrendszerek és távérzékelési aspektusai

3.2.1. Nagy felbontású optikai sávú távérzékelési műholdak

Jelen alfejezet a kereskedelmi célú, nagy térbeli felbontással rendelkező műholdas rendszereket mutatja be, amelyek fontos szerepet játszanak a precíziós térképezésben, várostervezésben, mezőgazdaságban, katasztrófakezelésben és biztonsági alkalmazásokban. Ezek a műholdak optikai szenzorokat használnak, és akár 0,3–1 méteres vagy annál is jobb felbontást biztosítanak.

A fejezet főbb alfejezetei a következő rendszereket ismertetik:

1. IKONOS műholdak

Az IKONOS volt az első kereskedelmi műhold, amely 1 méteres pánkromatikus és 4 méteres multispektrális felbontású képeket biztosított. 1999-ben indították, és mérföldkönek számít a magánkézben lévő távérzékelés történetében.

2. QUICKBIRD műhold

A DigitalGlobe által üzemeltetett QUICKBIRD 2001-ben indult, és hasonló, de kissé jobb felbontású adatokat szolgáltatott: kb. 0,6 m pánkromatikus, 2,4 m multispektrális képek. Népszerű volt városi és katonai alkalmazásokban.

3. ORBVIEW-3 műhold

Ez a rendszer 2003-ban indult, és 1 méteres pánkromatikus és 4 méteres multispektrális felvételeket készített. Rövid ideig működött (2007-ig), de fontos lépés volt az amerikai kereskedelmi távérzékelésben.

4. GeoEye műholdak

A GeoEye-1 2008-ban indult, és akár 0,41 méteres pánkromatikus és 1,65 méteres multispektrális képeket nyújtott. A cég később egyesült a DigitalGlobe-bal, egyesítve a két legnagyobb nagy felbontású szolgáltatót.

5. WorldView műholdak

Ezek napjaink egyik legfejlettebb rendszerei. A WorldView-1–4 műholdak a 0,31–0,5 méteres pánkromatikus és 1,2–2 méteres multispektrális felbontásukkal a legnagyobb részletességet kínálják a kereskedelmi piacon. Nagy pontosságuk miatt különösen hasznosak térinformatikai és katonai alkalmazásokban.

3.2.2. Szuperspektrális műholdak

A szuperspektrális műholdak olyan földmegfigyelő rendszerek, amelyek 10–60 közötti, viszonylag szűk spektrális sávban érzékelik az elektromágneses sugárzást, jellemzően a látható fény (VIS), a közeli infravörös (NIR) és a rövid-hullámú infravörös (SWIR) tartományban. Ezek a rendszerek technikailag a multispektrális és a hiperspektrális műholdak között helyezkednek el, és céljuk, hogy kompromisszumot kínáljanak a spektrális felbontás, az adatméter, valamint a gyakorlati alkalmazhatóság között. A multispektrális rendszerekhez képest finomabb spektrális információval rendelkeznek, így pontosabban tudják megkülönböztetni a felszín különböző típusait, például a növényzetfajtákat, a talajtípusokat vagy a vízminőség különbségeit. Ugyanakkor a hiperspektrális rendszerekhez viszonyítva kevesebb adatot generálnak, ami gyorsabb feldolgozást és olcsóbb adattárolást tesz lehetővé.

Az egyik legismertebb és legszélesebb körben alkalmazott szuperspektrális földmegfigyelő műhold a Sentinel-2 rendszer, amely az Európai Űrügynökség (ESA) és az Európai Unió Copernicus programjának része. A Sentinel-2A 2015-ben, a Sentinel-2B pedig 2017-ben állt pályára. A rendszer két azonos műholdból áll, amelyek egymást kiegészítve 5 napos visszatérési időt biztosítanak globálisan. A Sentinel-2 műholdak fedélzetén található multispektrális képalkotó rendszer (MSI – Multispectral Instrument) 13 spektrális sávban működik, ezek közül három 10 méteres, hat 20 méteres, négy pedig 60 méteres térbeli felbontással dolgozik. A sávok elosztása lehetővé teszi a vegetációs indexek számítását, a talaj és a növényzet különválasztását, a víztestek vizsgálatát, valamint az urbanizált területek nyomon követését is. A Sentinel-2 adatai nyílt hozzáférésűek, ezért kutatási és gyakorlati célokra is széles körben használják őket.

Egy másik említésre méltó szuperspektrális rendszer a kínai Gaofen-5 műhold, amely 2018-ban indult, és hiperspektrális mellett szuperspektrális szenzorokat is hordoz. Az Advanced Hyperspectral Imager (AHSI) érzékelője például 330–2515 nm közötti tartományban képes adatgyűjtésre, és alkalmazható levegőminőség-monitoringra, valamint felszíni anyagösszetétel meghatározására. Habár a Gaofen-5 alapvetően a hiperspektrális kategóriába tartozik, egyes szenzorai szuperspektrális jellemzőket mutatnak.

A szuperspektrális rendszerek fontossága a jövőben várhatóan tovább nő, mivel egyre több alkalmazás igényli a magas spektrális részletességet – például precíziós mezőgazdaság, erdőgazdálkodás, várostervezés, környezeti monitoring és

klímaváltozás-elemzés területén. Ugyanakkor a felhasználók számára kulcsfontosságú a jó adathozzáférés, a feldolgozási infrastruktúra, valamint az adatok hosszú távú archiválása is. A szuperspektrális műholdak ebben a kontextusban hatékony átmenetet kínálnak a hagyományos és hiperspektrális rendszerek között.

A Sentinel-2 műholdpáron működő MSI-szenzor összesen 13 spektrális sávban érzékel, lefedve a látható (VIS), közeli infravörös (NIR) és rövidhullámú infravörös (SWIR) tartományokat. A különböző sávok különféle célokra szolgálnak, az alábbi táblázat ennek összegzését adja (19. táblázat).

19. táblázat. *A Sentinel műhold spektrális sávjai és funkciói*

Sávszám	Középső hullámhossz (nm)	Sávszélesség (nm)	Térbeli felbontás	Főbb alkalmazás
B1	443	20	60 m	Aeroszolfigyelés, atmoszférakorrekció
B2	490	65	10 m	Víztestek elemzése, növényzet állapota
B3	560	35	10 m	Vegetációfelügyelet, RGB-képek
B4	665	30	10 m	Vegetációs indexek (pl. NDVI)
B5	705	15	20 m	Vegetációs pigmenttartalom, chlorophyll
B6	740	15	20 m	Vegetációstressz, biomassa
B7	783	20	20 m	Vegetációs különbségek
B8	842	115	10 m	NIR-alapú vegetációs mutatók
B8A	865	20	20 m	Vegetációs struktúra, vízhatárok
B9	945	20	60 m	Vízgőztartalom, atmoszférakorrekció
B10	1375	30	60 m	Cirrusfelhő-detekció
B11	1610	90	20 m	SWIR – talajnedvesség, égés utáni felszín
B12	2190	180	20 m	SWIR – talaj, hó, jég, égetés utáni állapot

3.2.3. Hiperspektrális távérzékeléses műholdak

A hiperspektrális technológia alapul szolgál és különösen nagy jelentőségű a professzionális erdőgazdálkodás, precíziós mezőgazdaság, környezetvédelem, geológia, bányászat és katonai felderítés területén, mivel lehetővé teszi a felszíni objektumok kémiai és fizikai jellemzőinek finom azonosítását.

A hiperspektrális távérzékelés során a műholdas vagy légi szenzorok a látható, közeli infravörös (NIR), rövidhullámú infravörös (SWIR), esetenként a termikus (TIR) tartományban, szűk (néhány nm széles) és egymást fedő spektrális sávokban rögzítik a felszínről visszavert vagy kibocsátott sugárzást. Ez lehetővé teszi, hogy az egyes földi objektumok sajátos spektrális „ujjlenyomataik” alapján azonosíthatók legyenek.

Egy multispektrális szenzor általában 3–10 spektrális sávval dolgozik, míg egy hiperspektrális rendszer akár 100–400 különálló spektrális csatornát is rögzíthet, 400–2500 nm között. Ez az adatmennyiség jelentős feldolgozási kapaci-

tást és korszerű osztályozási algoritmusokat igényel (például gépi tanulás, PCA, spektrális unmixing).

Alkalmazási területek

- Erdőgazdálkodás: a növényborítottság, növekedés nyomon követése, fertőzések terjedése, faállomány korösszetétele, állapotvizsgálata, biotermék mennyiségi és minőségi felmérése.
- Mezőgazdaság és növényállapot-felmérés – a növények vízhiányának, betegségeinek vagy tápanyaghiányának kimutatása a spektrális jellegzőgörbék alapján.
- Környezeti monitoring – szennyezőanyagok detektálása talajban és vízben, algavirágzás nyomon követése.
- Ásvány- és kőzettérképezés – hiperspektrális adatokkal pontosítható a geológiai térképezés, különösen a hidrotermális ásványzónák azonosításában.
- Kulturális örökség védelme – régészeti struktúrák és rejtett építmények azonosítása eltérő spektrális jellemzőik alapján.
- Városi környezet vizsgálata – tetőfedő anyagok, burkolatok, zöldtetők azonosítása.
- Katonai és hírszerzési célok – álcázott objektumok, haditechnikai eszközök azonosítása a spektrális kontraszt révén.

Hiperspektrális műholdas rendszerek

EO-1 Hyperion (NASA, 2000–2017)

Az első valódi hiperspektrális műholdas szenzor. A Hyperion 220 spektrális sávot mért 400–2500 nm között, 30 m-es térbeli felbontással és 7,5 km sáv szélességgel. Demonstrációs küldetesként indult, de tudományos szempontból úttörő jelentőséggel bírt.

PRISMA (ASI – Olasz Űrügynökség, 2019–)

A PRISMA hiperspektrális műhold célja az olasz és európai környezeti és mezőgazdasági megfigyelés támogatása. 66 spektrális sávot mér 400–2500 nm között, 30 m-es felbontással, valamint egy multispektrális pankromatikus csatornával (5 m). Kiemelt jelentősége van a vízminőség és vegetációs állapotfelmérés területén.

EnMAP (DLR – Német Űrközpont, 2022–)

A legújabb európai hiperspektrális műhold, amely 242 spektrális sávban gyűjt adatot (400–2500 nm), 30 m térbeli felbontással, 30 km-es sáv szélességgel. Az EnMAP célja a globális ökoszisztémák változásainak nyomon követése, különös tekintettel a talajhasználatra, biotermékre és városi fejlődésre.

Gaofen-5 (Kína)

A Gaofen sorozat ötödik tagja a kínai hiperspektrális földmegfigyelés úttörője. A szenzor több mint 330 spektrális sávban rögzít adatokat. Célja a mezőgazda-

ság, környezetvédelem és városfejlesztés támogatása. A rendszer része a tágabb kínai földmegfigyelési stratégiának (CHEOS).

ZHUHAI-1 (Kína)

Egyik szenzora, az OHS-01, egy miniatürizált hiperspektrális kamera, amely kb. 32 m-es felbontással dolgozik. A kínai magánszektor fejlesztése, amely több kis műholdból álló konstellációt céloz meg, rugalmas megfigyelési lehetőségekkel.

HISUI (Japán)

A HISUI (Hyperspectral Imager Suite) eredetileg repülőgépre szerelt rendszer volt, majd 2019-ben felkerült a Nemzetközi Űrállomásra (ISS). Spektrális tartománya 185 sáv, 400–2500 nm között. Célja az ásványkutatás, növényállapot-elemzés és a vízmegfigyelés.

A közeljövő műholdas hiperspektrális küldetesei

- HySIS (India) – Az Indiai Űrkutatási Szervezet (ISRO) által fejlesztett, 55 spektrális sávval rendelkező hiperspektrális műhold, amely 30 m felbontású képeket nyújt 400–950 nm között.
- SHALOM (Izrael–Olaszország) – Kétoldalú együttműködésben készülő műhold, célja a környezeti és mezőgazdasági alkalmazások támogatása.
- CHIME (ESA, 2026-ra várható) – Az Európai Űrgynökség Copernicus-programjának részeként fejlesztett hiperspektrális misszió, amely az élelmiszerbiztonság, földhasználat és környezeti állapot felmérését célozza.

Hiperspektrális adatfeldolgozás – kihívások és lehetőségek

A hiperspektrális adatok mennyisége és komplexitása miatt különösen fontos a megfelelő előfeldolgozás (radiometriai és geometriai korrekció, zajcsökkentés) és osztályozás (gépi tanulás, spektrális könyvtárak használata). Az új generációs algoritmusok, mint a konvolúciós neurális hálók (CNN) vagy a térspektrális feldolgozók lehetővé teszik az automatikus, megbízható objektumazonosítást.

A hiperspektrális távérzékelés a műholdas földmegfigyelés egyik legfejlettebb ága, amely a spektrális információ mélységét kihasználva rendkívül részletes és pontos elemzést tesz lehetővé. A technológia fejlődésével, az újabb hiperspektrális műholdak megjelenésével, valamint a feldolgozó algoritmusok javulásával ez a módszer várhatóan egyre szélesebb körű alkalmazást nyer a tudományos, gazdasági és társadalmi szférákban.

A műholdas távérzékelés napjainkra olyan kulcsfontosságú technológiává vált, amely nélkülözhetetlen az erdőgazdálkodásban, agráriumban, vízgazdálkodásban, várostervezésben és számos egyéb környezeti alkalmazásban. Az elmúlt évtizedek során számos nemzetközi és kereskedelmi műholdprogram indult el, amelyek különböző felbontással, szenzortechnológiával és célkitűzésekkel szolgálták a földi megfigyelések igényeit. Az alábbiakban öt kiemelkedő rendszer kerül bemutatásra.

3.2.4. Landsat műholdprogram (USA)

A Landsat program a világ leghosszabb ideje működő, polgári célú, multispektrális földmegfigyelési műholdrendszere, amelyet az Amerikai Egyesült Államok indított el 1972-ben. A program célja a Föld felszínének rendszeres, nagy felbontású és többspektrális sávban történő leképezése a földhasználat, a mezőgazdaság, az erdészet, a vízgazdálkodás, a városfejlődés és a környezetmonitoring céljából.

A Landsat műholdak optikai és közelinfravörös tartományban működő szenzorokkal figyelik a Földet, és a kapott adatok hosszú távú, globális és összehasonlítható információt nyújtanak a felszíni változások követéséhez. A rendszer adatai ma is kulcsfontosságú szerepet töltenek be a klímamodellezésben, a földhasználati előrejelzésekben, valamint a természeti katasztrófák utólagos értékelésében.

A Landsat 1–3 műholdak (1972–1983)

A Landsat program első generációs műholdjai (korábban ERTS – Earth Resources Technology Satellite néven) kísérleti jelleggel indultak, de gyorsan igazolták gyakorlati hasznukat. A három műhold pályája napszinkron, poláris, 917 km magasságú volt, 18 napos visszatérési ciklussal.

Főbb műszaki jellemzők:

A legfontosabb fedélzeti szenzor a Multispectral Scanner System (MSS) volt, amely 4 (később 5) sávban rögzített adatokat:

- MSS 1: 0,5–0,6 μm (zöld)
- MSS 2: 0,6–0,7 μm (vörös)
- MSS 3: 0,7–0,8 μm (közeli infravörös)
- MSS 4: 0,8–1,1 μm (közeli infravörös)
- MSS 5 (Landsat 3-tól): 10,4–12,6 μm (termális IR – csak kísérleti)

Térbeli felbontás: 79 m (pánkromatikus sáv nem volt); sáv szélesség kb. 185 km.

Működési időszak:

- *Landsat-1*: 1972–1978,
- *Landsat-2*: 1975–1982,
- ***Landsat-3*: 1978–1983.**

Ezek a műholdak megalapozták a földmegfigyelés kvantitatív módszertanát, különösen a mezőgazdasági hozambecslések, a felszíni víztestek és a növényborítottság detektálása terén.

A Landsat 4–5 műholdak (1982–2013)

A második generációs műholdak jelentős technikai előrelépést hoztak. Megjelent a Thematic Mapper (TM) nevű szenzor, amely már 7 sávban, nagyobb térbeli és spektrális felbontásban készített felvételeket.

TM-sávok:

- 0,45–0,52 μm (kék)
- 0,52–0,60 μm (zöld)
- 0,63–0,69 μm (vörös)
- 0,76–0,90 μm (közeli infravörös)
- 1,55–1,75 μm (közép-infravörös)
- 10,4–12,5 μm (termális IR)
- 2,08–2,35 μm (távoli infravörös)

Térbeli felbontás:

- Sávok 1–5 és 7: 30 m
- Termális sáv (6): kezdetben 120 m, később újraszámolva 30 m pixelméretre
- Lefedett sáv szélesség: 185 km
- Működési időszak:

Landsat-4: 1982–2001 (korai meghibásodás, adatátvitel megszakadása után tartalék üzemmód)

Landsat-5: 1984–2013 (!), a leghosszabb ideig működő földmegfigyelő műhold volt

A Landsat 5 rekordműholdként vonult be a történelembe. Az adatai különösen értékesek hosszú távú trendvizsgálatokhoz – például urbanizáció, elsivatagosodás, erdőirtás, tavak visszahúzódása stb.

A Landsat 6–7 műhold (1993–napjainkig)

Landsat-6: 1993-ban indították, de nem érte el a pályáját, mert az indítás során elveszett.

A fedélzeten egy Enhanced Thematic Mapper (ETM) lett volna, de így sosem került használatba.

Landsat-7: 1999. április 15-én indult, a fedélzeti fő szenzor az ETM+ volt, amely egy pánkromatikus sávval (0,52–0,90 μm) is bővült, 15 m-es térbeli felbontással.

ETM+ sávok:

- 1–5, 7: azonosak a TM sávokkal
- 6. sáv: termális IR, 60 m
- Pánkromatikus sáv: 15 m (0,52–0,90 μm)

2003-ban a Scan Line Corrector (SLC) meghibásodott, ami azóta sorokban hiányos képeket eredményez. A hibát szoftveresen részben korrigálni lehet, de a teljes képminőség már nem állt vissza.

Landsat-8 műhold (2013–napjainkig)

A Landsat-8 új korszakot nyitott a program történetében. A műhold 2013-ban indult, és két fő szenzort hordoz: az Operational Land Imager (OLI) és a Thermal Infrared Sensor (TIRS) nevű eszközöket.

OLI-sávok (9 multispektrális + 1 pánkromatikus):

- sáv (kék mély): 0,43–0,45 μm
- sáv (kék): 0,45–0,51 μm
- sáv (zöld): 0,53–0,59 μm
- sáv (vörös): 0,64–0,67 μm
- sáv (közele IR): 0,85–0,88 μm
- sáv (SWIR-1): 1,57–1,65 μm
- sáv (SWIR-2): 2,11–2,29 μm
- sáv (pánkromatikus): 0,50–0,68 μm (15 m)
- sáv (felhődetekció): 1,36–1,38 μm

TIRS-sávok: 10. sáv: 10,60–11,19 μm

sáv: 11,50–12,51 μm (Térbeli felbontás: 100 m; interpolált 30 m-re)

Működés:

Napszinkron pálya, 705 km magasan, 16 napos ismétlődési idő. A letapogatott földfelszín sáv szélessége: 185 km.

A Landsat-8 képei kiváló geometriájúak, atmoszférikusan jól korrigálhatóak, és számos új spektrális sáv lehetővé teszi például a felhőzeti maszkolást, vízminőség-vizsgálatokat, talajtípus-meghatározást.

Landsat 9 műhold

A Landsat 9 a NASA és az USGS közös földmegfigyelő műholdja, amelyet 2021. szeptember 27-én indítottak Föld körüli pályára, a több mint 50 éve tartó Landsat program legújabb tagjaként (35. ábra). Feladata a Föld felszínének hosszú távú, összehasonlítható és tudományosan hiteles megfigyelése, elsősorban a földhasználat, mezőgazdaság, erdőzet, vízgazdálkodás és éghajlatkutatás szolgálatában.

A Landsat 9 két fő érzékelővel van felszerelve:

- OLI-2 (Operational Land Imager-2): a látható, közeli infravörös és rövidhullámú infravörös tartományban dolgozik, 30 méteres térbeli felbontással,
- TIRS-2 (Thermal Infrared Sensor-2): két hőinfravörös sávot rögzít, 100 méteres térbeli felbontással.

A műhold 16 napos visszatérési idővel rendelkezik és a Landsat 8-cal együtt működik, így nyolcnaponta biztosít friss, globálisan összehasonlítható felvételeket. A felvételek 12 bites radiometriai felbontása lehetővé teszi a felszín finomabb változásainak érzékelését.

Röviden: a Landsat 9 fontos szereplő a globális földmegfigyelésben, kulcsfontosságú adatszolgáltató az erdészeti monitoring, talajnedvesség-változás, felszínborítási trendek vagy a klímaváltozás hosszú távú vizsgálatában.



35. ábra. A Landsat 9 műhold, forrás: NASA 2021

A Landsat-adatok szabadon hozzáférhetők, és kiváló alapot nyújtanak időbeli összehasonlításokra, mivel az archívum 50 évre visszamenőleg elérhető.

Napjainkban a Landsat 7 műhold ETM+ érzékelője, valamint a Landsat 8 és Landsat 9 OLI/TIRS érzékelői készítenek felvételeket. Ezekre a felvételekre a 30 m-es geometriai felbontás, a 9+2 spektrális sáv, a 12 bites radiometriai felbontás, valamint a 16 napos visszatérési idő jellemző. Monitoringhoz – mint pl. földhasználati, felszínborítási, éghajlatváltozási, mezőgazdasági, erdészeti, hidrológiai, ipari alkalmazások – használják.

A Landsat műholdprogram napjainkban is aktív, és kulcsszerepet tölt be a Föld hosszú távú megfigyelésében. Jelenleg három aktív műhold szolgáltat adatot: a Landsat 7 (1999–), a Landsat 8 (2013–) és a legújabb Landsat 9 (2021–), melyek különböző érzékelőrendszerekkel vannak felszerelve.

- A Landsat 7 műholdon található ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) érzékelő 30 méteres térbeli felbontást biztosít a multispektrális tartományban, egy 15 méteres pánkromatikus sávval kiegészítve. A termikus csatorna felbontása 60 méter.
- A Landsat 8 és 9 műholdak fő érzékelői az OLI (Operational Land Imager) és a TIRS (Thermal Infrared Sensor). Ezek az eszközök 9 multispektrális, valamint 2 termikus infravörös sávban gyűjtenek adatot.
- Spektrális felbontás: 11 sáv (9 OLI + 2 TIRS), amelyek lefedik az ultraibolyától (coastal/aeroszol sáv) egészen a termikus infravörösig terjedő tartományt.
- Geometriai felbontás: 30 méter a multispektrális sávokra, 15 méter pánkromatikus sávra (OLI), 100 méter a termikus sávokra (TIRS), utóbbiak újraszámolva 30 m-es rácsra kerülnek.

- Radiometriai felbontás: 12 bit, amely finomabb árnyalati különbségeket képes detektálni (az ETM+ esetében ez 8 bit volt).
- Revíziós idő: 16 nap (pályaisméltási ciklus), ami lehetővé teszi a rendszeres, szisztematikus adatgyűjtést globális szinten.

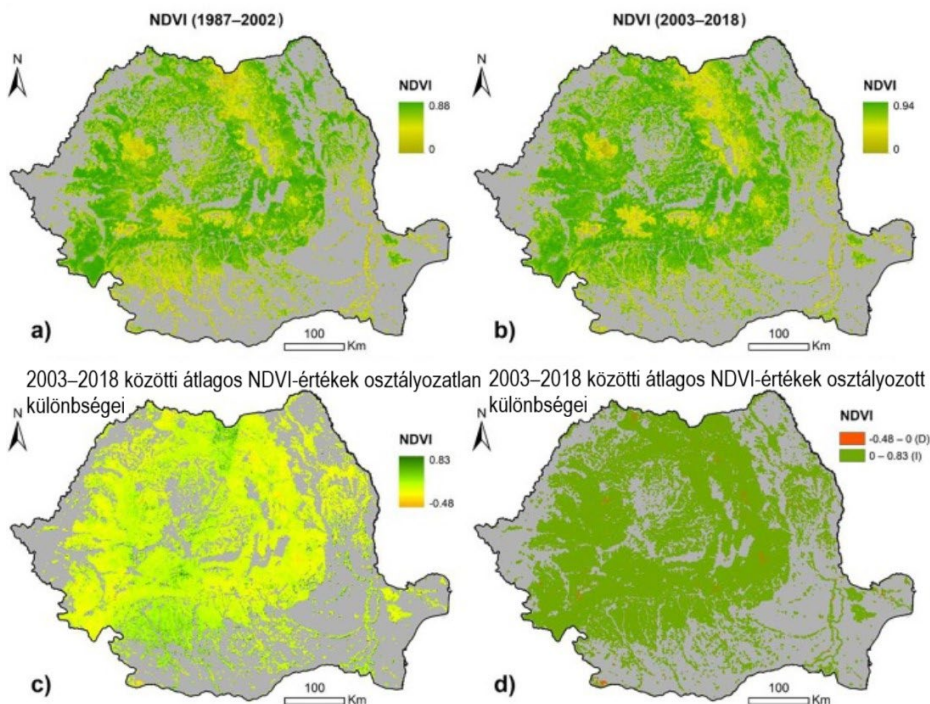
3.2.5. A Landsat műholdak erdészeti jelentősége és gyakorlati alkalmazása

Az erdészeti gyakorlatban a Landsat-rendszer egyfajta „időgép” a táj felett, amely több mint öt évtizede ugyanazzal a következetes felvételi geometriával és spektrális felbontással figyeli a Föld felszínét. Ez a következetesség teszi lehetővé, hogy egy erdőrésztlet történetét – záródását, letermelését, regenerációját, egészségi állapotát – akár 1972-ig visszamenően rekonstruálni lehessen. Az erdőszmérnöki oktatásban a Landsat adatai kiváló alapot adnak a távérzékeléshez kapcsolódó gyakorlati feladatokhoz, hiszen elegendő felbontást biztosítanak nagy kiterjedésű tájak vizsgálatához, mégis ingyenesen hozzáférhetők, így a hallgatók is szabadon kísérletezhetnek velük.

A mindennapi erdészeti gyakorlat számos pontján használják ezeket az adatokat. A felszínborítás-változás elemzése például az erdőgazdálkodási tervezés egyik kulcsfeladata. A Landsat multispektrális felvételei világosan kirajzolják, hogyan terjed egy telepített lucfenyves, milyen irányban húzódik vissza egy akácos, vagy milyen ütemben zajlik egy tarvágás utáni felújítás. Mivel a műhold minden területet 16 naponta újra felmér, a képsorozatból nemcsak az állapotot, hanem annak alakulását is pontosan ki lehet olvasni. Az erdőirtás vagy illegális fakitermelés észlelése szintén gyakran Landsat-adatokra épül, főleg olyan országokban, ahol az erdészeti hatóság nagy kiterjedésű területeket felügyel.

Az erdők egészségi állapota

Az erdők egészségi állapotának felmérése különösen fontos napjainkban, amikor a klímaváltozás következtében gombafertőzések, rovargradációk, szárazságstressz vagy éppen szélöntések fenyegetik az állományokat. A Landsat termikus és közeli infravörös sávjai segítségével egy-egy erdőrésztlet „stresszjele” korán kimutatható. Erdészeti gyakorlatokon gyakran alkalmazzák az NDVI- (36. ábra), EVI- vagy akár a NBR-mutatókat annak megértésére, hogy a lombkorona hogyan reagál egy hideg, száraz vagy éppen extrém csapadékos évre. A szűkárós erdők – különösen a lucosok – állapotromlása sokszor hetekkel korábban felismerhető a spektrális jellegzőröbélből, mint ahogy a terepi szemlén láthatóvá válna.



36. ábra. A nyári időszakra vonatkozó átlagos NDVI-értékek Romániában az 1987–2002 (a) és a 2003–2018 (b) időszakban, valamint a két időszak közötti átlagos NDVI-értékek osztályozatlan (c) és osztályozott (d) különbségei, forrás: Prăvălie 2022

Szűkárók beazonosítása

A szűkáros lucfenyvesek állapotváltozását a műholdas távérzékelés – különösen a Landsat multispektrális felvételei – sok esetben jóval korábban képesek kimutatni, mint ahogy a terepi bejárás során bármilyen egyértelmű vizuális jel megjelenne. Ennek oka, hogy a fák fiziológiai stresszválasza már a fertőzést követő korai szakaszban módosítja a lombkorona spektrális tulajdonságait, még akkor is, amikor a tűlevelek színe, tömege vagy szerkezete külső szemmel még nem mutat jelentős eltérést.

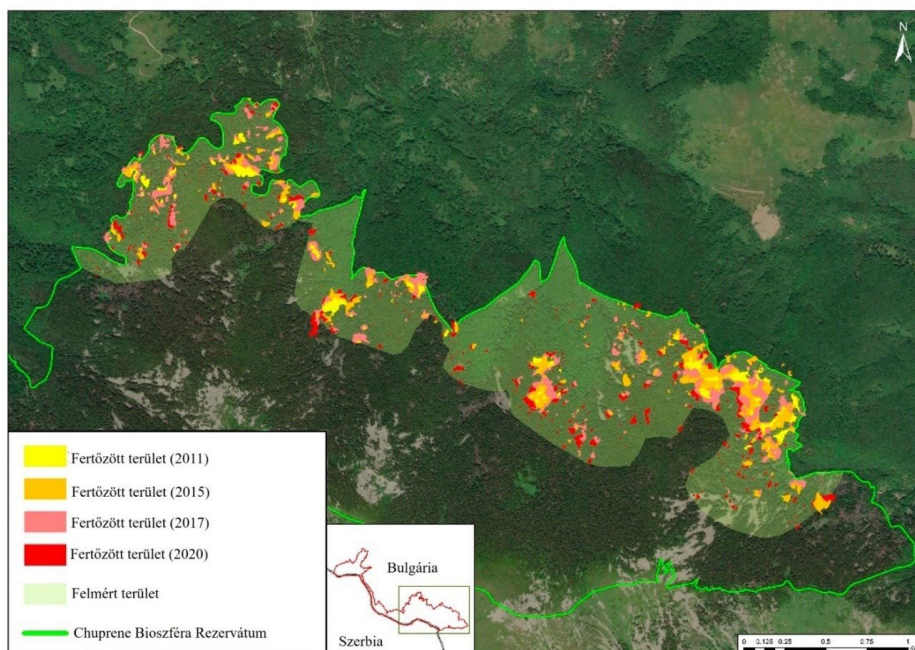
A frissen megtámadott lucfenyő a víz- és tápanyagforgalom zavara miatt először a közeli infravörös tartományban (NIR) veszít a jellegzetes magas reflexitásiából, mivel romlik a sejtek vízellátottsága és szerkezeti integritása. Ezzel párhuzamosan a vörös tartományban (RED) enyhén nőhet a visszaverődés, ami az asszimilációs aktivitás csökkenésére utal. Ezek a finom spektrális eltolódások az NDVI- és más vegetációs indexek (pl. EVI, NDMI, MSI) értékeiben már hetek-

kel azelőtt csökkenést okoznak, hogy a tűk sárgulása, vörösödése, majd barnulása megfigyelhető lenne.

A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy egy erdész vagy természetvédelmi szakember már 3-6 héttel korábban értesülhet a fertőzés megjelenéséről, és jóval gyorsabban reagálhat – például felmérő terepbejárást szervezhet, csapdázást erősíthet, vagy kijelölheti a potenciálisan érintett erdőrészeket (37. ábra).

A spektrális jelek alapján történő korai felismerést erősen támogatja az is, hogy a lucfenyvesek viszonylag homogén állománystruktúrája és erős szezonális stabilitása miatt az egészséges állomány „spektrális jelleggörbéje” könnyen elkülönül a stresszre utaló mintázatoktól. Így a legegyszerűbb NDVI-idősorok is érzékenyek a változásra, de a korszerűbb nedvességtartalom-érzékeny indexek (NDMI) vagy a közeli és középínfravörös sávok kombinációi még pontosabb előrejelzést adnak.

Összességében a spektrális jelleggörbe megváltozása a szűkárós lucosokban olyan korai diagnosztikai információt nyújt, amely a terepi megfigyelést hetek-hónapok előnyével egészíti ki, és a modern erdővédelmi stratégia egyik alapját jelenti.



37. ábra. *Ips typographus* fertőzési foltok a Chuprene Rezervátum északkeleti részén, forrás: Georgiev 2022

Erdőtűz-monitoring

Az erdőtűz-monitoring a műholdas erdészeti alkalmazások egyik legfontosabb és leglátványosabb területe, ahol a Landsat-adatok több évtizedes időbeli folytonossága és multispektrális felbontása különösen értékes. Mivel az erdőtűz hatása egyszerre jelenik meg a növényzet szerkezetében, nedvességtartalmában és reflektancia-viselkedésében, a Landsat-szenzorok – különösen az infravörös tartományt rögzítő csatornák – érzékenyen és megbízhatóan mérik a pusztítás mértékét.

A Normalized Burn Ratio (NBR) és annak különbségi változata (dNBR) ma már a világ erdészeti és tűzvédelmi szervezeteinek standard eszköze. A módszer lényege, hogy a közeli infravörös (NIR) és a rövidhullámú infravörös (SWIR) csatornák eltérő viselkedését használja ki: a friss égés nyomán a vegetáció struktúrája összeomlik, a NIR-reflektancia drasztikusan csökken, miközben a SWIR-reflektancia az elszenesedett, kiszáradt felületek miatt jelentősen nő. Ez a kontraszt teszi lehetővé, hogy már a tűz utáni első felhőmentes felvételen kirajzolódjon a leégett terület pontos kontúrja, sokszor jobban, mint amit terepi bejárással egyetlen nap alatt be lehetne járni.

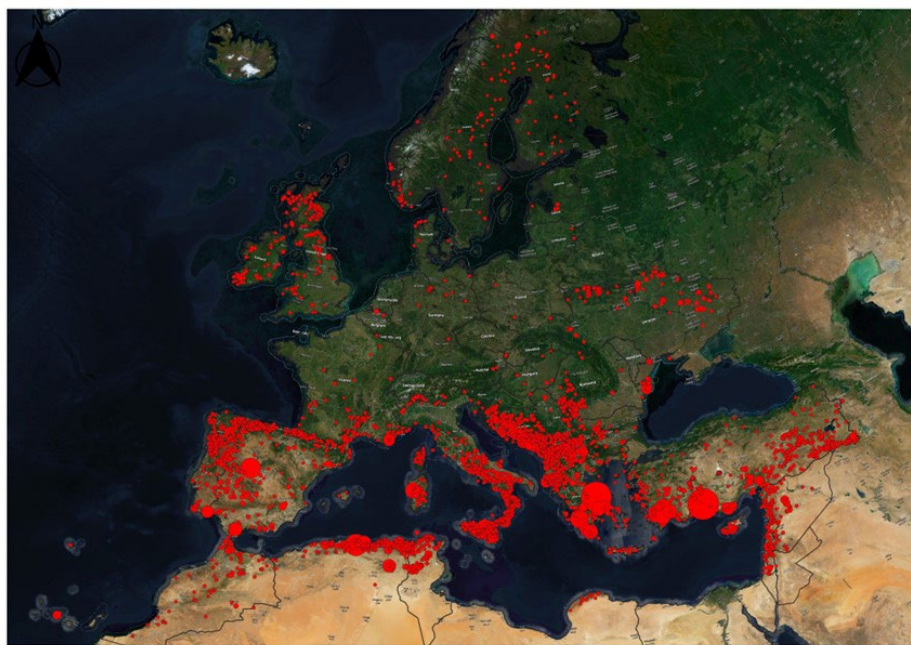
Az erdészmérnök-hallgatók számára a Landsat-alapú erdőtűzelemzés több okból is ideális tananyag és gyakorlati feladat. Egyik legfontosabb előnye, hogy idősorokkal lehet dolgozni, vagyis több évtizedre visszamenőleg meg lehet vizsgálni, hogyan változott egy adott tájegység tűzdinamikája: gyakoribbá váltak-e a felszíni tüzek, megjelentek-e nagy kiterjedésű koronatüzek, vagy hogyan függ mindez a klímaszélsőségek erősödésétől.

A regeneráció követése ugyancsak kulcsterület. A tűz által érintett ültetvényekben vagy természetes erdőkben a vegetáció újjáéledése – a sarjak megjelenése, a lágyszárú pionír növényzet térhódítása, majd a fiatal fák megjelenése – mind külön fázisokként rajzolódhatnak ki a Landsat-felvételeken. A hallgatók gyakorlati feladatai között rendszeresen szerepel, hogy évről évre végigkövessék egy adott égéstérség NBR-értékeinek változását, és a grafikonok és térképek alapján megállapítsák: hol indult meg gyorsabban a regeneráció, hol van szükség beavatkozásra (például erózióvédelemre vagy erdőfelújításra), és hol marad el a természetes megújulás.

A modern tűzkezelésben ugyanakkor nem csak a károk felmérése fontos. A Landsat infravörös csatornáinak segítségével egyre több helyen végeznek tűzveszély-előrejelzést is. A vízstressz, a záródás csökkenése vagy az elszáradt aljnövényzet aránya egyaránt olyan spektrális jellegzetességeket mutat, amelyekből következtetni lehet a tűzveszély alakulására. Erdészeti üzemtervezési gyakorlatokon a hallgatók megtanulják, hogyan lehet NDMI-, MSI- vagy más víztartalomra érzékeny indexekkel megbecsülni az állomány kiszáradásának szintjét, ami a klímaváltozás miatt egyre fontosabb feladat.

A tűzesetek utólagos dokumentálása a hatósági és szakmai munkában is kulcsfontosságú. A Landsat-rendszeres 16 napos visszatérése miatt nagy az esély arra, hogy rövid időn belül elérhető legyen egy tiszta, felhőmentes kép, amely alapján az égéstér hivatalos térképe elkészíthető (38. ábra). Ez a kárbecsléstől kezdve a biztosítók felé történő jelentéseken át az erdőgazdálkodási döntésekig minden lépésben kritikus szerepet játszik.

Összességében a Landsat-adatsorok egyedülállóan részletes és hosszú távú képet adnak az erdőtüzek természetéről, közvetlen hatásairól és az erdők regenerációjáról. Az erdészmérnöki képzésben a hallgatók megtanulják, hogyan lehet ezeket az információkat integrálni az üzemtervezésbe, a természetvédelmi döntésekbe és a kockázatkezelési folyamatokba – így a Landsat nem pusztán kutatási eszköz, hanem a modern, tudásalapú erdőgazdálkodás egyik alappillére.



38. ábra. Európai erdőtüzesetek műholdas térképe, forrás: JRC 2022

Hidrológiai jelenségek műholdas megfigyelése

A Landsat SWIR (Short-Wave Infrared) sávjai különösen érzékenyen reagálnak a talajnedvességre, a vízfilm vastagságára, illetve a vegetáció víztartalmára. Mivel a vizes felszínnek erősen elnyelik a SWIR-sugárzást, az akár csak átmeneti, néhány napig fennálló vízborítások is tisztán elkülöníthetők a száraz, de sötét

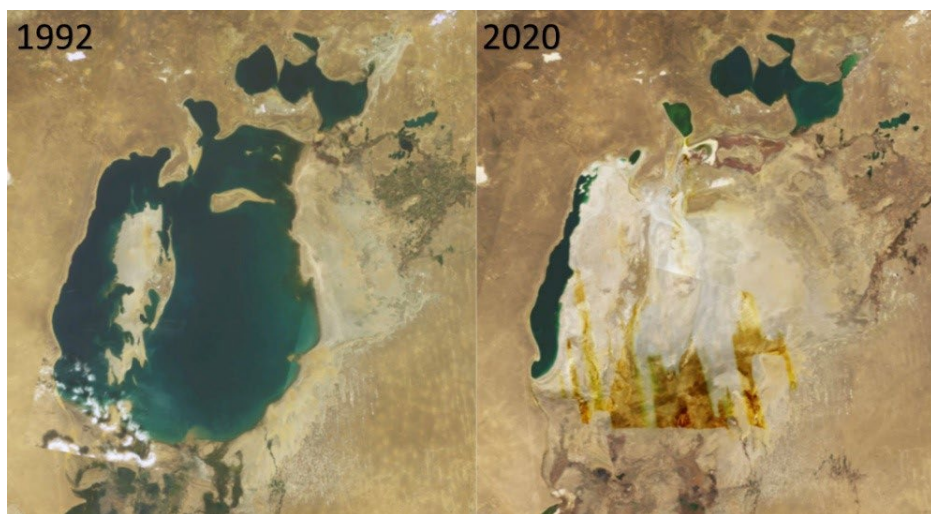
aljzatoktól (39. ábra). Ez az érzékenység felbecsülhetetlen értékű a lápos területek, zsombékosok, tőzeges élőhelyek vagy kiszáradó forráslápok lehatárolásában. A terepen ezeknek a határai gyakran bizonytalanok, árnyalatosak, évszakosan változók, és többhektárnyi vizsgálat akár egész napos gyalogos felmérést igényelne. Landsat-idősorokkal azonban néhány kattintással láthatóvá válik, mikor volt a legnagyobb a vízborítás, hogyan változott a talajnedvesség a szezonok során, vagy hol jelentek meg új, potenciálisan védendő élőhelyfoltok.

A TIR (Thermal Infrared) sávok ehhez további dimenziót adnak. A felszíni hőmérséklet térbeli eloszlása sokat elárul a víz jelenlétéről, a talaj hőkapacitásáról és a vegetáció stresszállapotáról. Az erdőszegélyek vízháztartása például különösen érzékeny a peremhatásokra – ott, ahol a napsugárzás, a szél és a talajnedvesség viszonyai élesen eltérnek a zárt állomány belsejétől. A Landsat TIR-csatornái lehetővé teszik, hogy ezeket a mikroklimatikus különbségeket térképre vigyük, így pontosabban modellezhetővé válik, hogyan hat a klímaváltozás a szegélypusztulásra, milyen fajok alkalmasak a szárazodó állományok megújítására, illetve mely erdőrészeket igényelnek vízviszatarító intézkedéseket.

Az időszakos vízborítások nyomon követése külön jelentőséggel bír az ártéri erdők, ligeterdők, erdőszyeppe zónák vagy nagyobb víztározók környékének erdészeti tervezésében. A Landsat-idősorok alapján jól elkülöníthető, mely területek kerülnek évről évre víz alá, milyen időtartamra és hogyan reagál mindegyik a vegetáció. Ezt a tudást az erdészethallgatók gyakran alkalmazzák fajmegválasztási gyakorlatokban: például annak meghatározásában, hogy hová érdemes kocsányos tölgyet, hová mézgás éger vagy hová fűzfajokat telepíteni, illetve hol kell számolni a csemeték rendszeres vízstresszével vagy éppen túllöntözöttség miatti pusztulásával.

A természetvédelmi kezelésekből a vízmozgások monitorozása döntő jelentőségű a védett élőhelyek állapotának értékelésében. A fokozottan érzékeny lápi és mocsári növénytársulások – például tőzegmohalápok, kékperjés rétek vagy égerlápok – fennmaradása sokszor néhány centiméternyi talajvízszint-ingadozáson múlik. A Landsat SWIR–TIR kombinációval feltérképezhetők az évente változó nedvességmintázatok, így felismerhetők azok a területek, ahol a vízháztartás lassan, de biztosan kedvezőtlen irányba tolódik el. Ez segíti a kezelőket abban, hogy időben beavatkozzanak – például mederkarbantartással, vízviszatarító gátak kialakításával vagy az invazív, vízigényes fajok visszaszorításával.

Végül soron a Landsat hidrológiai információi olyan térbeli és időbeli kontextust adnak az erdészeti döntésekhez, amelyet terepi módszerekkel még nagy ráfordítással sem lehetne ilyen rendszerességgel reprodukálni. A modern erdész-mérnöki gondolkodás egyre inkább épít ezekre az adatokra, hiszen a víz – látható vagy rejtett formájában – az erdei ökoszisztémák működésének egyik legfontosabb mozgatórugója, és a Landsat éppen ezt az „észrevétlen” dinamikát képes nagy pontossággal feltárni.



39. ábra. Az Aral-tó területi változása 1992 és 2020 között, forrás: USGS 2023

A szénmegkötés és biomasszabecslés témaköre ma már nemcsak tudományos kérdés, hanem az erdőgazdálkodási tervezés egyik alapja. Amikor a hallgatók először találkoznak a Landsat-adatokkal mint biomasszabecslési eszközzel, többnyire meglepődnek azon, hogy egy 30 méteres felbontású műholdfelvétel mennyire érzékenyen tükrözi vissza az erdőállomány szerkezetét. A spektrális sávok – különösen a vörös, a közeli infravörös és a két SWIR-sáv – bizonyos kombinációkban már önmagukban is jelzik, hogy mennyi élő növényi anyag található a felszín felett. A dúsabb, egészségesebb, nagyobb lombtömeggel rendelkező állományok erőteljesebben verik vissza a közeli infravörös sugárzást, míg a stresszelt, ritkásabb vagy fiatal állományok spektrális jelleggörbéje ennek az ellenkezőjét mutatja.

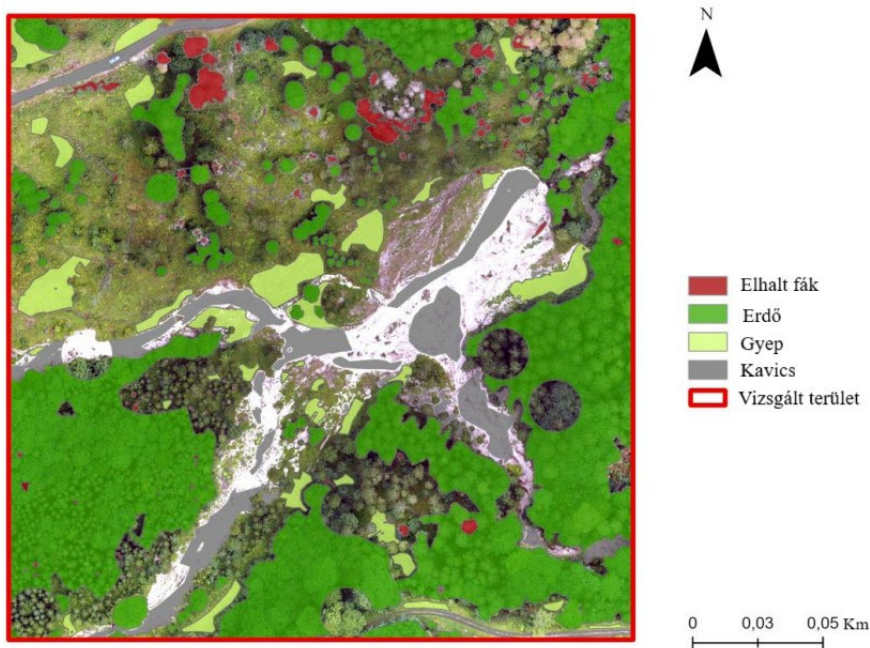
Egy erdészhallgató számára a legizgalmasabb pont az, amikor ezeket a távérzékelte jelzéseket először próbálja összekötni a terepen mért valós adatokkal. Egy-egy féléves projekt során gyakran mérnek mellmagassági átmérőt, famagasságot, állománysűrűséget, majd ezekből biomasszát számolnak különféle allometrikus egyenletek segítségével. Amikor aztán ezekhez a mintapontokhoz Landsat-pixelet kapcsolnak, világossá válik, hogyan lehet regressziós modellekben feltárni az összefüggést a spektrális reflektanciák és a tényleges fatömeg között. Egy jól sikerült modell már képes megmutatni az erdőrészletben a biomassza térbeli eloszlását, akár több évre visszamenőleg is, a Landsat-archívumnak köszönhetően.

Ez az idősoros elemzés teszi a Landsat-adatokat igazán értékkessé az erdőgazdálkodásban. Egy lucos vagy bükkös állomány növekedési üteme például évről évre kimutatható a spektrális jel erősödéséből, különösen ott, ahol nincs nagy záródásváltozás, és a lombkorona fokozatos tömegfelhalmozása dominál. A fia-

talosok fejlődése, a véghasználat utáni felújulás dinamikája, vagy akár egy tarvágott terület szénkészletének lassú visszaépülése mind követhető olyan helyeken is, ahol ritkán járnak terepre.

A klímaváltozás hatásait vizsgáló hallgatók szintén sokat profitálnak ezekből az adatokból. A száraz évek és a nagy hőségű időszakok biomassza-növekedésre gyakorolt hatása gyakran tisztán kirajzolódik az NDVI, az EVI vagy a NBR idősoraiiban. Egy állomány, amelyben például két egymást követő aszályos nyár után érezhetően csökken a vegetációs index, nagy valószínűséggel alacsonyabb éves szénmegkötést produkált, amit a terepi mérések is vissza szoktak igazolni.

A szénkészlet-modellezésben a Landsat-adatok különösen akkor nyújtanak előnyt, amikor kistájak vagy nagyobb hegyvidéki területek erdőállományait kell egyszerre értékelni. Egy-egy erdőgazdaság számára az így készített térképek megmutatják, hogy mely állományrészek a legnagyobb szénraktárak, hol figyelhető meg lassuló növekedési ütem, vagy éppen mely területek reagálnak érzékenyen az extrém időjárásra. Az ilyen eredmények ma már a fenntarthatósági jelentések és a karbonkredites projektek előkészítésében is meghatározó szerepet játszanak (40. ábra).

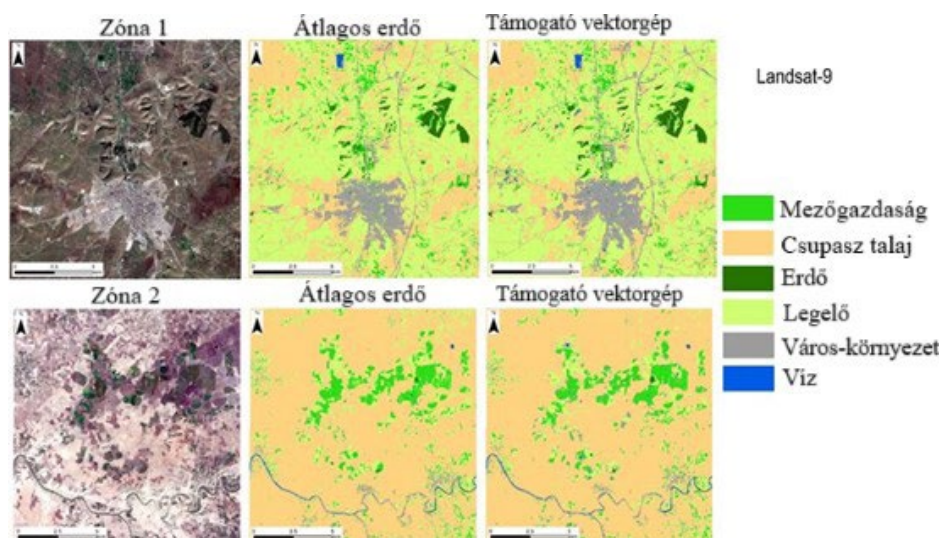


40. ábra. Szénlekötés becslése távérzékelési megközelítéssel, forrás: Leditznig 2024

A Landsat tehát abban segíti az erdészhallgatókat és a szakmát, hogy a biomassza és a szén körforgása ne elvont fogalomként jelenjen meg, hanem térben

és időben vizsgálható, számszerűsíthető jellemzőként. A terepi munka és a távérzékelés együtt olyan pontosságot ad, amely nélkül ma már elképzelhetetlen a stratégiai szintű erdőtervezés.

Ezek a példák mind azt mutatják, hogy a Landsat nem csupán egy adatforrás a sok közül, hanem az erdészeti távérzékelés gerince: egy olyan, stabilan működő, folyamatosan frissülő információforrás, amely lehetővé teszi, hogy az erdőmérnök ne csak az erdő mai állapotát lássa, hanem annak múltját és jövőbeli alakulását is megértse. (41. ábra).

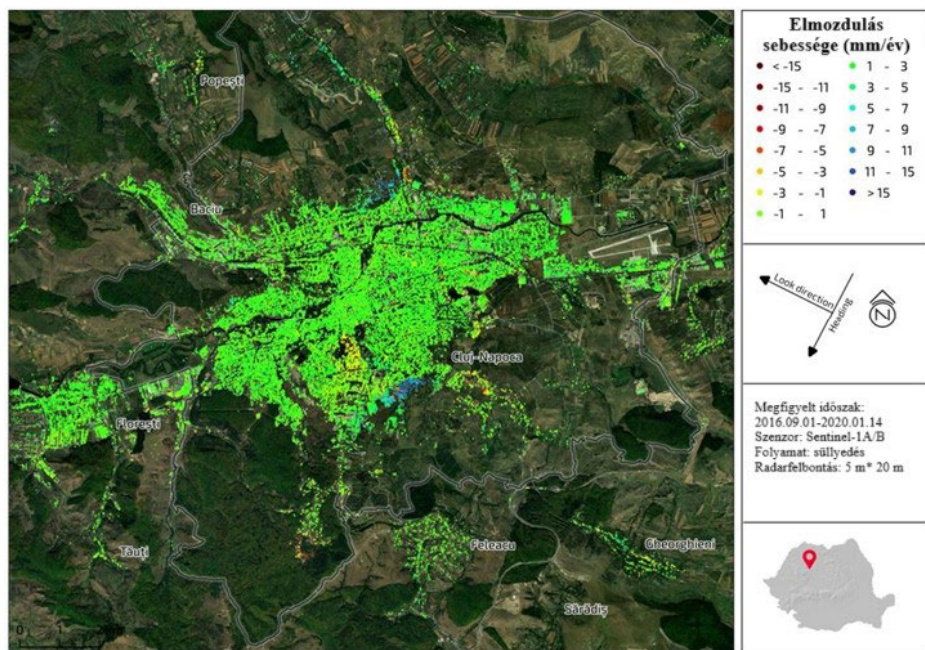


41. ábra. Felszínhasználati Landsat 9-es műholdfelvétel,
forrás: saját szerkesztés

3.2.6. Sentinel műholdcsalád (Európai Űrügynökség – ESA)

Az ESA Copernicus programjának részeként indított Sentinel műholdrendszer az egyik legnagyobb volumenű földmegfigyelési kezdeményezés. Több különböző típusú műholdból áll, amelyek eltérő érzékelőkkel működnek:

- Sentinel-1: radar (SAR), éjjel-nappali és felhőfüggetlen megfigyelés (42. ábra)
- Sentinel-2: multispektrális optikai szenzorokkal (13 sáv)
- Sentinel-3: óceán- és légkörmonitorozás, termális szenzorokkal
- Térbeli felbontás (Sentinel-2): 10–60 m sávfüggően
- Revisit idő: 5 nap (két Sentinel-2 műholddal)
- Fő alkalmazási területek: mezőgazdaság, erdőállapot-felmérés, természetvédelem, városi hőterképezés, felszínborítás-változás



42. ábra. Sentinel műholddal megfigyelt felszíni süllyedés Kolozsvár környékén, forrás: Descopera 2020

A CORINE Land Cover (CLC és CLC+) szerepe az európai erdészeti térinformatikában

A Sentinel program adatai szintén nyilvánosan és ingyenesen elérhetők, ami jelentősen növeli tudományos és operatív alkalmazásuk lehetőségét.

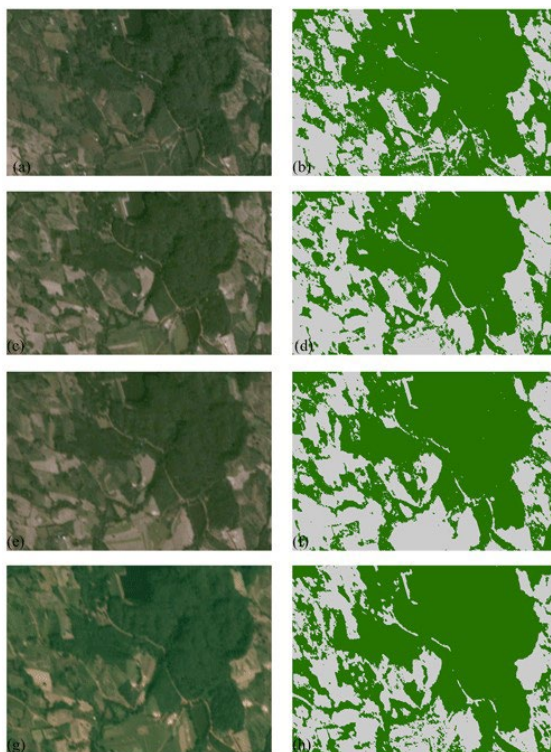
Az európai erdőgazdálkodás a 21. században egy olyan korszakba lépett, ahol a terepi tapasztalat és a modern távérzékelési rendszerek többé nem elkülönülnek egymástól, hanem szoros kölcsönhatásban működnek. A Copernicus program Sentinel műholdjai és a hozzá kapcsolódó adatbázisok napjainkra az erdészeti tervezés alapvető adatsoraivá váltak. Európában a legmeghatározóbb a CORINE Land Cover (CLC) rendszer, amelyet az Európai Környezetvédelmi Ügynökség már az 1990-es évektől működtet, és amely azóta Európa egyik leghosszabb idősort biztosító felszínborítási adatbázisává nőtte ki magát.

A CLC jelentősége nem pusztán abban rejlik, hogy térképez, hanem abban, hogy a felszínborítás-változásokat is egységes módszertan szerint rögzíti több évtizedes távlatban. Az erdészeti szakma számára ez azért különösen értékes, mert az erdőkben lezajló folyamatok – legyen szó regenerációról, degradációról, állomány-cseréről vagy zöldfolyosók átrendeződéséről – évtizedes léptékben értelmezhetők

igazán. A CLC folyamatos frissítése ugyanakkor lehetővé teszi, hogy a hosszú távú trendek mellett a közelmúlt változásait is átlátható keretbe rendezzük.

A legújabb, CLC+ (2023) verzió egyfajta minőségi ugrást jelent a korábbi adatbázisokhoz képest. A Sentinel-2 műhold nagy felbontású multispektrális adataira épülő, 10–20 méter térbeli felbontású, gépi tanulási algoritmusokkal támogatott felszínborítás-térképezés már egészen más részletességet biztosít, mint a korábbi 100 méteres CLC-rétegek. Miközben az eredeti CLC ma is nélkülözhetetlen a nagy léptékű, hosszú idősoros elemzésekhez, a CLC+ már sokkal finomabb térbeli mintázatokot is megmutat: erdőfoltok szétaprózódását, erdőszegélyek változását, új telepítések térnyerését, üres vágásterületek regenerációját (43. ábra).

A CLC+ nem egyszerű térképi termék, hanem gazdag attribútumadattal rendelkező adatbázis, amely az egyes kategóriákhoz ökológiai, tájhasználati és szerkezetinformációkat is rendel. Ez különösen akkor értékelhető, amikor a hallgató vagy az erdész szakember nem pusztán tudni szeretné, hogy „hol van erdő”, hanem hogy milyen típusú erdő, milyen környezetben, és hogyan illeszkedik a térségi táj- és ökológiai hálózatba.



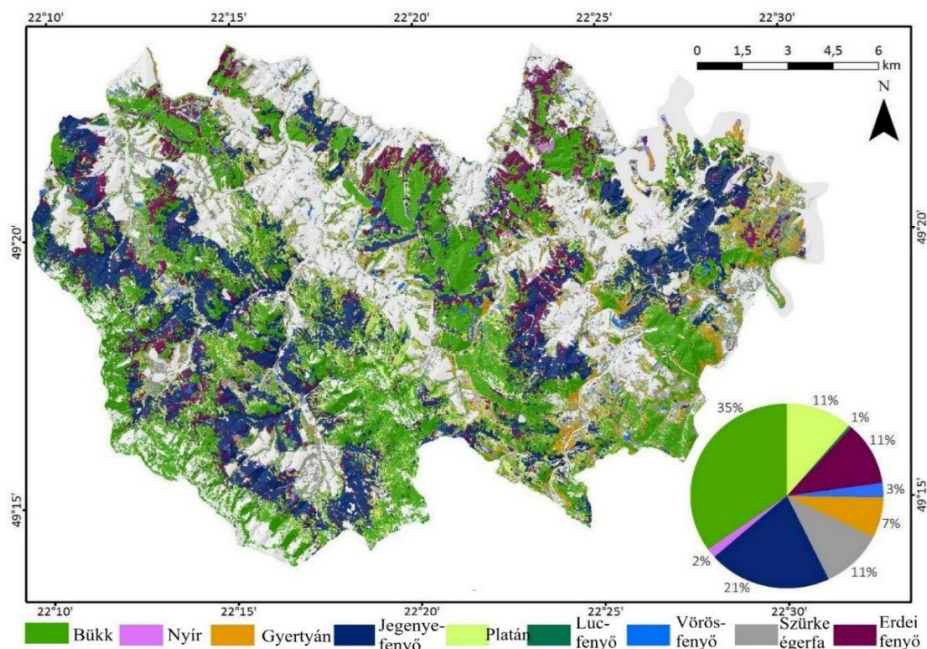
43. ábra. Erdős területek idősoros összehasonlító elemzése műholdfelvételek alapján, 2016–2021 között, forrás: Yang et al. 2023

Erdőtípusok térbeli lehatárolása

Az erdőtípusok elkülönítése a gyakorlatban első ránézésre egyszerű feladatnak tűnik, de a terepen járva hamar kiderül, hogy a tájban váltakozó állományok, elegyarányok, lombkoronaszintek és korosztályok sokszor fokozatos átmeneteket képeznek. Egy táblázatos erdőrészletadat nem mindig tükrözi ezt a finomságot (44. ábra).

A CLC+ rendszer viszont a Sentinel-2 spektrális információi alapján képes különbséget tenni például:

- tűlevelű,
- lombos,
- vegyes,
- alacsony záródású
- vagy fiatal regenerálódó erdők között.



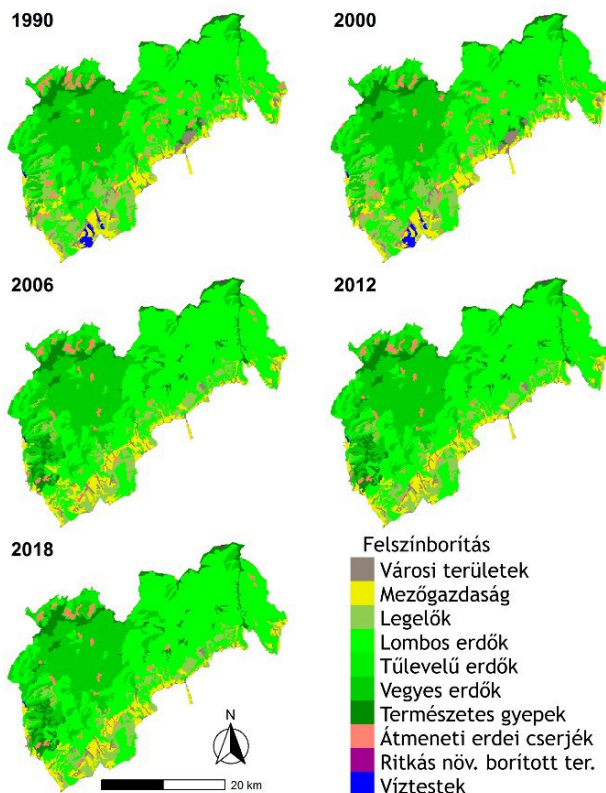
44. ábra. Fafajok megkülönböztetésére alkalmas Sentinel 2A műholdfelvételek, forrás: Grabska 2019

A Sentinel 2A műholdfelvételei, a 10–20 méteres felbontással már azt is lehetővé teszi, hogy megfigyeljük, hol húzódnak valóban az állománytípusok határai, hol jelennek meg elegyfoltok, vagy hogyan változik a lombkorona-struktúra a domborzat függvényében.

Az erdészmérnök-hallgatók terepgyakorlati feladatai között éppen ezért gyakran szerepel, hogy a CLC+ alapján előre meghatározzanak állománytípusokat, majd ezeket terepi mintavétellel ellenőrizték. A tapasztalat rendszerint visszaigazolja, hogy a CLC+ pontosabban követi a valós vegetációs mintázatokat, mint a korábbi CLC-kiadások. A hallgatók így megtanulják, hogyan lehet a távérzékelési adatokat összekapcsolni a helyszíni felméréssel, hogyan kell a spektrális jellemzőket értelmezni, és milyen korlátokat kell figyelembe venni (például árnyékh hatás, felhőmaradványok, fenológiai eltérések).

Erdőterület-változás detektálása: kitermelés és újratelepítés

Európa erdői folyamatosan változnak, és ezek a változások az erdészeti tervezés rutinfeladataihoz tartoznak. A CLC és a CLC+ különösen hatékony a nagyobb kiterjedésű változások felismerésében (45. ábra).



45. ábra. Felszínborítás változása 1990–2018 között a Déli-Kárpátokban, forrás: saját szerkesztés

A kitermelt területek például már néhány hónapon belül felismerhetők a Sentinel-2 képeken a drasztikusan lecsökkent NIR-visszaverődés és a megnövekedett látható tartományú reflektancia miatt. A CLC+ osztályozási rendszere ezeket a változásokat a következő frissítéskor már külön kategóriaként jeleníti meg (pl. „vágásterület”, „fiatal telepítés”, „alacsony záródású erdő”).

Ez azért fontos, mert így a hallgató megtapasztalja: a vágás nemcsak „együtt jár” a terepi munkával, hanem térinformatikai értelemben is könnyen detektálható jelenség.

A felújítás és regeneráció pedig évről évre követhető ugyanazon a helyen. A CLC+ által biztosított részletesség lehetővé teszi, hogy:

- megkülönböztessük a csemetés korai fázisát a gyepalj növényzettől,
- elkülönítsük a rákövetkező 5–10 évben létrejövő fiatalos állományt,
- felismerjük a természetes felújulással képződő mozaikos szerkezeteket.

Így az erdőgazdaságok hosszú távú monitoringjában a CLC+ olyan alaprétgkévé válik, amelyhez a tervezők és az üzemtervezők évről évre visszatérhetnek, különösen nagyobb területű vágások esetében.

Fragmentáció, összefüggőség és zöldfolyosók vizsgálata

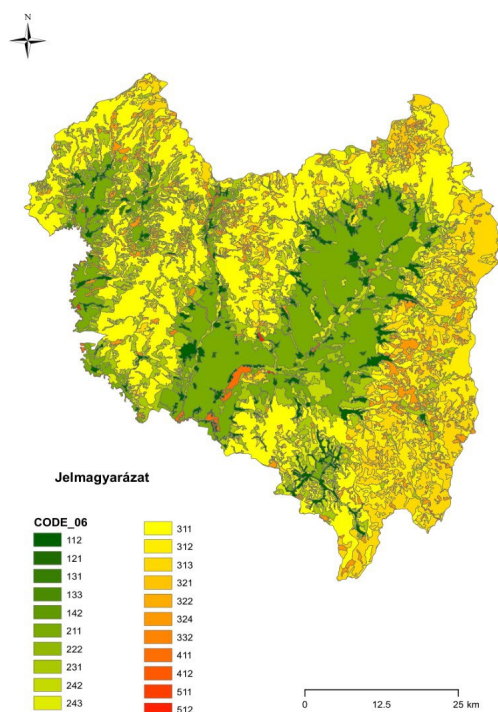
A modern természetvédelem egyik kulcskérdése az élőhelyek összekapcsoltsága. A fragmentáció – vagyis az élőhelyek feldarabolódása – sok erdőtípus esetében közvetlenül befolyásolja az ott élő fajok fennmaradását.

A CLC+ segítségével lényegesen részletesebb térképek készíthetők a táji összefüggések vizsgálatához. Míg régebben csak nagyobb erdőtömböket láttunk, ma már:

- keskeny fasávok,
- árokparti növényzatsávok,
- erdőszegélyek,
- kapcsolódó mezsgyék,
- völgyek mentén húzódó természetes folyosók

is felismerhetők és vizsgálhatók.

Egy erdőökológiai gyakorlaton például a hallgatók gyakran készítenek konnektivitási elemzést, ahol a CLC+ adatbázis alapján faunafajok lehetséges mozgási útvonalait térképezik fel. A módszer jól mutatja, hogy a táj apró elemei – egy 20 méter széles fasáv vagy egy kiszélesedő erdőszegély – milyen fontos szerepet játszanak a genetikai sokféleség megőrzésében (46. ábra).



46. ábra. Kovászna megye CLC felszínborítási térképe, forrás: saját szerkesztés

Tájléptékű élőhely-modellezés és természetvédelem

A CLC+ részletes kategóriarendszere lehetővé teszi, hogy nagyobb kiterjedésű területekre készítsünk élőhelymodelleket. Az ilyen modellezés a természetvédelmi kezelések egyik alapvető eszköze, különösen ott, ahol több mintatípus egymással kölcsönhatásban alakítja a tájat.

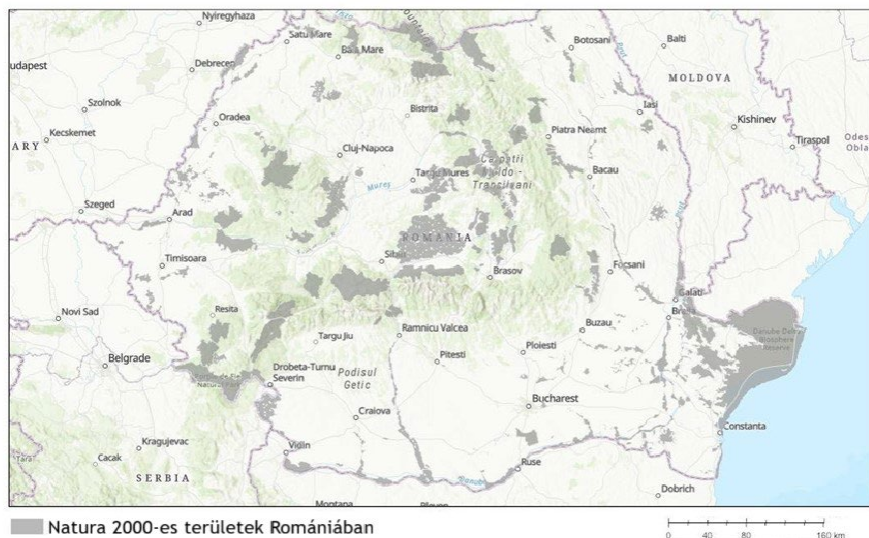
Romániában is gyakori feladat, hogy Natura 2000 területek, kiterjedt hegyvidéki erdőtömbök vagy vadon élő nagytestű emlősök (például medve, hiúz) élőhelyeit kell vizsgálni (47. ábra). A CLC+ itt több szempontból is meghatározó:

- térbeli tisztasága miatt jól követhetők a hegylábi vegyes erdők, az üde völgytalpi állományok vagy a sziklaerdők elhelyezkedése;
- attribútumrendszere támogatja az élőhelyi preferenciák pontosítását;
- gépi tanulási alapú kategóriahatárai sokkal közelebb állnak a valós vegetációs mintázathoz, mint a régebbi CLC-osztályozások.

A hallgatók számára ez különösen akkor válik szemléletessé, amikor egy nagyobb tájegységben a vadállomány vonulási útvonalait, potenciális pihenőhelyeit vagy szaporodási zónáit kell modellezni. A CLC+ adatait ilyen esetben gyakran kombinálják:

- domborzati modellekkel,
- talajtani térképekkel,
- klimatikus adatbázisokkal
- vagy éppen Sentinel-1 radaradatokkal.

A különböző adatforrások szinergiáját a CLC+ teszi lehetővé, stabil alaprétgként biztosítva a felszínborítás térbeli szerkezetét.



47. ábra. Natura 2000-es területek földrajzi elhelyezkedése Romániában, forrás: saját szerkesztés

Éghajlati hatásvizsgálatok támogatása

Az erdők válasza a klímaváltozásra – különösen Közép- és Kelet-Európában – egyre inkább az erdészeti kutatások középpontjába kerül. A szárazodási folyamatok, a szélsőséges hőhullámok és a tartós vízhiány egyre több állományban okoznak lombvesztést, pusztulást vagy lassuló növekedést.

A CLC+ ilyen vizsgálatokban főként két módon válik hasznossá:

1. történeti kontextust ad: lehetővé teszi annak megértését, hogyan alakult a táj felszínborítása az elmúlt 10–20 évben,
2. segít elkülöníteni az éghajlati eredetű változásokat az emberi eredetűektől (kitermelés, infrastruktúra-építés, mezőgazdasági átalakulások).

Egy klímaválasz-vizsgálat során például a hallgató összevetheti:

- hol sűrűsödnek a degradálódó tűlevelű foltok,
- mely területeken vált gyakoribbá a lombkorona ritkulása,
- hogyan alakul a fiatalosok regenerációja a szárazabb térségekben.

A CLC+ térképek itt gyakran kiegészülnek Sentinel-2 vegetációs indexekkel (NDVI, EVI), felszínhőmérséklet-adatokkal (LST) vagy radaralapú talajnedveségi mutatókkal. A felszínborítási kategória ilyenkor a „történet gerincét” adja: először megmutatja, milyen típusú területet érint a változás, majd a kiegészítő mutatók írják le a változás jellegét és intenzitását.

3.3. Műholdas lézerszkennelő rendszerek és erdészeti alkalmazásuk

3.3.1. A NASA GEDI bemutatása

A lézerszkennelés fogalma az elmúlt két évtizedben gyökeresen átalakította az erdők megfigyelésének és menedzsmentjének lehetőségeit. Míg korábban a LiDAR-technológia elsősorban repülőgépekre vagy helikopterekre szerelt érzékelők formájában vált ismertté, a 2010-es évektől kezdődően megjelentek az első olyan műholdas platformok, amelyek a Föld felszínéről érkező lézer-visszaverődések segítségével képesek értékelni a vegetáció magassági szerkezetét. A műholdas LiDAR különösen fontos áttörést jelentett az erdészeti kutatásokban, mert olyan helyeken is részletes információt nyújt a lombkorona magasságáról, szerkezetéről és biomasszájáról, ahol a terepi mintavétel rendkívül nehéz, vagy ahol a repülőgépes felmérés költsége és logisztikája túl nagy lenne. A technológia legérettebb és legmasszívabban használt képviselője a NASA GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation) küldetés, amelyet az ISS telepítettek, és amely 2018 és 2023 között gyűjtött adatokat a Föld mérsékelt, trópusi és boreális erdőiről.

A GEDI-küldetés egyik legfontosabb sajátossága, hogy elsődleges tervezési célja nem valamilyen általános felszínmagasság-mérés volt, hanem kifejezetten az erdei ökoszisztémák háromdimenziós jellemzése. A műszer nyolc párhuzamos lézernyalábot bocsát ki, amelyek a felszínt érve energiaprofilokat rögzítenek a lombkorona felső zónájától a talajig. Ezek az energiaprofilok tulajdonképpen a vertikális biomassza-eloszlás finom részleteit tükrözik: megmutatják, hogy mekkora a lombkorona magassága, mennyire sűrű az ág- és lombzatstruktúra, és milyen magassági rétegben található a legtöbb biomassza. Mivel minden egyes „footprint” – amely körülbelül 25 méter átmérőjű – egy önálló vertikális mérési egységet jelent, a GEDI nem pontfelhőt hoz létre olyan értelemben, mint a repülőgépes LiDAR-rendszerek, hanem sokkal inkább egy reflektancia-magassági görbét minden egyes mérési pontnál. Ezeket az úgynevezett „full-waveform” LiDAR-adatokat a kutatók utólag matematikailag bontják komponensekre, így visszanyerhető a lombtömegeloszlás, a koronamagasság, sőt bizonyos esetekben a lombkorona és a talaj közötti rések mérete is.

A GEDI jelentősen eltér a klasszikus fotogrammetriai módszerektől. Mivel fényképek helyett lézérimpulzusokból származó időkülönbség-adatokat rögzít, nem függ a megvilágítástól, az árnyékhatásoktól vagy a színbeli kontrasztoktól. A műholdas pályára helyezés másik nagy előnye, hogy egy teljesen egységes mérési rendszert biztosít a Föld minden olyan pontján, amely felett az ISS elhalad. Ez különösen értékes a globális erdészeti modellezésben, ahol az egységes adatgyűjtés és a kompatibilis időbeli lefedés elengedhetetlen a biomassa és a szénkészlet változásainak követéséhez. A GEDI-küldetés tudományos jelentősége ezért messze túlmutat az erdészeti térképezésen: hozzájárult a globális szén-ciklus finomabb becsléséhez és a klímodellek pontosságának javításához.

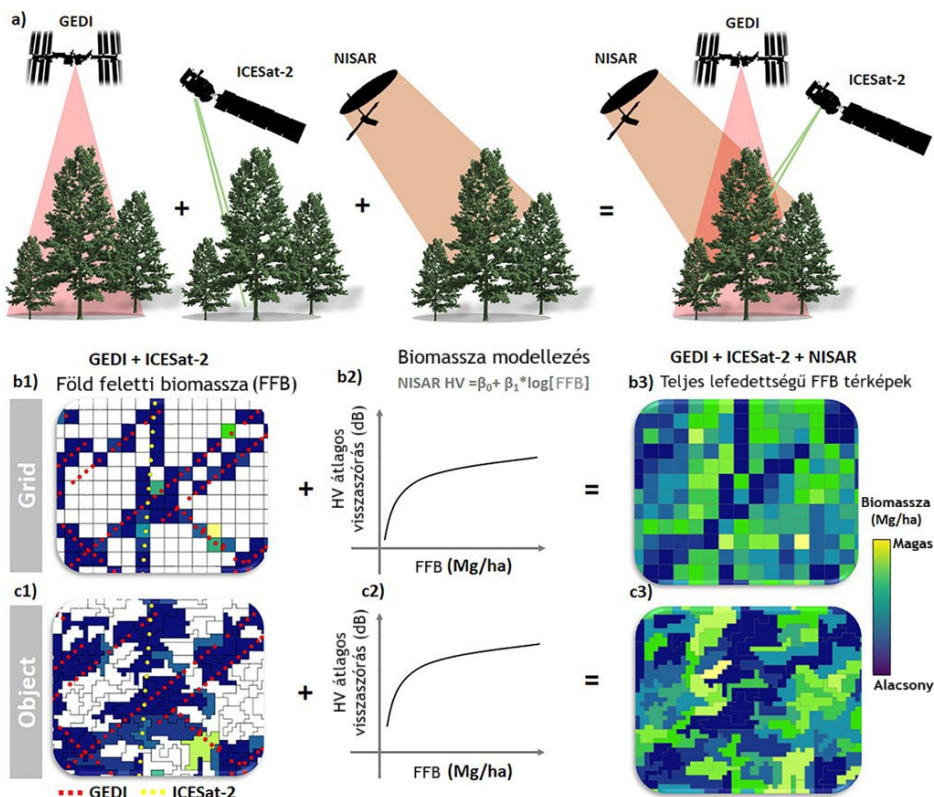
A műholdas LiDAR-rendszerek fejlődése azonban nem a GEDI-programmal kezdődött. A NASA már a 2000-es évek elején útjára indította az ICESat-küldetést, amely eredetileg a sarkvidéki jégtakaró és a gleccserek vastagságának mérését szolgálta, de mellékesen a vegetáció magasságára is szolgáltatott adatkivonatokat. Az első ICESat GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) rendszere még jóval kevésbé volt érzékeny a komplex forest struktúrákra, mint a későbbi GEDI, de már ekkor felismerték, hogy a full-waveform LiDAR alkalmas az erdőmagasság távoli becslésére. A valódi technológiai ugrást azonban a 2018-ban indított ICESat-2 hozta el. Az új ATLAS-rendszer mikroimpulzusos LiDAR-technológiát alkalmaz, amely rendkívül nagy ütemben, másodpercenként több tízezer impulzust bocsát ki, így egészen kivételes magassági pontosságot ér el. A rendszer elsődlegesen továbbra is a jégtakaró és a gleccserek vizsgálatára szolgál, ugyanakkor számos tanulmány demonstrálta, hogy az ICESat-2 adatai erdészeti célokra is jól használhatók, különösen a koronamagasság becslésére és a nagy területi léptékű vegetációváltozások feltérképezésére.

A műholdas LiDAR egyik nagy előnye, hogy az adatgyűjtés globális és ismétlődő, ami lehetővé teszi a hosszú távú idősorok összeállítását. Ez különösen fontos az olyan ökológiai folyamatok megértésében, amelyek több évtizeden át tartanak, például az erdő regenerációjának üteme egy tarvágást követően, a rovar Gradációk hatására bekövetkező lombkorona-ritkulás, vagy a klímaváltozás miatt meghosszabbodó vegetációs időszak hatása a biomassa-növekedésre. Míg a repülőgépes LiDAR alkalmas nagy részletességű, lokális térképezésre, a műholdas változat olyan helyeken is adatot szolgáltat, ahol egyébként logisztikailag nem lenne megoldható rendszeres felmérés – például trópusi esőerdők belsejében vagy a szibériai tajga kiterjedt régióiban.

Az erdészeti távérzékelési gyakorlat szempontjából különösen értékes, hogy a GEDI adatai kombinálhatók a Sentinel-1 radaros mérésekkel és a Sentinel-2 multispektrális képekkel. A különböző adatforrások együttes használata lehetővé teszi a kronológiai és szerkezeti információk összeolvasztását. Például egy erdőrészlet biomasszájának becslésekor a GEDI vertikális szerkezeti profiljai jól összehangolhatók olyan spektrális indexekkel, mint az NDVI vagy az EVI. Ez a kombináció különösen hatékony a lombkorona egészségi állapotának térbeli elemzésében: egy

szükárosodást követő lombvesztés például a GEDI visszaverődési görbéjében is erősen megjelenik, még mielőtt a multispektrális adatok színárnyalat-változásai feltűnnének. A műholdas LiDAR tehát nem csupán önmagában értékes eszköz, hanem integrált része egy komplex távérzékelési rendszernek.

Érdemes megjegyezni, hogy a GEDI-küldetés a maga nemében átmeneti megoldásnak tekinthető, mivel az ISS nem biztosít teljes körű globális lefedést. A pálya dőlésszöge miatt a műszer nem mér az északi magas szélességeken; ezért a boreális erdők egy része kimaradt a vizsgálati területből. Ugyanakkor a meglévő adatmennyiség még így is példa nélküli, és alapvetően formálta át az erdészeti szénmérlegszámítások globális kereteit. A kutatások szerint a GEDI-adatok segítségével teljesen újra kellett gondolni a biomasszatérképek módszertani alapjait, különösen az Amazonas-medence, Közép-Afrika és Délkelet-Ázsia trópusi erdősegeinek esetében, ahol korábban csak pontszerű terepi mérések vagy alacsony felbontású radaros adatok álltak rendelkezésre.



48. ábra. Föld feletti biomasszabecslés műholdas lézershakenneléssel, forrás: Silva 2021

A műholdas LiDAR jövője az integrált rendszerekben rejlik. A következő generációs távérzékelési koncepciók olyan multiszenzoros platformokban gondolkodnak, ahol a lézerszkennelést magas felbontású multispektrális és hiperspektrális kamerákkal, valamint radaros szenzorokkal kombinálják. Ez a szemlélet tükröződik már ma is abban a kutatási gyakorlatban, amely a GEDI vertikális profiljait egyfajta referenciaként használja a Sentinel-2 és a Landsat felszínborítási osztályozásainak finomhangolásához. A műholdas LiDAR-adatok különleges előnye, hogy olyan abszolút magassági információt nyújtanak, amely terepi mérőeszközökkel csak óriási időráfordítással lenne előállítható. Nem véletlen, hogy az erdészeti egyetemek és kutatóintézetek világszerte e technológia köré szervezik az erdőszerkezet-modellezés oktatását és kutatásait.

A modern erdészeti gyakorlatban a műholdas LiDAR nem helyettesíti a drónos vagy repülőgépes felméréseket, hanem kiegészíti azokat. Míg a drónok centiméteres részletességgel térképezik fel egy adott állomány belső szerkezetét, addig a műholdak globális kontextust adnak: megmutatják, hogyan illeszkedik be az adott állomány a táj egészének szerkezetébe. Egy ritkítás után a drónos LiDAR megmutatja, mely fák maradtak meg, a GEDI pedig hozzáteszi, hogyan változott ezzel a térség biomasszakészlete több száz km²-es léptékben. Ez a többdimenziós összekapcsoltság a fenntartható gazdálkodás egyik kulcsa, különösen egy olyan korban, amikor az erdők klímavédelmi szerepe stratégiai jelentőségű (48. ábra).

3.3.2. Lézeres magasságmérés globális léptékben

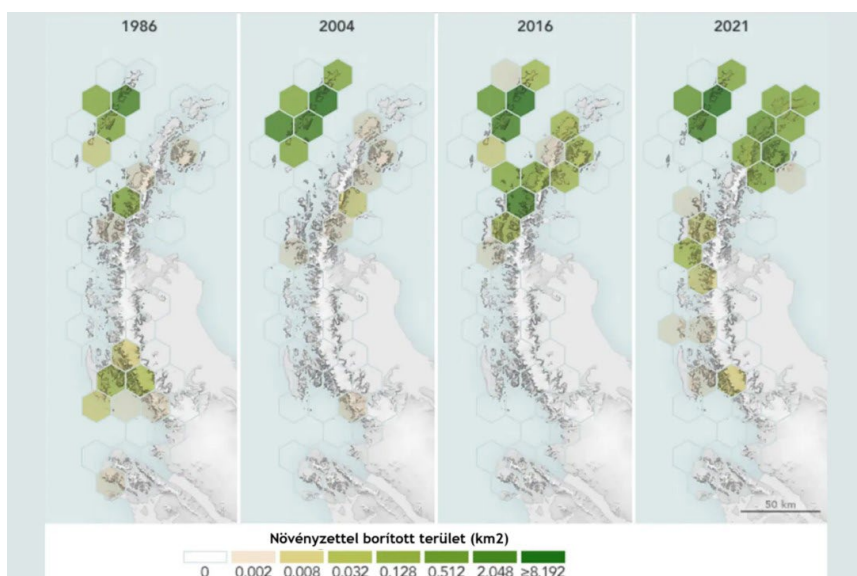
A NASA ICESat programja eredetileg a sarkvidéki jégtakarók vastagságának, változásainak és a globális tengerszintváltozás összefüggéseinek feltárására indult. A 2003-ban pályára állított első ICESat műhold a GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) nevű lézeres magasságmérővel működött, és ez volt az első olyan űreszköz, amely lézerszkenneléssel követte a Föld jégborítottságának alakulását. A GLAS LiDAR alapvetően egyirányú magasságméréseket végzett, és centiméteres vertikális pontossága révén meghatározó szerepet játszott abban, hogy pontos képet alkothassunk a grönlandi és antarktiszi jégtömegek fogyásáról.

A 2018-ban felbocsátott ICESat-2 a program második, technológiailag újraszervezettebb generációja lett. A fedélzetén működő ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System) már nem csak továbbviszi, hanem lényegében újradefiniálja a műholdas LiDAR fogalmát. Működése során másodpercenként több mint 10 000 lézerimpulzust bocsát ki, és ezekből több millió visszaverődési pontot gyűjt, így a GLAS-hoz képest nagyságrendekkel részletesebb adatsűrűséget biztosít. Az ATLAS-rendszer vertikális pontossága szubméteres tartományba esik – a visszaverődési idő mérése alapján akár 20 cm alatti magasságkülönbségek is kimutathatók.

Ezzel az ICESat-2 nem pusztán a jégfelszín vizsgálatára vált alkalmassá. Lézerimpulzusai a Föld felszínének szinte bármilyen borítottságán képesek át-

hatolni vagy arról visszaverődni, így lehetővé teszik az erdők lombkorona- és talajszintjének elkülönítését, a tundra egyenetlenségeinek feltárását vagy a hegyvidéki domborzati változások pontos követését. Az ATLAS LiDAR valójában egy globális, folyamatos adatgyűjtésű magassági érzékelő, amely a bolygó felszínén bárhol képes kiszámítani a topográfiai különbségeket, legyen szó vegetációról, gleccserfelszínekről vagy kőzetfelszínekről.

Az ICESat és ICESat-2 eredményei ma már kulcsfontosságúak nem csak a klímakutatás, hanem az ökológia, az erdőgazdálkodás, a geológia és az űrföldrajz számos területén. A műholdas lézerszkennelés így mára a globális távérzékelés egyik legpontosabb és legmegbízhatóbb adatforrásává vált, amely egyedülálló módon követi a Föld felszínének legfinomabb változásait is (49. ábra).



49. ábra. Az Antarktisz növényzettel való borítottságának növekedése a jég olvadása mentén, forrás: Garrison 2024

3.4. Egyéb globális és regionális műholdrendszerek szerepe a távérzékelésben és erdészeti alkalmazásokban

A modern erdészeti és környezeti megfigyelés eszköztárában ma már különböző típusú műholdrendszerek működnek együtt: vannak kifejezetten távérzékelési célú műholdak, nagy felbontású kereskedelmi képalkotók, valamint navigá-

ciós és helymeghatározó rendszerek, amelyek a terepi adatgyűjtés nélkülözhetetlen elemei. Bár ezek a rendszerek eltérő funkciókra épülnek, a gyakorlatban egy erdőgazdálkodási vagy természetvédelmi projekt gyakran mindegyiket használja, egymással párhuzamosan: az egyik a részletes felszínborítási elemzést biztosítja, a másik a nagy felbontású koronaszint-megfigyelést, a navigációs rendszerek pedig a terepi mérési pontok pontos rögzítését.

Az alábbiakban öt meghatározó rendszer (20. táblázat) – az indiai IRS, az amerikai Ikonos, az orosz GLONASS, a kínai Gaofen és BeiDou – összehasonlító bemutatása következik, külön kitérve arra, hogy ezek milyen módon kapcsolódnak az erdészeti és környezetmonitoring feladatokhoz.

IRS (India)

India IRS (Indian Remote Sensing Satellite) műholdcsaládja 1988-tól kezdve folyamatosan szolgálja a dél-ázsiai térség térképezési, mezőgazdasági és erdészeti feladatait. Az IRS-platformok különféle szenzorokkal, köztük multispektrális és pánkromatikus kamerákkal, valamint hőérzékelőkkel vannak felszerelve.

- Térbeli felbontás: 5–70 m.
- Spektrális sávok: optikai és hőinfra sávok, néhány esetben SAR.
- Fő alkalmazások: mezőgazdasági termelés monitorozása, vízgazdálkodás, erdőtűz-megfigyelés, szárazságvizsgálat.

Az IRS-program jól példázza, hogy egy fejlődő ország is képes lehet önálló, hosszú távú távérzékelési program működtetésére.

Ikonos (USA, kereskedelmi)

Az Ikonos volt az első valódi VHR (Very High Resolution – nagyon nagy felbontású) polgári célú műhold, amely 1999-ben állt pályára az amerikai Space Imaging fejlesztésében. Optikai szenzorai révén méteres alatti részletességű képeket készít, elsősorban város- és infrastruktúra-fejlesztési, valamint biztonsági célokra.

- Pánkromatikus felbontás: 0,8 m.
- Multispektrális felbontás: 3,2 m.
- Alkalmazási területek: várostervezés, közlekedésfejlesztés, katonai megfigyelés, térképezés, katasztrófavédelem.

Az Ikonos elindulása új korszakot nyitott a kereskedelmi célú nagy felbontású távérzékelés területén, és alapot adott későbbi rendszereknek, mint például a QuickBird vagy a WorldView sorozat.

GLONASS (Oroszország)

A GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) az orosz Föderáció globális műholdas navigációs rendszere, amelyet már a Szovjetunió kezdett fejleszteni az 1980-as években, válaszul az amerikai GPS-re. Bár elsődlegesen helymeghatározásra szolgál, az aktív távérzékelés és geodéziai alkalmazások terén is komoly szerepet játszik, különösen Eurázsia és Észak-Ázsia területén.

- Elsődleges cél: pozicionálás, navigáció, időszinkronizálás.
- Kiegészítő szerep: GNSS-alapú precíziós távérzékelés (pl. drónos ortofotózás, mobil szkennelés, földfelszíni monitoring).
- Integráció: széles körben használják RTK és PPP korrekciós rendszerekben, együtt GPS-szel, Galileóval és BeiDou-val.

Gaofen (Kína)

A Gaofen műholdcsaládot a Kínai Földmegfigyelési Program (CHEOS) részeként indították útjára 2013-tól kezdve. A „Gaofen” jelentése „nagy felbontás”, és ez a sorozat az egyik legfejlettebb kínai távérzékelési rendszer, amelynek célja Kína földmegfigyelési függetlenségének biztosítása.

- Optikai és radar műholdak vegyesen.
- Felbontás: akár 0,5 m (VHR).
- Főbb alkalmazások: mezőgazdaság, várostervezés, katasztrófa-monitoring, erdőirtás detektálása, tengeri aktivitás követése.
- Nemzetközi szerep: Kína több Gaofen-adatot nyíltan elérhetővé tett fejlesztési célú országok számára is, ezzel növelve a rendszer nemzetközi jelentőségét.

BeiDou (Kína)

A BeiDou Navigációs Műholdrendszer Kína válasza a GPS- és GLONASS-rendszerekre. Bár nem közvetlen földmegfigyelési célra fejlesztették, a távérzékelési rendszerek pontosságának biztosításában kulcsszerepet játszik.

- Kompatibilis a GPS-, Galileo-, GLONASS-rendszerekkel.
- Jelentőség: lehetővé teszi Kína és más partnerországok számára a független nagy pontosságú geolokációs távérzékelést.
- Alkalmazási területek: távérzékelés, flottakövetés, mezőgazdasági precíziós rendszerek, autonóm járművek pozicionálása.

20. táblázat. *Globális és regionális műholdrendszerek összehasonlító táblázata*

Rendszer	Ország	Típus	Elődleges funkció	Terbelti felbontás	Spektrális tartomány	Erdészeti és távérzékelési alkalmazás
IRS	India	Földmegfigyelő műholdcsalád	Közepes és nagy felbontású optikai megfigyelés	5–60 m (LISS, AWIFS), 1–2 m (Cartosat)	VIS–NIR–SWIR	Erdőborítás, záródás, biomasszabecslés, mezőgazdasági monitoring, hosszú idősorok elemzése
Ikonos	USA	Kereskedelmi optikai műhold	Nagy felbontású felvételezés (város, környezet)	0,8 m PAN, 3,2 m MS	VIS–NIR	Koronasziint strukturális vizsgálata, földinfrastruktúra elemzése, kis léptékű erdőkárok detektálása
GLONASS	Orosz-ország	Navigációs műholdrendszer	Pozíció-meghatározás	–	–	Terepi adatgyűjtés, GPS-kiegészítés, pontos geodéziai alapozás, erdészeti mintavételi pontok rögzítése
Gaofen	Kína	Nagy felbontású távérzékelő műholdak	Optikai és radaros földmegfigyelés	0,5–16 m (típusfüggő)	VIS–NIR–SWIR + SAR	Koronasziint részletes elemzése, felújulás követése, precíziós erdőgazdálkodás, káresemények feltérképezése
BeiDou	Kína	Navigációs műholdrendszer	Centiméteres pontosságu hely-meghatározás	–	–	RTK-mérések támogatása, digitális erdőléltár, terepi adatgyűjtés sűrű lombkorona alatt is stabilan

3.5. Romániai erdőmonitoring-rendszerek

Romániában az erdők állapotának és kiterjedésének nyomon követése már évtizedek óta fontos része az erdőgazdálkodási és természetvédelmi stratégiának. A klasszikus erdőleltár és állománytervezési gyakorlatok mellett az utóbbi évtizedben fokozott figyelmet kapott a távérzékelésen alapuló erdőmonitoring is, amely lehetőséget ad nagy területek objektív, gyors és ismételhető vizsgálatára.

A romániai országos erdőleltár (Inventarul Forestier Național – IFN) első szakasza 2008 és 2012 között zajlott, és ez volt az első országos szintű adatgyűjtés, amely statisztikai mintavétel alapján, egységes módszertannal mérte fel az ország erdőállományát. A második ciklus 2013–2018 között került végrehajtásra, jelenleg pedig a harmadik ciklus zajlik. Az IFN keretében több ezer mintapontból gyűjtenek terepi adatokat a fák magasságáról, átmérőjéről, fafajról, korosztályról, záródásról, valamint különféle ökológiai és biodiverzitási mutatókról. A leltár adatai kulcsszerepet játszanak Románia szén-dioxid-mérlegének, biomassza-nyilvántartásának és biodiverzitási stratégiáinak kialakításában.

A különböző fajok különböző módon reflektálják és abszorbeálják a napfényt különböző spektrális sávokban – ez lehetővé teszi a fajok spektrális alapú elkülönítését. A gépi tanulási algoritmusok a tanító minták alapján képesek az országos szintű fajtérképezésre, akár Sentinel-2 vagy más multispektrális műholdfelvételek felhasználásával. A Molnár (2023) által is bemutatott módszerek szerint nemcsak a tűlevelű és lombhullató állományok, hanem különböző fajok és korosztályok is elkülöníthetők (Molnár–Király 2023). A fiatal és idős állományok eltérő levélfelületi indexe és fotoszintetikus aktivitása alapján kimutathatók.

Az IFN adatait egyre inkább összehangolják műholdas megfigyelésekkel, így például Sentinel-2 vagy Landsat idősoros felvételekkel történik a zavarások detektálása, valamint a regenerációs folyamatok és fajkompozíciók térbeli modellezése. Román kutatók és erdészeti szervezetek több projektben is részt vesznek, melyek célja az automatizált erdőosztályozás és a zavarási események (tűz, szélvihar, erdőirtás) korai felismerése.

A nemzeti szintű erdőmegfigyelés digitalizációja terén fontos mérföldkő volt az INSPIRE-direktíva követelményeinek megfelelő digitális erdészeti adatinfrastruktúra létrehozása, amely lehetővé teszi a különböző hatóságok és kutatók számára az adatok gyors elérését és elemzését.

A távérzékelésen alapuló felügyelet az illegális fakitermelések visszaszorításában is egyre hangsúlyosabb szerepet játszik. A Forest Guard (Garda Forestieră) és a SUMAL 2.0 rendszer bevezetése (2021-től) új korszakot nyitott a valós idejű nyomon követhetőség és az erőforrások átláthatóbb kezelése felé. A SUMAL-rendszer térinformatikai alapú, és kapcsolódik a műholdképes ellenőrzési protokollokhoz.

A romániai kutatóintézetek – mint például az ICAS (Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare în Silvicultură „Marin Drăcea”) – aktívan részt vesznek eu-

rópai programokban (pl. Copernicus, ForestFlux), valamint a GEDI és ICESat-2 aktív lézeres műholdas adatok erdészeti alkalmazásának hazai adaptálásában is. Ez lehetővé teszi a magaslati erdők vagy a nehezen elérhető területek pontosabb fel térképezését, a záródás, koronamagasság és szerkezet pontosabb meghatározását.

Románia erdőmonitoring-rendszere egyre inkább a multiszenzoros, adatvezérelt és távérzékelésen alapuló megközelítések felé halad, amelyek hozzájárulnak az európai uniós erdőstratégiákhoz való illeszkedéshez, és egyúttal szolgálják a nemzeti erdővédelmi célokat, klímaváltozási alkalmazkodást és a fenntartható erdőgazdálkodást is.

Összefoglalva, a korszerű távérzékelési technikák – beleértve a mesterséges intelligenciát, spektrális elemzést, idősoros feldolgozást és aktív lézeres rendszereket – alapvetően megváltoztatták az erdőállapotok nyomon követésének lehetőségeit. Ezek a módszerek nemcsak a klasszikus erdőlehatárolás, hanem az erdőállapot-változások, fafajok, korosztályok, zavarások és klímaváltozás-reakciók térképezését is lehetővé teszik, új távlatokat nyitva a digitális erdőgazdálkodás és a klímaadaptív erdőtervezés számára.

FOTOGRAMMETRIA

4.1. A fotogrammetria fogalma, célja

A fotogrammetria a térbeli objektumok alakjának, méretének és elhelyezkedésének meghatározásával, az erről szóló információk feldolgozásával foglalkozó tudományág, amely fényképek vagy más képalkotó eszközök segítségével végzi az adatkinyerést. Lényege, hogy a kétdimenziós képekből különböző matematikai és geometriai módszerek segítségével háromdimenziós információkat nyerhetünk ki, azaz térbeli pozíciókat és formákat rekonstruálhatunk. E tudományterület gyökerei a 19. századba nyúlnak vissza, de fejlődése a légi fényképezés elterjedésével, majd a digitális képfeldolgozás kibővülésével kapott új lendületet.

A fotogrammetria célja kettős: egyrészt geometriai információk (pl. pontkoordináták, távolságok, területek, szögek) pontos meghatározása, másrészt vizuális dokumentáció, azaz olyan képi anyag előállítása, amely archiválható, elemezhető és összevethető különböző időpontokban készült felvételekkel. A klasszikus fotogrammetria jellemzően passzív érzékelőeszközökkel dolgozik, amelyek a természetes vagy mesterséges fényforrások által megvilágított objektumokról visszaverődő sugárzást rögzítik. Ezeket a képeket aztán analóg vagy digitális módszerekkel kiértékelhetjük.

Az erdőgazdálkodásban és természetvédelemben a fotogrammetria alkalmazása rendkívül hasznos, mivel lehetővé teszi például az állománytérképezést, a fakészletbecslést, a lombkorona-záródás vagy a biodiverzitás térbeli mintázatainak feltérképezését. Segítségével nyomon követhetők a károsító hatások, a szél-döntések, a szukcessziós folyamatok vagy akár az élőhelyi változások is. Mivel a módszer lehetővé teszi a sztereoszkopikus, azaz háromdimenziós látást, így terepmodellek, magassági térképek és domborzati profilok is származtathatók a képi adatokból.

A modern fotogrammetria – különösen a digitális változata – szorosan összefonódik a távérzékeléssel, a térinformatikával (GIS), valamint a számítógépes képfeldolgozással. Napjainkban már nemcsak repülőgépről vagy műholdról készített légi felvételekkel dolgozunk, hanem a drónos technológia révén kis magasságú, nagy felbontású ortofotók is könnyen előállíthatók, akár erdei vagy nehezen megközelíthető területekről is.

A fotogrammetria tehát egy rendkívül sokoldalúan alkalmazható eszközrendszer, amely precíz, megbízható és részletes adatokat szolgáltat a környezeti térszerkezet megismeréséhez, valamint a változások kvantitatív nyomon követé-

séhez. Az erdészeti gyakorlat számára ez különösen fontos, hiszen a fenntartható erdőgazdálkodás és a természetvédelem csak megalapozott térbeli adatokra és azok rendszeres frissítésére támaszkodva valósítható meg.

4.1.1. A fotogrammetria fejlődése

A fotogrammetria több mint másfél évszázados múltra tekint vissza, és fejlődése szorosan kapcsolódik a természet- és műszaki tudományok előrehaladásához: a fizika és optika törvényszerűségeihez, a kémia (fényérzékeny anyagok) fejlődéséhez, a matematika (vetületi geometriák) egyre kifinomultabb módszereihez, valamint a geodézia, topográfia és kartográfia folyamatosan növekvő igényeihez. Bár napjainkban a fotogrammetriát gyakran a digitális légi vagy drónos képrögzítéssel azonosítjuk, a tudomány története valójában a földi fotogrammetriával kezdődött, és ez az alapozó korszak döntően meghatározta a későbbi módszertani fejlődést.

A fotogrammetria fejlődése négy fő korszakra bontható, ám mindegyik korszak kiindulási pontja, módszertani magja a földi fényképezésből és a kétképes középponti vetítés geometriai értelmezéséből fakadt. Ugyanis a térbeli rekonstrukció legelső kísérletei nem a levegőben, hanem állványokra, épületekre vagy tájelemekre rögzített kamerák segítségével zajlottak.

A földi fotogrammetria kialakulása (1830–1880): a tudomány születése

A fotogrammetria gyökerei a fényképezés 1839-es megszületésével egyidősek. William Henry Fox Talbot, Niépce és Daguerre munkájával egyszerre vált lehetővé, hogy a fizikai világot nemcsak szemmel, hanem rögzíthető, mérhető képként is vizsgáljuk. A korai fotogrammetriai kutatók gyorsan felismerték: a fénykép nem pusztán ábrázol, hanem geometriai információt hordoz, amelyből megfelelő matematikai módszerrel visszaállítható az objektumok valódi térbeli helyzete.

A földi fotogrammetria első úttörői

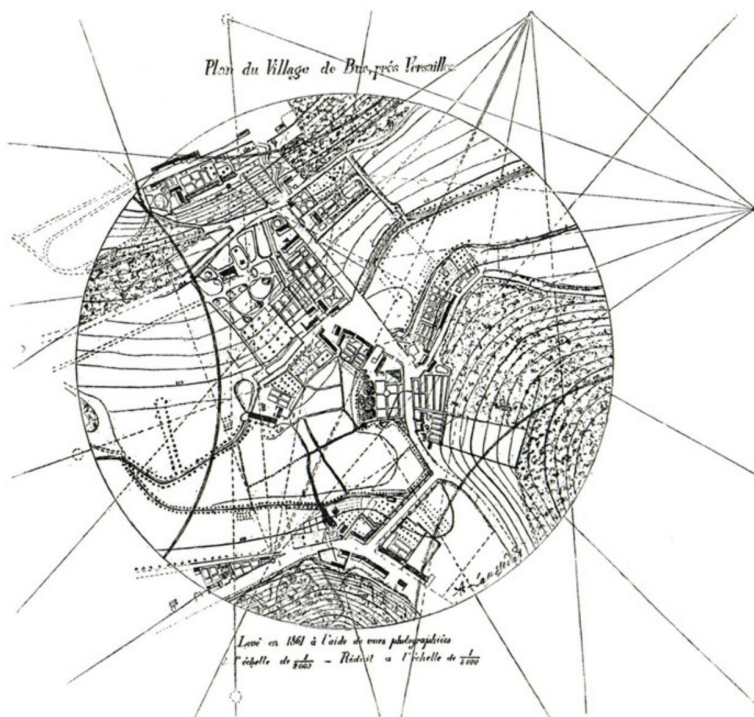
A tudományág első korszakának meghatározó szereplői olyan mérnökök és katonai térképészek voltak, akik stabil, földi pozícióból készítették két vagy több fényképet, majd a képek geometriáját felhasználva háromszögeléssel meghatározták a tereptárgyak helyzetét.

Néhány fontos méréföldkő:

- Aimé Laussedat (francia hadmérnök) – a „fotogrammetria atyja”.
- 1851-től foglalkozott a fényképek térképezési célú felhasználásával. Módszerei *teljes egészében földi felvételezésre* épültek. Láncok, szintezők és teodolitok pontjaira illesztett kamerával készített kétképes felvételeket épületekről és városrészekről (50. ábra).

- 1859-es publikációját tekintik az első valódi fotogrammetriai módszertannak.
- Meydenbauer (német építész és műemlékvédelmi szakember) – a műemléki fotogrammetria megalapozója.
- 1885-ben megalapította a Königliche Preußische Messbildanstaltot, a világ első fotogrammetriai intézetét.
- Számos kastély, templom és történelmi épület máig fennmaradt felmérései földi fotogrammetriai módszerrel készültek.
- A korai műszerek
 - › masszív faállványra szerelt kamerák,
 - › mérőjelek, geodéziai alappontok,
 - › skálával ellátott távmérési rendszerek.

A módszer alkalmazását elsősorban építészeti felmérések, városi térképezés és erődítmények geometriájának meghatározása motiválta. A földi fotogrammetria az alapja a későbbi analóg és digitális technikáknak, mivel a képpontok sugárnyalábjainak metszéspontja adja a 3D rekonstrukció elvét – ez az elv ma is változatlan.



50. ábra. Az Aimé Laussedat által készített Buc település tervrajza 1861-ből, forrás: Polidori 2020

A légi fotogrammetria megjelenése (1880–1939): a kvantitatív szemléletű fordulat

A 19. század második felében a fotogrammetria már stabilan jelen volt a térképészeti gyakorlatban, azonban az ekkor alkalmazott földi módszerek horizontja korlátozott maradt: a mérés pontossága nagymértékben függött a kamerák állandó pozicionálhatóságától, a képek dőlésszögének kontrolljától és a terepi körülményektől. A mobil és magasból történő megfigyelés gondolata már az 1850-es évektől foglalkoztatta a kutatókat, és amikor 1858-ban Nadar elkészítette az első légi fényképet mintegy 80 méteres magasságból, még senki sem gondolta, hogy alig fél évszázaddal később a légi fotogrammetria több nagyságrenddel növeli majd a kartográfia térbeli lefedettségét.

A technikai ugrás lényegében akkor vált mérhetővé, amikor a felvevőplatformok magassága stabilizálódott, és a kamerák zárszerkezete már 1/50–1/100 másodperces expozíciós időket is lehetővé tett. Ez azért volt kulcsfontosságú, mert egy 200–400 méter közötti repülési magasságban készült felvételen a repülésből adódó elmozdulás könnyen meghaladhatta volna a kép felbontásának néhány tizedét; az expozíciós idő drasztikus csökkentése nélkül a részletgazdag térképezés egyszerűen lehetetlen lett volna. A ballonokról készített képek magassági ingadozása ± 5 –15 méter között mozgott, ami a kor kameraival nagyjából 1:5 000–1:10 000 méretarányú térképezést tett lehetővé. A papírsárkányos és léghajós kísérletek még ennél is pontatlanabbak voltak, de fontos lépcsőfokot jelentettek: már 1900 körül sikerült több négyzetkilométert lefedő, 30–40 képből álló sorozatokat rögzíteni.

A galambokra szerelt fényképezőgépes kísérletek a 20. század első két évtizedében zajlottak. Konkrétan, a legismertebb példák 1910 környékére tehetőek. Ebben az időszakban olyan apró, automata expozíciós mechanizmussal felszerelt kamerákat rögzítettek kiképzett postagalambokra, amelyek képesek voltak a levegőből, rövid távokon, néhány száz méteres magasságból fényképeket készíteni (51. ábra).

A valódi fordulat akkor érkezett el, amikor a repülőgépek megjelentek mint stabil és jól irányítható felvevőplatformok. Az 1910-es évek végére a katonai repülőgépek már 800–1500 méteres magasságból is képesek voltak a korhoz képest kiváló geometriai minőségű felvételeket készíteni. A méretarányok ezzel az 1:10 000–1:20 000 tartományba léptek, és a két irányból készített átfedő (60–80%-os longitudinal overlap) felvételek megteremtették a sztereoszkopikus kiértékelés alapját. Ezzel a módszerrel először vált lehetővé, hogy a tereptárgyak térbeli helyzete ne csupán kétdimenziós képekből legyen visszakövetkeztethető, hanem közvetlenül mérhető hármass pontokból (a fotogrammetria korai „3D” adatbázisai).

A technológiai fejlődés mennyiségi értelemben is látványos volt. Az 1920-as évek végére egyetlen repülőgép egy bevetés során már 200–400 légi felvételt is rögzíteni tudott, ami hektárok helyett több száz négyzetkilométer precíz feltérké-

pezését tette lehetővé. A felbontás is nagyságrendeket javult: a kamera fókusztávolsága ekkor már gyakran meghaladta a 150–200 mm-t, ami 1 méternél kisebb terepi felbontást eredményezett jó minőségű filmek esetén. Ezen a ponton vált igazán világossá, hogy a légi fotogrammetria nem egyszerű kiegészítője, hanem egyre inkább központi módszere a nagytérsegi térképezésnek.

Miközben a légi módszerek rohamosan fejlődtek, a földi fotogrammetria korántsem tűnt el; sőt, a geodéziai alapokat továbbra is elsősorban terepi mérések biztosították. A belső tájékozás paramétereinek meghatározása – fókusztávolság, fősugár helyzete, torzítási paraméterek – gyakorlatilag a földi kalibrálási eljárásokon alapult. A műemléki felmérések, a bányászati térképezés és az ipari épületek dokumentálása továbbra is olyan precíz, centiméteres pontosságot igényelt, amelyet a korszak légi rendszerei még nem tudtak minden körülmény között garantálni. A földi fotogrammetria ezért nemhogy háttérbe szorult volna, hanem szerves egységet alkotott a légi technikákkal: előbbi biztosította a geometriai kontrollt, utóbbi a nagy kiterjedésű felmérések hatékonyságát.

A két irány fejlődése végül az 1930-as évekre egy stabil rendszerben egyesült. Ekkorra már szabványosították a kamerák belső paramétereinek mérését, kialakultak az első analitikus módszerek, és a sztereoszkópos kiértékelés ipari szintűvé vált. A légi fotogrammetria nem csupán új perspektívát, hanem új mérési mennyiségeket, új pontossági kategóriákat és új, kvantitatív mérési elveket hozott be a térképészetbe. Ennek a korszaknak köszönhető, hogy a 20. század közepére a fotogrammetria már nem csupán képek értelmezését, hanem nagy térbeli adatbázisok numerikus feldolgozását jelentette.



51. ábra. Postagalambokra rögzített kamerák és légi felvételezés, forrás: Anil 2016

A légi fényképezés katonai alkalmazása először az amerikai polgárháborúban (1861–1865) vált fontossá, amikor a hőlégballonokról készült képeket hírszerzési célokra használták. A 20. század elején a repülőgépek fejlesztése háttérbe szorította a hőlégballonokat, mivel a repülők gyorsabbak, irányíthatóbbak és megbíz-

hatóbbak voltak. Az első repülőgépről készített légi felvételt George R. Lawrence 1906-ban készítette San Francisco városáról, a nagy földrengést követően.

A fotogrammetria és a légi fényképezés fejlődése szorosan összefügg a világháborúkkal is. Az első és a második világháború alatt a légi fényképezés kulcsszerepet töltött be az ellenséges hadmozdulatok felderítésében, a csapatmozgások követésében és a terepadottságok elemzésében. A katonai igények jelentős mértékben ösztönözték az optikai rendszerek, a filmtechnológia és a képfeldolgozás módszereinek fejlődését.

Az analitikus fotogrammetria korszaka (1940–1990): a precizitás forradalma

A 20. század közepére a fotogrammetria tudománya új szintre lépett. A matematikai és optikai ismeretek fejlődése lehetővé tette, hogy a képpontok középponti vetítését pontosan, egyenletekkel és mátrixgeometriával írják le. Ez a korszak a precizitás és a számításalapú megközelítés forradalmát hozta el, amely alapvetően átalakította a légi és földi fotogrammetriai munkákat. A korábban empirikus módszereken alapuló felvételezések helyét átvették a szisztematikus, analitikus megoldások, amelyek lehetővé tették a mérnöki pontosságú térképezést és modellezést.

A földi fotogrammetria ebben az időszakban új funkciókat kapott, hiszen a számítások és a kalibrációs eljárások központi szerepet játszottak a teljes rendszer megbízhatóságában. A korszak mérnökei és fotogrammetrárai a kamerák kalibrálásán, a lencsetorzulások feltárásán és korrekcióján dolgoztak, miközben a módszerek az építészeti dokumentáció, az ipari mérések, például az autóipar és gépészet, valamint a mérnökgeodéziai monitoring területein is egyre nagyobb jelentőséget nyertek. A földi fotogrammetria így nem csupán a térképezéshez szolgáltatott alapot, hanem a mérnöki, ipari és tudományos alkalmazások megbízható adatforrásává vált.

Ebben az időszakban jelentek meg az analitikus plotterek, mint például a Wild A8 és a Kern DSR sorozat, amelyek a korszak ikonikus műszereinek számítottak. Ezek az eszközök lehetővé tették, hogy a légi és földi felvételek centiméteres pontossággal kerüljenek feldolgozásra, miközben a térképi adatokat és 3D modellinformációkat automatikusan generálták. Az analitikus plotterek kombinálták a mechanikai pontosságot a matematikai számítások lehetőségével, így a fotogrammetria a számítógépes feldolgozás előtti korszakban is a lehető legmagasabb precizitást biztosította.

Az analitikus fotogrammetria bevezetése a gyakorlati alkalmazások széles spektrumát nyitotta meg. Az ipari környezetben a részletes gépészeti és autóipari mérések során a mérnökök képesek voltak a modellezett alkatrészek és szerkezetek valós dimenzióit összevetni a tervezett geometriával. Az építészeti és városi felmérések során a korabeli analitikus módszerekkel lehetővé vált az épületek,

utcahálózatok és terepfelületek háromdimenziós, pontos dokumentációja, ami hozzájárult a várostervezési és műemlékvédelmi döntések megalapozásához. A földi fotogrammetria kiemelkedő szerepet kapott a mérnökgeodéziai monitoringban is, például hidak, építmények és más kritikus infrastruktúrák deformációinak és elmozdulásainak nyomon követésében.

A korszak jelentősége nem csupán a precizításban, hanem a metodológiai fejlődésben is rejlett. Az analitikus fotogrammetria lehetővé tette a matematikai modellek széles körű alkalmazását a felvételek feldolgozásában, és ez alapozta meg a későbbi digitális fotogrammetriai rendszereket. A pontos geometriai ismeretek megszerzése révén a szakemberek nemcsak térképeket és ortofotókat tudtak készíteni, hanem háromdimenziós terep- és objektummodelleket, amelyek a későbbi 3D térinformatikai alkalmazások előfutárai voltak.



52. ábra. *Analitikus fotogrammetriai eljárással vizsgálták az egyiptomi I. Széthi- királysír szarkofágtermének mennyezetét, forrás: ERDA 2025*

Összességében az analitikus fotogrammetria korszaka a fotogrammetria történetének azon időszaka, amikor a tudomány és a mérnöki gyakorlat szoros egységbe fonódott. A matematikai alapú megközelítések és a mechanikai pontosság lehetővé tették, hogy a légi és földi felvételek a valóságot precízen tükrözzék, miközben a földi módszerek tapasztalatai továbbra is kritikus szerepet játszottak a kalibrációban és az adatok helyességének biztosításában. Az analitikus fotogrammetria így nemcsak a térképezést forradalmasította, hanem az egész mérnöki, építészeti és ipari mérés módszertant is tartósan megalapozta.

A következő fejlődési lépcsőt tehát a számítástechnika megjelenése és alkalmazása jelentette a fotogrammetria területén. Az analitikus korszak lényege, hogy a képalkotás és -értelmezés során a geometriai torzításokat, perspektívákat, térbeli transzformációkat már matematikai úton, algoritmusok segítségével kompenzálták, nem pedig kizárólag mechanikai-optikai eszközökkel.

A számítógép lehetővé tette, hogy a fotógeometria törvényeit egyenletrendszerek formájában kezeljük. A legismertebb a központi vetítés matematikai modellje, amely az objektum és a kép közötti geometriai kapcsolatot írja le.

Az analitikus fotogrammetria megjelenésével pontosabbá vált a domborzati modellek létrehozása, a topográfiai térképezés, valamint a térbeli objektumok rekonstrukciója. Az analóg rendszereket fokozatosan elkezdtek kiváltani az analitikus plotterek, amelyek a képpontokat numerikusan, és nem csupán optikai úton értelmezték (52. ábra).

A digitális és UAV-fotogrammetria korszaka (1990-től napjainkig): a földi fotogrammetria új reneszánsza

Az 1990-es évektől kezdődően a fotogrammetria történetében új korszak nyílt meg a digitális képalkotás és a számítógépes képfeldolgozás robbanásszerű fejlődésével. A fényképezőgépek filmtechnológiáját felváltották a digitális szenzorok, a képfeldolgozó algoritmusok és a számítógépes hardverek lehetővé tették a nagy méretű adatállományok gyors és precíz elemzését, így a földi fotogrammetria ismét központi szerephez jutott a téradatgyűjtésben.

A modern földi fotogrammetria eszközei már nem csupán hagyományos kamerákon alapulnak. A digitális tükörreflexes és tükör nélküli kamerák, mobiltelefonos mérőrendszerek, valamint földi állványra, robotkarrá vagy járműre szerelt kamerarendszerek mind hozzájárulnak ahhoz, hogy a felvételezés rendkívül rugalmas és precíz legyen. Ezzel párhuzamosan a Structure-from-Motion (SfM) algoritmusokra épülő 3D-rekonstrukciók lehetővé teszik, hogy az egyszerű kép-készítésből automatikusan részletes, háromdimenziós térmodellek álljanak elő, amelyek pontossága akár milliméteres léptékű is lehet a megfelelő előkészítés és feldolgozás mellett. A felhasználók ma már professzionális fotogrammetriai szoftverek, például az Agisoft Metashape, RealityCapture vagy MicMac segítségével dolgoznak, amelyek integrálják a képek kalibrálását, a pontfelhők generálását és az ortofotók előállítását.

Ezek az új eszközök és módszerek alapvetően átformálták a földi fotogrammetria alkalmazási spektrumát. Az erdészetben különösen nagy jelentősége van a csemeteszintű felméréseknek, ahol a kis fák koronamagasságának, lombtömegének és sűrűségének értékelése digitális képeken keresztül történik. Az UAV-fotogrammetria (drónfotogrammetria) ebben kiemelkedő szerepet játszik, hiszen a drónok képesek olyan precíziós felvételeket készíteni, amelyeket korábban csak terepi mérésekkel vagy laboratóriumi modellezéssel lehetett volna elérni.

A módszer nem korlátozódik az erdészeti felhasználásokra: a kulturális örökség megőrzésében, például műemlékek digitális „ikertestvéreinek” létrehozásában, a barlangok és sziklaletörések topográfiai vizsgálatában, valamint változásdetektálási feladatokban is alapvető eszközzé vált. Az ipari és mérnöki alkalmazások, például híd- vagy épületmonitoring, valamint nagy felbontású terepi 3D-modellek előállítása (akár 1-5 mm felbontással), szintén a digitális fotogrammetria erősségei közé tartoznak.

Az UAV-alapú fotogrammetria különösen az erdészeti gyakorlatban bizonyul hasznosnak. A drónok nagy felbontású, centiméteres pontosságú felvételei lehetővé teszik az egyedi fakoronák felismerését, a tarvágások pontos területmérését, a felújuló csemeték vagy sarjadások nyomon követését, valamint a lombtömeg becslését és modellezését. Emellett a drónos felvételek nagy előnye, hogy nehezen hozzáférhető, meredek hegyoldalakon is alkalmazhatók, így az erdészeti álmányok részletes térképezése most már biztonságosan és gyorsan elvégezhető.

A digitális és UAV-fotogrammetria jelentősége abban is rejlik, hogy a földi fotogrammetria újra reneszánszát éli. A módszer nem csupán történeti érdekességként jelenik meg, hanem napjaink egyik legdinamikusabban fejlődő és leggyakrabban alkalmazott eszközöként, amely a precíziós erdőgazdálkodás, a természetvédelmi monitoring, a környezeti változások elemzése és a mérnöki felmérések számára egyaránt alapvető. Az integrált digitális feldolgozás, a drónos adatgyűjtés és a modern szoftveres eszközök kombinációja révén a földi fotogrammetria képes a korábbi technológiáknál sokkal részletesebb, gyorsabb és rugalmasabb megoldásokat nyújtani, miközben a téradatok pontossága és megbízhatósága továbbra is a legmagasabb szinten marad.

A mai digitális fotogrammetria tehát elérhető már drónokkal, mobiltelefonnal vagy hordozható kamerarendszerekkel is, így nemcsak professzionális kartográfiai felhasználásra, hanem terepi adatgyűjtésre, térinformatikai feladatokra, erdőleltár-ra vagy környezetvédelmi értékelésekre is hatékony eszközzé vált (53. ábra).

A fotogrammetria fejlődése négy fő szakaszon keresztül valósult meg: a kézi méréseken alapuló planimetrikus korszak, a sztereoszkópos térbeli értelmezésen alapuló analóg korszak, a matematikai modellezéssel dolgozó analitikus korszak, valamint a teljesen digitális és automatizált feldolgozást kínáló jelenkori korszak. Mindegyik szakasz szoros összefüggésben állt a természettudományos és műszaki ismeretek, valamint a technológiai eszközök fejlődésével. A mai fotogrammetria integrált, sokoldalú, precíz és gyors megoldásokat kínál, amelyek nélkülözhetetlenek a korszerű erdészeti téradatgyűjtés és -elemzés számára.



53. ábra. Digitális domborzatmodell készítése, forrás: Lechnerközpont, 2025

4.2. Kapcsolódása más szakterületekhez (pl. térinformatika, geodézia, távérzékelés)

A fotogrammetria egy olyan alkalmazott tudományág, amely a képekből történő mérésre és háromdimenziós információk kinyerésére specializálódott. Bár önálló diszciplínaként is értelmezhető, fejlődése és gyakorlati alkalmazása szorosan összefonódik más szakterületekkel, különösen a térinformatikával (GIS – Geographic Information Systems), a geodéziával, valamint a távérzékeléssel. Az alábbiakban részletesen vizsgáljuk meg e tudományterületek közötti kapcsolatot, kölcsönhatásokat és szinergiákat, valamint azokat a metszéspontokat, ahol a fotogrammetria elengedhetetlen szerepet tölt be.

4.2.1. Kapcsolata a térinformatikával (GIS)

A térinformatika egy multidiszciplináris tudományág, amely különféle forrásokból – például szenzorokból, térképekből, műholdképekből és terepi adatgyűjtésekből – származó térbeli adatok kezelésével, elemzésével és megjelenítésével foglalkozik. A fotogrammetria közvetlenül szolgálja a térinformatikai rendszereket azáltal, hogy:

- Térbeli adatokat szolgáltat: A fotogrammetria legfőbb kimenete a georeferált, háromdimenziós pontfelhő, ortofotó, illetve digitális terep- és felszínmodell (DTM, DSM), amelyek közvetlenül integrálhatók a GIS-adatbázisokba.

- Tematikus térképek készítését támogatja: A nagy felbontású fotogrammetriai képek alapján topográfiai, városi, mezőgazdasági és környezeti tematikus térképek állíthatók elő.
- Térbeli elemzések alapját képezi: A GIS-ben végzett térbeli modellezés – például lejtő- és kitettségelemzés, vízgyűjtőterület-analízis – gyakran a fotogrammetria által generált digitális modellekre épül.
- 3D-városmodellek létrehozása: A városi térinformatikában egyre nagyobb jelentősége van a valósághű 3D-modelleknek, amelyeket légi vagy földi fotogrammetria segítségével állítanak elő (pl. épületfelmérés, tetőstruktúrák modellezése).

A GIS és fotogrammetria közötti kapcsolat nem csupán technikai, hanem metodológiai is: mindkét szakterület az adatok térbeli elhelyezkedésére és értelmezésére épít. A fotogrammetria által előállított térbeli adatok integrálhatók térinformatikai elemzőrendszerekbe, így összekapcsolhatók például statisztikai, demográfiai vagy gazdasági adatokkal.

4.2.2. Kapcsolata a geodéziával

A geodézia a Föld méreteinek, alakjának, nehézségi erőterének és felszíni formáinak tudományos meghatározásával foglalkozik. A fotogrammetria több szinten is kapcsolódik ehhez a szakterülethez:

- Koordináta-rendszerek használata: A fotogrammetriai feldolgozás során alapvető fontosságú a térbeli adatok pontos georeferálása. A geodéziai alapponthálózatok, vetületi rendszerek és transzformációs eljárások biztosítják, hogy a képekből származó adatok beilleszthetők legyenek a nemzeti vagy globális térinformatikai rendszerekbe.
- Alapponthálózatok alkalmazása: A légi és földi fotogrammetriai eljárások során vezérlőpontokra (ground control points – GCP) van szükség, amelyek pontos pozícióját geodéziai módszerekkel (például GNSS, total station) határozzák meg.
- Mérések pontosságának validálása: A geodézia kínálja azokat a módszereket (kiegyenlítő számítás, szisztematikus hibák korrekciója), amelyekkel a fotogrammetriai mérések pontossága növelhető és ellenőrizhető.
- Közös alkalmazási területek: A geodézia és a fotogrammetria szimbiózisa különösen a nagy pontosságú térképezésnél, infrastruktúra-felméréseknél, út- és vasúthálózatok tervezésénél, valamint geodéziai monitoring (pl. torzulásfigyelés, földmozgások mérése) területén figyelhető meg.

A geodézia és fotogrammetria kapcsolata történetileg is mélyen gyökerezik: a fotogrammetria kezdetben a geodézia részterületeként jelent meg, és máig szoros technológiai, módszertani kapcsolat áll fenn a két diszciplína között.

4.2.3. Kapcsolata a távérzékeléssel

A távérzékelés (remote sensing) a Föld felszínének, objektumainak vagy jelenségeinek fizikai érzékelő eszközökkel történő vizsgálatát jelenti, anélkül hogy közvetlen kapcsolat lenne az érzékelt tárgy és az érzékelő között. A távérzékelés és a fotogrammetria között több átfedés és kapcsolódási pont található:

- Képi alapú adatgyűjtés: A távérzékelés során gyűjtött adatok jelentős része képi információ (multispektrális, hiperspektrális, radar stb.), amely feldolgozható fotogrammetriai módszerekkel is.
- Képek geometriájának kezelése: A fotogrammetria adja a módszertani hátteret a képi torzítások (pl. perspektivikus, domborzati, radiometriai torzítások) korrigálására, így a távérzékelte képek pontos georeferálása gyakran fotogrammetriai lépéseken alapszik (ortorektifikáció).
- Digitális felszínmodellek létrehozása: A fotogrammetria, különösen a sztereoképes feldolgozás és a LiDAR- (fényradar) technológiák révén olyan magassági modellek készíthetők, amelyek elengedhetetlenek a távérzékelési adatok értelmezéséhez.
- Integrált alkalmazások: A mezőgazdasági, erdészeti, katasztrófavédelmi vagy városfejlesztési projekteknél gyakran együttesen alkalmazzák a fotogrammetria és a távérzékelés eszközeit. Például egy drónnal készített ortofotó lehetőséget ad arra, hogy spektrális információkat (pl. NDVI) kombináljanak geometriai térképi adatokkal.

A két terület között némi szemléletbeli különbség is tapasztalható: míg a fotogrammetria elsősorban geometriai, térbeli információkat nyer ki képekből, addig a távérzékelés hangsúlya a spektrális (radiometriai) információkon és azok tematikus értelmezésén van. E két megközelítés azonban egymást kiegészíti, és együtt képesek komplex környezeti, gazdasági és társadalmi jelenségek hatékony vizsgálatára.

4.3. A fotogrammetria osztályozása

A fotogrammetriát – alkalmazási körétől, a felvételek készítésének módjától, feldolgozási technikáitól, valamint a technológia típusától függően – többféle szempont alapján osztályozhatjuk. Az alábbiakban a főbb kategóriákat ismertetjük:

4.3.1. Az eredmények felhasználási területe szerint

A fotogrammetria rendkívül sokoldalú tudományterület, amelynek alkalmazási lehetőségei nagymértékben függenek attól, hogy milyen célt szolgálnak a nyert adatok. A szakirodalom és a gyakorlati tapasztalatok alapján a fotogrammetriai alkalmazásokat két nagy csoportra lehet bontani: topográfiai és nem

topográfiai fotogrammetria. A két ág elkülönítése nem csupán elméleti, hanem jelentős gyakorlati következményekkel is jár, mivel a mérések pontossága, a felhasznált eszközök és a feldolgozási módszerek nagymértékben eltérnek.

Topográfiai fotogrammetria

A topográfiai fotogrammetria hagyományosan a térképészet és a földmérés szolgálatában áll. Célja, hogy a tereptárgyakról és a felszín domborzati viszonyairól kvantitatív, precíz 3D-információkat nyerjen. A módszer alapvető feladata a vízszintes (x, y) és magassági (z) koordináták meghatározása, amelyek segítségével részletes topográfiai térképek készíthetők. A modern légi és műholdas fotogrammetria esetén a pontosság nagyban függ a platform magasságától, a kamera felbontásától és a feldolgozási technikától. Például egy repülő légi fotogrammetriai rendszer 1000–3000 m repülési magasságon, digitális 50–100 megapixeles kamerával, 5–15 cm térbeli felbontást és 10–20 cm pontosságot biztosíthat a terepen. A műholdas topográfiai fotogrammetria, például a WorldView vagy Pléiades műholdak esetén, 0,3–0,5 m panchromatikus felbontású képekkel dolgozik, és a digitális terepmodellek (DTM) pontossága 1–5 m-re tehető, globális lefedettséggel.

A topográfiai fotogrammetria eredményei elsősorban a térképek készítésére, geodéziai hálózatok kiépítésére, városrendezési tervek, infrastruktúra-monitoringra szolgálnak. A módszer kiemelt jelentőségű olyan területeken, ahol a terep megközelítése nehézkes, például hegyvidéki környezetben, erdős területeken vagy árvíz által veszélyeztetett síkságokon. A digitális feldolgozás lehetővé teszi, hogy az egyes tereppontok koordinátái centiméteres pontossággal legyenek meghatározhatók, ami elengedhetetlen a precíz geodéziai munkákhoz.

Nem topográfiai fotogrammetria

A nem topográfiai fotogrammetria azokat az alkalmazásokat foglalja magában, amelyek nem a hagyományos térképezést célozzák, hanem egyedi objektumok, szerkezetek vagy folyamatok dokumentálását és elemzését. Ebbe a kategóriába tartozik az építészeti felmérés, ahol műemlékek homlokzatait vagy épületek belső tereit mérik fel centiméteres pontossággal, digitális modellként rögzítve. Az ipari fotogrammetria lehetővé teszi gépek működés közbeni deformációinak vizsgálatát, a minőségellenőrzést és a precíziós gyártás támogatását. A régészeti fotogrammetria az ásatások dokumentálását és a feltárt tárgyak digitális megőrzését szolgálja, gyakran drónos fotogrammetriával, 1–3 cm felbontással.

Az utóbbi évtizedekben a nem topográfiai fotogrammetria alkalmazása kibővült a biológiai és orvostudományi területekre, például csontmodellek, állati testformák vagy növényi szerkezetek vizsgálatára. Az erdészeti gyakorlatban a nem topográfiai fotogrammetria különösen a koronamagasság, állományszerkezet, holtfamennyiség és csemeték felmérésében bizonyult rendkívül hasznosnak,

mivel lehetővé teszi a faegyedszintű, kvantitatív adatgyűjtést drónokkal, UAV-platformokon. A digitális képfeldolgozás és a Structure-from-Motion algoritmusok segítségével a háromdimenziós pontfelhők feldolgozhatók, a fák lombkorona-területe és magassága centiméteres pontossággal mérhető, ami közvetlenül beépíthető biomasszabecslési és karbonkészlet-modellezési számításokba.

A nem topográfiai fotogrammetria előnye, hogy kisebb skálájú, de rendkívül precíz mérések végezhetők vele, ahol a teljes felszín lefedése nem kritikus, viszont a pontosság és a részletesség kulcsfontosságú. Tipikus adatok közé tartoznak a felvételezett tárgyak 3D-modelljei, felülettextúrák és változásdetektálások időbeli sorozatokban, például épületek deformációja, erdőszerkezet változása vagy ipari berendezések monitorozása.

Összehasonlítás

Amennyiben a két ágat összehasonlítjuk, a különbségek jól kvantifikálhatók. A topográfiai fotogrammetria gyakran nagyobb lefedettséget biztosít (több km² terület egy repülés alatt), miközben a pontosság a terepi viszonyok és a kamera felbontása függvényében 10–50 cm körüli lehet a vízszintes koordinátákban, és 15–100 cm a magasságban. Ezzel szemben a nem topográfiai fotogrammetria kisebb felületeken dolgozik (néhány m²-től néhány ha-ig), de a pontosság lényegesen nagyobb, akár 1–5 cm vízszintes és magassági felbontással, különösen drónos UAV-felvételezés esetén.

Mindkét ágak megvan a maga kvantitatív és gyakorlati jelentősége. A topográfiai fotogrammetria a nagy skálájú, térképezésorientált feladatoknál elengedhetetlen, míg a nem topográfiai alkalmazások a lokális, részletgazdag méréseknél nyújtanak páratlan előnyt, különösen az ipari, építészeti, régészeti és erdészeti kutatásokban. A modern fotogrammetriai rendszerekben mindkét megközelítés integrálható, így a nagyobb lefedettségű topográfiai adatokat kiegészítheti a helyspecifikus, nagy felbontású, nem topográfiai mérés, lehetővé téve a teljes körű, precíz, háromdimenziós földfelszínelemzést.

4.3.2. A felvételek készítésének módja szerint

A fotogrammetriai felvételek készítésének módszere alapvetően meghatározza a leképezett terület kiterjedését, a geometriai felbontást, a pontosságot és az alkalmazható feldolgozási technikákat. E szempont alapján három fő csoportot különböztetünk meg: földi, légi és űr-fotogrammetria.

A földi fotogrammetria

A földi fotogrammetria vagy geofotogrammetria esetében a felvételek rögzítése a földről történik. A fényképezőgépek, esetenként speciális sztereometrikus

kamerák vagy fototeodolitek, jól definiált álláspontokról készítik a képeket, ahol a pozíciók és az orientációk (x, y, z koordináták) pontosan ismertek. A felvételek készítése jellemzően vízszintes tengelyű, bár a ferde szögű beállítások is alkalmazhatók bizonyos építészeti vagy ipari vizsgálatokhoz. A módszer előnye, hogy nagyon nagy precizitás érhető el, akár milliméteres pontossággal is, ami lehetővé teszi például épületek, műtárgyak vagy ipari berendezések részletes dokumentálását. Erdészeti alkalmazásokban a földi fotogrammetria a csemeték és fiatal állományok felmérésében, a faegyedek magasságának, lombkorona-területének, valamint a holtfa mennyiségének mérésében válik kulcsfontosságúvá. A kis skálájú, részletgazdag mérési igényekhez kiválóan illeszkedik, és gyakran integrálják drónos vagy légi felvételekkel a nagyobb térbeli kontextus biztosítása érdekében.

A légi fotogrammetria

A légi fotogrammetria vagy aerofotogrammetria a 20. század elejétől terjedt el, amikor a repülőgépek és helikopterek elérhetővé váltak a térképezési célokra. A felvételezést ebben az esetben függőleges vagy ferde tengelyű kamerákkal végzik, amelyeket repülő eszközökre szerelnek. Az aerofotogrammetria lehetővé teszi nagy területek gyors és részletes feltérképezését, jellemzően néhány tucat négyzetkilométertől akár több ezer km²-ig egy repülés során. A modern digitális légi fotogrammetriai rendszerek 5–15 cm/pixel felbontást biztosítanak 1000–3000 m repülési magasság mellett, míg a magassági pontosság a digitális terepmodellek esetében általában 10–50 cm között mozog. A légi fotogrammetria története során számos innováció született, például a sztereoszkopikus képek készítése, a filmek geometriai torzulásainak kompenzálása, valamint a GPS és inerciális navigáció integrációja, amelyek mind jelentősen javították a mérési pontosságot és a feldolgozás hatékonyságát. A légi felvételezés különösen hasznos az erdőgazdálkodásban a lombkorona-záródás és az állományszerkezet monitorozásához, a tarvágások felületének meghatározásához, valamint az időbeli változások vizsgálatához.

Az űr-fotogrammetria

Az űr-fotogrammetria, más néven műholdas fotogrammetria, a földfelszín távoli, űrből történő leképezésére szolgál. Kezdetben a kéműholdak alkalmazása dominált, a legismertebb példák közé tartozik az amerikai CORONA program és a későbbi KVR-sorozat az 1960–1970-es évekből. Ezek a rendszerek nagy felbontású fekete-fehér filmre készítették a felvételeket, amelyeket visszahozott kapszulákban értékeltek ki, lehetővé téve a terepi viszonyok, infrastruktúrák és stratégiai létesítmények részletes elemzését. A műholdas fotogrammetria technikai fejlődése azonban nem maradt a katonai alkalmazások szintjén. A Landsat program, majd a Sentinel-sorozat megjelenésével a civil távérzékelési célok, mint

például erdőborítás elemzése, változásdetektálás, környezeti monitoring és városi térképezés, egyre nagyobb szerepet kaptak. A modern műholdak 0,3–10 m felbontású képekkel dolgoznak, lehetővé téve a sztereoszkopikus felvételezés és a digitális terepmodellek (DTM) előállítását, ami hosszú távú, összehasonlítható adatsorokat biztosít a földfelszín változásainak kvantitatív vizsgálatához. Az űr-fotogrammetria tehát a globális megfigyelés, az erdészeti kontextus és a környezeti elemzések egyik alapvető eszközévé vált, amely kiegészíti a földi és légi felvételezést, integrált, többforrású adatgyűjtést téve lehetővé.

A három felvételi módszer közötti különbségek nem csupán a felbontásban és a pontosságban jelentkeznek, hanem a lefedett terület nagyságában, az alkalmazás sebességében és a feldolgozás komplexitásában is. Míg a földi fotogrammetria egy-egy kisebb terület részleteinek milliméteres pontosságú leképezését biztosítja, a légi fotogrammetria több száz hektáros vagy több km²-es területek gyors feldolgozására alkalmas, az űr-fotogrammetria pedig globális, több tízezer km²-t lefedő rendszerszintű adatgyűjtést tesz lehetővé. Az integrált fotogrammetriai rendszerekben e három módszer kiegészíti egymást: a földi felvételek részletes helyi információkat adnak, a légi felvételek nagy területek monitorozását teszik lehetővé, míg az űrfelvételek biztosítják a globális kontextust és hosszú távú adatsorok létrehozását. Így a fotogrammetriai eszköztár minden szintjén precíz, kvantitatív és sokcélú információk nyerhetők a földfelszínről, ami az erdészeti, környezeti, városi és agráralkalmazásokban egyaránt nélkülözhetetlen.

4.3.3. A felhasznált technológia és a képek megjelenítési módja szerint

A fotogrammetria fejlődésében alapvető jelentősége van annak, hogy a felvételek milyen technológiával készülnek, és milyen formában állnak rendelkezésre a feldolgozás során. A megközelítés szerint két fő kategóriát különböztethetünk meg: az analóg és a digitális fotogrammetriát.

Analóg fotogrammetria

Az analóg fotogrammetria a tudományág hagyományos formáját képviseli. Itt a felvételek fizikai hordozókon, például filmekben, üveglemezeken vagy papíron készültek és kerültek tárolásra. A feldolgozás során az adatok optikai és mechanikai eszközök segítségével váltak értékelhetővé. A klasszikus analóg műszerek, mint a fotogrammetriai plotterek és sztereoszkópok, lehetővé tették a képek geometriai feldolgozását, a tereptárgyak koordinátáinak meghatározását és a topográfiai térképek előállítását. A precizitás ebben a rendszerben főként a filmminőségtől, a kamera optikai tulajdonságaitól és a plotterek mechanikai pontosságától függött. Erdészeti alkalmazásokban például a korai légi felvételek alapján készített topográfiai térképek és állománytérképek létrehozása az analóg

fotogrammetria segítségével történt, amely megalapozta a modern digitális rendszerek fejlődését.

Digitális fotogrammetria

A digitális fotogrammetria a 20. század végén és a 21. század elején vált meghatározóvá. Ebben az esetben a felvételek digitális formában állnak rendelkezésre, ami lehet közvetlen digitális kamerák használata, vagy korábbi analóg felvételek beszkennelésével történő átalakítás. A digitális környezet lehetővé teszi a képek matematikai feldolgozását, a számítógépes képfeldolgozás, a Structure-from-Motion (SfM) algoritmusok, valamint a georeferált pontfelhők generálását. A digitális fotogrammetria egyik fő előnye, hogy nagyságrendekkel gyorsabb adatfeldolgozást tesz lehetővé, és integrálható más térbeli adatrendszerekkel, például LiDAR vagy multispektrális felvételekkel. Az erdészeti gyakorlatban a digitális fotogrammetria lehetővé teszi a faegyedek pontos azonosítását, a koronamagasság és lombtömeg kvantitatív becslését, a tarvágások felületének mérését, valamint az időbeli változások monitorozását nagy felbontású, több száz vagy ezer kép feldolgozása révén.

Mindkét technológia esetében alapvető a képek minősége és a geometriájuk pontos ismerete, de míg az analóg rendszerek mechanikai és optikai precizitásra támaszkodtak, a digitális fotogrammetria a számítógépes algoritmusok és a szoftveres feldolgozás pontosságára épít. A digitális képek előnye, hogy könnyen reprodukálhatók, integrálhatók más adatforrásokkal, és lehetővé teszik a háromdimenziós modellezést is. Az analóg és digitális módszerek közötti átmenet a fotogrammetria történetében nemcsak technológiai változást jelentett, hanem új alkalmazási lehetőségeket nyitott a tudományos, erdészeti, környezeti és ipari célú felmérésekben, és alapvető lépés volt a földi, légi és műholdas fotogrammetria integrációjában.

A modern oktatási gyakorlatban a hallgatók mindkét rendszert tanulmányozzák: az analóg módszerek történeti és elméleti alapokat adnak, míg a digitális technológiák lehetővé teszik a valós adatfeldolgozást, például UAV-felvételek feldolgozását, 3D-modellek generálását, valamint az állománytérképek kvantitatív és időbeli elemzését. Így a fotogrammetria e megközelítése a tanulás során egyszerre biztosítja a klasszikus tudományos megalapozottságot és a modern gyakorlati alkalmazások elsajátítását.

4.3.4. A felvételek feldolgozásának módja szerint

Az egyképes vagy síkképes kiértékelés során a fotogrammetriai adatok feldolgozása egyetlen felvétel alapján történik, ahol a térbeli mélységérzet nem áll rendelkezésre, így a kiértékelés elsősorban planimetrikus adatokra, kontúrookra és felületi jellemzőkre koncentrál. Ezzel szemben a sztereoszkopikus képelemzés alapjai azon az elven nyugszanak, hogy két, egymást részben átfedő felvételtől

háromdimenziós információ nyerhető, lehetővé téve a magassági és térbeli viszonyok pontos meghatározását. A sztereoszkopikus megközelítés alapvető a topográfiai térképezésben, az erdészeti állományok szerkezetének feltérképezésében, valamint minden olyan alkalmazásban, ahol a domborzati és objektumspecifikus magasságadatok kritikusak.

Egyképes vagy síkképes kiértékelés

A fotogrammetriai gyakorlatban a térbeli információk kinyerése általában sztereoszkopikus (kétképes) módszereken alapszik, azonban bizonyos esetekben lehetőség nyílik egyetlen kép alapján történő háromdimenziós koordináták meghatározására is. Ezt a speciális eljárást nevezzük monoplottingnak vagy egyképes kiértékelésnek. Bár a klasszikus síkfotogrammetria csak kétdimenziós mérésekre alkalmas, a monoplotting módszer ezt a korlátot képes áthidalni, megfelelő segédinformációk – elsősorban domborzati adatok – felhasználásával (54. ábra).

A monoplotting során egy légi felvétel vagy ferde állású kép alapján úgy határozzunk meg térbeli koordinátákat, hogy a képi pontokat leképezzük egy ismert domborzatmodellre, azaz egy digitális domborzatmodell (DTM) vagy digitális felszínmodell (DSM) segítségével.

A térbeli helymeghatározás akkor válik lehetővé, ha rendelkezésre állnak a kamera orientációs adatai, azaz:

- a belső tájékozási elemek (pl. fókusz távolság, szenzorméret, torzítási paraméterek) és
- a külső tájékozási elemek (kamera helyzete és irányultsága a térben).

Ezek ismeretében minden képponthoz meghatározható az adott sugárnyaláb, amely a perspektív középpontból a képponton keresztül halad. A vetítési sugár és a DTM metszéspontja adja meg a keresett térbeli koordinátát.

Ez a módszer egyértelmű előnyt jelent olyan esetekben, amikor sztereofelvételek nem állnak rendelkezésre, például:

- régi, egyképes légi felvételek feldolgozásakor,
- műemléki felmérések esetén,
- régészeti dokumentációban
- vagy környezeti változások retrospektív vizsgálatok (pl. gleccserek visszahúzódása).

A kiértékeléshez a felhasználó interaktívan választ ki pontokat a képen, miközben a szoftver automatikusan meghatározza a képpontból induló vetítési sugár és a DTM metszéspontját. Ez a folyamat valós időben történik, és azonnali visszajelzést ad a kiválasztott pont térbeli elhelyezkedéséről. A folyamat során előállíthatók:

- térbeli pontfelhők (3D-koordináták),
- digitális térképi rétegek (pl. kontúrvonal, terepmodell) és
- georeferált vektoros adatbázisok.

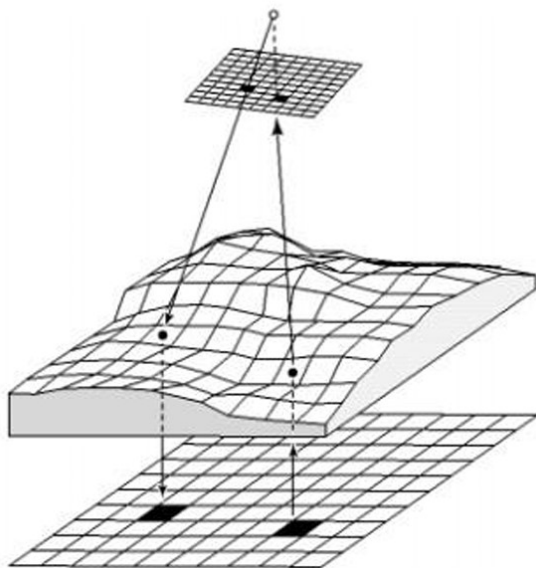
A módszer fő előnye, hogy minimális adatigény mellett is képes térbeli adatok előállítására, különösen ott, ahol csak archív vagy szórványos képi források állnak rendelkezésre. Ugyanakkor a pontosság jelentősen függ a DTM felbontásától és megbízhatóságától, valamint a kameramodellezés (kalibráció) minőségétől.

A monoplottting módszer gyakorlati alkalmazásához szükséges, hogy a szoftver támogassa a következő funkciókat:

- DTM betöltése és kezelése,
- belső és külső orientációs paraméterek importálása,
- képpontok interaktív kijelölése,
- valós idejű koordinátaleképezés és -exportálás.

A 76. ábrán szemléletesen bemutatják a monoplottting folyamatát, különösen azt a geometriai elvet, amely alapján a vetítési sugár és a terepmodell metszéspontja térbeli helyzetet eredményez. Ezek az ábrák vizuálisan is segítik az eljárás megértését, és rávilágítanak arra, hogyan válik egy kétdimenziós kép valós térképi adattá.

Összegzésként elmondható, hogy a monoplottting egy rugalmas, jól alkalmazható kiértékelési eljárás, amely lehetővé teszi egyetlen felvétel alapján térbeli adatok meghatározását, amennyiben rendelkezésre áll egy megfelelő terepmodell, és pontos ismereteink vannak a kamera geometriai és helyzeti paramétereiről. E módszer különösen értékes eszköz a történeti elemzésekben, erdészeti változásvizsgálatokban vagy ott, ahol a sztereofelvétel hiánya korlátozza a hagyományos fotogrammetriai eljárások alkalmazását.



54. ábra. Egyképes kiértékelési mód illusztrációja, forrás: Jancsó 2010

A sztereoszkopikus képelemzés alapjai

A fotogrammetria egyik legfontosabb jellemzője, hogy lehetőséget nyújt a háromdimenziós (3D) információk kinyerésére kétdimenziós képek alapján. Ez a lehetőség azon a sztereoszkopikus képelemzésen alapul, amely során két, kis nézőponteltéréssel készült kép (sztereopár) együttes vizsgálatával az emberi látáshoz hasonlóan térhatás jön létre. Ennek során a képpontok párhuzamos megfigyelése révén az agy képes rekonstruálni a tárgyak térbeli elhelyezkedését, mélységét és formáját.

A térlátás alapelve

Az emberi térlátás azon az egyszerű, de hatékony elven alapszik, hogy két szemünk kissé eltérő nézőpontból látja ugyanazt a tárgyat. Az így létrejövő két különböző síkbeli kép agyunkban egyesül, és háromdimenziós benyomást kelt. A szemek közötti távolság (kb. 6,5 cm) elegendő ahhoz, hogy mélységi információkat nyerjünk az észlelt tárgyról.

A sztereoszkopikus képelemzés pontosan ezt a mechanizmust utánozza mesterséges módon: két képet – amelyek ugyanarról a területről készültek, de különböző, kis szögeltéréssel rendelkező pozíciókból – együttesen, meghatározott módon jelenítünk és figyelünk meg.

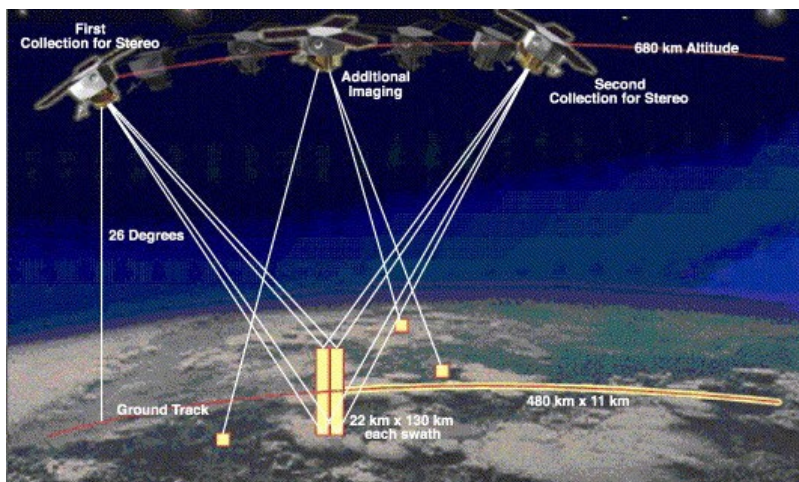
A sztereopárok szerepe

A sztereopár két olyan felvételtől áll, amelyek között meghatározott mértékű alapvonal (baseline) húzódik, vagyis a kamera mozgása vagy elhelyezése következtében keletkező nézőpontkülönbség. A két képnek elegendő átfedéssel kell rendelkeznie ahhoz, hogy a közös képtartalom összehasonlítható és értelmezhető legyen.

A sztereopár fő jellemzői:

- Átfedés mértéke: optimális esetben 60–80% közötti átfedés szükséges.
- Bázisvonal (baseline): a két kameraállás közötti távolság.
- Konvergenciaszög: a két kamera tengelyének egymáshoz viszonyított dőlésszöge.

A megfelelő sztereopár kiválasztása és előkészítése az egyik legfontosabb lépés a sikeres 3D-kiértékeléshez (55. ábra).



55. ábra. Sztereoszkopikus felvételezés illusztrációja, forrás: Dial 2003

A sztereoszkopikus megfigyelés módjai

A térhatás megjelenítésére és a sztereopárok együttes vizsgálatára többféle eszköz és módszer áll rendelkezésre:

a) Optikai sztereoszkóp

Hagyományos műszer, amely két objektív segítségével egyszerre teszi lehetővé a bal és jobb képek megfigyelését. Típusai:

- zsebsztereoszkóp: egyszerű, hordozható, tanulmányi célokra,
- tükörsztereoszkóp: nagyobb méretű, pontosabb megfigyelést biztosít,
- kézi vagy digitális sztereoszkópok: modern változatok képernyőn történő elemzéshez.

b) Számítógépes (digitális) sztereoszkópia

Számítógépes kijelzőn való sztereoszkopikus megjelenítés, amelyhez speciális eszközök (pl. aktív vagy passzív 3D-szemüvegek, térbeli kijelzők) szükségesek. Ez a megoldás lehetővé teszi a digitális képpont-megfeleltetés automatikus vagy félautomatikus alkalmazását is.

Mélység és magasság meghatározása

A sztereoszkopikus képelemzés során a fő cél a képpontokhoz tartozó Z koordináta (magasság) kiszámítása. Ehhez a sztereopárok diszparitását (a képpontok eltérését a két képen) használjuk fel.

A diszparitás értéke közvetlenül arányos a tárgy mélységével a képsíkhöz képest: minél közelebb van a tárgy, annál nagyobb az eltérés (parallaxis) a bal és jobb kép azonos pontjai között.

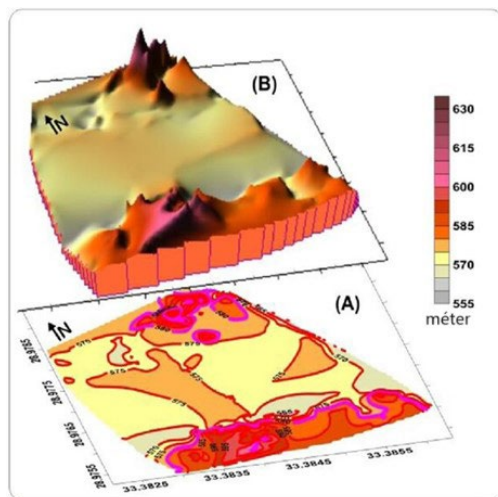
A következő egyszerű képlet jellemzi a mélységszámítást:

$$Z = \frac{f \cdot B}{d},$$

ahol:

- Z – a pont távolsága a kamerától (mélység),
- f – fókusz távolság,
- B – a két kamera közötti távolság (baseline),
- d – a diszparitás értéke (képpontok eltérése).

Ez a képlet az alapja a digitális domborzatmodellek (DTM) és felszínmodellek (DSM) létrehozásának (56. ábra).



56. ábra. Topográfiai képtérkép (A) és 3D topográfiai térkép (B), forrás: Ahmad 2017

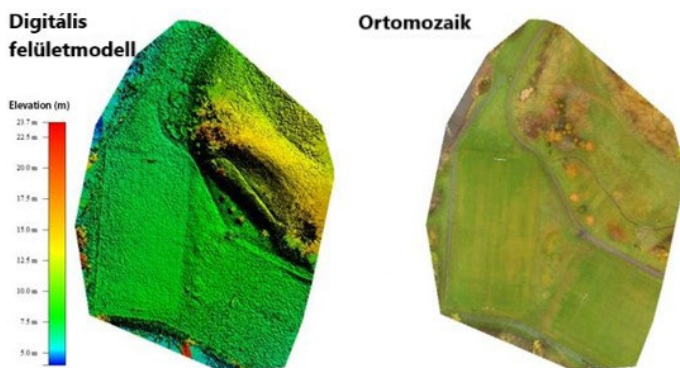
A sztereoszkopikus elemzés alkalmazásai

A sztereoszkopikus képelemzés alkalmazási területei rendkívül szélesek, különösen az alábbiakban:

- topográfiai térképezés,
- digitális terepmodellek előállítása (DTM),
- erdészeti leltár (famagasság, lombkorona) (57. ábra),
- bányaméretezés, térfogatszámítás,
- műemlékvédelem, építészeti felmérések,
- 3D-városmodellezés,
- kárfelmérés (pl. szélvihar, rovarkár).

A modern drónos adatgyűjtések során a Structure from Motion (SfM) módszer is a sztereoszkopikus elv alapján működnek (Mikita et al. 2016).

A sztereoszkopikus képelemzés a fotogrammetria egyik legfontosabb eszköze a háromdimenziós információ kinyerésére. A sztereopárok elemzése lehetővé teszi a mélység és magasság meghatározását mind optikai, mind digitális módszerekkel. A módszer pontossága, megbízhatósága és vizualizációs értéke miatt ma is nélkülözhetetlen része a topográfiai, geodéziai és erdészeti munkáknak.



57. ábra. *A Structure from Motion (SfM) alapú fotogrammetria alkalmazása háromdimenziós tereptérképezésre, forrás: GIM 2025)*

Méretarány, torzítás és korrekció

A méretarány (lépték) a kép és a valóság közötti lineáris arányt fejezi ki, és azt mutatja meg, hogy a képen mért távolságok mekkora távolságnak felelnek meg a valóságban. Szimbolikusan:

$$m = \frac{f}{H}$$

ahol:

- m – méretarány (aránytalan szám vagy 1:n alakban),
- f – a kamera fókusztávolsága (mm),
- H – a tárgytávolság, azaz a kamera és a földfelszín közötti távolság (mm, m).

A méretarány a légi felvételek esetében jellemzően változó, különösen domborzattal tagolt területeken, mivel a H értéke folyamatosan változik. Ezért a képen torzítások jelennek meg, amelyek geometriai korrekciót igényelnek.

Torzítások típusai és forrásai

A fotogrammetriai képeken többféle torzítás léphet fel, amelyek forrása lehet:

- a kamera optikai rendszere (pl. lencsetorzítás – hordó- vagy párnatorzítás),
- a szenzor pozíciója és mozgása (pl. dőlés, rezgés),
- a terep domborzata (a változó magasság perspektívtorzulást okoz),

- a képfeldolgozó algoritmusok beavatkozása (pl. digitális zajsztűrés, kontraszt-emelés),
- a képek tömörítése (pl. JPEG artefaktusok).

Mindezek olyan geometriai és radiometriai hibákhoz vezethetnek, amelyek torzíthatják a tárgyak helyzetét, méretét vagy megjelenését, így akadályozzák a pontos kiértékelést. A geometriai, radiometriai korrekciók szükségessége és módszerei a 2.5. alfejezetben vannak részletezve.

A képfeldolgozás utómunkája

A képrögzítést követő utómunka gyakran hosszabb és részletesebb folyamat, mint maga a terepi felvételkészítés. Ez azonban elengedhetetlen a magas minőségű fotogrammetriai eredményekhez. A leggyakoribb lépések:

- geometriai kalibráció (kamera-paraméterek megadása, torzítások eltávolítása),
- radiometriai normalizálás (színek, fényerő, kontraszt kiegyensúlyozása),
- ortofotó-előkészítés (digitális terepmodell alapján történő kiegyenesítés),
- fényképek illesztése és összehangolása (SfM, bundle adjustment).

Az alapos utófeldolgozás lehetővé teszi, hogy olyan felvételekből is térbeli modell legyen előállítható, amelyek nyers formájukban alkalmatlannak tűnnek a háromdimenziós rekonstrukcióra.

Fontos megemlíteni, hogy a helyszíni felvételek tartalmának módosítása – például elemek eltávolítása vagy hozzáadása – a legtöbb esetben tiltott vagy etikátlan, különösen hivatalos vagy tudományos célú feldolgozás esetén. Azonban a képessztétikai célú javítások, mint például árnyékkiemelés vagy fehér egyensúly-korrekció, nem számítanak manipulációnak, és megengedettek, sőt, hasznosak lehetnek a kiértékelhetőség javítása érdekében.

A fotogrammetriai felhasználásra készített képeknek megfelelő méretarányban, torzításmentesen és jó minőségben kell rendelkezésre állniuk. A nyers formátumú képrögzítés lehetőséget nyújt az utólagos korrekciók pontos elvégzésére, amely nemcsak a geometriai pontosságot, hanem a képi részletek rekonstruálhatóságát is javítja. A precíz képfeldolgozás elengedhetetlen a 3D-modellalkotáshoz, térképezéshez és minden más fotogrammetriai célhoz.

A sztereoszkopikus szemlélés technológiái

A digitális munkaállomásokon alkalmazott sztereoszkopikus szemlélési módok technikai háttere döntő jelentőségű a pontos 3D-értelmezéshez. Négy fő technológia terjedt el, amelyek lehetővé teszik a bal és jobb képek egyidejű vagy váltott megjelenítését:

Anaglif szemlélés

Az anaglif technika egy olyan módszer, amely a 3D-s térhatású képek megjelenítésére szolgál, és működése a színszűrésen alapul. A két képet digitálisan úgy dolgozzák fel, hogy az egyik a piros, a másik a kék (vagy cián) színcsatornán jelenik meg. A szemlélő speciális, piros–kék színszűrős szemüveget visel: az egyik oldal a piros, a másik a kék fényt szűri ki.

Ennek köszönhetően a bal és jobb szem kizárólag a neki szánt képet érzékeli, így az agy háromdimenziós képként egyesíti azokat. Bár az eljárás egyszerű és költséghatékony, hátránya, hogy csak korlátozottan használható színes képekkel, és a mélységhatás is gyengébb a fejlettebb rendszerekhez képest (58. ábra).

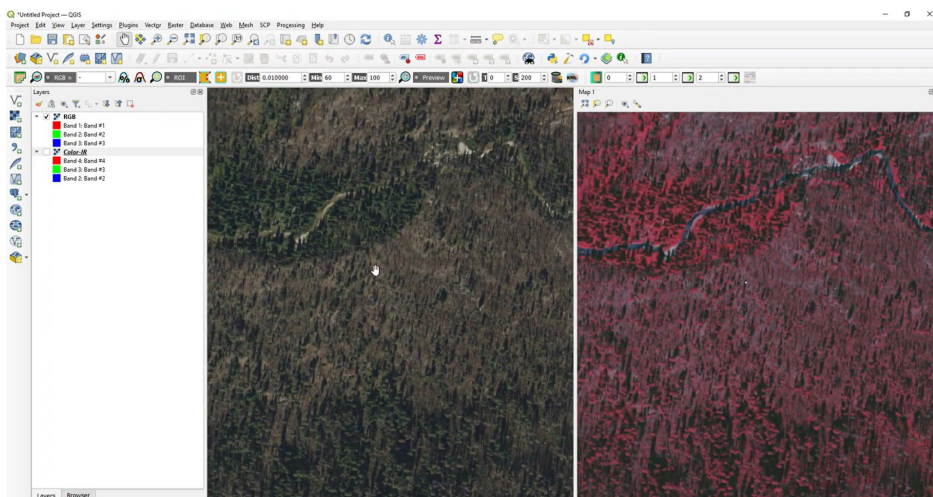


58. ábra. Erdőfelszín 3D anaglif képen, forrás: Takashi 2025

Osztott képernyős szemlélés tükörrendszerrel

Ebben a megoldásban a monitor képernyője két részre oszlik, a bal és jobb oldali képek egymás mellett jelennek meg. A sztereoszkopikus hatás eléréséhez tükrös sztereoszkópot alkalmaznak, amely a fénysugarakat 45° -os tükrökön keresztül tereli a szemekhez. Ez a rendszer lehetővé teszi, hogy a szembázist – az emberi szemek közötti 6,5 cm-es távolságot – a képek közötti fotóbázishoz igazítsák.

Az optikai rendszer tartalmaz nagyítók is, amelyek fokozzák a térélményt, azonban a szemlélés során három képtartalom is látható (bal kép, jobb kép, térmodell), ami zavaró lehet. A néző szemének természetellenes módon kell igazodnia a párhuzamos szemtengelyű nézéshez, ami külön jártasságot igényel az operátortól (59. ábra).



59. ábra. *Osztott képernyős szemlélés, forrás: saját szerkesztés*

Váltott képes megjelenítés aktív polarizációval

Az aktív polarizációs váltott képes megjelenítés (más néven: *shutter-glasses* technológia) a digitális sztereoszkopikus szemlélés egyik legfejlettebb módszere, amely nagy felbontású és színteljes képi élményt nyújt, miközben teljes térbeli mélységérzetet biztosít. A technológia alapja, hogy a monitor a sztereopárt alkotó bal és jobb képet felváltva jeleníti meg a képernyőn, nagy frekvenciával, oly módon, hogy az emberi szem a gyors váltakozást egyetlen háromdimenziós képformaként észleli.

A módszer alkalmazásához először is szükséges, hogy a számítógép rendelkezzen egy speciális videokártyával, amely támogatja a sztereó módú megjelenítést. Ez lehetővé teszi, hogy a bal és jobb oldali képek váltakozva, azaz interlace módban jelenjenek meg a képernyőn. Ha például a monitor frissítési frekvenciája 100 Hz, akkor a képernyő 50 alkalommal jeleníti meg másodpercenként a bal képet, és 50 alkalommal a jobb képet. A váltakozás olyan gyors, hogy a látórendszer ezt nem érzékeli külön képként – a két kép agyi integrációja térérzetet eredményez.

A folyamat működéséhez elengedhetetlen egy speciális folyadékkristályos (LCD) szemüveg, amelynek lencségei elektronikusan sötétednek vagy átlátszóvá válnak, szinkronban a monitor képkockaváltásával. A technológia lényege tehát

az, hogy mindig csak az egyik szem lencséje válik átlátszóvá abban a pillanatban, amikor a képernyőn a neki szánt (bal vagy jobb) kép jelenik meg. Amikor például a bal kép kerül megjelenítésre a képernyőn, a szemüveg bal oldali lencséje átlátszó, a jobb oldali viszont elsötétül. Ez biztosítja, hogy mindkét szem kizárólag a neki szánt képet érzékelje, így az optikai szeparáció tökéletes, azaz a képek nem keverednek, és a sztereó hatás tiszta marad.

A szemüveg és a képernyő közötti időbeli szinkronizáció kétféleképpen valósítható meg:

1. Infravörös (IR) szinkronizáció: ebben az esetben a monitorhoz vagy a számítógéphez egy infravörös jeladó egység csatlakozik, amely folyamatosan sugározza a váltási jeleket. A szemüveg beépített infravörös érzékelője fogadja a jeleket, és az alapján vezérli a folyadékkristályos lencsék állapotát. Ez a megoldás vezeték nélküli, kényelmes, de érzékeny lehet zavaró fényhatásokra vagy az adóval való rálátás elvesztésére.

2. Vezetékes szinkronizáció: ennél a megoldásnál a szemüveg közvetlenül kábel segítségével csatlakozik a számítógép videokártyájához vagy egy külön vezérlőegységhez. Az elektromos jel így közvetlenül jut el a szemüveg vezérlőelektronikájához, amely a bal és jobb oldali lencsék zárását vagy nyitását vezérli, tökéletes szinkronban a képernyő képfrissítésével. Ez a megoldás stabilabb, de kényelmetlenebb lehet, mivel a felhasználó mozgásterét korlátozza (60. ábra).

A technológia további előnye, hogy teljes színmélységű képeket tud megjeleníteni, szemben az anaglif módszerrel, ahol a színszűrés miatt színtorzulás léphet fel. Emellett nagy felbontású kijelzők esetén is kiváló minőség érhető el, így ez a módszer különösen alkalmas mérnöki, geodéziai, topográfiai és erdészeti alkalmazásokhoz, ahol nemcsak a térbeli mélység, hanem a részletek pontos megjelenítése is kulcsfontosságú.

Ugyanakkor figyelembe kell venni a módszer technikai hátrányait is: szükséges hozzá kompatibilis hardver (videokártya, kijelző, szemüveg), megfelelő szoftverkörnyezet, továbbá hosszú távon vizuális fáradtságot okozhat, ha a szinkronizáció nem tökéletes, vagy a frissítési frekvencia nem elég magas.



60. ábra. A váltott képes vetítéshez szükséges folyadékkristályos szemüveg és infra jeladó, forrás: Jancsó 2010

Szemlélés passzív polarizációs technikával

A passzív technológia során a monitor vagy vetítőfelület elé polarizációs szűrőt (Z-képernyőt) helyeznek, amely biztosítja, hogy az egyik kép vízszintesen, a másik függőlegesen polarizált fényben jusson a szemlélőhöz. A néző passzív polarizált szemüveget visel, amely a két képet a megfelelő szemhez juttatja (61. ábra).

E módszer továbbfejlesztett változata az ún. duálmonitoros rendszer, ahol két kijelző szolgáltatja a két képet, egy félig áteresztő üveglemez segítségével vizuálisan összekötve az egyik képet. Ez kiváló sztereó élményt biztosít, de helyigényes és különleges beállítást igényel.

Sztereopárok alkalmazása a gyakorlatban

A sztereó képpárokkal végzett kiértékelés az egyik legpontosabb módszer a következő célokra:

- digitális domborzatmodell (DTM) előállítás,
- ortofotó-generálás terepkompenzációval,
- térfogatszámítás (pl. biomasszagyarapodás-követés, tarvágás, depók),
- famagasság- és lombkorona-elemzés,
- topográfiai térképezés,
- műszaki és környezeti állapotfelmérés.

A kiértékelés során a szoftver lehetővé teszi a térmodell interaktív vizsgálatát, pontok, vonalak és felületek háromdimenziós kijelölését, valamint ezek mentését különböző georeferált formátumokban (pl. shapefile, XYZ, LAS).



61. ábra. *Passzív polarizációs technika ábrázolása, forrás: Target3D 2025*

A digitális fotogrammetria képpáros eljárásai a térbeli adatkinyerés legpontosabb és legsokoldalúbb módszerei közé tartoznak. A különböző sztereoszkopikus megjelenítési technológiák – legyenek azok anaglif, optikai, aktív vagy passzív polarizációs eljárások – lehetővé teszik a 3D-modell szemrevételezését és

feldolgozását különféle technikai és gazdasági környezetben. A sztereopárokkal végzett kiértékelés nem csupán a topográfiai térképezés, hanem az erdőgazdálkodás, geológia, környezetvédelem, műemlékvédelem és urbanisztika egyik kulcsfontosságú eszköze marad a digitális korszakban is.

4.4. A fotogrammetria típusai

4.4.1. Geometriai és tematikus információk

A fotogrammetria egyik alapvető jellemzője, hogy olyan információhordozó eszközökre épül, amelyek képesek a valós világ elemeit vizuálisan rögzíteni. Ezen eszközök közül a leggyakrabban alkalmazott és legismertebb a fénykép, amely egy időben képes tárolni geometriai (mennyiségi) és tematikus (minőségi) információkat az ábrázolt objektumokról.

A fotogrammetriai adatelemzés két fő típusú információval dolgozik:

- geometriai (kvantitatív) információkkal, amelyek mérhetők, számíthatók, és pontos térbeli helymeghatározásra szolgálnak,
- tematikus (kvalitatív) információkkal, amelyek a tárgyak tulajdonságait, típusát, minőségét és állapotát írják le.

A kétféle információ nem választható szét élesen, a fotogrammetriai gyakorlatban gyakran komplementer módon működnek együtt, különösen akkor, amikor a képelemzést és képfeldolgozást digitális eszközökkel végezzük.

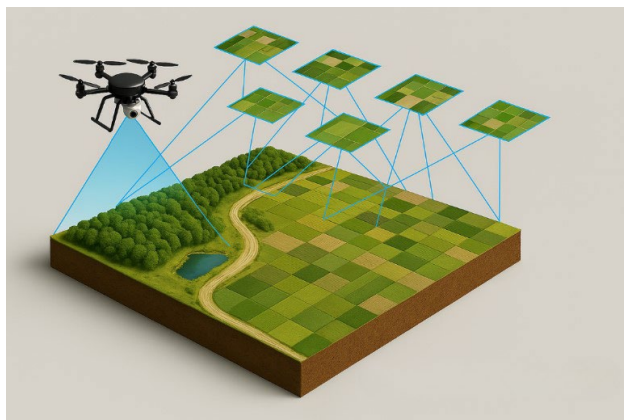
Geometriai információk

A geometriai információ minden olyan mérhető adatot magában foglal, amely a térbeli helyzet, méret, arány és forma meghatározására alkalmas. Ezeket az adatokat kvantitatív információknak is nevezzük. A fotogrammetria egyik alappillére éppen az, hogy a fényképek alapján térbeli koordináták, távolságok, területek, szögek és térfogatok meghatározhatók matematikai módszerekkel.

A leggyakoribb geometriai paraméterek:

- koordináta: az objektumok helyzetét meghatározó értékek egy meghatározott vetületi rendszerben (pl. EOVI, WGS84),
- távolság: két pont közötti egyenes vonalú hossz,
- szög: két egyenes vagy irány közötti hajlásszög (pl. lejtés, dőlés),
- terület: egy adott zárt alakzat felszíni kiterjedése (pl. lombkorona-felület, irtásrészlet),
- térfogat: háromdimenziós objektumok (pl. rönkfa, halom) becsült vagy számított térfogata,
- forma és alak: objektumok kontúrja, geometriai szimmetriája, arányai (62. ábra).

A geometriai mérések előfeltétele a képek pontos ismerete – beleértve a belső (fókusz távolság, torzítás) és külső (kamera helyzete, irányítása) orientációs elemeket. Ezek alapján a térbeli pontokat vissza lehet vetíteni valós térkoordinátákba. Az analóg korszakban ezt mechanikai-optikai eszközökkel, a digitális korban matematikai algoritmusokkal végzik.



62. ábra. Fotogrammetriai elemzés, forrás: Aero Laser 2025

Tematikus információk

A tematikus (kvalitatív) információk a képen ábrázolt objektumok tulajdonságaira vonatkoznak. Ezek nem közvetlenül mérhetők, hanem a megfigyelés, képi jellemzők és a képértelmezés (fotointerpretáció) révén következtethetők. A tematikus információk az objektumok típusát, anyagát, állapotát, színét vagy akár funkcióját is leírhatják.

Idetartoznak például:

- felszínborítás típusa: erdő, víz, beépített terület, kaszáló stb.,
- faj, vegetáció típusa: lombos vagy tűlevelű, természetes vagy telepített állomány,
- állapot: egészséges vagy károsodott, zárt vagy ritkult állomány,
- textúra: homogén vagy inhomogén képszerkezet, amely segít a kategorizálásban,
- szín és tónus: a spektrális információk alapján következtethető tulajdonságok.

A fotointerpretáció feladata, hogy a képeken található vizuális mintázásokat (szín, árnyalat, forma, textúra, környezet, elhelyezkedés) rendszerezze és tematikus osztályokba sorolja. A tematikus információ fontos szerepet játszik az erdőállapot-felmérésekben, természetvédelmi monitoringban és földhasználati osztályozásokban.

A geometriai és tematikus információk kapcsolata

A gyakorlatban a geometriai és tematikus információk szoros összefüggésben állnak. A tematikus értelmezés gyakran megelőzi a geometriai méréseket, hiszen tudnunk kell, hogy mit mérünk (pl. faegyed, úttest, víztest). Ugyanakkor a tematikus azonosítás pontosabbá válhat, ha geometriai viszonyokat (alak, méret, orientáció) is figyelembe veszünk.

Például egy digitális képen mért 20 m átmérőjű, kör alakú, sötétzöld objektum esetén a geometriai adatok alapján valószínűsíthető, hogy ez egy nagy lombkoronával rendelkező, idős faegyed – de csak a tematikus értelmezés révén tudjuk azonosítani, hogy ez például egy kocsányos tölgy.

A fotointerpretáció szerepe

A fotointerpretáció a fotogrammetria azon ága, amely kifejezetten a tematikus információk kinyerésére specializálódott. Ennek során az értelmező személy vizuálisan (vagy szoftveresen, automatikusan) felismeri az objektumokat és azok jellemzőit a kép alapján. A modern digitális fotointerpretáció gépi tanulási algoritmusokat, osztályozási szabályokat, indexeket és képstatistikát alkalmaz.

Fontos hangsúlyozni, hogy a fotointerpretáció nem zárja ki a geometriai mérést, de annak szerepe itt alárendeltebb: a cél a tartalom felismerése, nem pedig a térbeli pontosság maximalizálása.

A fotogrammetria kétféle alapinformációra épül: a geometriai és a tematikus adatokra. Előbbiek mérhetőek, kvantifikálhatóak, és a térbeli pozíciókat, távolságokat, szögeket, területeket, alakokat jellemzik. Utóbbiak értelmezést igényelnek: a kép alapján következtetünk az objektum tulajdonságaira, típusára, állapotára. A fotogrammetriai gyakorlat során mindkét típusú információra szükség van: a pontos mérésekhez és a megbízható értelmezéshez egyaránt.

4.4.2. Spektrális felbontás

A spektrális felbontás a műholdas távérzékelés egyik alapvető jellemzője, amely azt írja le, hogy a szenzor milyen finom bontásban képes érzékelni az elektromágneses spektrum különböző hullámhosszait. Másképp megfogalmazva: ez a paraméter határozza meg, hogy a műhold szenzora hány különálló, jól definiált hullámhosszszávbán (sáv = „band”) rögzíti a felszínről visszavert sugárzást.

A Földről visszaverődő elektromágneses sugárzás a látható fény (kb. 400–700 nm) mellett kiterjed az ultraióbolya (UV), közeli infravörös (NIR), rövidhullámú infravörös (SWIR), közepes infravörös (MIR), sőt, a hőinfravörös (TIR) és a mikrohullámú tartományokba is. A különböző felszíni anyagok és jelenségek – például növényzet, víztestek, talaj, városi burkolatok – sajátos spektró-radiometriai tulajdonságokkal bírnak, vagyis eltérő módon nyelik el, verik vissza vagy

bocsátják ki a különböző hullámhosszú sugarakat. A spektrális felbontás lehetővé teszi ezen sajátosságok elkülönítését és azonosítását.

Spektrális felbontás típusai

1. Pánkromatikus (pan):

- Egyetlen széles sávban (általában 450–800 nm között) mér.
- › Előnye: nagy térbeli felbontás (akár 0,3 m), de kevés színinformáció.
- Jellemző műholdak: WorldView, GeoEye.

2. Multispektrális szenzorok:

- Jellemzően 4–10 spektrális sávban mérnek (pl. kék, zöld, vörös, NIR).
- Kiegyensúlyozott kompromisszum a spektrális és térbeli felbontás között.
- Példa: Sentinel-2 (13 sáv), Landsat 8 (11 sáv).
- Alkalmas például mezőgazdasági monitoringra, erdészeti elemzésekre, víztestek vizsgálatára. Manapság széleskörűen elterjedt és alkalmazott típusa a fotogrammetriai szenzoroknak.

3. Hiperspektrális szenzorok:

- Több mint 100 szűk, egymást átfedő sávban mérnek.
- Lehetővé teszik az anyagazonosítást, mivel minden felszíni elem egyedi spektrális „ujjlenyomattal” rendelkezik.
- Jellemző spektrális felbontásuk akár 5–10 nm.
- Példák: EnMAP (Németország), PRISMA (Olaszország), jövőben: CHIME (ESA).
- Alkalmazás: geológia, precíziós mezőgazdaság, környezeti kockázatelemzés, környezeti szennyezésetektálás.

Spektrális felbontás kvantitatív értelmezése

A spektrális felbontás értékét két módon szokás megadni:

- **Sávszám** (pl. 4, 13, 242) – minél több, annál finomabb a spektrális bontás.
- **Sávszélesség** (nm) – az adott sáv hány nanométeres tartományt fed le.
- Például:
 - › Sentinel-2: a vörös sáv ~20 nm szélességű.
 - › PRISMA hiperspektrális sávjai: ~10 nm körüliek.

A magas spektrális felbontás előnye, hogy lehetővé teszi a finom spektrális különbségek detektálását, így például:

- erdőgazdálkodásban a növényfajok megkülönböztetését,
- a víztestek lebegőanyag-tartalmának vagy klorofillkoncentrációjának becslését,
- szennyeződések vagy bányászati lerakódások felismerését,
- talajtípusok vagy ásványi anyagok azonosítását.

Hátránya viszont, hogy a nagy sávszám és sávszűkítés gyakran alacsonyabb térbeli felbontással és nagyobb adattárolási igénnyel jár. A hiperspektrális rendszerek például jellemzően 10–30 méteres térbeli felbontásúak.

A spektrális felbontás kulcsszerepet játszik abban, hogy a műholdas szenzor milyen mértékű spektrális információt képes érzékelni és feldolgozni. A multi-spektrális rendszerek lehetővé teszik az alapvető földhasználati típusok elkülönítését, míg a hiperspektrális rendszerek már anyagazonosításra és folyamatok finomabb modellezésére is alkalmasak. A megfelelő spektrális felbontás kiválasztása mindig az alkalmazási céltól, az elemzendő objektumoktól és a feldolgozási lehetőségektől függ.

4.4.3. Földi, légi és űrfotogrammetria

A fotogrammetria rendszerezése többféle szempont alapján lehetséges, azonban az egyik leggyakrabban alkalmazott felosztás a felvétel készítésének helye és módja szerint történik. Ez alapján három fő kategóriát különböztetünk meg: földi, légi és űrfotogrammetria. Mindhárom esetben közös, hogy képi alapú információgyűjtést alkalmazunk, azonban az alkalmazott eszközök, a geometriai feltételek és az elérhető eredmények jelentősen eltérnek.

Földi fotogrammetria

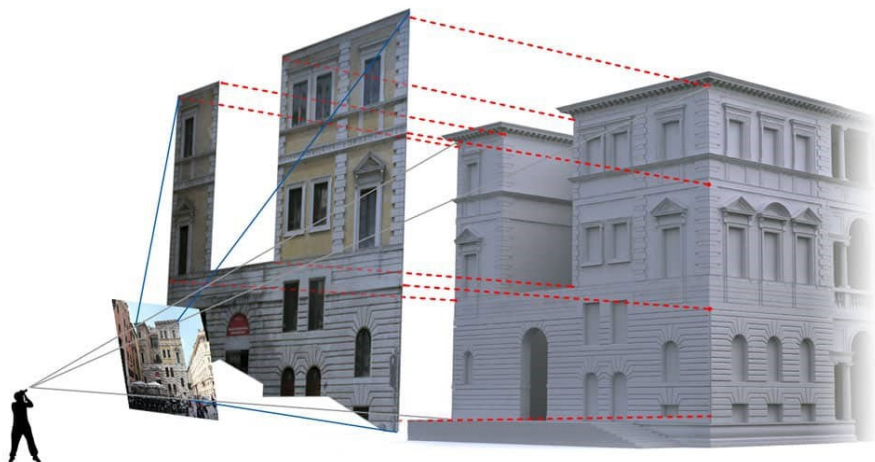
A földi fotogrammetria (más néven területi vagy klasszikus fotogrammetria) olyan eljárás, ahol a felvétel készítése földi álláspontból történik, és az objektum is a felszínen vagy ahhoz közel helyezkedik el. A felvételi tengely jellemzően vízszintes vagy enyhén döntött, ellentétben a légi felvételek jellemzően függőleges irányával.

Ez a módszer különösen alkalmas épületek, műemlékek, bányák, sziklafalak, fák, fasorok, állóvizek, infrastrukturális létesítmények rögzítésére, mivel közelről, nagy pontossággal és részletgazdagsággal készíthető el a leképezés (63. ábra).

A földi fotogrammetria altípusai a felvételi távolság szerint:

- Mikrofotogrammetria: a képkészítés mikroszkópon keresztül történik (pl. sejtszintű struktúrák).
- Makrofotogrammetria: a fényképezési távolság néhány centiméter, alkalmas apró tárgyak (pl. rovarok, falevél) vizsgálatára.
- Közelfotogrammetria (Close Range Photogrammetry): a fényképezés 1–200 méter közötti távolságból történik. Tipikusan ilyen például egy faegyed vagy egy épület leképezése drónnal vagy kézi kamerával.
- Távoli földi fotogrammetria: domb- és hegyvidéki térképezés esetén a kamera-tárgy távolság akár 1000–1500 méter is lehet.

Különleges esetekben (pl. asztrofotogrammetria) a kamerát nem földi objektumra, hanem az égboltra, csillagokra irányítják, és célja a csillagászati objektumok térbeli helyzetének meghatározása.



63. ábra. Földi fotogrammetria példája, forrás: Microgeo 2025

Légi fotogrammetria

A légi fotogrammetria során a felvételek valamilyen légi járműről – repülőgépről, drónról, motoros sárkányrepülőről vagy akár hőlégballonról – készülnek. A felvételezés történhet függőleges (nadir) irányban, amely az erdészeti felde-
rítésre a leginkább alkalmas (64. ábra), vagy ferde tengelyű, amely gyakrabban alkalmazott vizuális vagy városépítészeti dokumentációs célokra (63. ábra).

A repülési magasság alapján három típust különböztetünk meg:

a) Kis magasságú légi fotogrammetria (100–3000 m):

- nagy részletességű felvételek (akár 1–30 cm/pixel),
- alkalmas: belterületi térképezés, pontos ortofotók, fasorok, víztestek, infrastruktúra,
- általában drónos felmérések tartoznak ebbe a kategóriába.

b) Közepes magasságú légi fotogrammetria (3000–5000 m):

- közepes méretarányú felvételek (0,5–1 m/pixel),
- alkalmas: topográfiai térképek, községi szintű területhasználati térképek.

c) Nagy magasságú légi fotogrammetria (5000–15 000 m):

- kis felbontású, de nagy területet lefedő képek,
- fő cél: felderítés, országos vagy regionális térképezés, gyors változásdetektálás (pl. kárfelmérés).

A légi fotogrammetria előnye, hogy széles kiterjedésű területek leképezésére alkalmas rövid idő alatt. A modern GPS/IMU-rendszerek segítségével a felvételek pontos orientációs paraméterekkel egészülnek ki, megkönnyítve az automatikus ortorektifikálást és pontfelhő-generálást.



64. ábra. Fásor elemzése drónos felméréssel, forrás: EnviroSense 2025

Űrfotogrammetria

Az űrfotogrammetria a fotogrammetria azon ága, amelyben a képek űreszközökről, több mint 150 km-es magasságból készülnek. Idesorolhatók a különféle műholdak optikai szenzorai által készített felvételek. Az űrfelvételek jellemzően kis méretarányú térképek készítésére alkalmasak, azonban nagy előnyük az állandó, globális lefedettség és az idősoros vizsgálatok lehetősége.

Jellemzői:

- kis térbeli felbontás (pl. MODIS: 250–1000 m/pixel) vagy nagy felbontású rendszerek (pl. WorldView-3: akár 30 cm/pixel),
- nagy időbeli felbontás (pl. Sentinel-2: 5 nap),
- széles spektrális érzékenység (multispektrális, hiperspektrális, infravörös).

Az űrfotogrammetria különösen alkalmas:

- regionális erdőborítás-vizsgálatra,
- változásdetektálásra (pl. tarvágások, tüzek),
- nagy területek tematikus térképezésére,
- globális környezeti monitoringra.

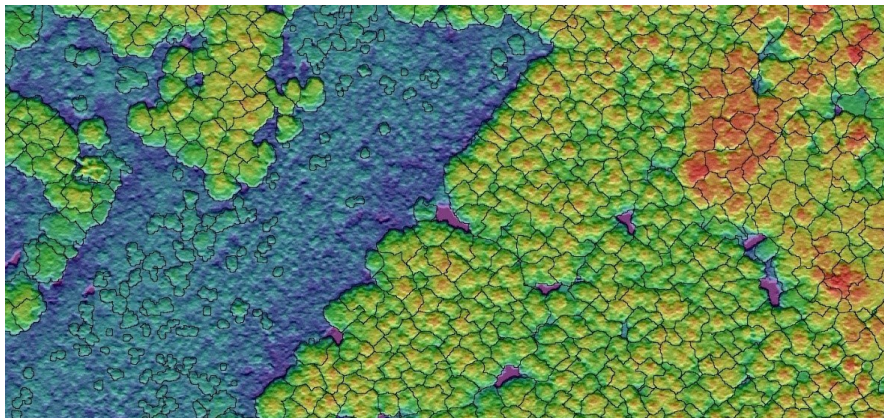
A térbeli pontosság rendszerint gyengébb, mint a földi vagy légi fotogrammetriában, viszont a lefedett terület és a költséghatékonyság kiemelkedő (21. táblázat).

Alkalmas az erdészeti térképezésre, fatömeg-, biomasszabecslésre (65. ábra).

21. táblázat. Összegző táblázat a fotogrammetria típusairól

Fotogrammetria típusa	Felvétel helye	Távolság/ magasság	Alkalmazás típusa	Példák
Földi	Földi álláspont	néhány cm – ~1500 m	épületek, fák, tárgyak dokumentálása	műemlékfelmérés, erdőleltár
Légi	Repülő, drón	100 – 15000 m	topográfia, ortofotó, tájhasználat, felderítés	drónos ortofotó, katonai térkép
Űrfotogrammetria	Műhold	>150 km	globális megfigyelés, erdőborítás, időbeli elemzés	Sentinel, Landsat, MODIS

A fotogrammetria különböző módszerei a felvétel helyétől, távolságától és céljától függően más-más erősségekkel és alkalmazási területekkel rendelkeznek. A földi fotogrammetria kiváló részletességű dokumentációt nyújt kis területen, a légi fotogrammetria gyors és pontos térképezést tesz lehetővé regionális szinten, míg az űrfotogrammetria globális skálán biztosít átfogó adatokat, különösen idősoros elemzésekhez. A korszerű téradatgyűjtés mindhárom típus ötvöztetését alkalmazza a hatékony és precíz információszerzés érdekében.



65. ábra. *Fatömeg, térfogatszámítás távérzékeléses eszközökkel, forrás: EnviroSense 2025*

4.4.4. Síkfotogrammetria és térfotogrammetria

A fotogrammetriai feldolgozás módszereinek osztályozása során alapvető különbséget tehetünk aszerint, hogy a kiértékeléshez egyetlen képet, vagy két, megfelelő átfedéssel készült képet használunk. Ennek megfelelően két fő típust különböztünk el: síkfotogrammetriát és térfotogrammetriát.

Síkfotogrammetria

A síkfotogrammetria esetében a kiértékeléshez csak egyetlen fényképet használunk. Mivel a térbeli (háromdimenziós) információ nem áll rendelkezésre, az ilyen eljárás kétdimenziós információk meghatározására alkalmas: vízszintes irányú távolságok, területek, formák, alakzatok kimérése történhet a képen.

Ez a módszer egyszerűbb, gyorsabb, és kevesebb adatot igényel, azonban nem képes magassági információk meghatározására, azaz nem rekonstruálható vele a felszín vagy az objektumok térbeli szerkezete. Ez különösen problémát okozhat dombvidéki vagy hegyvidéki területeken, ahol a perspektivikus torzítás jelentős lehet.

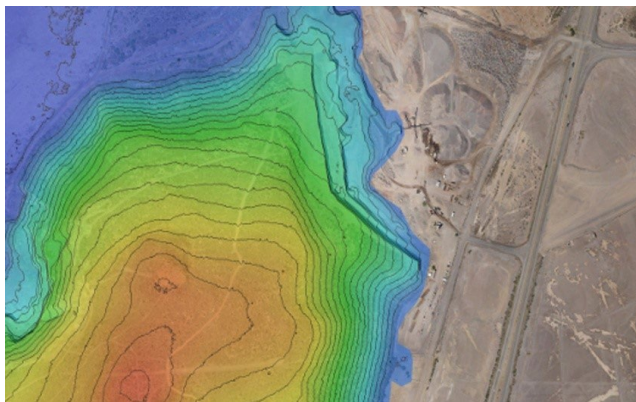
A síkfotogrammetria során gyakran alkalmazzuk a képátalakítási eljárásokat, amelyek célja a geometriai torzulások korrigálása és az adatok térinformatikai használhatóságának javítása. Az egyik legfontosabb képátalakítási eljárás az ortorektifikálás, amelynek eredménye az ortofotó.

Ortofotó és ortofoszkópia

Az ortofotó egy olyan speciálisan átalakított légi felvétel, amely geometriailag helyes, torzításmentes, és így mérhető (mint egy térkép). Az ortofotó előállítása során a képi torzításokat – beleértve a domborzati eltérések, a kamera dőlése és a szenzorhibák által okozott torzításokat – korrigáljuk, így az elkészült kép ortogonális vetületként tekinthető a terepfelületről.

A modern szakirodalomban egyre gyakrabban használják az ortofoszkópia kifejezést, amely tágabb fogalom: magában foglalja a síkfotogrammetriai képátalakításokat, valamint az ortofotó létrehozásának teljes eljárásláncát.

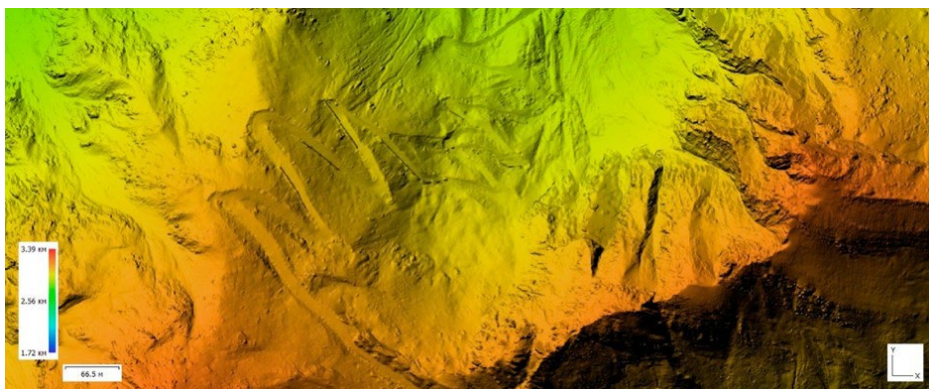
A síkfotogrammetria tehát nem alkalmas magasságok, térfogatok, domborzati viszonyok meghatározására, azonban rendkívül hasznos térképi háttérkép előállításához, felszínborítások digitális térképezéséhez vagy területhasználati osztályozáshoz (66. ábra).



66. ábra. Síkfotogrammetria illusztrálása, forrás: Technosky 2025

Térfotogrammetria (kétképes fotogrammetria)

A térfotogrammetria – más néven sztereofotogrammetria vagy modellfotogrammetria – olyan eljárás, amelyben két (vagy több) megfelelő átfedéssel készült felvétel alapján történik a feldolgozás. A két képből, amelyek kis szögeltéréssel, egymástól meghatározott távolságra készülnek ugyanarról az objektumról, térhatás hozható létre, amely lehetővé teszi a háromdimenziós információk (X, Y, Z koordináták) kinyerését (67. ábra).



67. ábra. Térfotogrammetria illusztrálása, forrás: Vestnik–Glonass 2025

A sztereoszkopikus hatást az emberi látásmód elvére alapozva érzük el: mivel két szemünk kissé eltérő szögből látja ugyanazt a tárgyat, az agyunk háromdimenziós képpé alakítja az információt. Ugyanez az elv alkalmazható a fotogrammetriában: ha két fényképet megfelelő eszközökkel (sztereoszkóp, digitális megjelenítés, számítógépes algoritmus) összevetünk, valós térmodell rekonstruálható.

A térfotogrammetria fő előnyei:

- magassági információk pontos meghatározása (pl. terepmodell, objektum-magasság),
- 3D térképezés: topográfiai térképek, domborzatmodellek (DTM), felszínmodellek (DSM),
- térfogatszámítások, pl. fakészlet, halmazatok, kőfejtők, földmunkák esetén,
- pontos digitális felszínmodellek (DOM, DEM) készítése,
- vizualizációs célok, pl. városmodellek, erdőszerkezet 3D-megjelenítése.

A térfotogrammetria alkalmazható földi, légi vagy műholdas felvételekkel is, de leggyakoribb formája a légi sztereopárok használata. A modern gyakorlatban drónokkal végzett többlépéses átfedéses felvételsorozatok és az azokból előállított pontfelhők és 3D-hálók képezik az alapját a térbeli elemzéseknek.

A fotogrammetria egyik legfontosabb elvi felosztása aszerint történik, hogy egyetlen vagy több átfedő képet használunk az információkinyeréshez. Az egyképes (sík) fotogrammetria alkalmas kétdimenziós mérésekre és képátalakításokra (pl. ortofotó), míg a kétképes (tér) fotogrammetria a valós háromdimenziós térbeli információ kinyerését teszi lehetővé. Az alkalmazás céljától, a terület domborzatától, valamint a szükséges pontosságtól függően kell választani a megfelelő eljárásmodot.

4.5. Fotogrammetriai eljárások

A fotogrammetriai kiértékelés módszerei a technológiai fejlődéssel párhuzamosan jelentősen átalakultak az elmúlt évtizedekben. A képi információ feldolgozásának és értelmezésének módja szerint a fotogrammetria három fő kiértékelési eljárást különböztet meg: az analóg, analitikus és digitális módszereket. Mindhárom megközelítés a kép alapján történő geometriai információkinyerésen alapul, de a kiértékelés eszközei, matematikai alapjai, pontossága és eredménytermékei különböznek.

4.5.1. Analóg fotogrammetriai kiértékelés

Az analóg fotogrammetria a fotogrammetriai kiértékelés történetileg elsőként megjelenő formája, amelyben az eredeti analóg képek (például celluloid vagy papír fényképek) felhasználásával, optikai vagy mechanikai elven működő eszközökkel rekonstruálják a felvétel készítésekor fennálló sugárnyalábokat.

A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy egy optikai mérőműszer (pl. sztereoplotter) segítségével a fényképen ábrázolt objektum térbeli helyzetét a fénytörés és a geometriai leképezés törvényei alapján visszaállítják. Az eszköz fizikailag is modellezi a fényképezés geometriáját, tehát a vetítési viszonyokat nem számítással, hanem mechanikai optikával állítják elő (68. ábra).

Ez az eljárás a múlt század közepéig széles körben használt volt, különösen topográfiai térképezés, katonai felderítés és műemlékvédelem területén. Az analóg módszer pontossága korlátozottabb, erősen függ a mechanikai eszközök beállításától és a kezelő szakértelmétől.



68. ábra. Optikai-mechanikus sztereoplotter, forrás: Anon 1992

4.5.2. Analitikus fotogrammetriai kiértékelés

Az analitikus fotogrammetria az 1960-as évektől kezdődően jelent meg, a számítástechnika fejlődésének köszönhetően. Ebben a módszerben szintén analóg fényképek szolgálnak alapul, azonban a feldolgozás matematikai modelleken alapszik, amelyek segítségével a vetítési geometriát egyenletek formájában írjuk le.

A fényképen mért képkoordináták és a terepi geodéziai koordináták közötti kapcsolatot vetítési egyenletek (pl. központi vetítési transzformáció) írják le, amelyek alapján a program matematikailag kiszámítja a pontok térbeli helyzetét. Az analitikus módszerek alkalmazása során minden vetítősugar egyenlete felírásra kerül, és a térbeli helyreállítást a sugarak metszéspontjai alapján határozzuk meg.

Ez az eljárás nagy pontosságot tesz lehetővé, ezért ma is alkalmazzák olyan esetekben, ahol szubmilliméteres pontosságra van szükség, például ipari metrologia, restaurálás vagy örökségvédelem területén.

4.5.3. Digitális fotogrammetriai kiértékelés

A digitális fotogrammetria a legkorszerűbb megközelítés, amelyben a feldolgozás már teljes mértékben digitális képadatokon történik. A fénykép raszteres formátumban, pixelhálóként áll rendelkezésre, és a képi pontok helyzetét pixelek (képelemek) koordinátái határozzák meg, nem analóg képkoordináták.

A képi információ feldolgozása, a pontazonosítás, az orientációs műveletek és a térbeli pontszámítás mind algoritmusok által vezérelt, automatizált módon történik. A szoftverek mesterséges intelligenciát, gépi tanulást, textúraelemzést és pontfelhő-generálást alkalmaznak a háromdimenziós térrekonstrukcióhoz.

A digitális fotogrammetria lehetővé teszi:

- az automatikus képpont-megfeleltetést (image matching),
- sűrű pontfelhők generálását,
- ortofotók és 3D-modellek előállítását,
- felszínmodellek (DEM, DTM) készítését,
- idősoros elemzést és térinformatikai integrációt (GIS).

A digitális módszerek alkalmazása ma már alapértelmezett a drónalapú felmérésekben, műholdképek feldolgozásában, városi modellezésben, és egyre inkább az erdészeti erőforrás-gazdálkodásban is.

A különböző fotogrammetriai eljárások eredményei három fő kategóriába sorolhatók, ahogy ez a 21. táblázatban részletezve van.

4.5.4. UAV-fotogrammetriai kiértékelés

Az elmúlt évtizedben a fotogrammetriai technológiák egyik legdinamikusabban fejlődő területe az UAV-fotogrammetria vagy más néven drónfotogram-

metria lett. Bár a klasszikus fotogrammetria történetében az analóg és digitális módszerek hosszú ideig domináltak, a kis méretű, könnyen telepíthető és precíziós szenzorokkal felszerelt UAV-rendszerek mára külön diszciplínává váltak, amely alapjaiban változtatta meg az erdészeti felmérések gyakorlatát. A drónok lehetővé teszik, hogy a terepen hagyományosan csak napok, hetek alatt végzett mérések digitális, nagy felbontású, térbeli modellé váljanak, így a szakemberek gyorsabban és pontosabban készíthetnek döntéstámogató adatokat az erdőgazdálkodás és természetvédelmi kezelések számára.

Technikai jellemzők és működési elv

Az UAV-fotogrammetria legfontosabb előnye a nagyon nagy térbeli felbontás, amely akár 1–10 cm/pixel szintet is elérhet, szemben a hagyományos repülőgépes vagy műholdas felvételekkel, amelyek 30–50 cm vagy annál nagyobb felbontással dolgoznak. Ez a finomság lehetővé teszi az egyedi faegyedek és koronák vizsgálatát, ami a modern erdőgazdálkodásban kritikus információ.

A repülési terv precíz meghatározása révén a fedettség és a képátfedés kontrollálható, így a háromdimenziós pontfelhő létrehozása során minimalizálhatóak az adatvesztések. A fotogrammetriai szoftverek automatikus pontfelhőből kiinduló koronasegmentálási algoritmusokat alkalmaznak, például dallamalapú vagy gépi tanulásra épülő módszereket, amelyek képesek elkülöníteni az egyes fákat és becsülni a lombkorona térfogatát, magasságát és kiterjedését.

Erdészeti alkalmazások

A drónfotogrammetria szerepe az erdőszetben rendkívül sokrétű. A fakoronák egyedi felismerése (Individual Tree Detection, ITD) lehetővé teszi a faegyedszintű adatgyűjtést, amely eddig csak időigényes terepi felmérésekkel volt lehetséges. Az állománystruktúra pontos meghatározása, a lombkorona-sűrűség, magasság és kiterjedés vizsgálata lehetővé teszi az üzemtervi döntések, például a ritkítás vagy újratelepítés optimális ütemezését (69. ábra).

A drónokkal végzett tarvágás és kitermelés pontos területmérése segíti a gazdálkodási tervek aktualizálását és a fakitermelés nyilvántartását, miközben a gazdasági és környezeti hatások pontosabban értékelhetők. A felújulási vizsgálatoknál a fiatal csemeték, sarjadások és újratelepített állományok nyomon követése valós időben történhet, így a regenerációs folyamatok beavatkozásra szoruló pontjai azonnal azonosíthatóak.

A lombtömeg- és biomasszabecslés szintén kiemelt jelentőségű felhasználási terület. A pontfelhőből és a multispektrális szenzorokból származó adatok kombinálásával a kutatók és erdőmérnökök képesek modellezni a fák szénttartalmát és növekedési rátáit, amely alapja lehet a szénmegkötési számításoknak és a fenntartható erdőgazdálkodási stratégiáknak.

Különösen meredek terepen, ahol a hagyományos felmérések balesetveszélyesek és időigényesek lennének, az UAV-fotogrammetria állékonyági vizsgálatokat is lehetővé tesz, például faállomány sűrűségének vagy talajerózió-kockázatnak a becslésére. Ezáltal a drónok hozzájárulnak a biztonságos és tudományosan megalapozott erdőgazdálkodáshoz.

Integráció más adatrendszerekkel

A modern erdészeti gyakorlatban az UAV-fotogrammetria nem önálló adatforrás, hanem gyakran integrált részét képezi a távérzékelési és GIS-alapú munkafolyamatoknak. Például a drónfelvételeket kombinálhatjuk Landsat, Sentinel-2 vagy LiDAR adatokkal, hogy a felbontást, térbeli lefedettséget és spektrális információt optimalizáljuk. Az ilyen integrált rendszerek segítségével a kutatók és hallgatók rövid idő alatt képesek komplex ökológiai modelleket, biomasszaszámításokat és változásdetekciós elemzéseket készíteni.

Gyakorlati példák a hallgatói és kutatói munkában

Az erdészmérnöki képzésben az UAV-fotogrammetria lehetőséget nyújt a hallgatóknak arra, hogy a terepi ismereteket digitális adatokkal egészítsék ki. Tipikus labor- és terepgyakorlatok:

- fakoronák és lombkorona-sűrűség mérése UAV-felvételekből,
- tarvágás, csemetekert vagy újraterelítés térképezése,
- tűzkár vagy szúkárosodás térbeli kiterjedésének dokumentálása,
- pontfelhőalapú lombtömeg- és biomasszabecslés készítése,
- meredek hegyoldalak stabilitásának felmérése és állománytervezés.



69. ábra. Erdőrészlet felvételezése 2025. 11. 18-án
DJI Mavic 3M-mel, forrás: saját fotó

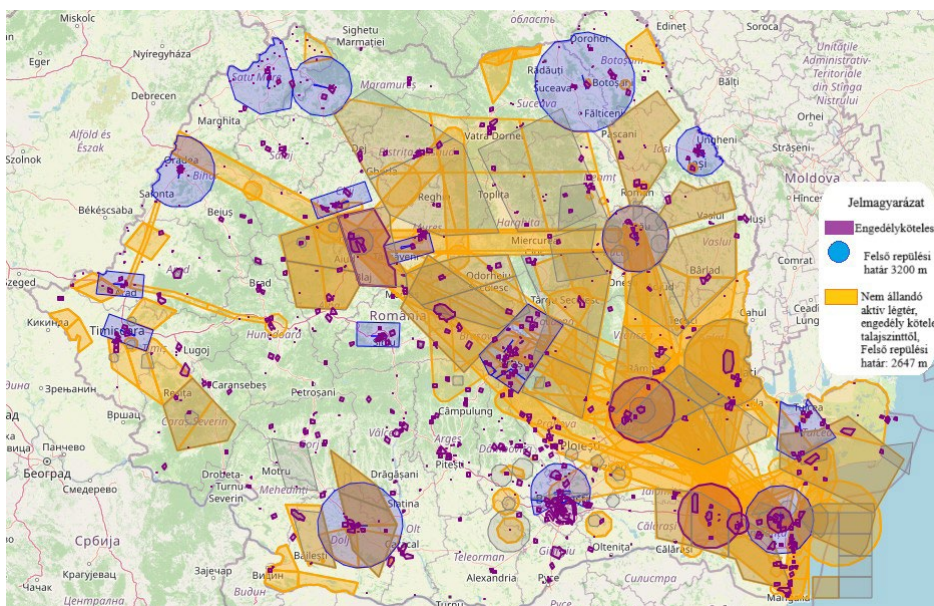
A drónok lehetővé teszik, hogy a hallgatók az adatok begyűjtésétől a térképezésen át a kiértékelésig a teljes folyamatot megtapasztalják, miközben valós adatokat és modelleket kapnak, amelyek közvetlenül kapcsolódnak az erdőgazdálkodás mindennapi döntéseihez (69. ábra).

Az UAV használatának korlátozásai Romániában

Romániában a drónhasználat az EU közös uniós szabályain (EASA) túlmenően nemzeti szabályok alapján is korlátozott, különösen a légi közlekedési és biztonsági szempontok miatt. A legfontosabb pontok:

- Regisztráció és kategorizálás: minden drónüzemeltetőnek regisztrálnia kell magát és a gépet az AACR-nél (Román Polgári Légügyi Hatóság), kivéve a játék drónokat. A drónokat tömegük (C0–C4) és céljuk alapján kategorizálják.
- Pilótaképzések: a 250 g feletti kategóriájú drónokhoz kötelező az A1/A3 online képzés, míg magasabb kategóriákhoz (pl. A2) gyakorlat is szükséges.
- Zónák és repülési korlátozások: a repülés maximum 120 m magasságig engedélyezett, kizárólag VLOS-feltételekkel. Tiltott a repülés sűrűn lakott területek, stadionok, börtönök, katonai bázisok és fontos infrastrukturális létesítmények felett. A Flightplan Romatsa interaktív térkép szerint ezeken felül speciális korlátok vonatkoznak például légvédelmi vagy katonai gyakorlóterületekre.
- Engedélyek és értesítések: a korlátozott és tiltott zónákban engedély szükséges – többek között az AACR-től és a Honvédelmi Minisztériumtól, mielőtt légi felvételt készítenénk.
- Biztosítás és életkor: 20 kg feletti drónokhoz kötelező a felelősségbiztosítás. A pilóta minimum életkora 16 év (kivéve bizonyos, legkisebb tömegű alosztályokat).
- Biztonsági és adatvédelmi szabályok: FPV-repülés esetén szükséges segédpilóta, és tilos repülni részeg állapotban, vagy életet, egészséget veszélyeztető módon. Továbbá, magánszemélyek védelme érdekében, tilos személyes adatok gyűjtése engedély nélkül.

Összefoglalva, Romániában az amatőr és professzionális drónhasználatra vonatkozó szabályozás az EU irányelveivel összhangban határozza meg a drónok bejegyzését, kategorizálását, pilótaképzését és a légterek korlátozásait. Ezek a korlátozások különösen fontosak lehetnek erdészi, térképészeti vagy természetvédelmi célú felhasználásnál, mivel csak megfelelő engedéllyel és előzetes egyeztetéssel végezhető drónos adatszerzés bizonyos térségekben (70. ábra).



70. ábra. Légtéri korlátozások UAV-repülésekre vonatkozóan, forrás: ROMATSA 2025

4.5.5. Integrált LiDAR-fotogrammetriai kiértékelés

A lézerszkennelés – más néven lézeres letapogatás vagy angolul LiDAR (Light Detection and Ranging) – az aktív távérzékelés egyik legnagyobb hatékonyságú és legdinamikusabban fejlődő ága (22. táblázat). Működésének alapját a pásztázó lézersugár adja, amely visszaverődésének ideje és szöge alapján rendkívül pontos térbeli koordináták nyerhetők a vizsgált objektumok felületéről. A technológia egyik legfontosabb eredménye a háromdimenziós pontfelhő, amely nagy sűrűségű, strukturált információt szolgáltat a földfelszínről, a növényzeti rétegekről, a mesterséges objektumokról és azok viszonyairól. A LiDAR-adatok ezzel együtt nem csupán térképek előállítására, hanem elemzések, számítások és 3D-modellek alapjául is szolgálnak.

A lézeres távmérés elsődleges alkalmazása az űrkutatásban jelent meg az 1960-as évek elején. A technológia fejlődése a kilencvenes években vett nagy lendületet, amikor a globális helymeghatározó rendszerek (GPS), a gyorsabb számítógépes feldolgozókapacitás, valamint az inerciális navigációs rendszerek (IMU) együttes alkalmazása révén lehetővé vált, hogy a légi platformokra szerelt szkennerek a földfelszínről, növényzetről vagy épített objektumokról gyors és pontos adatgyűjtést végezzenek. A lézerszkennelés áttörése a térinformatika és a geodézia mellett az erdészetben is új lehetőségeket nyitott.

Az erdészeti gyakorlatban a légi lézerszkennelés különösen előnyös, mivel a pásztázó sugár a lombkoronán részben vagy teljesen áthatolva képes elérni a talajfelszínt. Ezáltal lehetővé válik a domborzat pontos feltérképezése még zárt erdőállomány esetén is, amit a hagyományos fotogrammetria gyakran nem tesz lehetővé. A reflektált jelek egyúttal információt hordoznak a növényzeti szintekről is, így az egyes fák magassága, záródása, koronaszintje vagy akár térfogata is meghatározhatóvá válik. A térbeli pontfelhők alapján közvetlenül létrehozható digitális domborzatmodell (DTM), felszínmodell (DSM) és normalizált felszínmodell (nDSM), amelyek segítségével pontos dendrometriai és térszerkezeti információk nyerhetők.

A technológia folyamatos fejlődése során a lézerszkennerek mérete és tömege is jelentősen csökkent. Az ezredfordulót követően megjelentek a földi, állványra szerelhető változatok, amelyek ipari, műemlékvédelmi és építészeti célokra kínáltak kiváló megoldásokat. A földi szkennereket alkalmazzák közlekedési létesítmények, alagutak, hídszerkezetek, valamint természeti objektumok, például fák, fatörzsek egyedi modellezésére. Ezek a rendszerek különösen nagy sűrűségű és részletgazdag pontfelhőt eredményeznek, amely lehetővé teszi a bonyolult geometriájú felszínek pontos rekonstrukcióját.

A hordozhatóság további fejlődésével megjelentek a gépjárművekre szerelhető mobil lézerszkennerek, majd 2015-től az UAV-platformokra optimalizált könnyű, energiatakarékos egységek is elérhetővé váltak. Ezek új távlatokat nyitottak a nehezen megközelíthető, lejtős vagy szerteágazó erdőrészek hatékony feltérképezésében. Az utóbbi években pedig már kézi lézerszkennerek is elérhetők, amelyeket egy operátor gyalogosan is használhat, például barlangokban, erdőszegélyeken vagy terepi mintavétel során. Ezeket a kis méretű, LiDAR-alapú szenzorokat már egyes tabletmodellekbe is beépítik, elsősorban térképezésre vagy 3D-modellezésre szolgáló alkalmazások számára.

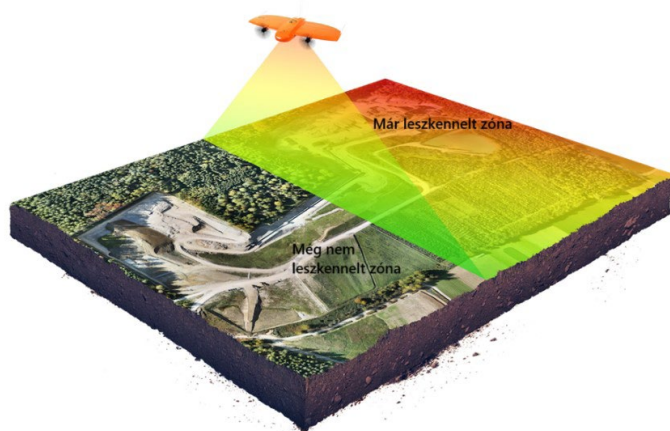
A lézerszkennelés alkalmazási területe ma már messze túlnőtt az eredeti topográfiai célokon. Használják építészetben, műemlékvédelemben, bányászatban, vízügyekben, agrárkutatásban, erdőtervezésben, környezeti monitoringban, valamint biztonság- és haditechnikai célokra is. Az önvezető járművekbe integrált lézerszkennerek valós időben érzékelik a jármű környezetét, felismerik a közlekedési helyzeteket és észlelik az akadályokat. Mindezek mellett a fogyasztói szegmensben is megjelent a technológia, ahol például épületmodellezésre, játékfejlesztésre vagy belső térfelmérésre használják.

Az erdészetben a lézerszkennelés – különösen a légi és UAV-alapú LiDAR – ma már nélkülözhetetlen eszközzé vált a nagy pontosságú domborzat- és állománymodellezéshez. Egyetlen felméréssel olyan mennyiségű és minőségű adat gyűjthető, amely korábban hosszú terepmunkát igényelt volna. Ennek köszönhetően a faegyedek pontos térbeli pozíciója, törzsmagassága, záródása vagy a lombkorona térfogata is számszerűsíthető, továbbá térképezhetők azok az állományrészek, amelyek gyérítést, egészségügyi beavatkozást vagy szerkezetalakítást igényelnek.

A lézerszkennerek tehát nem csupán az adatgyűjtést gyorsítják fel, hanem új szintre emelik a térbeli adatértékelés lehetőségeit is, hozzájárulva egy pontosabb, objektívebb és tudományosan megalapozott erdőgazdálkodási gyakorlat kialakításához.

Alapfogalmak a lézerszkennelés fizikájából és működéséből

A lézerszkennelés mögötti technológia alapját a lézer, vagyis az irányított elektromágneses sugárzás adja. A lézersugár több szempontból is különleges: hullámhossza precízen meghatározott, terjedési sebessége ismert, emellett pedig egy irányban, keskeny és jól fókuszált nyalábként terjed, amely pontos távmérések végzésére teszi alkalmassá. A távérzékelésben – különösen a földfelszín és a növényzet vizsgálatában – jellemzően a közeli infravörös tartományban működő lézerek alkalmazása terjedt el, mivel ezek hullámhosszai kedvezőek a visszaverődéshez és a célobjektumok detektálásához (71. ábra).

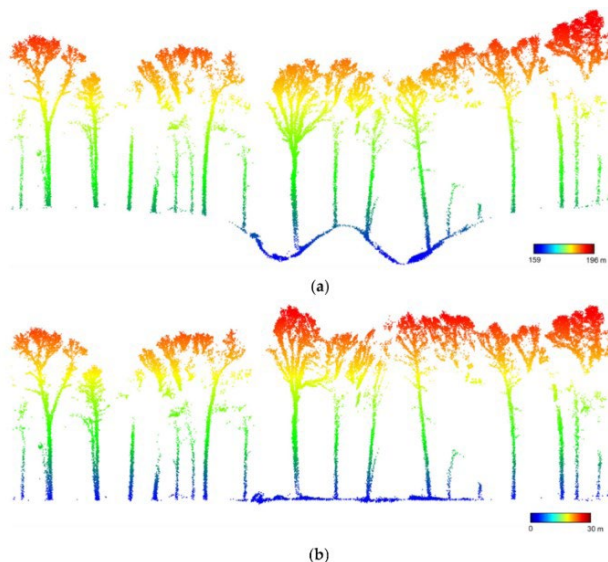


71. ábra. Lézerszkennelés folyamata, forrás: Anon 2024

A lézerszkennerek működési elve a távmérésen alapul: a műszerből kibocsátott lézernyaláb a célfelületről – például talajról, lombkoronáról vagy épített szerkezetről – visszaverődik, majd visszaérkezik az érzékelőbe. A kibocsátás és a beérkezés közötti időintervallum, azaz az úgynevezett futásidő alapján pontosan kiszámítható a vizsgált objektum távolsága. Más mérési technológiák esetén – például fázismérés – nem az időt, hanem a beérkező hullám fáziseltolódását értékelik, de a cél ugyanaz: meghatározni a távolságot. Ha a kibocsátott sugár előre definiált vízszintes és magassági szögtartományban terjed, akkor a távolságadatokat térbeli koordinátákká lehet konvertálni, így háromdimenziós térbeli pontfelhő keletkezik.

A térbeli felbontást és adatsűrűséget meghatározza, hogy a lézerszkennер egy másodperc alatt hány impulzust képes kibocsátani. A modern műszerek már 500 000 és 5 000 000 közötti lézerimpulzust bocsátanak ki másodpercenként, ami elképesztően részletes térképezést tesz lehetővé. A lézerforrás általában fixen rögzített a műszerházban, a pásztázást pedig egy forgó tükör vagy prizma biztosítja, amely a lézernyaláb irányát változtatja. Az utóbbi időszakban azonban egyre elterjedtebbek a szilárdtest-technológiát alkalmazó lézerrendszerek, amelyek nem tartalmaznak mozgó alkatrészt, így megbízhatóságuk és élettartamuk is nőtt.

A lézernyaláb terjedése során természetes módon szóródik, így távolodva a kibocsátás helyétől az átmérője is növekszik. Egy repülőgépről indított lézersugár a földfelszín elérve akár tenyérnyi foltban szóródhat szét. Ez azt is jelenti, hogy a nyaláb több, különböző távolságban lévő felületet is elérhet – például faágat, levelet, illetve a talajt és domborzati viszonyokat –, ami több, egymástól eltérő visszaverődést eredményezhet. Az ilyen többvisszaverődéses jelek elemzése különösen értékes az erdészeti alkalmazásokban, mivel lehetővé teszi a faállomány rétegeinek (lombkorona, törzs, domborzati felszínváltozások) szétválasztását és külön kezelését (72. ábra).



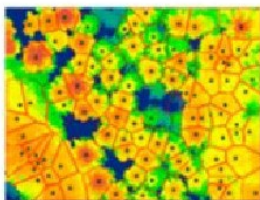
72. ábra. Minta pontfelhő magasságnormalizálási eredmény, amely a pontfelhőket mutatja (a) normalizálás előtt és (b) normalizálás után, forrás: Lin 2021

A lézerszkennerek a visszavert impulzusok feldolgozásakor nem csupán a távolságot rögzítik. Fontos mérési attribútum a visszaverődés sorszáma, vagyis hogy az adott pont az első, második, esetleg utolsó visszaverődéshez tartozik-e.

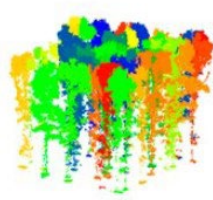
Ez különösen akkor érdekes, ha a sugár például először egy ágban, majd egy lombozaton és végül a talajon is visszaverődik. Emellett minden egyes pont esetében rögzítik a visszaverődött jel intenzitását, amely a visszaverő felület fényvisszaverő képességétől (reflektivitásától) és méretétől függ. Ezek az adatok segítenek például abban, hogy a pontfelhő egyes elemeihez szöveti vagy anyagi tulajdonságokat lehessen kapcsolni, ezzel tovább bővítve az értelmezési lehetőségeket, mint például egészségügyi állapot, fajok megkülönböztetése, életkor megállapítása stb. (73. ábra).



Vegyes erdő



Korona lehatárolás



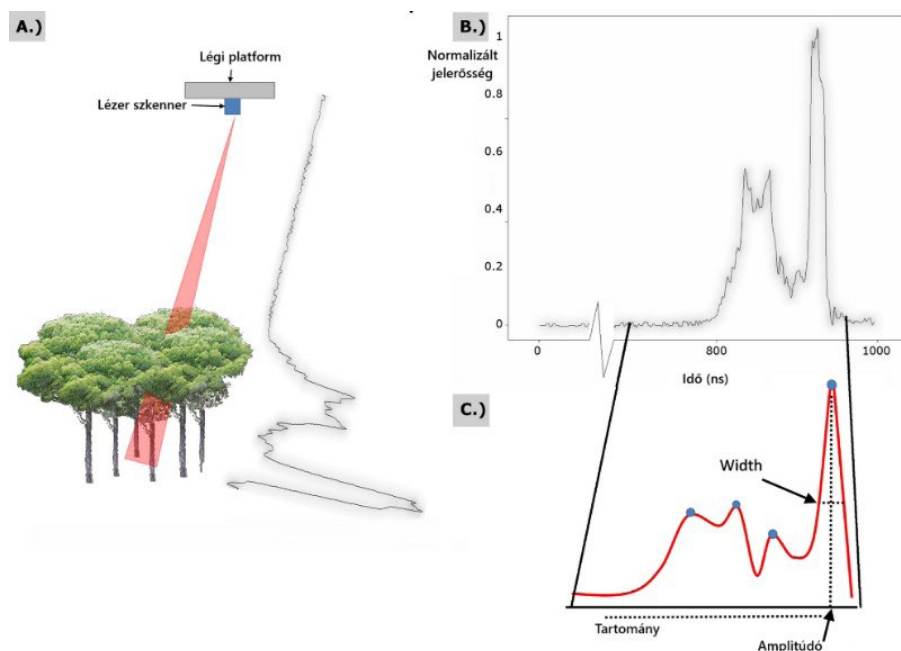
Fajonkénti csoportosítás

73. ábra. Lézerszkennelés eredményei

A legtöbb fejlett rendszerhez ma már RGB-kamerák is társulnak, amelyek lehetővé teszik, hogy a pontfelhő egyes pontjaihoz színinformációt is rendeljünk. Ezek a színértékek ugyan nem mindig esnek teljesen egybe a tényleges felszíni textúrával – hiszen a szkennerek és a kamera felbontása jelentősen különbözik –, de az emberi értelmezés során mégis fontos támpontot adnak, például a lombos növényzet, a talaj vagy épített objektumok megkülönböztetésében.

A legújabb generációs lézerszkennerek képesek nemcsak a visszaverő jel elsődleges tulajdonságait rögzíteni, hanem a teljes beérkező jelalakot is digitálisan menteni. Ezt a technológiát „full-waveform” vagy teljes jelalakos lézerszkennelésnek nevezzük. Az ilyen adatok részletesebb elemzését követően a visszaverő felület karakterisztikái, például a jel amplitúdója és szélessége is kinyerhető. Ezen paraméterek értékes információt szolgáltatnak az adott objektum fizikai jellemzőiről, például arról, hogy a visszaverő felület sima-e, laza szerkezetű-e, vagy épp sűrű és zárt (74. ábra).

Összességében a lézerszkennelés során keletkező pontfelhő nem csupán térbeli információkat tartalmaz, hanem reflektív és spektrális jellemzőket is, amelyek lehetővé teszik a digitális terepmodellek, felszínmodellek, vegetációs struktúrák és sok más attribútum rendkívül pontos és részletes modellezését. A lézerszkennelés mára az erdészeti távérzékelés egyik kulcstechnológiájává vált, amely megbízható adatot szolgáltat a faállomány szerkezetének háromdimenziós feltérképezéséhez.

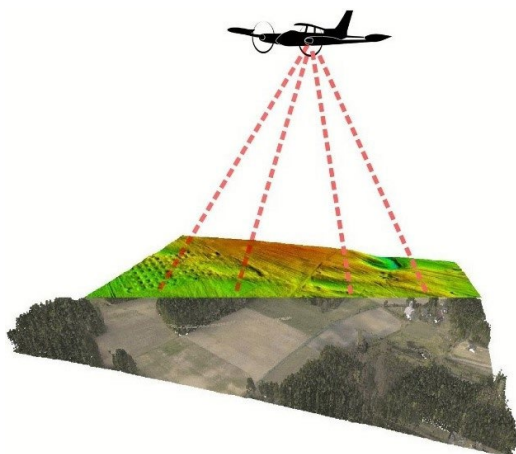


74. ábra. (A) Erdős borításról érkező teljes hullámformájú visszatérő jel sémája; (B) a digitalizáló számlálók időfüggvényben történő ábrázolása; (C) modellezett hullámforma, ahol minden csúcsot egy tartomány, szélesség és amplitúdó jellemez, forrás: Pirotti 2011

Alkalmazott hordozók és szenzorok

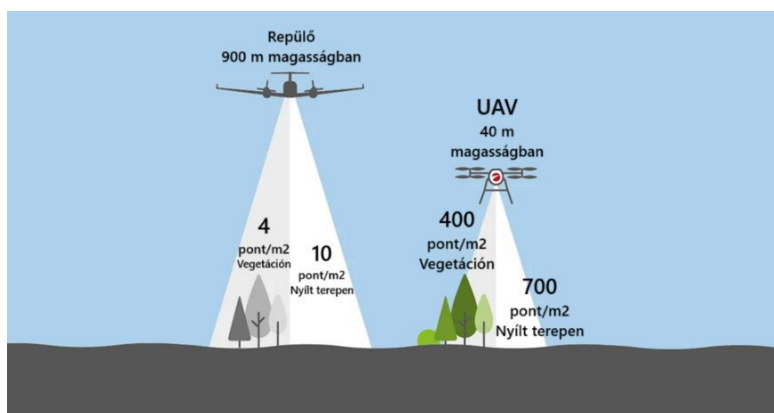
A lézerszkennelési technológia fejlődése lehetővé tette, hogy a szenzorokat különböző hordozóeszközökre integrálják, így az adatgyűjtés többféle környezetben és célra is optimalizálható. A különböző platformok nemcsak az alkalmazható mérési magasságot és sebességet határozzák meg, hanem jelentős hatással vannak az adat sűrűségére, pontosságára és a mérési geometriára is.

A légi lézerszkennelés (angol rövidítéssel ALS – *Airborne Laser Scanning*) hagyományosan kisrepülőgépekről vagy helikopterekről történik, jellemzően 500 és 1500 méter közötti repülési magasságból. A lézerszkennerek pásztázási iránya általában merőleges a repülés irányára, így széles, párhuzamos sávokat hoz létre a felszín felett. A pásztaszélesség, amelyet a repülési magasság, a haladási sebesség és a szkennerek paraméterei határoznak meg, több száz métert is elérhet. A repülési soron belüli pontsűrűség tipikusan 5 és 30 pont/m² között változik. A helikopterek külön előnye, hogy repülési sebességük tetszés szerint csökkenthető, így akár lokálisan is növelhető a mérési sűrűség, amit például légvezetékek vagy infrastruktúra-elemek részletes feltérképezésére használnak ki (75. ábra).



75. ábra. Légi lézerszkennelés illusztrációja, forrás: Univ. Bamberg 2025

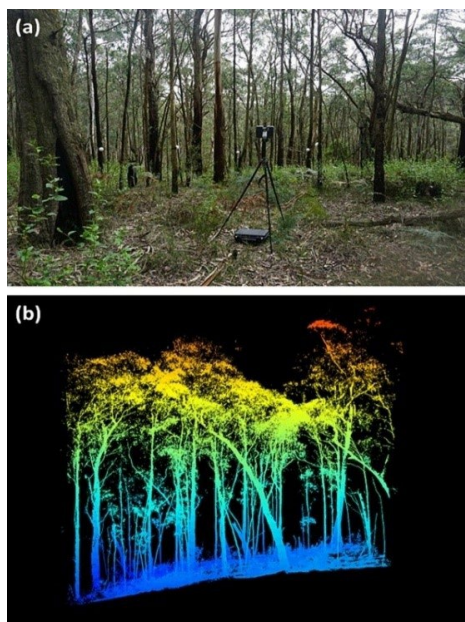
Az UAV-alapú lézerszkennelés az utóbbi évek egyik legdinamikusabban fejlődő területe. A drónokra szerelhető szenzorok tömege jellemzően 1 és 4 kilogramm között mozog, és főként multikopteres eszközökkel végzik a felméréseket. Az adatgyűjtés általában 120 méteres vagy annál alacsonyabb repülési magasságban történik. Ennek eredményeként a pontsűrűség jóval magasabb, elérheti vagy meghaladhatja a több száz pontot négyzetméterenként. Az ilyen mérések különösen előnyösek kisebb erdőterületek, faegyedek, régészeti lelőhelyek vagy belterületi zöldfelületek részletes vizsgálatában (76. ábra).



76. ábra. Repülő- és UAV-alapú lézerszkennelés

A földi lézerszkennelés (TLS – *Terrestrial Laser Scanning*) műszerlábon elhelyezett, statikus mérőberendezések segítségével történik. Ezek a szkennerek

függőleges síkban nagy frekvenciájú pásztázást végeznek, miközben vízszintes síkban lassan, néhány perc alatt 360° -os fordulatot tesznek. A pontmintázat koncentrikusan, sugarasan alakul ki: a műszertől távolodva a szomszédos pontok közötti távolság fokozatosan nő. A berendezések hatótávolsága általában 100 és 400 méter között van. A ponttávolság egy tízméteres távolságban elhelyezkedő objektum esetén akár 5–20 milliméter is lehet, ami rendkívül nagy részletességet tesz lehetővé. Egyetlen álláspontból jellemzően 10–50 millió pontot rögzítenek. A műszerek csúcskategóriás változatai akár 10 kg feletti tömeggel is rendelkeznek, ami megnehezíti terepi mozgásukat. Emiatt az erdészeti gyakorlatban gyakrabban használnak kisebb méretű és alacsonyabb hatótávolságú eszközöket, amelyek jobban megfelelnek a nehezen járható terepviszonyoknak (77. ábra).



77. ábra. Földi lézerszkennerek és fákra rögzített célpontok;
(b) az ugyanazon helyszínről származó szkennelt adatok
25 × 20 m-es parcellaszegmense, forrás: Penman 2023

A mobil lézerszkennelés (MLS – *Mobile Laser Scanning*) olyan rendszereket jelöl, amelyek valamilyen mozgó földi hordozóra – például gépjárműre vagy hátizsákra – telepített lézerszkennereket tartalmaznak. A gépjárműre szerelt egységeket főként városi környezetben, utcák, járdák, közlekedési infrastruktúrák térképezésére használják. Ezek rendszerint komplex rendszerek részei, amelyek tartalmazhatnak GPS-t, IMU-t és fotogrammetriai kamerarendszert is, így a begyűjtött adatok térben georeferáltak és nagy pontossággal integrálhatók (78. ábra).



78. ábra. Hátra rögzített mobil lézerszkennelés, forrás: Bohlin 2025

Az erdészeti alkalmazások szempontjából a legígéretesebb technológiai irány a kézi lézerszkennelés. Ezek a könnyű, kompakt eszközök már olyan mértékben csökkentették a műszer tömegét és energiaigényét, hogy kézben tartva is működtethetők. A mérés során az operátor szabadon mozog a vizsgálni kívánt objektumok körül, így azokat több szögből is fel tudja mérni. Ez lehetővé teszi a részleges takarásból adódó adatvesztés minimalizálását, illetve az olyan egyedi célobjektumok – például fák, farakások vagy régészeti elemek – térbeli dokumentálását, amelyekhez nem lehet közelről hozzáférni statikus álláspontból. Noha a kézi szkennerek pontossága (jellemzően 1–3 cm) és pontsűrűsége elmarad a statikus rendszerekétől, nagy előnyük a mobilitás, a rugalmasság és a terepi hatékonyság.

Összességében elmondható, hogy a különféle hordozóeszközökre szerelt lézerszkennerek az adatgyűjtési cél, a kívánt részletesség és a terepi körülmények függvényében egymást kiegészítő technológiaként alkalmazhatók. Az erdőgazdálkodás és természetvédelem különböző célkitűzései – legyen szó domborzatmodell készítéséről, faállomány-szerkezet feltárásáról vagy ökológiai állapotértékelésről – egyaránt profitálhatnak e szenzorrendszerek változatosságából.

Mérések feldolgozása

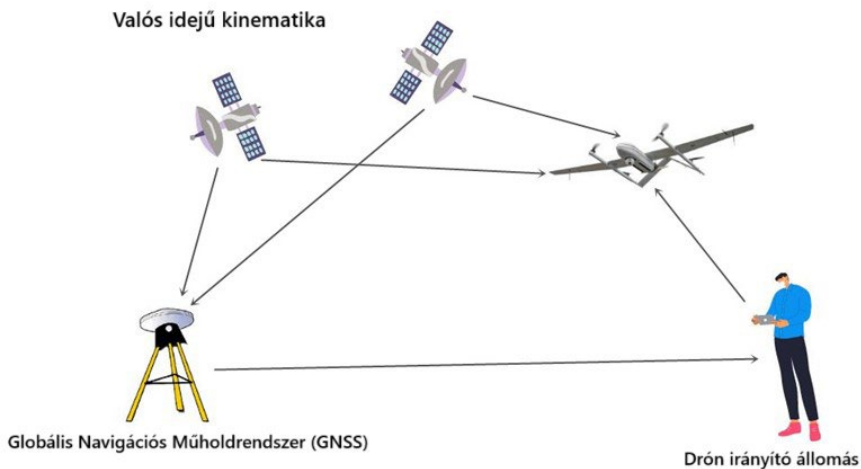
A lézerszkenneléssel nyert térbeli ponthalmaz értelmezése és felhasználása minden esetben több, egymásra épülő feldolgozási lépést igényel, függetlenül attól, hogy a felmérés földi, légi, UAV-alapú vagy mobil platformról történt. A feldol-

gozás célja, hogy a nyers mérési adatokból georeferált, értelmezhető és strukturált információt nyerjünk ki a vizsgált környezetről, legyen az erdőállomány, épített objektum vagy természetes domborzat. A folyamat három fő szakaszra bontható: a térbeli tájékozásra és koordináta-transzformációra, a domborzati és borított felületek modellezésére, valamint a célobjektumok kinyerésére a pontthalmazból.

Tájékozás és geometriai transzformáció

A lézerszkennerek által regisztrált pontok koordinátái a műszer saját koordináta-rendszerében értelmezhetők, amelynek origója a szenzor optikai középpontja. Ahhoz, hogy ezeket a pontokat térképi rendszerekben – például az EOV- (Egységes Országos Vetületi rendszer) vagy az UTM-rendszer szerint – értelmezzük, szükséges a pontfelhő térbeli elhelyezkedésének meghatározása a földrajzi térben. Ez a feladat a georeferálás, amely történhet közvetlen vagy közvetett módon.

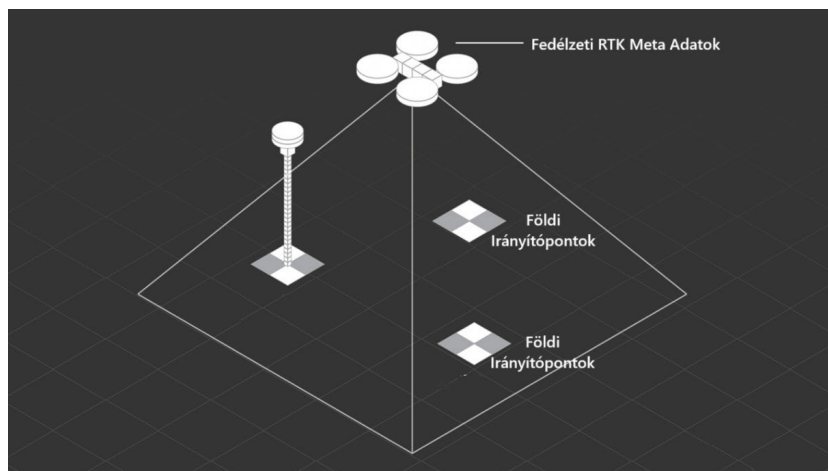
Közvetlen georeferálás során a szenzor mozgását GNSS- és IMU-rendszerek segítségével követik. Például egy UAV-alapú felmérés esetén a drónba épített RTK GNSS-antenna nagy pontosságú pozícióadatokat szolgáltat, míg az inerciális mérőegység (IMU) a szögelfordulásokat és gyorsulásokat rögzíti. A két rendszer együttesen biztosítja, hogy minden lézerimpulzushoz pontos pozíció és orientáció rendelkezhető. E módszer elterjedt a légi és mobil platformokon végzett méréseknél (79. ábra).



79. ábra. Valós idejű és közvetlen georeferálás illusztrálása

Földi lézerszkennelés esetén, ahol a műszer statikus álláspontról működik, gyakran közvetett tájékozást alkalmaznak. Ez a pontfelhő térképi rendszerbe való illesztését előre kijelölt illesztőpontok (GCP – Ground Control Points) segítségével

vel oldja meg. Ezeket a terepen jól látható céljelekkel – például jeltárcsákkal – jelölik meg, melyeknek koordinátáit előzetesen nagy pontosságú geodéziai méréssel (GNSS, totálállomás) határozzák meg. Az illesztőpontok révén elvégzett transzformáció során meghatározzuk a pontthalmaz térbeli eltolási és forgatási paramétereit (80. ábra).



80. ábra. Földi irányítópontok alkalmazása a térbeli elhelyezés folyamatában

A kézi lézerszkennerek esetében, ahol a szenzor a felhasználóval együtt mozog, a tájékozás egyidejűleg történik a térképezéssel. Ezt a technológiát SLAM-nak (Simultaneous Localization and Mapping) nevezzük. A szenzor folyamatosan követi saját pozícióját és orientációját az IMU adatai alapján, amit szoftveres korrekcióval finomítanak a már felmért pontok illesztése révén. A zárt útvonalú bejárások – ahol a kezdő- és végpont megegyezik – elősegítik az esetleges hibák kompenzálását.

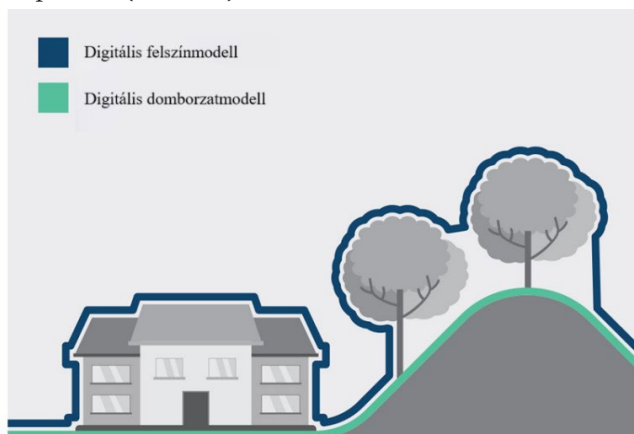
Domborzat- és felszínmodellek előállítás

A pontfelhő egyik legfontosabb felhasználási területe a digitális domborzatmodell (DTM) és a digitális felszínmodell (DSM) előállítás. A nyers adathalmazban megtalálhatók a terep, a növényzet és a mesterséges struktúrák pontjai is, ezért szükség van a terepfelszín automatikus szűrésére. Ennek során a rendszer kiválogatja azokat a pontokat, amelyek nagy valószínűséggel közvetlenül a földfelszínről verődtek vissza. Az algoritmusok e döntést nem elszigetelten, hanem a szomszédos pontok kontextusában hozzák meg. Alapvetés, hogy a valódi terep-pontok a környezetükben a legmélyebb pontok közé tartoznak.

A szűrés egy többlépcsős iteratív folyamat, ahol kezdetben a legalacsonyabb magasságú pontokból álló vázmodellre építve becsülik meg a felszín alakját. Az

iteratív folyamat azt jelenti, hogy a pontfelhőből történő tereppontok kiválasztása nem egyszeri művelet, hanem több lépésben, egymást követően finomított eljárások sorozata során történik. Az iterativitás lényege, hogy a rendszer minden lépésben visszacsatolást kap az előző eredményekből, és ezek alapján javítja, pontosítja a szűrési eredményt. A további pontokat a modelltől való eltérésük alapján osztályozzák, majd a modell egyre pontosabbá válik a beszámított pontok újrásúlyozásával. Az ilyen módon előállított DTM különösen fontos például erdőállományok magassági jellemzőinek meghatározásához vagy vízgyűjtő-modellezéshez.

A felszínmodell (DSM) ezzel szemben a teljes borított felszínt, tehát a lombkorona, tetők és egyéb objektumok legfelső pontjait tartalmazza. A DTM és DSM különbségeként kapott normalizált felületmodell (nDSM) a talajszint feletti relatív magasságot adja meg, amely például egy erdőrészletben pontos képet adhat a faállomány állapotáról (81. ábra).



81. ábra. A digitális domborzatmodell (DTM) és a digitális felszínmodell (DSM) előállítása

Objektumok kinyerése a pontthalmazból

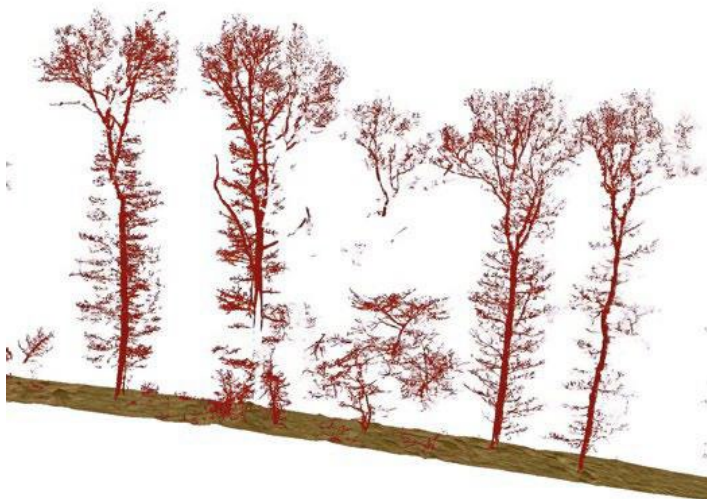
Az objektumazonosítás célja, hogy a pontthalmazból konkrét, egyértelműen értelmezhető entitásokat – például faegyedeket – nyerjünk ki. A lehetőségek az alkalmazott pontsűrűségtől függenek. Ha a légi lézerszkenneléssel előállított pontthalmaz sűrűsége nem elegendő az egyes fák azonosításához, akkor az állomány szintjén végeznek statisztikai alapú paraméterbecslést, melyhez terepi mintaterületek szolgálnak kalibrációs alapként.

Magasabb pontsűrűségnél – például UAV-felvételek vagy földi szkennelés esetén – a faegyedek csúcspontjai és törzsei is külön azonosíthatók. A csúcspontok detektálása lokális maximumkereséssel történik, míg a lombkorona kiterjedését például inverz vízgyűjtő-algoritmusokkal határozzák meg. Az így kapott

paraméterek alapján meghatározható a fa magassága, a lombkorona átmérője, záródása, illetve a fahelyek koordinátái – ezek alkotják a digitális törzstérképet.

A nagy felbontású 3D-modellek lehetőséget adnak a fa törzsének háromdimenziós reprezentációjára is. A voxelizálás során a pontthalmazt kis térfogat-egységekre (voxelekre) bontják, amelyekből aggregáció révén automatikusan összeállítható egy fa struktúrája. Lombtalan állapotban még az ágstruktúra is jól modellezhető, ami dendrometriai célokra vagy ökológiai értékeléshez különösen hasznos. A voxel alapú modellezés lehetővé teszi továbbá a törzsek átmérőjének különböző magasságban történő mérését, valamint szabályos testekkel (henger, kúp) való illesztését is.

A fent bemutatott feldolgozási lépések, ha kellő precizitással és jól kalibrált algoritmusokkal történnek, lehetővé teszik a faállomány struktúrájának kvantitatív és vizuális értékelését, ezáltal megbízható adatokat szolgáltatva az erdészeti tervezéshez, erdőgazdálkodási döntésekhez vagy kutatási célokra (82. ábra).



82. ábra. Faállomány-jellemzők meghatározásához használt pontthalmaz, forrás: Czímber (szerk.) 2025

22. táblázat. Összefoglaló táblázat a kiértékelési eljárások típusairól, erdészeti kutatások és gyakorlati felmérések tekintetében

Kategória	Alapvető jellemzők	Felbontás / pontosság	Erdészeti alkalmazások	Előnyök	Korlátok
Analóg fotogrammetria	Mechanikus-sztereoszkopikus képelemzés	1:10 000–1:50 000	Állományhatárok, tarvágások, nagy léptékű felmérések	Alacsony költség, régi idősorokhoz elérhető	Korlátozott pontosság, lassú, manuális

Kategória	Alapvető jellemzők	Felbontás / pontosság	Erdészeti alkalmazások	Előnyök	Korlátok
Analitikus fotogrammetria	Számítógépes koordinátaszámítás analóg eszközről	1–5 m	Lombkoronamagasság, állománystruktúra	Precízebb, matematikai alapú számítás	Félig manuális, eszköz- és számításigényes
Digitális fotogrammetria	Teljesen digitális képfeldolgozás, ortofotók, 3D modellek	0,1–1 m	CHM, erdőborítás, regeneráció	Automatikus, gyors, nagy léptékű	Nagy számítási kapacitás szükséges
UAV-fotogrammetria	Drónfelvételek, nagy átfedés, ortofotók	1–10 cm	Egyedi fakoronák, fiatal állományok, tarvágás	Nagyon nagy felbontás, rugalmasság	Korlátozott fedett terület, repülési engedélyek
Integrált LiDAR-fotogrammetria	Lézerszkennelés + digitális kép	0,1–50 cm / cm pontosság	Biomassza, alsó lombkorona, holtfa	Faegyed-szintű adat, teljes 3D	Drága, komplex feldolgozás
AI-alapú automatizált kiértékelés	Gépi tanulás alapú szegmentálás	1–10 cm	Beteg vagy száradó fák, erdőtűz, változásdetekció	Teljes automatizálás, idősoros elemzés	Nagy adat- és számításigény, algoritmusfüggő

4.6. Képtípusok és képalkotás

4.6.1. Analóg és digitális képek jellemzői

A fotogrammetriában a képalkotás elsődleges célja a valós világ geometriai és radiometriai információinak rögzítése térképezési, modellezési vagy monitorozási célból. A képek típusa – analóg vagy digitális – alapjaiban határozza meg az alkalmazható eszközöket, a feldolgozás módszertanát, valamint a végeredmény pontosságát és alkalmazási területét. E két képformátum történetileg és technológiailag is eltérő paradigmákat képvisel, ugyanakkor a kortárs gyakorlatban gyakran egymást kiegészítő szerephez jutnak.

Az **analóg képek** olyan hagyományos képalkotási eljárások termékei, amelyeknél a fényérzékeny emulzióval bevont fizikai hordozóra (például filmre vagy üveglemezre) vetített fény kémiai reakció révén hozza létre a képet. Ezek a képek folytonos tónuseloszlást mutatnak, és nem képpontokra bontva ábrázolják a vizsgált objektumot, hanem a fényerősség finom, átmenetes változásait jelenítik meg. Az ilyen felvételek felbontását a film szemcsészettsége határozza meg, amely a maga idejében kivételes részletgazdagságot biztosított, sokszor meghaladva a mai digitális rendszerek felbontását is. A feldolgozás optikai-mechanikus eszközökkel, például sztereoplotterekkel vagy vetítógépekkel történt, a kiértékelés pedig jelentős szaktudást és manuális munkát igényelt. Az analóg képek archi-

válása fizikai térben történik, ami különös gondosságot igényel: a fényérzékeny anyagok hajlamosak a degradációra, így a tárolási körülmények (hőmérséklet, páratartalom, fényhatás) jelentősen befolyásolják a hosszú távú megőrzést.

Ezzel szemben a digitális képek elektronikus úton keletkeznek. A digitális képérzékelők – mint a CCD (charge-coupled device) vagy a CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) szenzorok – a beérkező fényt elektromos jelekké alakítják, majd numerikus formában, képpontok (pixelek) sorozataként tárolják. Minden pixel egy adott helyhez rendelt, diszkrét fényintenzitási értéket hordoz, így a kép felbontását a szenzor térbeli felbontóképessége (pixelszám és pixelsűrűség), illetve a képtartalom leképezésének optikai minősége határozza meg. A digitális képek lehetőséget biztosítanak automatikus vagy félautomatikus képfeldolgozási algoritmusok alkalmazására: ilyenek például a képkorreláció, az élkeresés, az osztályozás vagy épp a mesterségesintelligencia-alapú objektumfelismerés.

A digitális képek előnye továbbá, hogy strukturált metaadatokkal láthatók el, mint például az időpont, a GPS-koordináták vagy a kamera paraméterei. Az adattárolás digitális formában történik, ami nem csupán helytakarékosabb, hanem a hosszú távú hozzáférés, archiválás és adatbiztonság szempontjából is kedvezőbb megoldást kínál. Az adatok könnyedén másolhatók, továbbíthatók, illetve beépíthetők más rendszerekbe, mint például térinformatikai adatbázisokba (GIS).

Bár technológiai szempontból az analóg és a digitális képek közötti különbség egyértelmű, a két megközelítés nem feltétlenül zárja ki egymást. A történeti jelentőségű analóg légi felvételek például digitalizálás révén beemelhetők a mai fotogrammetriai feldolgozási láncba, lehetővé téve a múltbéli földhasználat, városfejlődés vagy környezeti változások elemzését. E képek szkennelése során a filmfelvétel fizikai információtartalma digitális formában rekonstruálható, és modern szoftveres eszközökkel feldolgozhatóvá válik.

Összefoglalva, az analóg képek a klasszikus fotogrammetria korát idézik, amikor a mérnöki precizitás fizikai és optikai úton valósult meg. A digitális képalkotás ezzel szemben a jelen és jövő technológiáját képviseli, amely a gyorsaság, automatizálhatóság és integrálhatóság révén új távlatokat nyitott a térbeli adatok feldolgozásában és alkalmazásában. A fotogrammetria fejlődéstörténetében a digitális képalkotás megjelenése paradigmaváltást jelentett: a térbeli információgyűjtés és -feldolgozás ma már elválaszthatatlan a digitális képek technológiájától (23. táblázat).

23. táblázat. Összehasonlító táblázat az analóg és digitális képek jellemzőiről

Tulajdonság	Analóg kép	Digitális kép
Hordozó típusa	Fizikai (film, üveg, papír)	Elektromos feltárolás (memória)
Feldolgozás	Optikai-mechanikus	Számítógépes, algoritmikus
Felbontás	Film szemcsézettsége igen nagy lehet	Pixelméret függvényében korlátozott
Archiválás	Fizikai tárolás, érzékeny	Elektronikus, könnyen másolható

Tulajdonság	Analóg kép	Digitális kép
Utófeldolgozás lehetősége	Korlátozott (nagyítással, maszkolással)	Széles körű (szoftveres eszközökkel)
Automatizálhatóság	Korlátozott	Nagyfokú (pl. mesterséges intelligencia)
Képpalkotás típusa	Folytonos tónusok, nem diszkrét	Diszkrét, képpontalapú

4.7. A képpontok koordináta-rendszerei

A fotogrammetriai és távérzékelési feldolgozás során alapvető fontosságú a képek koordináta-rendszerének helyes értelmezése, hiszen minden mérés, transzformáció és térbeli rekonstrukció ezen alapul. Mivel a kép digitális formában képpontok (pixelek) sorozataként jelenik meg, ezért a képi koordináták kezeléséhez különböző koordináta-rendszerek állnak rendelkezésünkre, amelyek mind különböző célokat szolgálnak.

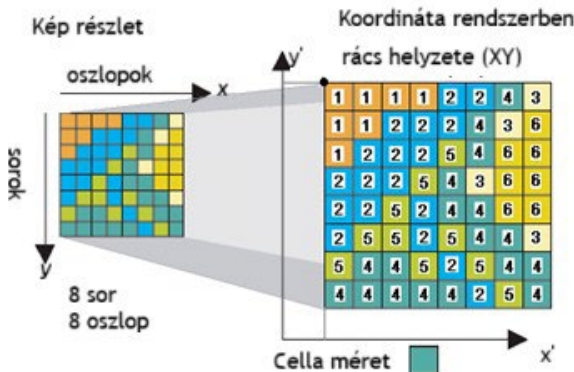
4.7.1. A képkoordináta-rendszerek típusai

A fotogrammetriában és a képfeldolgozásban jellemzően három fő koordináta-rendszert különítünk el:

a) Pixelkoordináták (képelem-koordináták)

A pixel-koordináta-rendszer a digitális képek belső rendszerét írja le, amelynek alapja az egyes képpontok (pixelek) oszlopszáma (x) és sorszáma (y). A rendszer eredete (0,0) pont általában a bal felső sarokban található, és innen indul az indexelés: az x koordináta jobbra, az y koordináta lefelé nő (83. ábra).

Ez a rendszer kifejezetten a digitális képek kezelésére szolgál, alkalmas például képfeldolgozási algoritmusok futtatására, szegmentálásra, klaszterezésre, de nem nyújt információt a valós térbeli helyzetről.

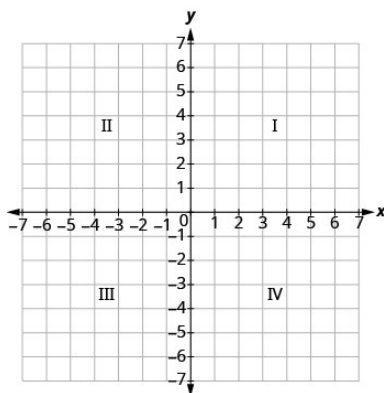


83. ábra. Pixel koordináta-rendszer illusztrációja, forrás: saját szerkesztés

b) Képkordináta-rendszer (mért koordináták)

A képkordináta-rendszer a képet mint vetítési síkot kezeli. Az origója jellemzően a képközéppontban (főpontban) helyezkedik el, és az egységek milliméterben vannak kifejezve. Ez a rendszer használatos az analóg és analitikus fotogrammetriában, amikor egy pont pozícióját a főponttól való távolság (ξ , η) formájában adjuk meg (84. ábra).

Ez a rendszer teszi lehetővé a vetítésugarak kiszámítását, és alapvető szerepet játszik a kamera kalibrációjában, illetve a belső orientáció meghatározásában.



84. ábra. Nézethálós képkordináta-rendszer; forrás: Lumen 2025

c) Kamera-koordinátarendszer

A kamera-koordinátarendszer (más néven képalkotási koordináta-rendszer) háromdimenziós térbeli rendszer, amelynek origója a kamera optikai középpontja (perspektív középpont). Az optikai tengely mentén előre felé mutató Z tengely, az X és Y tengelyek pedig a kép síkjával párhuzamosak (85. ábra).

Ezt a rendszert használjuk a térbeli vetítési egyenletek felírásához, és fontos szerepe van a külső orientáció számításában (azaz a kamera helyzetének és irányának térben való meghatározásában).

A 33. ábrán egy világkoordináta-rendszert láthatunk a 85. ábra jobb oldalán, három tengellyel (x , y , z), és balra haladva egy P pontot, amely ebben a koordináta-rendszerben helyezkedik el.

Ebben a világkoordináta-rendszerben helyezkedik el egy kamera, amelynek megvan a saját koordináta-rendszere, jelölése: C. A kamera koordináta-rendszerének z tengelye egybeesik a kamera optikai tengelyével. A kamera hátsó részén található a képsík, amelyre a kétdimenziós képek vetülnek. A kameralyuk és a képsík közötti távolságot nevezzük fókusztávolságnak, amit általában f -fel jelölünk.

A cél az, hogy a világkoordináta-rendszerből átjussunk a kamera koordináta-rendszerébe. Hogyan valósítható ez meg?

Amennyiben ismerjük a kamera világkoordináta-rendszerhez viszonyított helyzetét és orientációját, felírhatunk egy kifejezést, amely lehetővé teszi, hogy a világkoordinátákban megadott P pontot leképezzük a képsíkra. Ezt a folyamatot nevezzük előremenő leképezésnek (forward mapping).

Lássuk, hogyan történik mindez. Először a világkoordinátákban megadott P pontot vektorként írjuk fel, jelölése: $\mathbf{x}_w$. Ezután transzformációval átváltjuk a pontot a kamera koordináta-rendszerébe, ekkor megkapjuk $\mathbf{x}_c$ értékét, majd perspektivikus leképezést alkalmazunk, hogy elérjük a képi koordinátákat, azaz $\mathbf{x}_i$ -t.

Matematikailag a következő kapcsolatok érvényesek:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \end{pmatrix} \ll \mathbf{X}_c = \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{pmatrix} \ll \mathbf{X}_w = \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{pmatrix}$$

A perspektivikus leképezés elvét már korábban is tárgyaltuk (pl. az előző fejezetben), de most részletesen megnézzük, hogyan származtatható, és hogyan számolhatjuk ki adott kamera esetén. A perspektivikus leképezés a következőképpen írható fel:

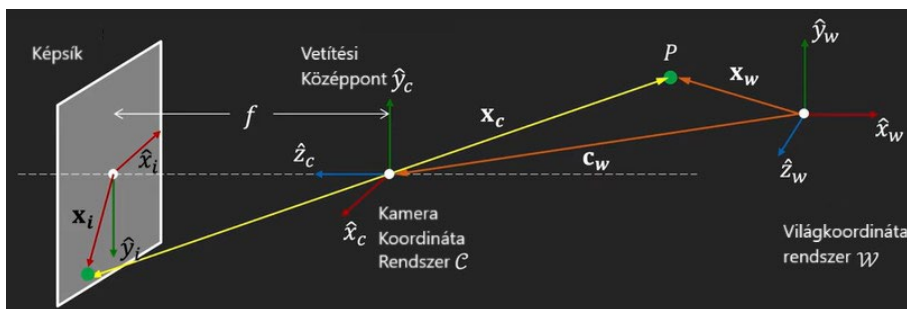
$$\frac{X_i}{f} = \frac{X_c}{Z_c} \text{ and } \frac{Y_i}{f} = \frac{Y_c}{Z_c}$$

Azaz:

$$X_i = \frac{X_c}{Z_c} \text{ and } Y_i = f \frac{Y_c}{Z_c}$$

Figyelembe kell vennünk a képsík tulajdonságait is. Kezdetben feltételezzük, hogy a képsík milliméterben van definiálva, azaz ugyanabban a mértékegységben, mint amelyben a kamera koordináta-rendszerében a pont P szerepel.

A valóságban azonban ez ritkán van így. A képet egy képszensor rögzíti, amely pixeleket használ alapegységként. A pixelek a képsíkon x és y irányban is nyúlnak, így meg kell határoznunk a leképezési viszonyt a milliméterek és a pixelek között. Fontos megjegyezni, hogy a pixelek nem mindig négyzet alakúak, – az alábbi ábrán is látható módon – lehetnek téglalap alakúak is.



85. ábra. Kamera-koordinátarendszer, forrás: 3D Modelling 2022

4.7.2. Koordináta-rendszerek közötti transzformációk

A gyakorlatban gyakran szükséges a különböző koordináta-rendszerek közötti átváltás:

- A pixelkoordinátákat át kell alakítani képkoordinátákká, figyelembe véve a képfelbontást (pl. mm/pixel arányt) és a képközéppont helyzetét.
- A képkoordinátákat át lehet vetíteni a kamera-koordinátarendszerbe, ahol az objektív geometriai paraméterei ismertek.
- A kamera-koordinátarendszert pedig egy világ-koordinátarendszerbe kell illeszteni, amelyet általában geodéziai vagy térinformatikai rendszerként (pl. EOV, WGS84) definiálunk.

Ezen átváltásokhoz lineáris és nemlineáris transzformációk, mátrixműveletek és vetítési egyenletek szükségesek. Ezek biztosítják, hogy a digitális képen mért pontok valódi térbeli helyzetükkel kapcsolatba hozhatók legyenek.

4.7.3. Koordináták szerepe a térbeli rekonstrukcióban

A különböző koordináta-rendszerek összekapcsolása és kezelése elengedhetetlen a fotogrammetriai munkafolyamat során, különösen az alábbi célok eléréséhez:

- 3D-térmodell előállítása (pl. erdőállomány szerkezeti elemzése),
- ortofotó létrehozása (magasságtorzítás nélküli kép),
- terepi mérések összevetése képi mérésekkel,
- GIS-be integrálás: a képpontoknak rendelkezniük kell valós térbeli (pl. EOV vagy WGS84) koordinátákkal.

A megfelelő koordináta-rendszer kiválasztása és a rendszeres koordináta-transzformációk pontos kezelése alapfeltétele a megbízható térinformatikai termékek előállításának.

A fotogrammetriai feldolgozás során a képpontok többféle koordináta-rendszerben is értelmezhetők, ezek közül a legfontosabbak a pixel-, kép- és kamera-koordinátarendszer. E rendszerek különböző célt szolgálnak: a képi feldolgozás, a geometriai vetítés és a térbeli rekonstrukció mind más és más rendszert igényel. A rendszerek közötti precíz transzformációk biztosítják azt, hogy a képen mért pontok helyesen legyenek ábrázolva a valós térben, és hogy az így nyert adatok megbízhatóan integrálhatók legyenek geodéziai, térinformatikai vagy műszaki rendszerekbe.

4.8. Terepmodell (DTM, DSM) előállítása légi fotókból

A digitális terepmodellek (DTM – *Digital Terrain Model*, más néven DEM – *Digital Elevation Model*) a modern távérzékelés és fotogrammetria egyik legfontosabb termékei. Egy DTM olyan térbeli adatbázist jelent, amely meghatározott

földfelszíni pontok X, Y, Z koordinátáit tartalmazza, és ezáltal a felszín domborzatát – változó részletességgel – matematikailag írja le.

A digitális terepmodell koncepciója az 1950-es évekre nyúlik vissza (Miller 1958), és azóta is folyamatosan fejlődik az adatgyűjtési és -feldolgozási technológiák előrehaladásával. A DTM jellemzően a növényzettől, épületektől, tereptárgyaktól mentes „kopasz” földfelszínt reprezentálja, szemben a digitális felszínmodellel (DSM – Digital Surface Model), amely a felszínen lévő objektumok (pl. fák, házak) magasságát is tartalmazza.

4.8.1. A digitális terepmodellek típusai és szerkezete

A DTM-ek adatszerkezet szerint két fő kategóriába sorolhatók:

- Raszteres (GRID) modellek – szabályos rácshálózat pontjaihoz rendelünk magassági értéket. A cellák mérete (felbontása) határozza meg a modell részletességét.
- Vektoros modellek – szabálytalan ponteloszlás alapján, például:
 - › TIN (Triangulated Irregular Network – szabálytalan háromszögháló),
 - › DSZM (digitális szintvonalmmodell),
 - › 3D pontfelhő – egyre fontosabb szerepet tölt be, különösen LiDAR- vagy SfM-alapú eljárásoknál.

A raszteres DTM a leggyakoribb forma a térinformatikai elemzésekben, mivel könnyen kezelhető, jól vizualizálható, és a legtöbb térinformatikai szoftver natívan támogatja.

4.8.2. A DTM előállításának módszerei

A digitális terepmodellek különböző adatnyerési forrásokból származhatnak, amelyek mind eltérő pontosságot, lefedettséget és hibalehetőséget hordoznak:

a) Közvetlen terepi felmérés

A legnagyobb pontosságot kínáló, de idő- és munkaigényes módszer. Ma leginkább GNSS-eszközökkel történik, amelyek terepi kontrollpontokat (GCP – Ground Control Points) szolgáltatnak a fotogrammetriai illesztéshez és validáláshoz.

b) Szintvonalas térképek digitalizálása és interpolációja

Korábban széles körben alkalmazott módszer, amely során meglévő papíralapú térképekből digitális szintvonalakat nyernek ki, majd ezek alapján interpolálják a terepfelszínt. Napjainkban jelentősége csökken, főként archív elemzésekben releváns.

c) Légi fotókból vagy űrfelvételekből sztereo-fotogrammetriai úton

Ez a módszer napjaink legelterjedtebb technikája, különösen drónos adatgyűjtés esetén. A Structure from Motion (SfM) eljárás a képek közötti átfedések alapján automatikusan rekonstruálja a kameramozgást és a térbeli pontokat, így

létrejön egy sűrű pontfelhő, amelyből DTM készíthető (Fonstad. 2013). Előnyei: gyors, olcsó, terepi munkát minimálisan igényel.

d) Aktív távérzékelés: radar és LiDAR

- A radar-interferometria (InSAR) precíz, űrfelvételen alapuló módszer, amely két eltérő időpontban készült radarkép fáziseltéréséből becsli meg a felszín domborzatát (Massonnet et al. 1993; Rabus 2003).
- A LiDAR (Light Detection and Ranging) lézerszkenneléssel készít nagy sűrűségű és nagy pontosságú 3D pontfelhőt. Ebből szűréssel és osztályozással (pl. földfelszín és növényzet szétválasztása) állítható elő a DTM (Petzold et al. 1999).

4.8.3. A DTM minőségének meghatározói

A terepmodellek megbízhatósága az alábbi technikai paramétereken múlik:

- Adatfelbontás: a raszteres cellák mérete határozza meg, milyen részleteket képes ábrázolni. Minél kisebb a cella, annál részletesebb, de annál nagyobb az adatmennyiség és a zajérzékenység is.
- Adatnyerési módszer: ez határozza meg a modell geometriai pontosságát és a benne rejlő szisztematikus hibák típusát.
- Vetületi rendszer: térinformatikai elemzések során méteralapú koordináta-rendszer használata ajánlott, mivel pl. a lejtőszög számítása fokban és méterben értelmezhető helyesen.
- Adatformátum: a legtöbb GIS- és távérzékelési szoftver képes különböző formátumok közötti konverzióra (pl. .tif, .asc, .xyz, .las), de célszerű a formátumokat az elemzés céljához igazítani.

Előfeldolgozás és derivált termékek

A nyers DTM-ből különböző származtatott termékek állíthatók elő:

- lejtőszög- és kitettség-térképek,
- vízgyűjtő hálózat és áramlási útvonalak,
- geomorfológiai paraméterek (konvexitás, profilgörbület stb.),
- térfogatszámítás, töltés-vágás modellezés,
- ortofotó-előállítás (ortorektifikálás).

A modellek vizualizálása (árnyékolás, színezés, domborzati perspektíva) szintén kulcsfontosságú lehet térképezési és kommunikációs célokra.

Nyílt hozzáférésű és országos DTM-források

Nem minden esetben szükséges saját terepmodell készítése. Számos globális és nemzeti szintű DTM-adatbázis áll rendelkezésre:

- SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) – 30–90 m felbontásban, globális lefedettség,
- ASTER GDEM – optikai űrfelvételekből készült 30 m-es raszteres modell,
- nemzeti LiDAR adatbázisok,
- EU-DEM, Copernicus DTM – uniós szintű adatszolgáltatás.

Ezek az adatok sok esetben szabadon elérhetők, és integrálhatók térinformatikai projektekbe.

A DTM szerepe a fotogrammetriában

A digitális terepmodell nélkülözhetetlen eleme a fotogrammetriai feldolgozásnak. Szerepe többek között:

- ortofotó előállításához – a tereptorzítások kiküszöbölésére,
- 3D-modellezéshez – a kamera vetítési sugarának metszése a domborzattal (pl. monoplotting),
- térfogatszámításhoz – változásvizsgálat során (pl. fakitermelés, lejtőmozgás),
- drónos adatfeldolgozáshoz – SfM-alapú modellgenerálás esetén.

A DTM és DSM előállítása légi fotókból a fotogrammetria egyik legkritikusabb feldolgozási lépése. A technológiai választások (pl. SfM, LiDAR, InSAR) nagymértékben meghatározzák a modell pontosságát, felbontását és alkalmazhatóságát. A korszerű térinformatikai rendszerek segítségével a DTM-ekből sokféle elemzés és térbeli döntéstámogatás végezhető el, különösen a geomorfológia, környezetgazdálkodás, erdészet és várostervezés területén. A megfelelően előállított és értelmezett domborzatmodell így nem csupán térképészeti termék, hanem a földfelszín matematikai modellje, amely új összefüggések feltárására is alkalmas (Telbisz 2023).

4.8.4. Domborzatmodell elkészítése szintvonalak digitalizálásával

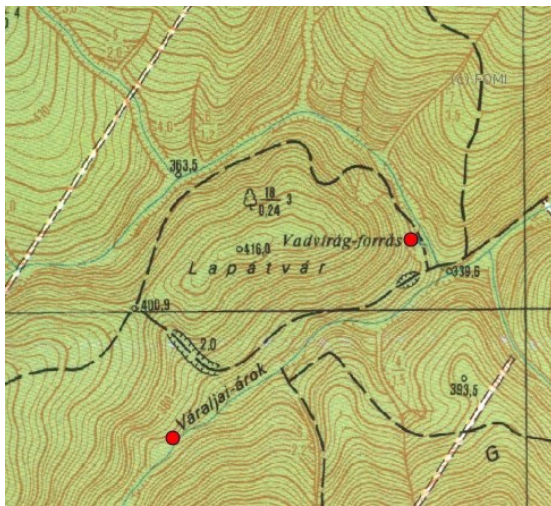
A digitális domborzatmodellek (DTM) előállításának egyik hagyományos, de továbbra is releváns módszere a szintvonalas térképek digitalizálása. Ez a megközelítés különösen hasznos, ha részletes terepinformációra van szükség egy kisebb területre vonatkozóan, és nem áll rendelkezésre nagy pontosságú LiDAR-adat vagy drónos felmérés. Bár e módszer által nyert modell pontossága alulmúlja a korszerű aktív távérzékelési technológiák (pl. LiDAR) eredményeit, több szempontból felülmúlhatja a globális léptékű, de durvább felbontású modelleket, mint az SRTM vagy az ASTER GDEM.

A modellalapú domborzatrekonstrukció a következő lépésekben valósul meg:

1. A forrásanyag és feldolgozás alapjai

A modellalapú domborzatrekonstrukcióhoz nagy felbontású topográfiai térképeket használunk (86. ábra), amelyekből szintvonalakat és magassági pontokat

digitalizálhatunk. A szintvonalak a felszín azonos magasságú pontjait összekötő vonalak, amelyek – helyes feldolgozás mellett – kiválóan alkalmasak a térbeli domborzat leképezésére (FÖMI 2025). A digitalizálás ArcGIS 10.1-ben végezhető el, ahol a szintvonalak vektorizálását követően többféle interpolációs algoritmus alkalmazható a háromdimenziós terepmodell előállítására.



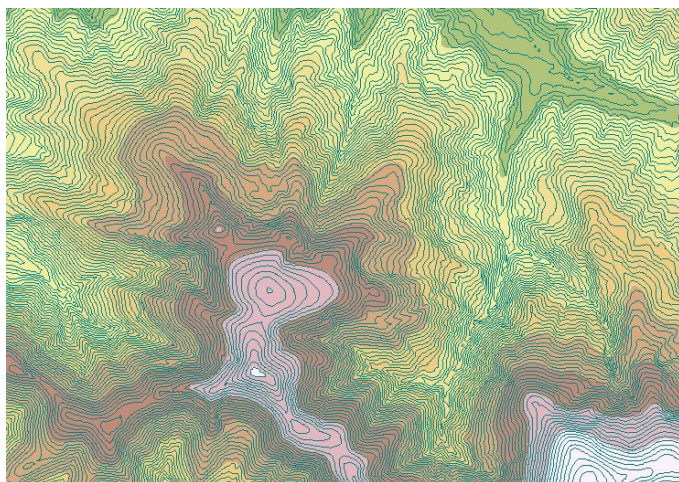
86. ábra. Topográfiai térkép illusztrálása, forrás: FÖMI 2025

2. Magassági pontok, szintvonalak szerepe és kiválasztása

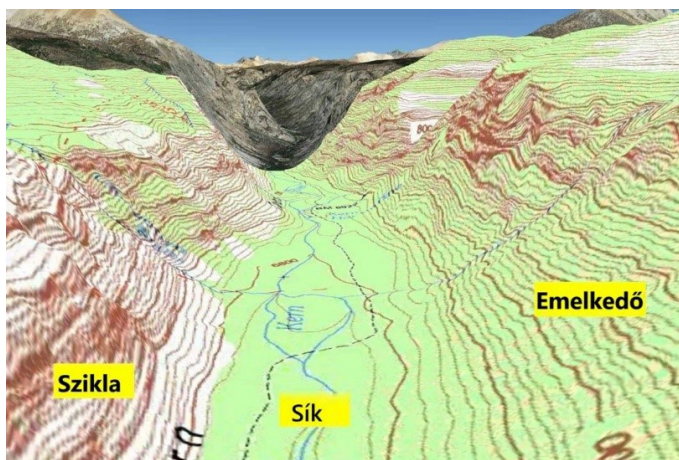
A térképeken található különálló magassági pontok (spot height) fontos kiegészítő adatok a modell pontosításához. Ugyanakkor nem minden magassági értéket vettem be az interpolációba. Számos ilyen pont útvonalak, töltések vagy csatornák tetején helyezkedik el, amelyek akár 1-2 méteres magassági eltérést is mutathatnak a közvetlen környezetükhöz képest. Ezek torzító hatással lehetnek a domborzat kontinuus lefutására, hiszen az interpoláció során mesterséges „csúcsoakat” eredményeznek. Ezért csak azokat a pontokat tartjuk meg, amelyek a természetes talajfelszín reprezentálták, így biztosítva a realisabb terepkép kialakulását (87. ábra).

3. A sík terep kihívásai

A módszer egyik korlátozó tényezője, hogy síkvidéki területeken a szintvonalak gyakran nagy távolságokra, ritkán helyezkednek el, mivel a magassági változások minimálisak. Az alacsony domborzati viszonyok miatt a szintvonalak nehezen észlelhetők és értelmezhetők, a ritkaságuk pedig csökkenti az interpoláció pontosságát. Ezen túlmenően előfordul, hogy hosszú szakaszon futó, azonos értékű szintvonalak nem nyújtanak elegendő információt a felszín kiszámítható lefutásához, emiatt a modell síkszerű felületeket generál az érintett területeken (88. ábra).



87. ábra. Topográfiai térképen való magassági értékek, pontok és szintvonalak ábrázolása, forrás: VMEK 2025



88. ábra. Változatos domborzati viszonyok illusztrálása

4. Interpolációs módszerek tesztelése és kiértékelése

A szintvonalak és pontok digitalizálása után különféle interpolációs módszerekkel lehet megalkotni a felszínmodell raszteres változatát (DTM). Az eljárások mindegyike azonos bemeneti adatokon, kb. 10 000 vektoros pontra épül (szintvonalcsomópontok + kiválasztott magassági pontok), és mindegyik esetben 0,5 méteres cellaméretű GRID-modelltől több tíz méteres cellaméterig különböző pontosságú DTM generálható.

a) Kriging interpoláció

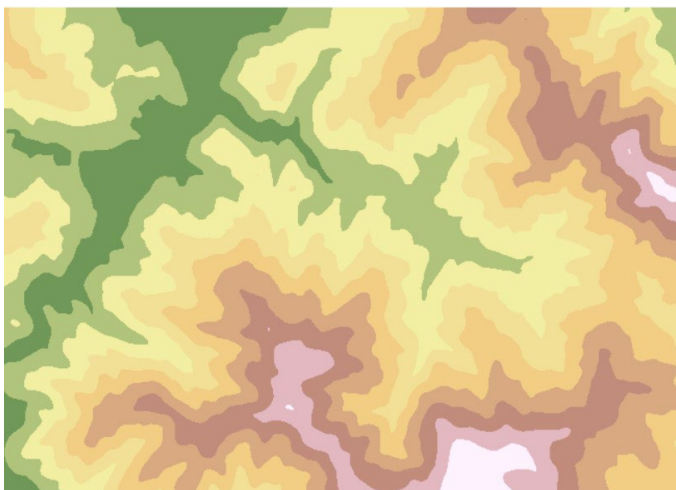
A Kriging egy geostatistikai módszer, amely a térbeli autokorreláción alapuló súlyozott átlaggal becsüli meg a cellák értékét. A tapasztalat szerint ez a módszer a jelenlegi adatstruktúrával nem volt optimális: a közeli, azonos értékű szintvonalak mentén egybefüggő, síkszerű felszíneket interpolált, miközben a felszín töredezett és szögletes karaktert öltött. A módszer statisztikai robusztussága ellenére a realisztikus domborzatérzetet nem adta vissza megfelelően.

b) Natural Neighbor (természetes szomszéd) interpoláció

Ez az eljárás egy lokálisan adaptív módszer, amely a legközelebbi ismert pontok alapján határozza meg az új cella értékét. Az így létrejött modell simább, folytonosabb és vizuálisan plasztikusabb volt. Ugyanakkor jellemző hibaformák is megjelentek, például a „bikaszem-hatás” – körkörös interpolált minták a pont-adatok körül –, valamint a szintvonalak túlzottan körívszerű lefutása, amely nem mindig felel meg a valódi topográfiának.

c) Topo to Raster

A Topo to Raster algoritmus a magassági adatok hidrológiai értelmezését is figyelembe veszi. Bár ez sok esetben kiváló felszínmodelleket hoz létre, a jelenlegi állományban ritka magasságértékek miatt torz eredmények születhetnek. A modell gyakran irreális vízfolyásokat és elágazásokat is generálhat, amelyek nincsenek jelen a valós terepen (89. ábra).



89. ábra. *Topo to Raster modul eredménye az ArcGIS-programban*

5. A modellalkotás összefoglalása

Az alkalmazott módszerek közül végül a Natural Neighbor interpoláció bizonyult a leginkább elfogadhatónak. Habár ez sem tökéletes – különösen az alacsony reliefű, síkvidéki területeken –, a felszín folytonossága és leképezett min-

tázata megfelelt a modellalkotási céloknak. A domborzati értékek 86–90 méter között mozogtak, a kiválasztott térség természetes terepszintje alapján.

A modellezés során hangsúlyt fektettem a túlzottan ható kiugró értékek szűrésére, a magassági pontok szelekciójára, valamint a vizuális és matematikai ellenőrzésre (pl. árnyékolt domborzat, szintvonal-generálás visszatesztelése).

A szintvonalak digitalizálásán alapuló domborzatmodellezés ma is használható és hatékony módszer, különösen kisebb területek részletes elemzésére, ha nem áll rendelkezésre modernabb adatforrás. Az eljárás legnagyobb előnye, hogy archív térképekre is alkalmazható, így retrospektív vizsgálatokhoz vagy változásdetekcióhoz is hozzájárulhat. Ugyanakkor a modell minősége erősen függ:

- a térkép minőségétől,
- a szintvonalak sűrűségétől,
- a magassági pontok gondos kiválasztásától,
- az alkalmazott interpolációs algoritmustól.

A digitális térképészet és fotogrammetria területén ez a módszer tehát továbbra is hasznos, de egyre inkább kiegészítő jelleggel alkalmazzák, a nagy pontosságú aktív távérzékelési megoldásokkal együtt.

4.9. Erdészetre alkalmazott példák

A fotogrammetriai eljárások az erdészet szolgálatában már évtizedek óta alkalmazásban vannak Romániában, különösen az erdőterképezés és az üzemi tervezés területén. A módszerek fejlődése párhuzamosan haladt a technológiai innovációval: a klasszikus, analóg megoldásokat mára teljes mértékben felváltották a digitális távérzékelési és feldolgozási eszközök, köztük a nagy pontosságú drónos fotogrammetria, ortofotó-alapú térképfrissítés, valamint a magassági és koronaszint-paraméterek automatikus detektálása.

4.9.1. A fotogrammetria alkalmazása a romániai erdészetben

A síkvidéki erdőállományok térképezése során már a 20. század közepétől alkalmaztak légifénykép-átrajzoló eszközöket, mint például a Zeiss LUZ készülékeket. Ezeket a technológiákat elsősorban a térképek aktualizálására használták az erdészeti üzemtervezés során. A sztereofotogrammetriai kiértékelések – vagyis a háromdimenziós térinformációk meghatározása légi fotókból – nem helyi szinten, hanem a regionális vagy központi irodákban történtek.

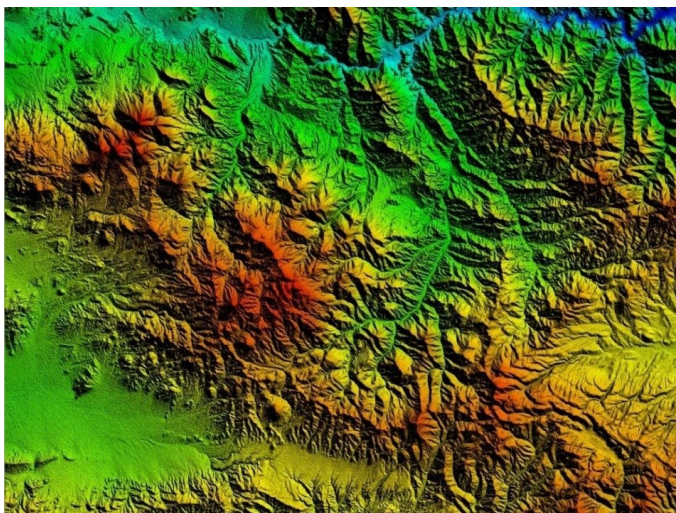
A 2000-es évek végétől a nagy felbontású ortofotók szerepe jelentősen megnőtt. Az ortofotók használatával pontos és torzításmentes térképi alap készült, amelyet a szakemberek felhasználhattak az erdőrészek határainak, úthálózatának és egyéb elemeinek pontos lokalizálására és frissítésére.

Napjainkban egyre erőteljesebben tör előre az ún. UAV- (Unmanned Aerial Vehicle) rendszerek alkalmazása, ami gyors, naprakész és hiteles képet tud biztosítani a felhasználók számára az erdőállomány állapotáról, fejlődéséről, elősegítve a tervezést és fenntartható erdőgazdálkodás precíziós tervezését és megvalósítását.

Az UAV-rendszerek – közismert nevükön drónok – megjelenése forradalmasította az erdészeti térképezést. A drónok viszonylag egyszerű felépítésük és megfizethető áruk révén elérhetővé tették a nagy felbontású téradatgyűjtést nemcsak kutatóintézetek, hanem gyakorló erdészetek számára is. Segítségükkel már nemcsak a domborzat leképezése, hanem állománystruktúra-elemzés, egészségi állapot-becslés, illetve készletfelmérés (pl. rakodókon tárolt faanyag térfogatának becslése) is kivitelezhető.

4.9.2. Domborzatmodellezés lombtalan állapotban

A lombtalan állapotban végzett repülések (ősz, tél, kora tavasz) lehetővé teszik a földfelszín nagy pontosságú vizsgálatát, mivel a levelek hiánya miatt a szenzorok több információt nyernek a terepről. Az így előállított digitális terepmodell (DTM) elengedhetetlen a famagasság-meghatározás, a lejtési viszonyok modellezése, valamint hidrológiai elemzések (pl. lefolyási útvonalak, eróziós kockázatok) alapjául (90. ábra).



90. ábra. Digitális terepmodell (DTM) elkészítése

Az ilyen jellegű felmérések sikere szorosan összefügg az időjárási és fényviszonyokkal. A repüléseket szélcsendben, csapadéktól mentes, derült vagy szórt

fénnyel megvilágított időszakban érdemes végezni. A szórt fény különösen előnyös, mert csökkenti a kontrasztarányokat, és egyenletesebb megvilágítást biztosít a képek számára.

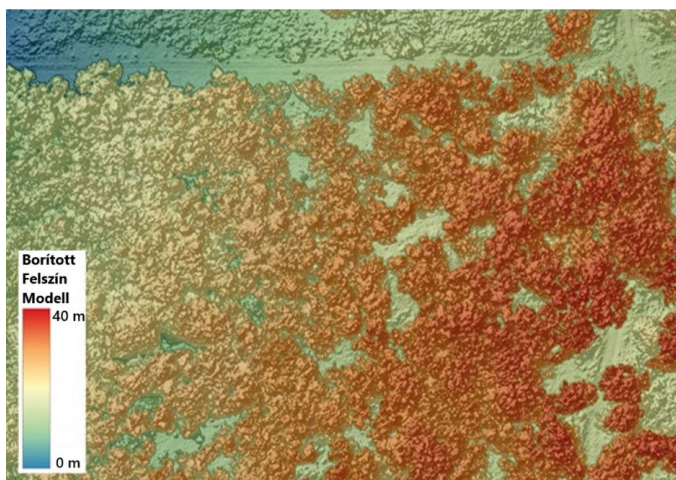
A megfelelő képátfedés kulcsfontosságú tényező: a lombtalan állapot miatt a szenzornak kisebb részen keresztül kell belátnia az erdőbe, ezért ajánlott a legalább 90%-os átfedés bázisirányban és a repülési sorok között egyaránt.

4.9.3. Faállomány-paraméterek meghatározása lombos időszakban

A lombos állapotban készült légi felvételek alapján előállított felszínmodellek (DSM) különösen alkalmasak a dendrometriai paraméterek becslésére. A legfontosabb kinyerhető mutatók:

- törzsszám: a faegyedek száma, amely különböző algoritmusok segítségével meghatározható, például lokális maximum detekció vagy inverz vízgyűjtő módszer alapján,
- lombkoronák vetületi területe: a faegyedek által lefedett terület, amelyet manuálisan vagy automatikusan lehet kijelölni,
- záródás (canopy closure): a lombkoronák együttes fedése az adott területen (Czímber szerk. 2025).

Amennyiben a felszínmodell normalizálva van (azaz kivontuk belőle a terepmodellt), a magassági értékek már a talajszint feletti növényzeti magasságot reprezentálják, így közvetlenül leolvasható a faegyedek magassága is (91. ábra).



91. ábra. Borított felszínmodell egy erdőrészletről, forrás: Czímber et al. 2025

A fentiekén túl indirekt paraméterek is becsülhetők statisztikai összefüggések alapján:

- a lombkorona-vetület és a mellmagassági átmérő közötti kapcsolat alapján becsülhető az átlagátmérő,
- a magasság-átmérő függvények segítségével meghatározható az állomány fatérfogata.

Ezek a módszerek különösen akkor működnek jól, ha az adott erdőrészletben:

- már túl vannak a növedékfokozó gyérítéseken,
- nincs második koronaszint (aljnövényzet vagy újulat),
- a felső koronaszint egyértelműen detektálható.

Egyéb alkalmazási lehetőségek

Az UAV-alapú fotogrammetria új távlatokat nyitott az erdőmérnöki munkában. A modellek felhasználhatók:

- útvonaltervezéshez és feltáróhálózat optimalizálásához,
- károsítások detektálásához (pl. szélkár, száradás, gombafertőzés),
- erdőgazdálkodási beavatkozások tervezéséhez (pl. tarvágás, szálalás),
- faanyag-kihozatal logisztikájának támogatására,
- erdőtüzek utáni kárfelméréshez.

A fotogrammetria és távérzékelés alkalmazása az erdészetben ma már nem csupán kiegészítő módszer, hanem integrált eszköz az erdőállomány állapotának térbeli feltárásához és menedzseléséhez, pl. NDVI-felmérésekkel (92. ábra). A térképezés, dendrometria és készletbecslés mellett monitoring- és előrejelző rendszerek alapjául is szolgálnak ezek az eljárások. A technológiai fejlődéssel együtt ezek az eszközök egyre hozzáférhetőbbé válnak az operatív erdészeti munka számára is, így elősegítik a fenntartható és precíziós erdőgazdálkodás megvalósítását (24. táblázat).

24. táblázat. UAV-fotogrammetria erdészeti alkalmazásainak részletes áttekintése

Alkal-mazási terület	Ajánlott évszak / lombál-lapot	Ajánlott szenzor-típus	Repülési paramé-terek	Szüksé-ges átfedés (%)	Szükséges előfeldol-gozás	Előál-lított modell	Felhasz-nálható mutatók / eredmények
Dom-borzat-modell (DTM)	Lomb-talan időszak (tél/kora tavasz)	RGB vagy multi-spektrális kamera	~80–100 m repü-lési ma-gasság, 2–5 cm GSD	90 / 90 (előre és oldali-rányban)	Fotogram-metriai illesztés, GCP-k	DTM (Digital Terrain Model)	Lejtés, kitett-ség, erózió, famagasság normalizálás

Alkal- mazási terület	Ajánlott évszak / lombál- lapot	Ajánlott szenzor- típus	Repülési paramé- terek	Szüksé- ges átfé- dés (%)	Szükséges előfeldol- gozás	Előál- lított modell	Felhasz- nálható mutatók / eredmények
Fama- gasság, lombko- ronaszint	Lombos időszak (nyár/ késő tavasz)	RGB vagy multi- spektrális kamera	~80 m, 2–3 cm GSD	85–90 / 85–90	DSM-DTM normalizálás	DSM, nDSM (felszín- modell)	Csúcspontok, magasság, záródás, vetület
Törzsszám- és faegyed- detekció	Lombos időszak	RGB, multispektrális, LiDAR, ha van	Alacsonyabb repülési magasság (~50–70 m)	>90% szükséges a faegyed- elkülönítéshez	Lokális maximumkeresés, klaszterezés	nDSM vagy pontfelhő	Törzsszám, lombkorona-terület, fahelyzet
Fatér- fogat- becslés	Lombos időszak, ritkás állomány	RGB, multispekt-rális + mintavétel	50–80 m	85 / 85	Statisztikai becslés, függvényillesztés	Dendrometriai adatbázis	Átlagátmérő, egyedi vagy állomány szintű fatérfogat
Egészségi állapot (korona- színek)	Lombos időszak, napos idő	Multi-spektrális, RGB, esetleg termál-kamera	80–100 m	80 / 80	NDVI/NDRE-számítás, osztályozás	Térképretegek, indikátortérkép	Stressz, betegségek, száradásos gócok
Térfogat- becslés (rakat, sarang)	Bármely időszak, jó fényviszony	RGB-kamera, alacsony magasság (~20 m)	2–5 cm GSD	85 / 85	Pontfelhőszűrés, térfogatmódellezés	3D-rakatomdell	Űrméter, térfogat (m³), készletbecslés
Térképi aktu- lizálás	Egész évben (lombtól független)	RGB-kamera, RTK-drón előny	100–120 m, ~5 cm GSD	80 / 80	Ortofotogenerálás	Ortofotó (georeferált)	Erdőrészlet-határok, utak, objektumok aktualizálása

4.9.4. Egészségügyi felmérés fotogrammetriai módszerekkel

Az erdőállományok egészségi állapotának rendszeres nyomon követése elengedhetetlen a fenntartható erdőgazdálkodás és a természetvédelmi célú beavatkozások szempontjából. A hagyományos terepi vizsgálatokat napjainkban egyre inkább kiegészítik – sőt sok esetben részben kiváltják – a drónalapú multispektrális távérzékelési megoldások. Ezek a módszerek lehetővé teszik, hogy az erdőrézszletek vegetációs állapotát gyorsan, objektíven és térben részletezett módon vizsgáljuk, még akkor is, ha az adott terület nehezen járható vagy kiterjedt.

A multispektrális kamerákkal felszerelt UAV-rendszerek képesek nemcsak a látható spektrum (vörös, zöld, kék – RGB) sávjában, hanem a közeli infravörös

(NIR – Near Infrared) tartományban is adatokat rögzíteni. Ez utóbbi különösen fontos a vegetáció állapotának vizsgálatában, mivel a növények levelei egészséges állapotban visszaverik a NIR-sugárzást, míg beteg, kiszáradt vagy stresszes növényzet esetén ennek mértéke jelentősen csökken.

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

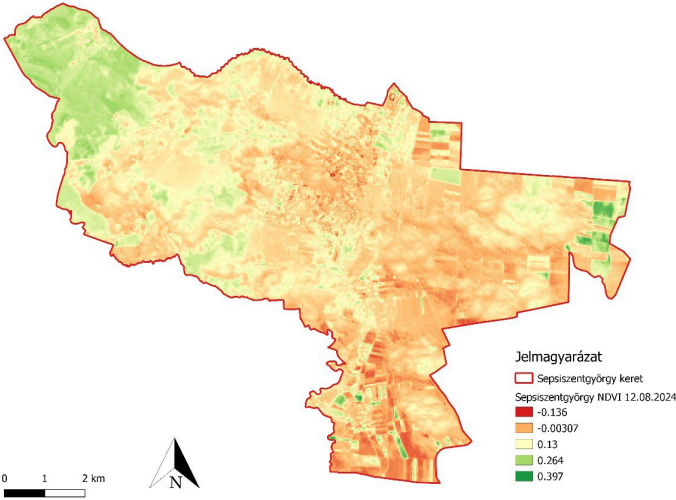
A vörös és NIR-sávok kombinálásával számítható ki a legismertebb vegetációs index, az úgynevezett NDVI (Normalised Difference Vegetation Index), amely az alábbi képlettel írható fel:

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$$

Ez az index –1 és +1 közötti értékeket vehet fel, de a növényzeti alkalmazásokban jellemzően 0 és 1 közötti tartományban értelmezzük. Az alacsony NDVI-értékek gyenge vagy hiányzó vegetációra, míg a magasabb értékek egészséges, aktívan fotoszintetizáló lombkoronaszintre utalnak (25. táblázat).

25. táblázat. *NDVI-értékek értelmezése erdészeti környezetben*

NDVI-tartomány	Jelentés
< 0,2	Nincs vagy nagyon gyenge vegetáció (pl. kopár talaj, vízfelszín)
0,2–0,4	Ritka vagy stresszes vegetáció, beteg állományrészek
0,4–0,6	Mérsékeltén aktív lombkoronaszint, gyér záródás vagy kezdeti stressz
> 0,6	Egészséges, zárt lombkoronaszint, magas fotoszintetikus aktivitás



92. ábra. *Sepsiszentgyörgy NDVI-térképe 2024. 08. 12-én*

Az NDVI-térképek segítségével számos fontos állománydiagnosztikai következtetés vonható le. Az aktív vegetációs időszakban, például nyáron vagy kora ősszel végzett felmérések jól kimutatják a lombvesztés, aszály, kórokozók vagy mechanikai sérülések okozta vegetációs stresszt. Ilyen módszerekkel azonosítani lehet a betegségnek kitett egyedeket, gyenge záródású állományrészeket vagy azokat a területeket, ahol az erdősítési kísérlet esetleg nem járt sikerrel. Az NDVI-térképek időbeli összehasonlítására is lehetőség nyílik, így nemcsak pillanatfelvételt kaphatunk az erdő állapotáról, hanem nyomon követhetjük a változásokat, például a szűkárók utáni regeneráció vagy a száraz időszak okozta állapotromlás mértékét is (92. ábra).

Az aktív vegetációs időszakban (május–szeptember) készült NDVI-térképek alapján jól azonosíthatók:

- a szárazságtűrő vs. érzékeny fafajok különbségei,
- a korhadó vagy betegség által megtámadott állományrészek,
- az invazív fajok elterjedése (pl. *Robinia pseudoacacia*, *Ailanthus altissima*),
- a táplálkozó rovarok (pl. *Lymantria dispar*) okozta lombvesztés térbeli mintázata.

A módszer alkalmazható idősoros vizsgálatokra is, ahol több NDVI-felvétel alapján követhető a degradáció vagy a regeneráció dinamikája (pl. szűkárók utáni helyreállítás).

Felvételezés és kiértékelés

A multispektrális adatgyűjtés tipikusan 80–120 méteres repülési magasságról történik, megfelelő képátfedéssel és világítási viszonyok mellett. A méréseket rendszerint szórt fény mellett érdemes végezni, a képek ortorektifikálása és kalibrálása során pedig ajánlott reflektanciapanelt vagy fényviszony-érzékelőt használni. A feldolgozás során elkészített ortomozaik alapján az NDVI-képek a vegetációs aktivitás térbeli eloszlását mutatják meg. Az anomáliák vizuális vizsgálatán túl statisztikai elemzések is elvégezhetők, amelyek révén az egyes erdőrészek közötti különbségek számszerűsíthetők.

Bár az NDVI a legelterjedtebb mutató, más vegetációs indexek is használhatók, például az NDRE, amely érzékenyebb lehet enyhébb stresszhatások detektálására, vagy az MSAVI, amely jobban kezeli a ritka vegetációs borítottságot. Egyes esetekben a termálkamerával történő felmérés is hasznos lehet, különösen akkor, ha a levélhőmérséklet változása is árulkodik a növény vízállapotáról vagy párologtatási aktivitásáról. A jövőben a gépi tanuláson alapuló koronaszint-osztályozások és automatikus betegségdetekciós algoritmusok (pl. deep learning) még nagyobb jelentőségre tehetnek szert.

Összefoglalva, a drónos multispektrális távérzékelés a faállomány egészségügyi állapotának vizsgálatában precíz, gyors és nem destruktív módszert kínál. Különösen értékes azokban az esetekben, amikor nagy területű vagy nehezen

bejárható állományokat kell monitorozni, illetve amikor a beavatkozások térbeli célzottságát szeretnénk növelni. Az ilyen eljárások bevezetése tehát nem csupán kutatási, hanem gyakorlati szinten is komoly előrelépést jelent az erdészeti távérzékelés területén.

TÉRINFORMATIKA

5.1. A térinformatika fejlődése

A térinformatikai rendszerek kezdetei: az 1960-as évek

A térinformatika története az 1960-as évekig nyúlik vissza, és elsősorban az Egyesült Államok hadseregéhez, a geológiai szolgálathoz, valamint tudományos intézményekhez, például a Harvard Egyetemhez kapcsolódik. Ezzel párhuzamosan Kanadában is elindultak hasonló fejlesztések, különösen a Kanadai Erdőgazdálkodási és Vidékfejlesztési Minisztérium kezdeményezései révén.

A kezdeti fejlesztések különböző célokat szolgáltak, attól függően, hogy civil vagy katonai felhasználásról volt szó. A civil szektorban az igények elsősorban adminisztratív rendszerek létrehozására koncentráltak, mint például a földtulajdon-viszonyok nyilvántartása. Ezzel szemben a katonai alkalmazásoknál a térinformatikai rendszerek inkább logisztikai és szállítmányozási kérdések megoldására irányultak. Ez a kettősség a térinformatikai rendszerek fejlődésének egyik meghatározó eleme volt az első időszakban.

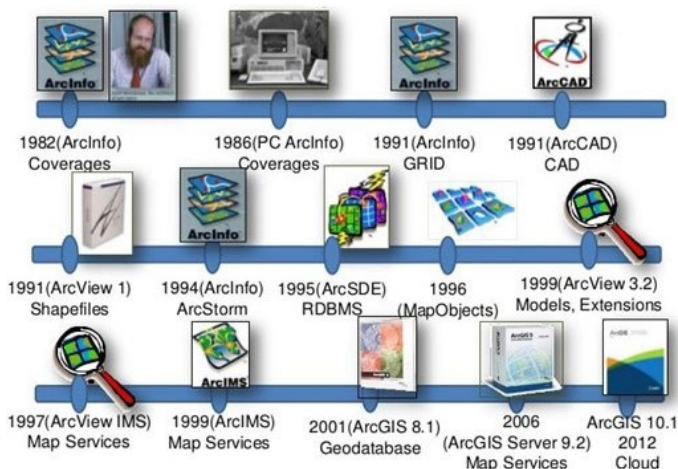
A második fázis: a közintézmények és minisztériumok szerepe az 1970-es években

Az 1970-es évek során a térinformatikai rendszerek fejlesztése új lendületet kapott. A közintézmények, minisztériumok és kormányzati szervezetek jelentős erőforrásokat mozgósítottak annak érdekében, hogy térinformatikai alapú rendszereket fejlesszenek ki. Ebben az időszakban azonban még nem léteztek kereskedelmi forgalomban kapható térinformatikai szoftverek. Az állami szervezetek, például az USA Természetvédelmi Hivatala, saját fejlesztéseikre támaszkodtak, hogy kielégítsék a földrajzi információs rendszerek iránti növekvő igényeket.

Az 1970-es évek egyik fontos vívmánya a vektoros és raszteres adatfeldolgozási igények elkülönülése volt. Míg a vektoros rendszerek elsősorban pontok, vonalak és poligonok használatával ábrázolták a földrajzi adatokat, a raszteres rendszerek nagyobb felbontású, képeken alapuló adatokat kezeltek. Ez a két technológia azóta is meghatározó szerepet játszik a térinformatikai rendszerek fejlődésében, és az eltérő alkalmazási területek eltérő megközelítéseket igényelnek.

A térinformatika kereskedelmi forradalma: 1980-as évek

Az 1980-as években a térinformatikai rendszerek fejlődése kereskedelmi szempontból is fordulóponthoz érkezett. A korábban állami és tudományos célokra fejlesztett rendszerek helyett megjelentek az első kereskedelmi forgalomba kerülő GIS-szoftverek, pl. ArcGIS-szoftvercsalád (93. ábra). Ezeket a szoftvereket immár nemcsak a kormányzati szervek, hanem a magánszektor is igénybe vehette, igaz, az árak még mindig rendkívül magasak voltak.



93. ábra. Az ArcGIS-szoftvercsalád fejlődése

A piacra lépő cégek közül kiemelkedett az Intergraph és az ESRI (Environmental Systems Research Institute). Az Intergraph eredetileg az amerikai kormány megbízásából fejlesztett térinformatikai rendszereket, majd az 1980-as évek elején kezdett kereskedelmi szoftvereket is kínálni. Az ESRI, amely 1969-ben alakult, a földrajzi információs rendszerek fejlesztésére specializálódott, és mára a térinformatikai piac egyik vezető szereplőjévé vált.

A kereskedelmi rendszerek megjelenésével egy új probléma is felmerült: a szoftverek által generált téradatbázisok nem voltak kompatibilisek egymással. A különböző fejlesztők által létrehozott programok saját formátumokat használtak, ami megnehezítette az adatok megosztását és újrafelhasználását. Ez különösen költséges volt az olyan szervezetek számára, amelyek többféle GIS-rendszert használtak, mivel minden egyes szoftverhez külön szakértőkre volt szükség.

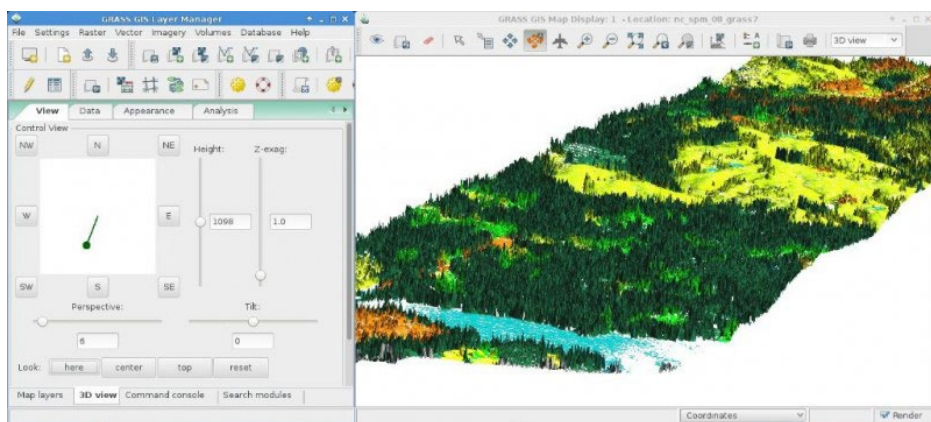
Az interoperabilitás igénye: az 1990-es évek

Az 1990-es évek elején egyre világosabbá vált, hogy a térinformatikai rendszerek hatékony működéséhez szükség van az interoperabilitásra, vagyis arra,

hogy a különböző szoftverek közötti adatmegosztás egyszerű és gyors legyen. Ez az igény vezette a GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) fejlesztéséhez, amely az amerikai hadsereg által készített, UNIX-alapú, raszteres térinformatikai szoftver volt. A GRASS széles körben elterjedt az Egyesült Államokban, és szinte állami szabványként kezelték.

1992-ben megalakult az Open GRASS Foundation (OGF), amely a GRASS-felhasználók nonprofit közösségeként jött létre, és célja az volt, hogy a civil szférában is népszerűsítse a GRASS használatát. Bár az OGF nem érte el teljes mértékben a célját, 1994-ben létrejött az Open Geospatial Consortium (OGC), amely piaci szereplőkből és kormányzati szervezetekből állt, és célja az volt, hogy megteremtse a térinformatikai szoftverek közötti átjárhatóságot (94. ábra).

Az OGC fő feladata az volt, hogy szabványokat hozzon létre a térinformatikai szoftverek interfészei számára, lehetővé téve ezzel az adatok megosztását és újrafelhasználását különböző programok között. Bár az interoperabilitás teljes megvalósítása még ma sem valósult meg teljes mértékben, az OGC által kidolgozott szabványok jelentős előrelépést hoztak ezen a területen.



94. ábra. Grass GIS 8.4.0 verziója, forrás: GRASS GIS 2025

Az operációs rendszerek és a térinformatikai rendszerek kapcsolata

A térinformatikai rendszerek fejlesztésében kezdetben az UNIX és LINUX operációs rendszerek játszották a fő szerepet. Ezek az operációs rendszerek a számítástechnika korai időszakában, amikor még nem volt széles körben elterjedt a személyi számítógépek használata, megbízható alapot nyújtottak a nagyobb adatmennyiségeket kezelő térinformatikai rendszerek fejlesztéséhez.

Az 1990-es évek második felétől azonban a Windows operációs rendszer elterjedése új kihívásokat és lehetőségeket hozott a térinformatikai piac számára. A GIS-fejlesztők egyre inkább a Windows-rendszereken való futtathatóságra

összpontosítottak, és bár kezdetben a UNIX-ról történő portolásra (átdolgozásra) volt szükség, a piac növekedése és a Windows-alapú rendszerek megbízhatóbbá válása miatt ez a trend fokozatosan megváltozott.

Mára a térinformatikai szoftverek számos operációs rendszeren futtathatók, beleértve a Windows, LINUX- és macOS-rendszereket is. Mindegyik platformon elérhetők zárt forráskódú (kereskedelmi forgalomban kapható, fizetős) és nyílt forráskódú (ingyenesen hozzáférhető és fejleszthető) GIS-alkalmazások. A nyílt forráskódú szoftverek népszerűsége folyamatosan nő, mivel rugalmasságuk és költséghatékonyságuk vonzóvá teszi őket különböző felhasználók számára, beleértve a tudományos kutatókat és a kisvállalkozásokat is.

A szabványosítás és az interoperabilitás jövője

Az OGC és más hasonló szervezetek munkája továbbra is alapvető szerepet játszik abban, hogy a térinformatikai rendszerek közötti adatmegosztás és interoperabilitás fejlesztése folytatódjon. A nyílt rendszerek koncepciója – amelyek lehetővé teszik, hogy egy szoftverrel létrehozott adatállományokat más programok is olvashassanak – már most is számos területen alkalmazható, és a jövőben várhatóan még szélesebb körben elterjed majd.

A szabványosítás előtt álló egyik legnagyobb kihívás a különböző geodéziai vetületi és koordináta-rendszerek sokfélesége, amely világszerte megnehezíti az interoperabilitást. A különböző országok és régiók saját, specifikus rendszereket használnak, amelyek közötti átjárhatóság még ma sem teljesen megoldott.

A térinformatika folyamatos fejlődése során azonban egyértelműen látható, hogy a globális adatmegosztás és a szabványosítás irányába mutató törekvések előbb-utóbb elérik céljukat. A térinformatikai rendszerek így nemcsak hatékonyabbá, hanem szélesebb körben elérhetővé is válnak a felhasználók számára. Az ilyen rendszerek nagy hatással vannak számos területre, beleértve a mezőgazdaságot, erdőgazdálkodást, várostervezést és környezetvédelmet, amelyek mindegyike profitálhat a térinformatika nyújtotta lehetőségekből.

5.2. A térinformatika és alkalmazási területei

A geoinformatika, más néven térinformatika, egy olyan multidiszciplináris tudományág, amely a földrajzi térhez kapcsolódó információk gyűjtésével, feldolgozásával, elemzésével és vizualizálásával foglalkozik. Alapja a földrajzi helyzetet és térbeli összefüggéseket tükröző adatok, amelyeket térinformatikai rendszerek (GIS) segítségével lehet kezelni, elemezni és bemutatni. Ezen rendszerek lehetőséget biztosítanak arra, hogy a különféle, helyhez kötött adatokat térben és időben értelmezzük, és ezek alapján meghatározzuk például a mezőgazdasági vagy erdőgazdálkodási feladatokat.

5.2.1. A geoinformatika alkalmazási lehetőségei az agrármérnöki oktatásban

Az agrármérnöki oktatás célja, hogy a diákok megfelelő ismeretekkel rendelkezzenek a modern mezőgazdasági technológiák és módszerek terén. Ebben kulcsfontosságú szerepet játszik a geoinformatika, mivel lehetővé teszi a precíziós mezőgazdasági eljárások alkalmazását, ami növeli a termelékenységet, miközben minimalizálja a környezeti terhelést.

1. *Precíziós mezőgazdaság*

A precíziós mezőgazdaság alapvető része a térinformatika, amely segítségével optimalizálható a termelési folyamatok minden fázisa. Az olyan eszközök, mint a GPS-alapú traktorirányítás és a drónok által szolgáltatott légi felvételek, rendkívül pontos adatokat nyújtanak a mezőgazdasági területekről, amelyek alapján a talaj minősége, a növények állapota, valamint az esetleges betegségek észlelhetők.

A drónok és műholdas távérzékelési módszerek révén a mezőgazdasági területek növényeinek állapotát valós időben követhetjük nyomon. A hamis színes képek például lehetővé teszik, hogy felismerjük a különböző növények tápanyaghiányát, illetve a kártevők jelenlétét, mielőtt ezek még látható károkat okoznának. Az ilyen adatok alapján a gazdák célzottan és csak ott alkalmaznak műtrágyát vagy növényvédő szereket, ahol valóban szükséges.

2. *A talajminőség és földhasználat optimalizálása*

A térinformatikai rendszerek fontos szerepet játszanak a talajminőség felmérésében és a területhasználat optimalizálásában. A geoinformatika segítségével részletes talajtérképeket lehet készíteni, amelyek megmutatják az adott földterület különböző részeinek adottságait, így például a talaj összetételét, pH-értékét vagy vízmegtartó képességét. Az ilyen információk alapján a gazdák eldönthetik, hogy mely növények a legmegfelelőbbek az adott területen, és hogyan lehet a legjobban hasznosítani a földet.

A távérzékelési módszerek (például műholdak és drónok) által szolgáltatott adatok alapján elemezhető a területek nedvességtartalma, ami kulcsfontosságú információ a vízgazdálkodásban és az öntözési rendszerek kialakításában. Ezek az információk elősegítik a vízhasználat optimalizálását, így csökkentve a pazarlást és növelve a hatékonyságot.

3. *A növénybetegségek és kártevők nyomon követése*

A térinformatika segítségével a növények betegségei és a kártevők terjedése időben felismerhető, ami lehetővé teszi a gyors és célzott beavatkozást. A drónok

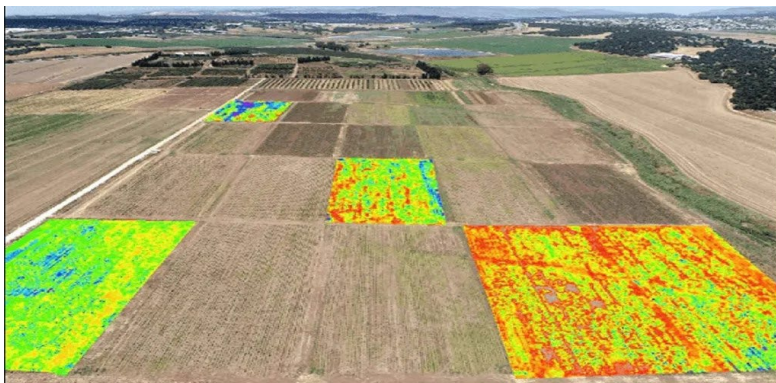
által készített nagy felbontású képeken már a legkisebb változások is észlelhetők a növények egészségi állapotában. Például a levelek színének vagy formájának változása a távérzékelési adatok alapján már akkor észlelhető, amikor még a gazdák szabad szemmel nem is látják a problémát.

Ezek az eszközök segítik a gazdákat abban, hogy időben alkalmazzák a megfelelő növényvédő szereket, így megelőzve a kiterjedt terméskárokat. Emellett a térinformatikai rendszerek lehetővé teszik a kártevők terjedési mintázatainak elemzését, így a gazdák előre felkészülhetnek a várható problémákra.

4. Területmonitoring

Továbbá, a geoinformatika lehetővé teszi a mezőgazdasági parcellák monitorizálását és a kataszteri nyilvántartást, ami segíti a földhasználati döntések pontosabb tervezését és nyomon követését. Az ilyen típusú nyilvántartás biztosítja, hogy a különböző földterületek pontos adatokat kapjanak a tulajdonjogról, használatról és kezelési előzményekről. Ez különösen fontos a földterület-nyilvántartási rendszerek fejlesztésében, amelyek elősegítik a mezőgazdasági területek hatékony és fenntartható kezelését.

Ezek az eszközök nemcsak a GIS és a távoli érzékelés technikáit alkalmazzák, hanem integrálják a GPS adatait is, amelyek segítik a precíziós gazdálkodást. A geoinformatikai ismeretek birtokában a jövő agrármérnökei képesek lesznek hatékonyabban kezelni a természeti erőforrásokat, optimalizálni a termelési folyamatokat, és hozzájárulni a fenntartható mezőgazdasági gyakorlatok kialakításához (95. ábra).



95. ábra. Térinformatika a mezőgazdaságban, forrás: GeoPard 2024

5.2.2. Geoinformatika az erdészmérnöki oktatásban

Az erdészmérnöki oktatásban a geoinformatika szintén kulcsszerepet játszik, mivel az erdőgazdálkodás területén is elengedhetetlen a térbeli adatok pontos ismerete. Az erdészeti területek kezelésénél fontos a faállomány állapotának, a biodiverzitásnak, valamint az erdőökológiai folyamatoknak a nyomon követése, amit a geoinformatika eszközei hatékonyan támogatnak.

1. Az erdőállomány nyilvántartása és kezelése

A térinformatikai rendszerek segítségével pontos nyilvántartás készíthető az erdőállományról, amely magában foglalja a különböző fafajok elhelyezkedését, életkorát és állapotát. Ezek az adatok nemcsak az erdőgazdálkodás tervezésében segítenek, hanem a fenntartható erdőkezelési módszerek alkalmazásában is. Az erdészmérnokok ezek alapján tudják megtervezni az erdőtelepítést, a fakitermelést, valamint az erdők újratelepítését és gondozását.

2. A vadgazdálkodás és biodiverzitás nyomon követése

A vadgazdálkodásban és a biodiverzitás megőrzésében a geoinformatika kulcsszerepet játszik. Az állatok mozgásának és élőhelyeik változásainak követése a GPS-technológia és a térinformatikai elemzések segítségével valósítható meg. Például a vadállomány paramétereinek ismeretében meghatározhatók azok a területek, ahol az adott vadfajok gyakrabban fordulnak elő, így hatékonyabban lehet megtervezni a vadgazdálkodási stratégiákat.

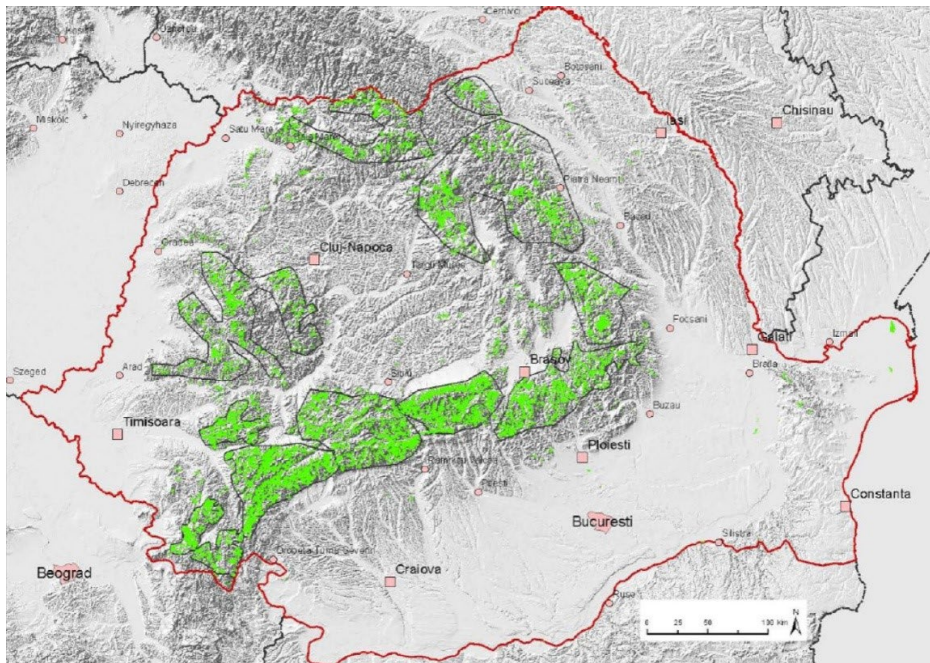
A térinformatikai rendszerek segítségével modellezhetők az állatok élőhelyei, valamint a környezeti változások hatása a biodiverzitásra. Ezáltal előre jelezhetők az ökológiai változások és az emberi tevékenységek hatásai az erdőkre és az élővilágra.

3. A klímaváltozás hatásainak elemzése az erdőgazdálkodásban

A klímaváltozás komoly kihívások elé állítja az erdőgazdálkodást, mivel a hőmérséklet és a csapadék változásai jelentős hatással vannak az erdők egészségére és regenerációs képességére. A geoinformatika segítségével nyomon követhetők ezek a változások, és előre jelezhetők azok a területek, amelyek a leginkább ki vannak téve a klímaváltozás hatásainak.

A térinformatikai adatok lehetővé teszik az erdők állapotának hosszú távú nyomon követését, így a döntéshozók hatékonyabb stratégiákat dolgozhatnak ki a klímaváltozás elleni védekezésre. A térképek és elemzések alapján az erdészeti szakemberek meghatározhatják, mely területeken van szükség az erdők regene-

rációjára, valamint hol kell megváltoztatni az erdőgazdálkodási gyakorlatokat a fenntarthatóság érdekében (Turai 2019) (96. ábra).



96. ábra. Térinformatika az erdészetben, forrás: Hirschmugl 2023

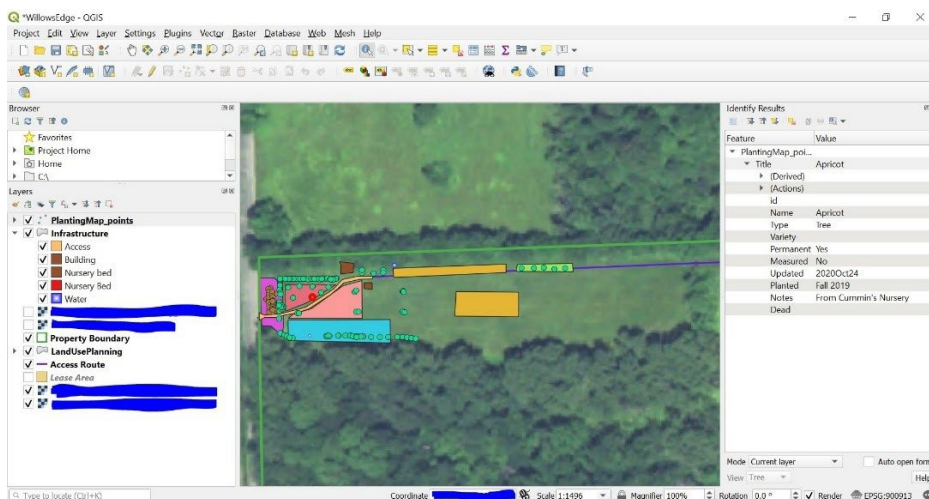
5.3. Térinformatikai rendszerek és eszközök

A geoinformatika oktatásában számos modern technológia és eszköz segíti a diákokat abban, hogy elsajátítsák a térbeli adatok kezelésének és elemzésének alapjait.

1. GIS-szoftverek

A GIS-szoftverek, mint például az ArcGIS vagy a QGIS, alapvető eszközei a térinformatikai adatok kezelésének és elemzésének (97. ábra). Ezek a programok lehetővé teszik a térbeli adatok összegyűjtését, rendszerezését, térképek készítését, valamint a különféle elemzések elvégzését.

Az agrár- és erdészeti oktatás során ezeknek a szoftvereknek a használata elengedhetetlen, mivel a diákok ezek segítségével sajátíthatják el a térinformatikai adatok gyakorlati alkalmazását.



97. ábra. Agrárerdő-faültetések és mezőgazdasági elemek nyomon követése QGIS segítségével, forrás: Alchemecology 2025

2. Távérzékelési eszközök

A távérzékelési eszközök – mint például a műholdak és a drónok, amelyeket a 2., 3. és 4. fejezetekben részleteztünk – segítenek abban, hogy nagy területekről gyűjtsünk adatokat gyorsan és hatékonyan.

3. GPS-technológia

A GPS-technológia az egyik legfontosabb eszköze a térinformatikának, mivel pontos helymeghatározást biztosít. A GPS-eszközök segítségével az erdészeti gépek pontosan irányíthatók, így elkerülhetők a felesleges átfedések vagy kihagyások a beavatkozás során.

Az erdészetben a GPS lehetővé teszi az állatok mozgásának nyomon követését is, valamint az erdők állapotának pontos felmérését és nyilvántartását.

A geoinformatika tehát kulcsfontosságú szerepet játszik az erdészeti oktatásban. Az ezen a területen elsajátított tudás nemcsak a termelési folyamatok hatékonyságát növeli, hanem hozzájárul a fenntartható erdő- és mezőgazdasági gyakorlatok kialakításához is. A térinformatikai rendszerek, a távérzékelési technológiák és a GPS-eszközök lehetőséget nyújtanak arra, hogy a diákok olyan modern technológiákkal ismerkedjenek meg, amelyek a jövő mezőgazdaságának és erdőgazdálkodásának alapját képezik (98. ábra).



98. ábra. A Geode Submeter GPS-vevő sűrű erdő lombkoronája alatti tesztelése, forrás: Merrell 2017

5.4. Adat és információ a térinformatikában

A térinformatika vagy GIS területén az „adat” és az „információ” fogalmak gyakran összemosódnak, pedig lényeges különbség van közöttük. Az adat alapvetően a tereppontok, objektumok vagy jelenségek nyers, feldolgozatlan attribútuma, amely önmagában nem hordoz értelmezhető jelentést. Ezzel szemben az információ az adatok értelmezéséből, összefüggéseinek feltárásából és feldolgozásából keletkezik, és már képes a döntéshozatalban, a tervezésben és a problémamegoldásban konkrét hasznot hozni.

Az adat információvá válásának folyamata

Az adat és az információ közötti átmenetet az adat feldolgozásának folyamata jellemzi, amely során a „nyers” adatokból értelmezhető információ válik. E folyamatot az alábbi lépések szemléltetik (99. ábra):

1. *Adatgyűjtés:* Az első lépés a terepi adatok gyűjtése. Ebbe beletartozik a térbeli objektumok (például földrajzi helyek, határok, infrastrukturális elemek) mérése és rögzítése különféle eszközökkel, például GPS-szel, távolságmérővel vagy drónokkal. Ezek a nyers adatok még nem hordoznak önmagukban jelentést, csupán a valós világ különféle aspektusainak leképezései.

2. *Adattárolás:* Az összegyűjtött adatokat ezután digitális formátumban tároljuk, például adatbázisokban vagy fájlrendszerekben. A GIS-rendszerek esetében az adatok gyakran térbeli adatbázisokban helyezkednek el, amelyek lehetővé

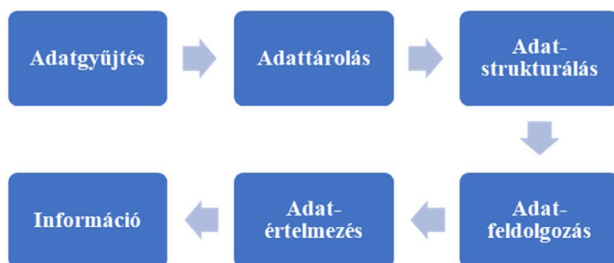
teszik a különböző típusú adatok (például pontok, vonalak, területek) hatékony kezelését és keresztkapcsolatait.

3. *Adatstrukturálás*: A gyűjtött nyers adatok rendezése és struktúrába szervezése, hogy könnyebben kezelhetők és elemezhetők legyenek.

4. *Adatfeldolgozás*: Az adatfeldolgozás során a nyers adatokat olyan formába alakítjuk, amely lehetővé teszi azok értelmezését. Ez magában foglalja az adatminőség ellenőrzését, a hibák javítását, az adatok különböző forrásokból való integrálását és az adatok térbeli elemzését. A feldolgozás eredményeképpen már olyan adathalmazokat kapunk, amelyek közelebb állnak az információhoz, de még mindig nem teljesen értelmezhetők.

5. *Adatértelmezés és -elemzés*: Ebben a szakaszban az adatok elemzésén keresztül információvá válnak. Az elemzés során különböző GIS-eszközöket használhatunk, például térképeket, statisztikai modelleket vagy térbeli elemzéseket, hogy az adatokból konkrét információt nyerjünk. Például ha a nyers adatok területi növényzetborítást tartalmaznak, az elemzés során megállapítható, hogy hol található a legnagyobb biomasszájú területek, ami már információnak minősül.

6. *Információ bemutatása*: A végső lépés az információ vizualizálása és prezentálása. A GIS-ben gyakran használunk térképeket, grafikonokat, jelentéseket, amelyek segítenek az információ könnyű megértésében és a döntéshozatalban. Ez a folyamat teszi lehetővé, hogy az összetett adathalmazokból konkrét és hasznos információk szülessenek, amelyek támogatják az agrár- és erdészeti menedzsment döntéseit, például a talajhasználati tervek kidolgozásában vagy az erdőgazdálkodási stratégiák meghatározásában.



99. ábra. Az adat és az információ közötti átmenet folyamata, forrás: saját szerkesztés

A GIS szerepe az adat információvá alakításában

A GIS-rendszerek központi szerepet játszanak abban, hogy az adatokat információvá alakítsák. Ezek a rendszerek képesek kezelni a nagy mennyiségű, különböző formátumú adatot, és eszközöket biztosítanak azok elemzéséhez. A GIS nemcsak a nyers adatok tárolására és megjelenítésére szolgál, hanem azok értelmezésére is, segítve ezzel a döntéshozók munkáját.

Összefoglalva, az adat és az információ közötti különbség megértése elengedhetetlen a térinformatikai rendszerek hatékony használatához. Az adatok megfelelő feldolgozása és elemzése révén a GIS lehetővé teszi, hogy a terepi mérésekből származó nyers adatok értékes, döntéstámogató információvá alakuljanak, amelyek közvetlenül befolyásolhatják az agrár- és erdészeti menedzsment döntéseit.

5.5. Grafikus adatmodellek

A grafikus adatmodellek a térinformatikai rendszerek alapvető eszközei, amelyek lehetővé teszik a földrajzi adatok vizuális megjelenítését, elemzését és kezelését. Ezek az adatmodellek segítenek abban, hogy a térbeli információkat érthető, szemléletes formában jelenítsük meg, és támogassuk a különböző térbeli elemzéseket. A leggyakrabban használt grafikus adatmodellek a vektoros és a raszteres adatmodellek, de léteznek egyéb típusok is, mint például a topológiai adatmodellek (100. ábra).



100. ábra. Grafikus és leíró adatok kapcsolata, forrás: Takácsné 2013

1. Vektoros adatmodell

A vektoros adatmodell a földrajzi objektumokat pontok, vonalak és poligonok (sokszögek) segítségével reprezentálja.

- Pont: egyedi helyek, például egy fa, egy épület vagy egy kút helyzete.
- Vonal: lineáris objektumok, mint például utak, folyók vagy elektromos vezetékek.
- Polygon: zárt sokszög, amely területeket reprezentál, mint például tavak, földterületek vagy erdőrészek.

A vektoros adatmodell előnyei közé tartozik a nagy pontosság és részletesség, valamint a könnyű szerkeszthetőség és átfedés kezelése.

2. Topológiai adatmodell

A topológiai adatmodell a térbeli objektumok közötti kapcsolatokat (pl. szomszédság, átfedés, összeköttetés) ábrázolja. Ez a modell biztosítja, hogy az objektumok közötti térbeli kapcsolatok pontosan leképezhetők legyenek.

- Szomszédság: melyik terület szomszédos egy másikkal?
- Átfedés: két vagy több terület átfed-e egymással?
- Összeköttetés: hogyan kapcsolódnak egymáshoz a vonalas elemek?

A topológiai adatmodell előnye, hogy segít megelőzni a térbeli hibákat (pl. átfedések, hiányok), és támogatja a térbeli elemzéseket, mint a hálózati elemzések vagy a területi elemzések.

3. Raszteres adatmodell

A raszteres adatmodell a földrajzi területeket cellák vagy pixelek segítségével reprezentálja, ahol minden cella egy adott területrészhez tartozó értéket (pl. magasság, talajtípus) tárol.

- Pixel/Cella: a raszteres kép legkisebb egysége, amely egy adott földrajzi helyet reprezentál egy adott értékkel (pl. hőmérséklet, nedvességtartalom).

A raszteres adatmodell előnye, hogy egyszerűen kezelhető nagy mennyiségű adat, különösen folytonos változók (pl. domborzat, hőmérséklet) esetén. Hátránya, hogy a nagy felbontású adatok sok tárhelyet igényelnek, és kevésbé pontosak a vektoros modellekhez képest.

4. TIN (Triangulated Irregular Network) adatmodell

A TIN-adatmodell a terep felszínét háromszögekkel közelíti, ahol a háromszögek csúcsai ismert magasságú pontok.

- Háromszögek: a terep felszínének közelítésére használt egységek, amelyekből egy folyamatos felület áll össze.

A TIN-modell előnye, hogy részletesen képes ábrázolni a terep változásait, és kevesebb adatot igényel, mint a raszteres modell hasonló részletességű megjelenítése.

5. Hibrid adatmodell

A hibrid adatmodell a vektoros és a raszteres modellek kombinálásával nyújt előnyöket. A hibrid modellek lehetővé teszik, hogy a különböző típusú adatokat egy rendszerben kezeljük, például vektoros formában tárolhatunk határokat és

vonalakat, míg rászteresen reprezentálhatunk olyan folytonos jelenségeket, mint a domborzat.

A grafikus adatmodellek fontos szerepet játszanak a térinformatikai rendszerekben, mivel ezek segítségével tudjuk a földrajzi adatokat térben megjeleníteni és elemezni. A megfelelő adatmodell kiválasztása az adott feladat jellegétől és az adatok típusától függ. Míg a vektoros modellek részletgazdag ábrázolást nyújtanak, addig a rászteres modellek kiválóak a folyamatos változók megjelenítésére. A topológiai modellek a térbeli kapcsolatok pontos kezelését teszik lehetővé, míg a TIN-modellek a domborzat részletes megjelenítésében jeleskednek. A hibrid modellek a különböző adatmodellek előnyeit egyesítik, biztosítva a sokoldalú és hatékony adatkezelést a GIS-ben.

5.5.1. Vektoros adatmodell

A vektoros modellek a térinformatikai rendszerek alapvető eszközei, amelyek lehetővé teszik a földrajzi objektumok és jelenségek precíz ábrázolását és elemzését. Ezek a modellek a térbeli adatokat pontok, vonalak és poligonok (területek) formájában jelenítik meg, ahol minden egyes objektumhoz attribútum-adatok kapcsolódnak. Az attribútumok olyan információkat tartalmaznak, mint például egy épület neve, egy út száma vagy egy mezőgazdasági terület típusa.

A vektoros modellek lényege, hogy az ábrázolandó területet és a rajta lévő objektumokat pontok és a köztük lévő egyenesek együtteseként fogják fel. Ezen az elven az sem változtat, hogy a legtöbb rendszer alkalmas szabályos ívek generálására is a pontok között, mivel az ívek is elképzelhetőek differenciálisan kicsiny egyenes darabokból (húrokból) alkotott poligonokként. A terep absztrakciója következtében a térképen, így a digitális térképen is pontszerű, vonalas és területi objektumok találhatók (101. ábra).

Pontszerű objektumok

A pontszerű objektumokat a vektoros modell alapvető meghatározását alkalmazva úgy értelmezzük, mint olyan nulla hosszúságú egyeneseket, amelyek kezdő és végpontja azonos. A pontok az egyszerűbb térbeli elemek közé tartoznak, és tipikusan olyan objektumokat jelképeznek, amelyeknek kiterjedése elhanyagolható az adott térképméretarányban. Például egy pont jelölhet egy magányos fát, egy jelzőtáblát vagy egy kutat a térképen.

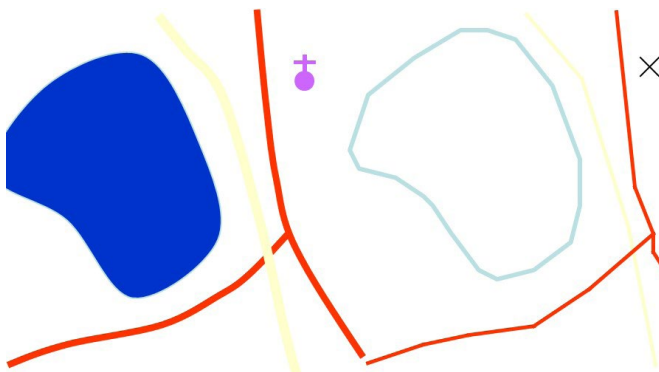
Vonalszerű objektumok

A vonalszerű objektumok mint egyenesek folytonos mondatai értelmezhetők. Ezek a térbeli objektumok többnyire olyan elemeket ábrázolnak, amelyeknek hosszúsága van, de szélessége az adott térképméretarányban nem releváns.

Például utak, folyók, ösvények vagy kerítések mind vonalszerű objektumokként jelennek meg a vektoros modellekben. Az egyenes szakaszokból felépülő vonalak folytonossága teszi lehetővé a terület különböző részei közötti kapcsolatok és útvonalak pontos modellezését.

Területi objektumok

A területi objektumok a vektoros adatmodellek egyik legösszetettebb elemei, hiszen ezek zárt sokszögekként (poligonokként) jelennek meg, amelyek meghatározott területet foglalnak el a térképen. Ezek az objektumok például mezőgazdasági parcellákat, erdőket, tavakat vagy városi negyedeket ábrázolhatnak. A poligonok a pontok és vonalak összekapcsolásával jönnek létre, és területük, kerületük, valamint egyéb geometriai tulajdonságaik révén átfogó információt nyújtanak az adott térbeli objektumokról.



101. ábra. Analóg térkép (bal) és vektoros digitális térkép (jobb), forrás: Detrekői-Szabó 1995

A vektoros adatmodellek előnyei és hátrányai

A vektoros adatmodelleknek számos előnye van, különösen a pontosság és a részletesség terén. Mivel a vektoros modellek a térbeli objektumokat matematikai egyenletekkel (például koordinátákkal) reprezentálják, a vektoros adatok méretaránytól függetlenül pontosan tárolhatók és megjeleníthetők. Ez különösen fontos a térinformatikai alkalmazásokban, ahol a részletes térképek és pontos elemzések elengedhetetlenek.

A vektoros adatmodellek könnyen szerkeszthetők, ami azt jelenti, hogy az új adatok hozzáadása, a meglévők módosítása vagy a hibák javítása egyszerűen végrehajtható. Továbbá a vektoros adatmodellek lehetővé teszik az attribútum-adatok és a geometriai adatok integrációját, így nemcsak a térbeli elhelyezkedést, hanem az adott objektumhoz kapcsolódó leíró adatokat is könnyen kezelhetjük.

Ugyanakkor a vektoros adatmodelleknek vannak hátrányai is. Például a rendkívül részletes vektoros adatok kezelése jelentős számítási kapacitást igényelhet, különösen, ha nagy mennyiségű adatot kell feldolgozni vagy megjeleníteni. Ezen kívül a vektoros adatok nem mindig alkalmasak folytonos jelenségek, mint például a domborzat vagy a hőmérsékleti viszonyok ábrázolására, ahol a raszteres adatmodellek hatékonyabbak lehetnek.

A vektoros adatmodellek számos alkalmazási területen használhatók a GIS-ben. Az agrármérnöki gyakorlatban például a vektoros adatmodellek segítségével pontosan térképezhetők fel a mezőgazdasági területek, nyomon követhetők a termények növekedése és hozama, valamint optimalizálhatók a termelési folyamatok. Az erdészeti alkalmazásokban a vektoros modellek lehetővé teszik az erdőterületek pontos nyilvántartását, a faállomány térbeli eloszlásának elemzését, valamint az erdőgazdálkodási tervek kidolgozását és megvalósítását.

A várostervezésben a vektoros adatmodellekkel pontosan nyomon követhetők a városfejlesztési projektek, modellezhetők a közlekedési hálózatok, és elemezhetők a különböző infrastruktúra-elemek közötti kapcsolatok. A katasztrófavédelemben pedig a vektoros modellek segítségével gyorsan felmérhetők a katasztrófa sújtotta területek, meghatározhatók a veszélyeztetett régiók, és tervezhetők a mentési műveletek.

A vektoros adatmodellek alapvető szerepet játszanak a térinformatikai rendszerekben, mivel lehetővé teszik a térbeli objektumok precíz ábrázolását, elemzését és kezelését. A pontok, vonalak és poligonok segítségével a térinformatikai szakemberek különböző típusú térbeli adatokat kezelhetnek és elemezhetnek, amelyek nélkülözhetetlenek a földrajzi információk pontos megértéséhez és alkalmazásához. Az agrármérnöki és erdészeti gyakorlatban a vektoros adatmodellek kulcsfontosságú eszközként szolgálnak a területkezelés, az erőforrás-gazdálkodás és a döntéshozatal támogatására.

Ahogy korábban megfogalmazásra került, a vektoros modellek nagy előnye, hogy a valós világ tárgyainak pontos és hatékony reprezentációját teszik lehetővé, különösen az olyan objektumok esetében, mint utak, folyók, épületek vagy határok. A vektoros modellek többféle típusba sorolhatók, amelyek különböző megközelítésekkel kezelik az adatokat és azok tárolását. Ezek közül a leggyakoribbak a spagetti-modell és a topológiai modell.

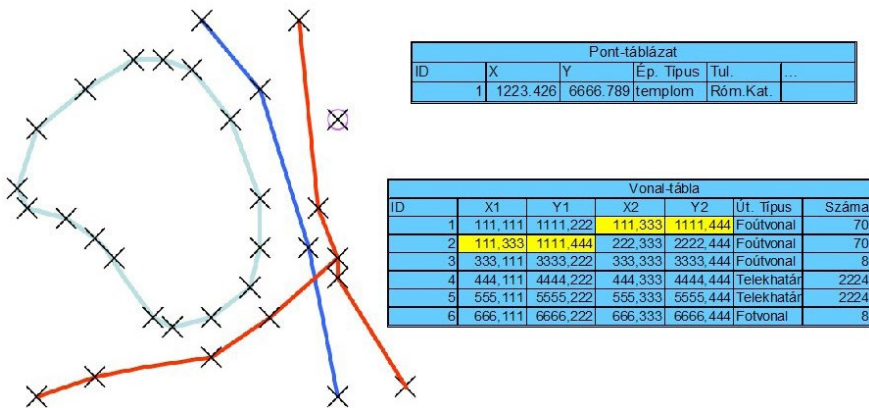
Spagetti-modell

A spagetti-modell a vektoros adatmodellek egyik legegyszerűbb formája. Nevét arról kapta, hogy a benne tárolt vonalak és poligonok olyan módon kapcsolódnak össze, mint a tányéron szétterülő spagetti. Minden egyes objektum különálló, független egységként van kezelve, amely nem áll kapcsolatban más objektumokkal, még akkor sem, ha azok érintkeznek vagy keresztezik egymást.

Alapelemei:

- Pont (koordináták): az egyes objektumok helyét a térben koordináták határozzák meg.
- Vonal: az objektumok egydimenziós listában tárolt vonalakkból épülnek fel.

A spagetti-modell objektumtáblázattal rendelkezik, amelyben az egyes objektumok azonosítóval és azokhoz rendelt koordinátákkal szerepelnek. Ez a megközelítés egyszerűsége miatt széles körben használt a térinformatikai rendszerek korai szakaszában, valamint azokban a projekteknél, ahol a gyors és egyszerű adatbeviteli módszerekre van szükség (102. ábra).



102. ábra. Spagetti-modell az objektumtáblázattal, forrás: Mucsi 2011

Előnyei:

- Egyszerű és gyors előállítás: a spagetti-modell egyszerű szerkezete lehetővé teszi az adatok gyors bevitelét és megjelenítését.
- Viszonylag kis helyigény: az adatokat nem kapcsolják össze bonyolult struktúrák, így kevesebb tárhelyet igényelnek.

Hátrányai:

- Keresés csak szekvenciálisan történhet: az objektumok csak az előállítás sorrendjében kereshetők meg, ami nagy adatbázisok esetén lassúvá teheti a feldolgozást.
- Objektumok nem alkotnak logikai egységet: az objektumok nem kapcsolódnak egymáshoz, így nem lehet térbeli elemzéseket végezni az objektumok közötti kapcsolatok alapján.
- Redundáns adatok: ugyanaz a térbeli információ többször is tárolásra kerülhet, ami adatduplikációhoz és az adatok konzisztenciájának problémájához vezethet.

A spagetti-modell egyszerűsége és gyorsasága miatt népszerű volt, azonban a térbeli adatok strukturálatlan tárolása és a redundancia kezelése korlátozza an-

nak alkalmazási lehetőségeit, különösen, amikor bonyolult térbeli elemzésekre van szükség.

A térbeli adatok digitális tárolásának és kezelésének egyik leggyakrabban alkalmazott módja a vektoros formátum. A vektoros adatstruktúra olyan módszer, amely pontosan ábrázolja a földrajzi objektumokat és azok tulajdonságait, beleértve a pontokat, vonalakat és poligonokat. Ezzel a módszerrel a térbeli adatok pontosan és hatékonyan rögzíthetők és elemezhetők. Az alábbiakban részletesen áttekintjük a vektoros formátum előnyeit és hátrányait.

Topológiai adatmodell

A topológiai modell a spagetti-modellhez képest egy sokkal fejlettebb és bonyolultabb adatstruktúrát alkalmaz. A topológia a geometriai alakzatok azon tulajdonságaira utal, amelyek nem változnak meg deformáció (nyújtás, zsugorítás) során. Ez a modell különösen fontos a GIS-rendszerekben, mivel lehetővé teszi a térbeli kapcsolatok hatékony elemzését, például szomszédsági kapcsolatok, hálózati vonalak vagy csomópontok közötti kapcsolatok vizsgálatát.

Lényege:

- Metrikus tér fogalmon alapuló távolságmérése: a topológiai modell alapját képezi a metrikus tér, amely lehetővé teszi a pontok közötti távolságok pontos mérését és azok térbeli kapcsolódását.
- Adattípusok értelmezése: a topológiai modell különbséget tesz különböző adattípusok között, például pontok, vonalak és poligonok, amelyek egymással kapcsolatba léphetnek.

Alapelemei:

- Csomópont: a vonalak (élek) végpontjai vagy elágazási pontjai, amelyek meghatározzák a térbeli struktúra alapjait.
- Él: az objektumokat összekötő vonalak, amelyek a csomópontok között húzódnak.
- Topológiai információk: az egyes objektumok közötti térbeli kapcsolatok, mint például szomszédság, folytonosság, tartalmazás (103. ábra).

Adattípusok a topológiai modellekben:

1. Ponttípus:

- Önálló pont: kiterjedés nélküli objektumok, mint például megfigyelési pontok vagy helyszínek.
- Lánc részét képező pont: egy vonal mentén található pont, amely meghatározza a vonal alakját.
- Csomópont: vonalak találkozási pontjai, ahol több vonal találkozik.

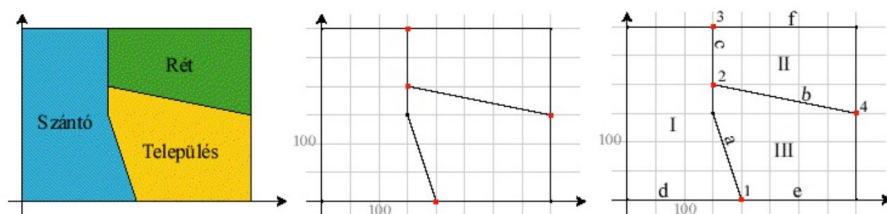
2. Vonalak:

- Töréspont: a vonal irányváltó pontjai.
- Csomópont: a vonalvégek, elágazások vagy metszéspontok, amelyek meghatározzák a térbeli hálózat szerkezetét.

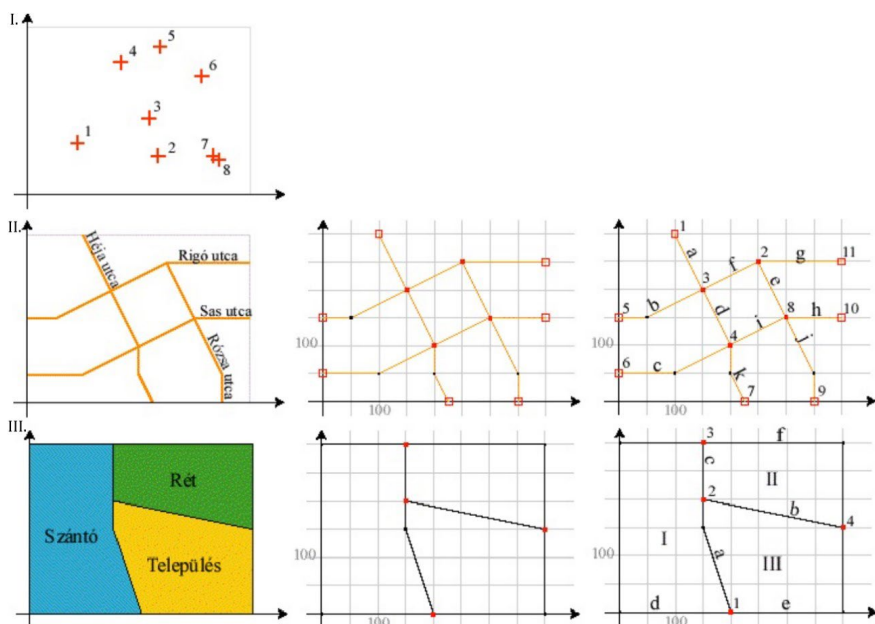
- Lánc, irányított lánc: a vonalak meghatározott sorrendben kapcsolódnak egymáshoz, irányított láncokat alkotva.

3. Poligon:

- Záródó láncsorozat: a poligonokat olyan láncsorozatok alkotják, amelyek visszatérnek kiindulási pontjukhoz, zárt alakzatot képezve.
- Jobb és bal oldali poligon: a poligonok egy lánc jobb és bal oldalán helyezkednek el, ami segít az irányítási problémák kezelésében.
- Szigetek kezelése irányított láncokkal: a poligonok között elhelyezkedő kisebb zárt területek, amelyeket szigeteknek neveznek, külön irányított láncokkal kezelhetők (104. ábra).



103. ábra. Területi jelenségek ábrázolása topologikus modellben, forrás: Mucsi 2011



104. ábra. Pontszerű (I.), vonalas (II.) és területi (III.) jelenségek ábrázolása topologikus modellben, forrás: Mucsi 2011

Előnyei:

- Hatékony térbeli elemzések: a topológiai modell lehetővé teszi a térbeli kapcsolatok pontos és hatékony elemzését, mivel az objektumok közötti kapcsolatok explicit módon tárolva vannak.
- Nincs redundancia a geometriai adatok tárolásánál: a topológiai modell struktúrája minimalizálja az adatduplikációt, mivel az egyes objektumok közötti kapcsolatok egyszer tárolódnak.

Hátrányai:

- Nagy erőforrásigény: a topológiai modell kidolgozott szerkezete és a kapcsolatok tárolása jelentős erőforrásokat igényel, ami növeli a rendszerek komplexitását és költségét. Bár ma már elérhetők olyan szoftverek, amelyek optimalizálják ezt a folyamatot, a topológiai modellek alkalmazása továbbra is drágább megoldásnak számít.

A spaghetti- és a topológiai modell összehasonlítása

A spaghetti- és a topológiai modell közötti legnagyobb különbség az, ahogyan az objektumok közötti térbeli kapcsolatokat kezelik. Míg a spaghetti-modell egyszerűen az egyes objektumok helyét és formáját rögzíti, addig a topológiai modell az objektumok közötti kapcsolatokat is figyelembe veszi. Ez lehetővé teszi a topológiai modell számára, hogy komplex térbeli elemzéseket végezzen, például meghatározza, hogy két terület határos-e egymással, vagy hogy egy út milyen más objektumokhoz kapcsolódik.

A spaghetti-modell előnyei közé tartozik az egyszerűség és a gyors adatbevitel, ami különösen hasznos lehet kis méretű, egyszerű térképek készítésekor, vagy amikor az adatok gyors megjelenítése a cél. Ezzel szemben a topológiai modell előnye a komplex kapcsolatok kezelése és a redundancia elkerülése, ami a nagyobb, összetettebb térképek és térbeli adatbázisok esetében válik szükségessé. Azonban a topológiai modell komplexitása miatt nagyobb erőforrásigényt támaszt, ami a rendszerek költségét és fejlesztési idejét is növeli.

*A vektoros formátum előnyei***1. Pontos térbeli ábrázolás**

A vektoros formátum lehetőséget nyújt a térbeli adatok rendkívül precíz ábrázolására. A pontok, vonalak és poligonok felhasználásával képes pontosan reprezentálni a valós világ objektumait, mint például az épületeket, utak vonalait vagy határokat. Ez a részletesség lehetővé teszi, hogy a vektoros formátumban tárolt adatok nagyon hasonlítsanak az eredeti térképekhez vagy tervekhez, megőrizve azok pontosságát és részletességét. Mivel a vektoros adatok a valós világ geometriai formáit követik, alkalmasak arra, hogy finom részleteket is pontosan megjelenítsenek.

2. Korlátlan nagyítási lehetőség

A vektoros formátum egyik legnagyobb előnye, hogy lehetővé teszi az adatok tetszőleges nagyítását anélkül, hogy a minőség romlana. Mivel a vektoros adatok matematikai egyenletek alapján vannak tárolva, bármilyen méretű nagyítás során az ábrázolt objektumok élesek és részletesek maradnak. Ez különösen fontos azokban az alkalmazásokban, ahol a felhasználónak gyakran kell nagyítani a térképen, például várostervezés során vagy részletes földmérési munkák elvégzésekor.

3. Nagy térbeli pontosság

A vektoros formátum rendkívüli térbeli pontosságot tesz lehetővé, amely megfelel a mérési adatok pontosságának. A geometriai adatokat pontos koordinátákkal tárolja, ami azt jelenti, hogy a valós világban mért pozíciók közvetlenül visszaadhatók a térképeken. Ez a magas fokú pontosság különösen előnyös olyan területeken, ahol a precíz helymeghatározás kulcsfontosságú, mint például földmérés, ingatlan-nyilvántartás vagy infrastrukturális tervezés.

4. Hatékony adattárolás

A vektoros formátum általában kisebb tárolókapacitást igényel, mint a raszteres formátum, különösen akkor, ha nagy részletességű adatokat kell tárolni. Mivel a vektoros adatok matematikai egyenletek formájában vannak tárolva, a memóriaigény sokkal kisebb lehet, mint a raszteres adatok esetén, ahol minden egyes cella külön értéket tárol. Ezáltal a vektoros adatstruktúra különösen előnyös, ha nagy méretű, részletes térképeket kell tárolni és kezelni korlátozott tárolási kapacitás mellett.

5. Topológiai kapcsolatok és elemzések

A vektoros adatokat az a képesség jellemzi, hogy topológiai kapcsolatokat tudnak megjeleníteni és kezelni. Ez azt jelenti, hogy az adatok nemcsak geometriai formákat tartalmaznak, hanem a különböző objektumok közötti kapcsolatokat is leírják. Például egy vektoros térkép képes megmutatni, hogy egy útvonal metsz-e egy másikat, vagy hogy egy adott terület határai hol érintkeznek más területekkel. Ezek a topológiai információk lehetővé teszik a komplex térbeli elemzések elvégzését, például útvonal-optimalizálás, területi zónák kijelölése vagy hidrológiai modellezés során.

A vektoros formátum hátrányai

1. Bonyolultabb adatkezelés

Míg a vektoros formátum számos előnnyel rendelkezik, az adatok kezelése összetettebb lehet, mint a raszteres formátum esetében. A vektoros adatstruktúra komplexitása miatt a felhasználónak alaposabb ismeretekkel kell rendelkeznie ahhoz, hogy hatékonyan kezelje és elemezze az adatokat. A topológiai kapcsolatok kezelése, a geometriai adatok pontosítása és a nagy pontosságú adatok integrálása mind-mind nagyobb kihívást jelenthetnek, különösen akkor, ha nagy méretű és bonyolult térbeli adatokat kell kezelni.

2. Magasabb számítási igény

A vektoros adatok feldolgozása és elemzése általában nagyobb számítási teljesítményt igényel, mint a raszteres adatmodelleké. Mivel a vektoros adatok geometriai formák alapján tárolódnak és kezelődnek, a térbeli elemzések és a topológiai műveletek elvégzése több számítási kapacitást igényel. Ez azt jelenti, hogy a vektoros adatok feldolgozásához erősebb, fejlettebb számítógépes rendszerekre van szükség, különösen, ha nagy mennyiségű adatot vagy bonyolult elemzéseket kell kezelni.

3. Magasabb tanulási küszöb

A vektoros adatok kezeléséhez szükséges szoftverek és módszerek elsajátítása általában hosszabb időt vesz igénybe, mint a raszteres rendszereké. A felhasználóknak meg kell érteniük a topológiai kapcsolatok jelentőségét, a geometriai formák kezelését és azokat az eszközöket, amelyekkel a vektoros adatok hatékonyan manipulálhatók. Ez magasabb tanulási küszöböt eredményez, különösen azok számára, akik kevésbé jártasak a térinformatikai rendszerek vagy a FIR használatában.

4. Kevesebb alkalmazhatóság modellszámításokhoz

Noha a vektoros formátum kiválóan alkalmas térbeli adatok pontos ábrázolására, kevésbé hatékony olyan esetekben, ahol nagy mennyiségű adatot kell modellezni, vagy ahol a folyamatos jelenségeket kell ábrázolni. A vektoros adatmodellek komplexitása miatt ezek nehezebben alkalmazhatók olyan területeken, mint például a környezeti modellezés, ahol gyakran szükség van a folyamatos változások ábrázolására és elemzésére, mint például a hőmérséklet, csapadék vagy talajnedvesség.

5. Alkalmatlan nagyobb adatbázisok kezelésére

A vektoros formátum hatékonysága és előnyei ellenére nem mindig a legmegfelelőbb választás, ha nagy méretű adatbázisokról van szó. A geometriai és topológiai információk komplexitása miatt a vektoros adatok tárolása és kezelése nehezebb lehet, különösen akkor, ha az adatok nagy mennyiségű és részletes információkat tartalmaznak. Ilyen esetekben a vektoros formátum kezelése nehézkes lehet, és több erőforrást igényelhet, mint más formátumok, például a raszteres adatmodellek.

A vektoros adatstruktúra rendkívül hasznos és hatékony eszköz a térbeli adatok pontos és részletes ábrázolására. Kiemelkedő előnyei közé tartozik a térbeli pontosság, a topológiai kapcsolatok kezelése, valamint a kisebb tárolási igény. Azonban a vektoros formátum használata nagyobb számítási kapacitást, magasabb tanulási küszöböt és bonyolultabb adatkezelést igényel, ami korlátozhatja alkalmazhatóságát bizonyos területeken. A felhasználóknak ezért gondosan mérlegelniük kell, hogy a vektoros formátum előnyei meghaladják-e a hátrányokat az adott alkalmazási területen, és megfelelően kell választaniuk az adatkezelési módszert az adott feladat céljainak eléréséhez.

A vektoros modellek jövője

A jövőben várható, hogy a vektoros modellek tovább fejlődnek, különösen a topológiai modellek irányába, mivel a térbeli adatok egyre összetettebbé válnak, és a térbeli elemzések iránti igény növekszik. Az új technológiák, mint például a mesterséges intelligencia és a gépi tanulás integrálása a térinformatikai rendszerekbe, lehetővé tehetik a topológiai kapcsolatok automatikus felismerését és kezelését, csökkentve a manuális munkát és a hibalehetőségeket.

A térinformatikai rendszerek fejlődése újabb lehetőségeket nyit meg a vektoros modellek alkalmazásában, például a valós idejű térbeli elemzések, az automatikus térképezési rendszerek és a drónok által gyűjtött adatok integrálása révén. Ezek a fejlesztések tovább növelhetik a topológiai modellek iránti igényt, különösen azokban az iparágakban, ahol a precíz térbeli elemzések kritikus fontosságúak, mint például a várostervezés, a közlekedés vagy a környezetvédelem területén.

A vektoros modell két alapvető típusa, a spaghetti- és a topológiai modell, eltérő megközelítéseket kínál a térbeli adatok tárolására és elemzésére. Míg a spaghetti-modell egyszerűsége miatt népszerű, a topológiai modell összetettsége és precizitása miatt egyre inkább előtérbe kerül a bonyolult térbeli elemzéseknél. A vektoros modellek fejlődése és az új technológiák integrálása új lehetőségeket teremt a térinformatikai rendszerekben, ami hozzájárul a hatékonyabb térbeli adatelemzéshez és döntéshozatalhoz.

5.5.2. Raszteres adatmodell

A digitális képfeldolgozás világában a képeket olyan elektronikus adatfájlokként értelmezzük, amelyek segítségével különféle képfeldolgozó szoftverekkel vizuális információkat ábrázolhatunk, legyen szó tárgyról vagy a földfelszín egy adott részéről.

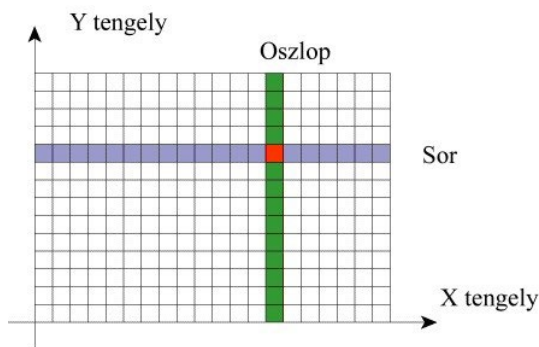
A raszteres adatmodellek esetében a képfeldolgozó rendszerekben a legkisebb egység a pixel, amelyet néha raszternek is neveznek. Ez a pixel a kép alapvető építőköve, amelynek meghatározott helye és értéke van. A helyet általában oszlop- és sorszám-koordinátákkal, esetleg Descartes-féle x , y koordinátákkal vagy földrajzi koordinátákkal jelölik. A pixel értéke egy numerikus adat, amely egy adott terület jellemzőjét, tulajdonságát vagy egy mérési eredményt reprezentál, mint például a reflektancia vagy a tengerszint feletti magasság. Különféle tulajdonságok mérési eredményeit különálló sávokban tárolják; például a különböző spektrális tartományokban mért reflektanciaértékek ugyanabban a képálmányban találhatók meg, de különböző sávokban.

A sáv és a réteg fogalma gyakran együtt jelenik meg a képfeldolgozó rendszerekben. Mindkét kifejezés használható, de fontos, hogy tisztázzuk a digitális kép egy sávjának és egy ürfelvétel spektrális tartományban mért adatainak kapcsolatát. Ha a digitális, többsávos képeket GIS-rendszerekben használjuk, akkor

gyakran már csak rétegekről beszélünk. Amikor a képfeldolgozás során új, raszteres vagy vektoros képek készülnek, ezeket az eredeti képsávoktól elkülönítve gyakran rétegeknek nevezzük, például annotációs rétegnek.

Amikor numerikus adatokat dolgozunk fel, nem mindegy, hogy a pixelek értékei milyen típusúak és milyen formátumban tároljuk őket. A raszteres fájlokban a pixelértékek lehetnek nominálisak, sorrendi, intervallum vagy arány típusúak. Az első két típusú rétegeket gyakran tematikus állományoknak nevezik. Az intervallum és arány típusú változók általában folyamatosan változó jelenségeket írnak le, mint például a domborzat magassága vagy a hőmérséklet, ezért az ilyen adattípusokat tartalmazó rétegeket folyamatos rétegeknek nevezzük.

A cellák alakja változatos lehet, mint például négyzet, téglalap, hatszög vagy háromszög. A gyakorlatban a négyzet alakú cellákat használják a legegyszerűbb kezelhetőség miatt, és mi is ezt fogjuk alkalmazni. Ezek az egyforma méretű cellák mátrixszerűen, oszlopokba és sorokba rendeződnek, úgy, hogy a vizsgált területet hézagmentesen lefedjék. Ez a mátrix egy szabályos rácshálót alkot, amelyet rávetítünk a vizsgált területre, és minden cella az oszlop- és sorszámával azonosítható (105. ábra).

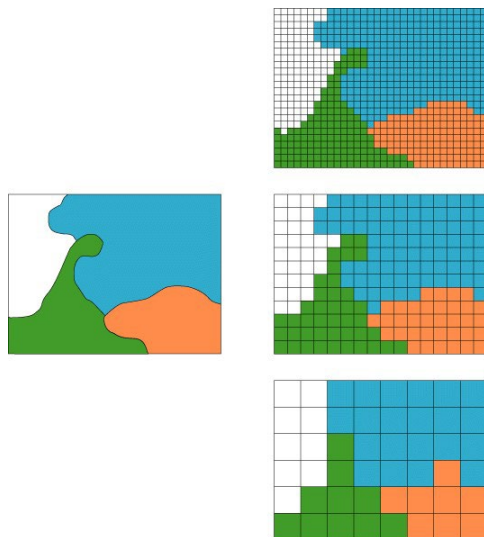


105. ábra. Sorok és oszlopok a raszterhálóban, forrás: Mucsi 2011

A felbontás kulcsfontosságú tényező a raszteres adatmodellezés során, amely szorosan összefügg a cellaméret, valamint a sorok és oszlopok számának megválasztásával. A megfelelő cellaméret kiválasztása a feldolgozás céljaitól függ, ugyanakkor a forrásadatok információsűrűsége, például a térkép méretaránya is meghatározó tényező lehet. Fontos megértenünk, hogy a négyzet alakú cellák csak nagyon ritkán képesek pontosan követni az ábrázolni kívánt jelenségek valós alakját és határait (106. ábra).

Amennyiben túl nagy cellaméretet választunk, a részletek elveszhetnek és a jelenségek kontúrjai elmosódhatnak, ami torzulásokhoz vezethet. Ezzel szemben, ha kisebb cellaméretet alkalmazunk, az ábrázolt jelenségek sokkal pontosabbak lesznek, és kevesebb generalizálásra lesz szükség. Azonban ennek a nagyobb precízitásnak ára van: a kisebb cellaméret jelentős mértékben növeli

a tárolási igényeket és a feldolgozási időt. Ez a növekedés a tárolt információ jelentős redundanciájából adódik. Például ha a cellaméretet felére csökkentjük, az eredeti terület lefedéséhez négyszer annyi cella szükséges. Ez azt jelenti, hogy a tárolókapacitás igénye, valamint a feldolgozási idő is négyszeresére nő, hacsak nem alkalmazunk valamilyen hatékony adattömörítési technikát, amely csökkentheti ezt a terhet.



106. ábra. Egyazon jelenség megjelenítése különböző felbontással, forrás: Mucsi 2011

Összességében tehát a cellaméret megválasztása során egyensúlyt kell teremteni a részletgazdagság és a tárolási, feldolgozási kapacitás között, figyelembe véve a céljainkat és a rendelkezésre álló források korlátait. A megfelelő felbontás elérése érdekében alaposan meg kell fontolni, hogyan lehet a lehető legnagyobb információtartalmat megőrizni anélkül, hogy a rendszer hatékonyságát túlzottan csökkentenénk (26. táblázat).

26. táblázat. Felbontás, sor- és oszlopszám, cellaméret, forrás: Mucsi 2011

Képtípus + képarány	Felbontás – hosszabbik oldal (pixel)	Méret cm	Pont/cm	DPI
17" 5:4	1280	33,7	38,0	96
19" 5:4	1280	37,7	34,0	86
19" 5:4	1024	37,7	27,2	69
19" 16:1	1440	40,9	35,2	89
19" 16:9	1024	42,1	24,3	62
19" 16:9	1366	42,1	32,5	82

Képtárló + képarány	Felbontás – hosszabbik oldal (pixel)	Méret cm	Pont/cm	DPI
19" 16:9	1920	42,1	45,6	116
21" 16:9	1920	46,5	41,3	105
24" 16:9	1920	53,1	36,1	92

Földrajzi jelenségek és ábrázolásuk raszteres adatmodellekben

1. Pontszerű jelenségek

A raszteres adatmodellekben a pontszerű jelenségek a legkisebb egység, egyetlen cella segítségével reprezentálhatók. Mivel minden cellának van saját területe, a pontszerű jelenségek ábrázolásának pontossága nagymértékben függ a cella méretétől, konkrétan annak átlójától. Ez azt jelenti, hogy a jelenség pozíciója a cellán belül bármelyik irányban eltolódhat a valósághoz képest, amit az adott cellaméret limitál. Az ilyen jelenségek gyakran egyszerűsítések vagy approximációk, hiszen a raszteres modell természeténél fogva minden valós térbeli pozíciót egy diszkrét cella koordinátáira kényszerít.

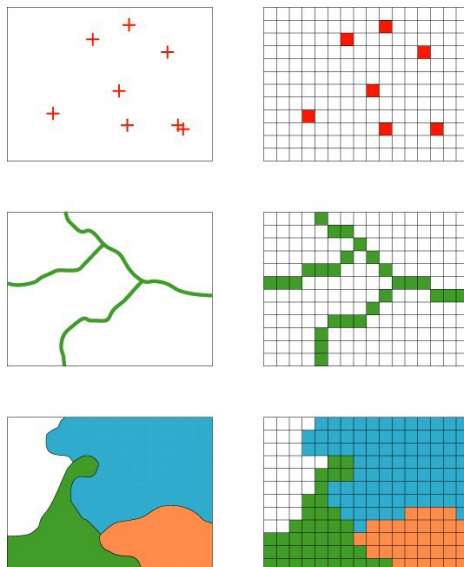
2. Vonalas jelenségek

Vonalas jelenségek esetén a raszteres adatmodellben több összekapcsolódó cella sorozatával ábrázoljuk a jelenségeket. A felbontás kritikus szerepet játszik ebben az esetben, mivel a túl alacsony felbontás megnehezíti vagy akár lehetetlenné is teszi a különböző vonalak elkülönítését egymástól. A rasztercellák sorozata gyakran nem képes pontosan követni a vonalas jelenségek ívét vagy hosszát, így torzítások és részletvesztés léphet fel. Ez különösen problematikus lehet, ha a vonalas jelenségek sűrűsége magas, vagy ha finom részleteket kellene megjeleníteni. Akárcsak a pontszerű jelenségeknél, itt sem fedik le a vonalas elemek a teljes területet, hanem csak annak egy részét reprezentálják, ami újabb kihívásokat vet fel az ábrázolás pontosságával kapcsolatban.

3. Területi vagy poligon jelenségek

A poligonális, vagyis területi jelenségek esetében a raszteres adatmodell több irányba is kiterjedő cellahalmazokkal ábrázolja az adott jelenséget. Ezek a cellahalmazok együttesen alkotják a poligon körvonalait, de a cellák diszkrét természetéből fakadóan ezek a körvonalak lépcsőzetesek és kevésbé simák. Ez a lépcsőzetesség azt eredményezi, hogy a valóságban folyamatos, görbe vonalak helyett egy szögletes, pixeles megjelenítést kapunk. Emellett előfordulhat, hogy a valós térbeli elhelyezkedés szerint egymástól távol álló területek a modellben egymás mellé kerülnek, ami további torzításokat okozhat. A raszteres modell ilyen módon történő egyszerűsítése és általánosítása a poligon jelenségek esetében különösen fontos tényező, amely hatással van az ábrázolás pontosságára és a kapott eredmények megbízhatóságára. Az ilyen jelenségek megfelelő ábrázolása érdekében fontos a felbontás alapos megválasztása, és szükség esetén más

modellezési módszerek alkalmazása is szóba jöhet, amelyek finomabb részletek visszaadására képesek (107. ábra).



107. ábra. Pont, vonal és területi jelenségek ábrázolása
raszteres modellben, forrás: Mucsi 2011

Cellaérték megállapítása

A cellaérték meghatározása az adott területen előforduló jelenségek jellemzésére szolgál. Ez a cella által lefedett terület egy reprezentatív tulajdonságát tükrözi, amelyet számszerűen fejezünk ki. A cellaérték lehet egy adott jelenséghez kapcsolódó kód vagy egy konkrét mérési eredmény, mint például a tengerszint feletti magasság. A raszterizálás folyamata során a vizsgált területet egy szabályos rácshálóval fedjük le, és minden cellához egyedi értéket rendelünk hozzá, amely a cella által ábrázolt terület jellemzőjét tükrözi.

Amikor egy cellán belül többféle jelenség is előfordul, a cellaérték megállapítása különböző módszerekkel történhet, az adott terület jellemzőitől és az alkalmazás céljától függően (108. ábra).

1. Centroid alapú értékelés

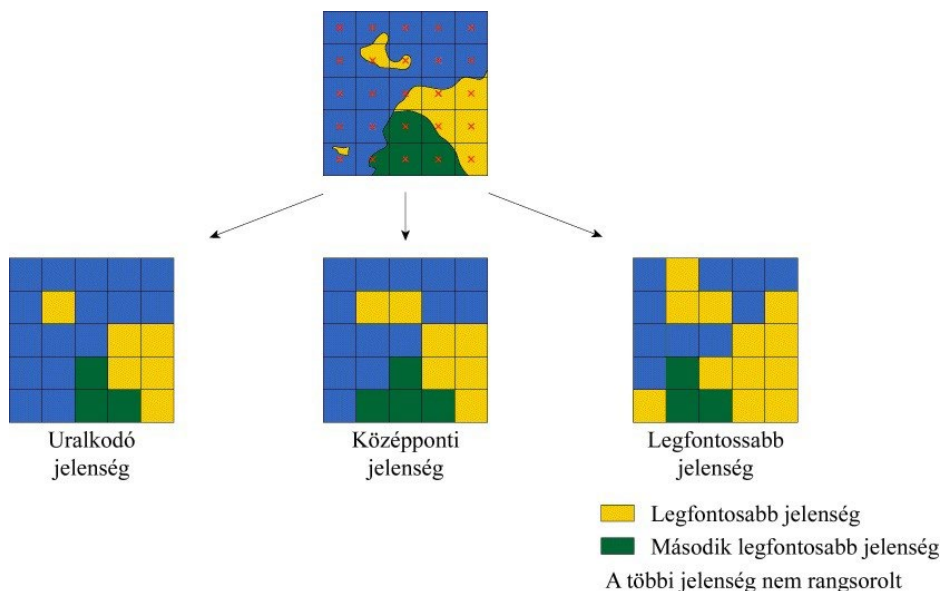
E módszer lényege, hogy a cellaértéket az a jelenség határozza meg, amely a cella középpontjában található. Ezt a megközelítést elsősorban olyan jelenségek esetén alkalmazzák, amelyek folyamatosan változnak a térben, mint például a magasságértékek vagy a levegő szennyezettsége. Az ilyen típusú jelenségek esetében a középponti értékelés gyakran a legmegfelelőbb módja a cellaértékek kijelölésének, mivel a jelenségek finom változásait tükrözi.

2. Domináns jelenség alapú értékelés

Ebben az esetben a cellaértéket az a jelenség határozza meg, amely a cella legnagyobb részét lefedi. Ez a módszer különösen hasznos területi jelenségek, például földhasználati típusok ábrázolásánál, ahol a cellán belüli különböző földhasználati kategóriák közül a legnagyobb területű lesz a domináns. Például ha egy cella területének 65%-át gyümölcsös, 25%-át szántó és 10%-át közút foglalja el, akkor a cella a gyümölcsös kategóriájához tartozó értéket kapja. Ez a módszer jól alkalmazható olyan esetekben, amikor diszkrét jelenségek (például földhasználati térképek, talajtérképek) ábrázolására van szükség, ahol a különböző kategóriák határai jól elkülöníthetők.

3. Legfontosabb jelenség alapú értékelés

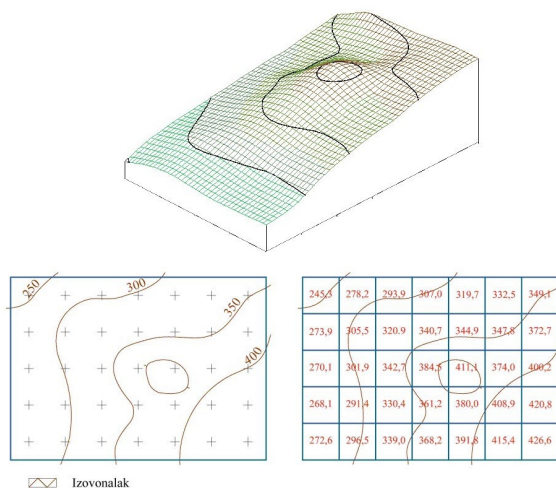
Ebben a módszerben a cellaérték meghatározása során a terület szempontjából legfontosabb jelenséget választjuk ki, figyelembe véve a modellezés célját és a forrásadatok jellegét. Ez különösen hasznos lehet akkor, ha a területen kisebb, de a vizsgálat szempontjából lényeges jelenségek is jelen vannak, amelyek más módszerekkel esetleg kimaradnának a modellből. Például ha egy terület fontos ökológiai szempontból, de a jelenség csak kis részt foglal el egy cellában, ezzel a módszerrel biztosítható, hogy ez a fontos jelenség mégis megfelelő súlyt kapjon az ábrázolásban. Ez a megközelítés jól alkalmazható vonalas és pontszerű jelenségek esetén is, ahol a cél a leglényegesebb elem kiemelése (108. ábra).



108. ábra. Cellaérték-megállapítási módszerek, forrás: Mucsi 2011

A folytonos jelenségek ábrázolása raszteres modellben

A folytonos jelenségek térbeli megjelenítésekor gyakran alkalmazzuk azt a módszert, amely a cellák értékét a cella középpontjában észlelt jelenség alapján határozza meg. Ebben az esetben a raszterháló minden egyes cellájához olyan értéket rendelünk, amely pontosan a cella középpontjánál mérhető. Ez az eljárás lehetővé teszi a térbeli jelenségek folyamatos változásának finom ábrázolását, mivel a cellák középpontjában rögzített adatok a legjobban reprezentálják a jelenség helyi jellemzőit. A módszer különösen hasznos, ha a jelenség értékei fokozatosan változnak a térben, például hőmérséklet, tengerszint feletti magasság vagy más környezeti paraméterek esetén. Az így meghatározott cellaértékek lehetővé teszik a terület precízebb ábrázolását és a folytonos jelenségek térbeli eloszlásának pontosabb elemzését (109. ábra).



109. ábra. Folytonos jelenségek ábrázolása raszteres adatmodellben, forrás: Mucsi 2011

A raszteres rendszer előnyei és hátrányai

A raszteres adatstruktúra az egyik legelterjedtebb módja a térbeli adatok tárolásának és elemzésének, különösen a GIS-rendszerek és a távérzékelés területén. Ez a rendszer a térbeli adatokat egyenletes méretű cellákból vagy pixelekből álló rácsból formájában ábrázolja, ahol minden cellához egy numerikus érték van hozzárendelve. Ez az érték jellemzően a cella által lefedett terület valamely tulajdonságát, például magasságot, talajtípust vagy vegetációs indexet jelöli. A raszteres rendszer sajátos előnyökkel és hátrányokkal rendelkezik, amelyeket alább részletesen ismertetünk.

A raszteres rendszer előnyei

1. Egyszerű és könnyen kezelhető adatszerkezet

A raszteres rendszer egyik legnagyobb előnye az egyszerűsége. Minden egyes cellához egyetlen numerikus érték van rendelve, amely jellemzi a cella által lefedett terület egy adott tulajdonságát. Ez az egyszerű adatstruktúra jelentősen megkönnyíti az adatkezelést, mivel nincs szükség bonyolult adatkapcsolatokra vagy topológiai kapcsolatokra, mint amilyeneket a vektoros adatmodellek igényelnek. Az ilyen típusú adatstruktúra különösen alkalmas olyan alkalmazásokhoz, ahol nagy mennyiségű adatot kell gyorsan és hatékonyan feldolgozni.

2. Hatékony adatfeldolgozás

A raszteres adatok feldolgozása rendkívül hatékony, mivel az egyszerű adatstruktúra lehetővé teszi a gyors számításokat és elemzéseket. Az olyan műveletek, mint a térbeli lekérdezések, statisztikai elemzések vagy modellezések, gyorsan elvégezhetők a raszteres adatstruktúrában. Ez különösen előnyös a távérzékelési alkalmazásokban, ahol nagy mennyiségű adatot kell feldolgozni rövid idő alatt, például műholdfelvételek vagy drónfelvételek esetén.

3. Kompatibilitás és olcsóbb hardverigény

A raszteres adatok egyszerűsége miatt az ilyen típusú adatstruktúrák feldolgozása viszonylag alacsony számítási teljesítményt igényel, ami lehetővé teszi, hogy olcsóbb számítógépes platformokon is hatékonyan használható legyen. Ez különösen előnyös olyan szervezetek számára, amelyek korlátozott költségvetéssel rendelkeznek, mivel nem szükséges drága, csúcskategóriás hardvert beszerezniük a raszteres adatok feldolgozásához.

4. Távérzékelési adatok integrációja

A távérzékelési adatok, például a műholdképek vagy a légi fotók, természetükénél fogva raszteres formátumúak. Ez a formátum lehetővé teszi, hogy ezeket az adatokat könnyen integráljuk más térbeli adatokkal és GIS-alkalmazásokkal, ahol a raszteres adatok feldolgozása gyakran az alapja a különböző elemzéseknek és modellezéseknek. A távérzékelési adatok raszteres formátumban történő használata megkönnyíti a nagy területek gyors és hatékony elemzését, ami különösen fontos a környezetvédelmi monitorozás, mezőgazdasági felmérések, valamint a városfejlesztés területén.

5. Alkalmas bonyolult modellezési feladatokra

A raszteres formátum kiválóan alkalmas különböző típusú modellezési feladatok elvégzésére, beleértve a térbeli modellezést, mint például a hidrológiai modellek, a hőmérsékleti modellek vagy a talajeróziós modellek. Mivel a raszteres adatok egyenletesen osztott térbeli egységek, a modellezési folyamat során könnyen lehet számításokat végezni és térbeli összefüggéseket elemezni. A raszteres rendszer lehetővé teszi, hogy különböző térbeli folyamatokat szimuláljunk és elemezzünk, ami jelentős előnyt jelent a környezeti modellezés, a várostervezés és a katasztrófakezelés területén.

A raszteres rendszer hátrányai

1. A térbeli pontosság korlátai

A raszteres adatstruktúrák egyik legnagyobb hátránya a térbeli pontosság korlátai. Mivel minden egyes cella egy adott területet reprezentál, a raszteres adatok térbeli felbontása közvetlenül meghatározza az adataink pontosságát. Nagyobb cellaméret esetén az apróbb részletek elveszhetnek, és a térbeli pontosság csökkenhet. Ez különösen problémás lehet olyan alkalmazásokban, ahol a nagy pontosság elengedhetetlen, például a pontos térképezési feladatoknál vagy precíziós mezőgazdaságban.

2. Alacsonyabb térbeli felbontóképesség

A raszteres adatmodellek általánosan alacsonyabb térbeli felbontóképességgel rendelkeznek a vektoros adatmodellekhez képest. Mivel a raszteres adatok cellákra bontják a teret, a finom részletek és az éles határok kevésbé kivehetők. A nagyobb felbontású raszterek ugyan javítanak ezen a problémán, de ezek több adatot is jelentenek, ami növeli a tárolási és feldolgozási igényt. A rosszabb felbontóképesség különösen hátrányos lehet, ha a térbeli elemzések során apró részleteket kell pontosan megjeleníteni és elemezni, például földhasználati térképek készítésekor.

3. Információvesztés és általánosítás

Egy másik jelentős hátránya a raszteres rendszereknek az információvesztés és az általánosítás. Mivel minden egyes cella egyetlen értéket tartalmaz, a cella méreténél kisebb objektumok és részletek elveszhetnek az adatok általánosítása során. Ez azt jelenti, hogy a raszteres adatok nem tartalmaznak információt azokról a finom részletekről, amelyek kisebbek a cellaméretnél. Ez különösen hátrányos lehet akkor, ha az elemzések során pontos részletekre van szükség, például épületek vagy más apró objektumok pontos helyének meghatározásakor.

4. Adathalmaz redundanciája és tárolási igény

A raszteres adatok egyik problémája a tárolási igény és az adathalmaz redundanciája. Minden egyes cellához értéket kell rendelni, függetlenül attól, hogy az adott cella ténylegesen tartalmaz-e releváns információt vagy sem. Ez növeli az adatok mennyiségét, különösen nagy felbontású raszterek esetén, ahol rengeteg cellát kell tárolni. A redundáns adatok és a nagy tárolási igény komoly problémát jelenthetnek, különösen akkor, ha nagy mennyiségű raszteres adatot kell tárolni és feldolgozni hosszabb időn keresztül.

5. Nehézségek a térbeli elemzéseknél

Bár a raszteres adatok egyszerűsége előny, egyes térbeli elemzések elvégzése nehézkes lehet a raszteres adatstruktúrában. Például a topológiai kapcsolatok, mint a szomszédsági kapcsolatok vagy az objektumok közötti távolságok, sokkal könnyebben kezelhetők a vektoros adatok esetén. A raszteres adatok esetében ezek az elemzések bonyolultabbak lehetnek, és több számítási erőforrást igényelhetnek. Ez különösen igaz olyan alkalmazásokra, ahol az objektumok közötti

kapcsolatok és távolságok pontos meghatározása kritikus fontosságú, például közlekedési hálózatok elemzésekor.

Összességében a raszteres adatstruktúra egyszerűsége és hatékonysága miatt számos előnnyel rendelkezik, különösen a távérzékelés és a modellezés területén. Azonban jelentős hátrányai is vannak, mint például a térbeli pontosság korlátai, az információvesztés és a nagy tárolási igény. Az alkalmazás területétől és az adott feladattól függően kell mérlegelni, hogy a raszteres adatstruktúra előnyei meghaladják-e a hátrányait. A megfelelő alkalmazás és adatkezelési technikák segítségével a raszteres rendszer hatékony eszköz lehet a térbeli adatok kezelésében és elemzésében, különösen akkor, ha nagy mennyiségű adat gyors feldolgozására és elemzésére van szükség.

5.6. Térinformatikai szoftverek áttekintése és jelentősége

A GIS-rendszerek fejlődése az elmúlt évtizedekben rendkívül gyors ütemben haladt előre, és a földrajzi információk kezelése, elemzése és megjelenítése ma már számos iparág számára elengedhetetlen eszközzé vált. A technológia kezdetben elsősorban a kormányzati szférában és a tudományos kutatásokban talált alkalmazásra, azonban mára a magánszektor is felfedezte a térinformatika lehetőségeit. Az adatok vizualizációja és az elemzési módszerek hatékonysága forradalmasította az erdőgazdálkodástól kezdve a várostervezésig számos ágazatot. Azonban a térinformatikai rendszerek fejlesztése és használata hosszú ideig kizárólag a zárt, kereskedelmi szoftverek piacán valósult meg, ahol a licenccdíjak gyakran elérhetetlenek voltak a kisebb felhasználók számára. Az utóbbi években azonban egyre nagyobb figyelmet kaptak a nyílt forráskódú térinformatikai szoftverek, amelyek szabadon hozzáférhetők, ingyenesen használhatók és testre szabhatók.

5.6.1. Az ESRI ArcGIS/ArcINFO térinformatikai szoftver bemutatása

Az ESRI ArcGIS szoftvercsalád az egyik legismertebb és legszélesebb körben használt térinformatikai rendszer a világon. Az ArcGIS-t, amely korábban ArcINFO néven volt ismert, az Environmental Systems Research Institute (ESRI) fejlesztette ki, és mára vezető szerepet tölt be a globális térinformatikai piacon. Az ArcGIS nem csupán egy szoftver, hanem egy komplex rendszer, amely lehetővé teszi a térbeli adatok rögzítését, kezelését, elemzését, megjelenítését és megosztását.

A szoftver sikere részben annak köszönhető, hogy az ESRI a '90-es években sikeresen váltott át a parancssoros UNIX-alapú megoldásokról (Arc/INFO) a grafikus felhasználói felületet biztosító Windows platformra, ezzel felhasználóbaráttá és hozzáférhetőbbé tette a térinformatikai eszközöket a szélesebb közönség

számára. Az ArcView 8.0 verziójának megjelenésével a szoftvercsalád kibővült, és létrejött az ArcGIS integrált moduláris rendszer, amely több különálló alkalmazásból és bővíthető komponensből áll.

Az ArcGIS felépítése és fő moduljai

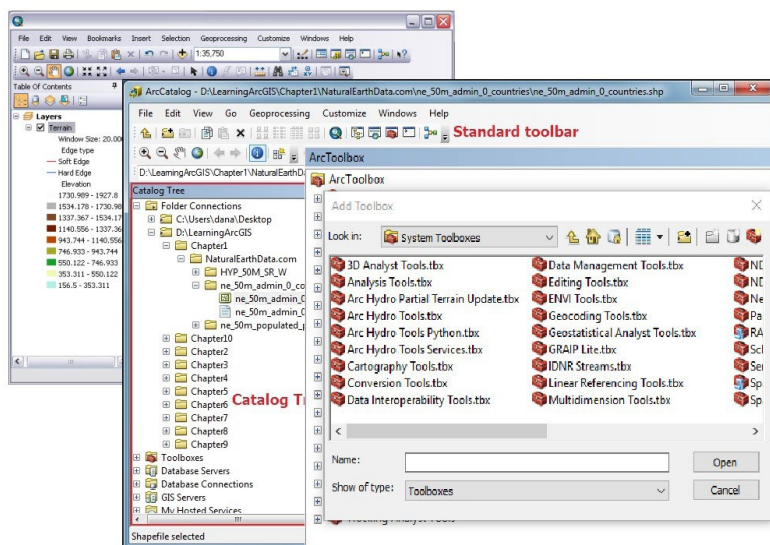
Az ArcGIS több fontos modult tartalmaz, amelyek különböző funkciókat látnak el a térbeli adatok kezelésében és elemzésében. Ezek közül a legfontosabbak az ArcMap, az ArcCatalog és az ArcToolbox. Ezek a modulok plug-inekkel bővíthetők, ami lehetővé teszi a rendszer rugalmasságát és testreszabhatóságát.

1. ArcMap: az ArcMap az ArcGIS legfontosabb modulja, amely a térképek szerkesztésére, elemzésére és megjelenítésére szolgál. Az ArcMap-ben a felhasználók képesek különböző vektoros és raszteres adatokkal dolgozni, adatokat szerkeszteni és különböző elemzéseket végrehajtani. A vektoros adatkezelés kezdetben a fő erőssége volt a szoftvernek, de az idő múlásával a raszteres adatfeldolgozás képességei is jelentősen fejlődtek.
2. ArcCatalog: ez a modul az adatok szervezésére és kezelésére szolgál. Az ArcCatalog segítségével a felhasználók áttekinthetik és rendszerezhetik a különböző térbeli adatokat, beleértve a vektoros és raszteres fájlokat, adatbázisokat, valamint különböző típusú metaadatokat. Ez a modul kulcsfontosságú szerepet játszik abban, hogy a felhasználók könnyen hozzáférjenek és kezeljék a projektjeikhez szükséges adatokat.
3. ArcToolbox: Az ArcToolbox egy eszköztár, amely különböző térbeli műveletek és elemzések végrehajtására szolgál. Az ArcToolbox-ban található eszközök segítségével a felhasználók különféle geoprocesszing műveleteket hajthatnak végre, mint például adatkonverziók, térbeli elemzések, statisztikai műveletek és térképészeti feladatok. Az eszköztár folyamatosan bővíthető új plug-inekkel és kiegészítőkkel, amelyek még több funkcióval ruházzák fel a rendszert (110. ábra).

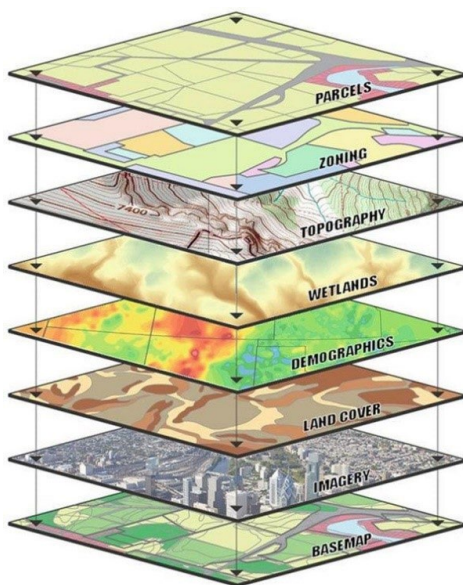
Az ArcGIS által támogatott adatformátumok

Az ESRI ArcGIS eredetileg saját adatbázis-formátumokat használt, amelyeket shapefile-oknak neveztek, amelyek egymásra rétegesen épülnek (111. ábra). Ez a formátum rendkívül népszerűvé vált, és számos más térinformatikai rendszer is átvette. A shapefile-ok valójában három különálló fájlból állnak, amelyek együttesen tárolják a térbeli objektumok geometriáját és azok attribútumadatait:

- SHP: ez a fő fájl, amely az objektumokat leíró geometriai adatokat tartalmazza.
- SHX: ez az indexállomány, amely összekapcsolja a geometriai adatokat a többi fájlban tárolt információkkal.
- DBF: ez a dBase adatbázisfájl, amely a térképi objektumokhoz tartozó tematikus, attribútumadatokat tárolja.



110. ábra. Az ArcGIS felépítése és fő moduljai, forrás: saját szerkesztés



111. ábra. Az ArGIS/QGIS rétegeinek illusztrációja, forrás: GIS 2021

Az ESRI ArcGIS azonban idővel bővítette a támogatott formátumok körét, és ma már többféle adatbázis kapcsolható a rendszerhez, például az Enterprise geodatabase és a File geodatabase, amelyek lehetővé teszik a nagy méretű térbeli

adatok kezelését és strukturált tárolását. Ez növeli az ArcGIS rugalmasságát, és lehetővé teszi, hogy a rendszer hatékonyan működjön mind kisebb, mind nagyobb léptékű projektek esetén.

Az ESRI által kifejlesztett ingyenes alkalmazások, mint az ArcReader és az ArcExplorer, lehetővé teszik a felhasználók számára, hogy böngésszenek és lekérdezéseket hajtsanak végre az ArcGIS-ben készített térképeken anélkül, hogy megvásárolnák a teljes szoftvercsomagot. Ezek az alkalmazások lehetőséget biztosítanak a térbeli információk könnyebb hozzáférhetőségére, különösen azok számára, akiknek nincs szükségük a teljes funkcionalitásra, de fontos számukra a térképek elemzése vagy megtekintése.

Az ArcReader elsősorban a térképek megtekintésére alkalmas, míg az ArcExplorer ennél fejlettebb funkcionalitást kínál, például egyszerű lekérdezéseket, elemzéseket és a rétegek közötti navigációt. Ezek az eszközök különösen hasznosak a vállalatoknál, ahol az adatok elemzése és felhasználása több részlegen keresztül történik, de nem minden alkalmazott rendelkezik teljes körű térinformatikai ismeretekkel.

Az ArcGIS licenclési rendszere és költségek

Az ESRI ArcGIS a piaci pozíciójából fakadóan nemcsak a térinformatikai szakemberek első számú eszközévé vált, hanem a költségek tekintetében is az egyik legdrágább megoldás. Az ArcGIS licenclési modellje bonyolult, többféle licenctípusból áll, amelyeket a felhasználók igényeihez igazíthatnak. Az egyszerűbb, alapszintű felhasználói licenc, amely alapvető funkcionalitást nyújt, már önmagában is jelentős költséget jelenthet, míg a komplexebb, több modult és bővítményt is tartalmazó licenccsomagok ára meghaladhatja egy alsókategóriás személygépkocsi árát is.

Az ESRI különféle licenckonstrukciókat kínál, beleértve a felhasználókénti, szerveren alapuló és vállalati licenceket, amelyek lehetővé teszik a szoftver széles körű alkalmazását különböző méretű szervezetekben. A licenclési költségek mellett a szoftverek éves karbantartási és támogatási díjakat is tartalmaznak, amelyek további költségekkel járnak a felhasználók számára. Ennek ellenére az ArcGIS kínálta lehetőségek, funkciók és a szoftver robusztussága sok esetben indokolják a magas árakat, különösen a nagyobb szervezetek és intézmények számára, amelyek térbeli adatokat elemző munkát végeznek.

Az ArcGIS szerepe a modern térinformatikában

Az ESRI ArcGIS ma is meghatározó szerepet játszik a térinformatikai iparágban. Fejlett eszközei, interoperabilitási lehetőségei és robusztus adatkezelési megoldásai révén sokoldalú és hatékony eszközt biztosít a földrajzi információk elemzéséhez és megjelenítéséhez.

Quantum GIS (QGIS) térinformatikai szoftver

A Quantum GIS (röviden: QGIS) egy nyílt forráskódú térinformatikai szoftver, amely gyors fejlődése és sokoldalú funkciói révén népszerűvé vált a geoinformatikai szakemberek körében. A QGIS fejlesztése 2002-ben kezdődött, amikor egyszerű GIS-böngészőprogramként indult, de azóta egy teljes körű térinformatikai megoldássá nőtte ki magát. Az egyik legfontosabb előnye, hogy a GNU General Public License alatt érhető el, így bárki számára szabadon felhasználható, módosítható és terjeszthető.

A QGIS kezdetben egy egyszerű térképböngészőként készült, amely képes volt más szoftverekkel létrehozott térinformatikai adatok megtekintésére és egyszerű lekérdezések végrehajtására. Azonban az évek során folyamatos fejlesztés alatt állt, és mára egy komplex, fejlett GIS-alkalmazássá vált, amely önálló térinformatikai rendszerek létrehozására is alkalmas. A szoftver jelenleg több platformon is elérhető, beleértve a Linux-, Windows- és Mac OS X-rendszereket, így széles felhasználói bázist tud kiszolgálni.

A QGIS fejlesztése nyílt forráskódú közösségi projektként zajlik, ami azt jelenti, hogy nemcsak használható, hanem bármely felhasználó hozzájárulhat a program továbbfejlesztéséhez. Ez a közösségi alapú fejlesztés rugalmasságot és gyors reagálási időt biztosít, ami lehetővé teszi, hogy a felhasználók azonnali visszajelzést adhassanak, és gyorsan javítsák a hibákat vagy implementálják az új funkciókat.

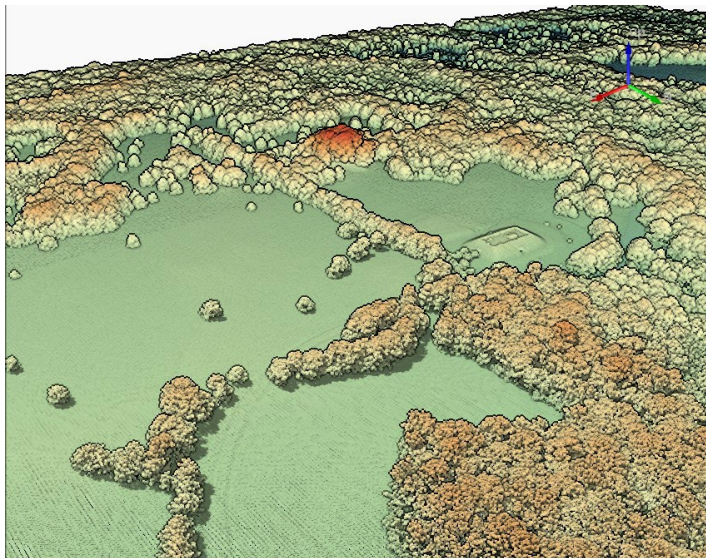
Főbb funkciók és eszközkészlet

A QGIS egyik legnagyobb erőssége a sokoldalú funkciókészlete, amely lehetővé teszi, hogy különböző típusú térinformatikai adatokat kezeljünk, szerkesztünk és elemezzünk. A program egyik alapvető jellemzője, hogy képes tetszőleges számú réteg megjelenítésére, amelyek különböző grafikus tulajdonságokkal és tematikus beállításokkal rendelkezhetnek. Ezáltal a felhasználók egyedi térképeket készíthetnek a rétegek vizuális megjelenítésének finomhangolásával.

A vektoros adatok szerkesztése is egyszerűen megoldható a QGIS-ben, amely lehetővé teszi a különböző geometriai objektumok digitalizálását, címkézését és attribútumainak módosítását. Az attribútumalapú címkézés különösen hasznos azok számára, akik tematikus térképeket szeretnének készíteni, mivel ez automatikusan összekapcsolja a térképi objektumokat az adatbázisban tárolt leíró adatokkal.

A szoftver további hasznos funkciókat is tartalmaz, például lekérdezések végrehajtását, projektek mentését és betöltését, valamint a térképek nyomtatásra való előkészítését a Map Composer segítségével. Ez a térképszerkesztő eszköz lehetővé teszi a felhasználók számára, hogy a térképeiket professzionális formában exportálják, beleértve a jelmagyarázatokat, léptékvonalakat és északjelzőket

is. Emellett a QGIS képes távolságok mérésére a térképeken, valamint térképi könyvjelzők használatára is, amelyek gyors hozzáférést biztosítanak a gyakran használt területekhez (112. ábra).



112. ábra. QGIS-ben megjelenített LIDAR-adatok, forrás: QGIS 2023

Plugin rendszer és bővítési lehetőségek

Az egyik legnagyobb előnye a QGIS-nek a plugin rendszer, amely lehetővé teszi, hogy a program funkcionalitását könnyedén kibővítsük. A beépülő modulok számos további funkciót kínálnak, például térképi elemző eszközöket, adatbázis-integrációkat és adatkonverziós megoldásokat. Ha a felhasználók nem találhatnak a szükségleteiknek megfelelő plugint, akkor akár saját modulokat is írhatnak Python vagy C++ nyelveken. Ez nagy szabadságot biztosít a fejlesztők számára, akik testre szabhatják a programot az adott projekt követelményei alapján.

Egy másik egyedülálló tulajdonság, hogy a QGIS-rétegeket importálhat térképszerverekről, például a MapServer rendszerből. Ez a funkció ritkaságszámba megy még a fizetős szoftverek világában is, és különösen hasznos azok számára, akik online térképszolgáltatásokat szeretnének integrálni a munkájukba.

Támogatott formátumok és adatbázisok

A QGIS széles körű támogatást nyújt különböző adatformátumokhoz és adatbázisokhoz. A szoftver képes ESRI shape fájlok, MapInfo és MicroStation állományok importálására és kezelésére. Ez különösen előnyös, ha a felhaszná-

lók más térinformatikai rendszerekkel készült adatokat szeretnének felhasználni. Emellett a QGIS többféle raszteres állományformátumot is támogat, beleértve az RGB, GIF, JPEG, TIFF és BMP fájlokat. Ez lehetővé teszi a felhasználók számára, hogy különböző forrásból származó térbeli adatokat egységes rendszerben kezeljenek és elemezzenek.

Az adatbázis-kapcsolatok terén a QGIS szintén sokoldalú megoldást nyújt. Képes kapcsolódni OracleSpatial, PostgreSQL és MySQL adatbázisokhoz, amelyek segítségével nagy mennyiségű adatot lehet tárolni és kezelni. Ha a felhasználók saját vektoros réteget definiálnak, az adatok shape formátumban kerülnek tárolásra, ami az egyik legelterjedtebb térinformatikai formátum.

A nyílt forráskódú szoftverek egyik nagy előnye a mögöttük álló aktív felhasználói és fejlesztői közösség. A QGIS közösség különösen élénk, és a felhasználók számos webes fórumon keresztül kérhetnek és nyújthatnak segítséget. A közösség ereje abban rejlik, hogy gyorsan reagál a felhasználók igényeire, így a hibajavítások és a fejlesztések is sokkal gyorsabban megvalósulhatnak, mint a kereskedelmi szoftverek esetében, ahol a fejlesztési ciklusok gyakran hosszabbak.

A folyamatos frissítések és fejlesztések révén a QGIS gyors ütemben fejlődik, ami azt jelenti, hogy a szoftver mindig naprakész marad a legújabb technológiákkal és trendekkel. Emellett a felhasználók számára rendelkezésre állnak dokumentációk, kézikönyvek és oktatóanyagok, amelyek segítenek elsajátítani a program használatát, és biztosítják, hogy a kezdő felhasználók is könnyedén megtanulhassák a szoftver alapjait.

A QGIS jövője és versenyképessége

A QGIS jelenlegi gyors fejlődése és rugalmassága egyre népszerűbbé teszi mind a kezdő, mind a haladó térinformatikai szakemberek körében. Mivel ingyenes és nyílt forráskódú, sok szervezet és intézmény választja alternatívaként a drága kereskedelmi szoftverek helyett. A szoftver egyre inkább képes helyettesíteni a fizetős megoldásokat, sőt, bizonyos esetekben, például a pluginek révén, túl is mutat azokon.

A QGIS rugalmas bővíthetősége, gyors fejlesztési ciklusa és széles körű felhasználói támogatása biztosítja, hogy a szoftver a jövőben is versenyképes maradjon a térinformatikai piacon, és továbbra is fontos szerepet játsszon a geoinformatikai közösségben.

IRODALOMJEGYZÉK

3D MODELLING

2022 3D Modellezés – lineáris kamera rendszer. URL: <https://datahacker.rs/016-3d-face-modeling-linear-camera-model/> [2025. augusztus 25.]

AERO LASER

2025 *Fotogrametria: qué es, para qué sirve y cómo funciona*. URL: <https://aerolaser.es/fotogrametria-que-es-para-que-sirve-y-como-funciona/> [2025. június 16.]

AHMAD

2017 Ground gamma-ray spectrometric studies of El-Sahu area, southwestern Sinai, Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics* 6. 2. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2017.06.001>.

ALCHEMECOLOGY

2025 *Agrárerdő faültetések és mezőgazdasági elemek nyomon követése QGIS segítségével*. URL: <https://alchemecology.com/?p=3690> [2025. július 1.]

ALDRICH

2023 *Clearing Up Cloudy Data for Satellite Imagery*, College of Agriculture, Health and Natural Resources. URL: <https://today.uconn.edu/2023/02/clearing-up-cloudy-data-for-satellite-imagery/> [2025. június 9.]

ANIL

2016 Determination of Tree Heights With Unmanned Air Vehicles. *Computer Science and Engineering*. DOI:10.13140/RG.2.2.10942.69447.

ANON

1992 *Aerial Photogrammetry*. New Smyrna Beach, Florida USA, Ezekiel Enterprises.

2024 *Applications of (GIS) Geoinformatics in Agriculture*. FlyPard Analytics GmbH. URL: <https://geopard.tech/blog/applications-of-gis-geoinformatics-in-agriculture/> [2025. június 13.]

BOHLIN

2025 Mobile laser scanning backpack. URL: <https://www.rslab.se/mobile-laser-scanning-backpack/> [2025. szeptember 4.]

BRANDIR

2006 *A P1 és P2 síkok által bezárt szög (i) az inklináció*. URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/User:ArtMechanic/gallery> [2025. augusztus 23.]

CSORNAI G. – LÁSZLÓ I.

2011 *Az ürfelvételek mezőgazdasági hasznosítása*. Budapest Főváros Kormányhivatala, Mezőgazdasági Távérzékelési és Helyszíni Ellenőrzési Osztály. 2011-es átdolgozott változata a TÁMOP 4.2.1./B-09/1/KMR-2010-0003 pályázat támogatásával készült.

CZIMBER K. szerk.

2025 *Geomatika az erdészetben*. OEE Szaktudás Füzetek 5.: a 163 éves Erdészeti Lapok tematikus különszáma.

DESCOPERA

2020 *Câteva zone din România se scufundă cu câțiva centimetri pe an și asta se vede și din satelit*. URL: <https://www.descopera.ro/galerii/19416709-cateva-zone-din-romania-se-scufunda-cu-cativa-centimetri-pe-an-si-asta-se-vede-si-din-satelit?pic=3> [2025. július 26.]

DETREKŐI Á. – SZABÓ GY.

1995 *Bevezetés a térinformatikába*. Budapest, Nemzeti Tankönyvkiadó.

Dial G.

2003 IKONOS satellite, imagery, and products. *Remote Sensing of Environment* 88. 1–2. 23–36.

DUCROS D.

2025 Earth seen from space. URL: <https://cnes.fr/en/projects/spot> [2025. augusztus 1.]

ENVIROSENSE

2025 EnviMAP© Erdő – Nagy pontosságú lézeres felmérésből előállított erdészeti információk. URL: <https://envirosense.hu/2023/12/21/envimap-erdo-nagy-pontossagu-lezeres-felmeresbol-eloolallitott-erdeszeti-informaciokwe-baruhaza/> [2025. szeptember 18.]

ENVIROSENSE

2025 *Erdészet, Térfogatszámítás (fatömeg)*. Envirosense. URL: <https://envirosense.hu/2021/04/27/terfogatszamitas-fatomeg/> [2025. június 23.]

EQUATOR

2023 Remote Sensing. URL: <https://equatorstudios.com/remote-sensing/> [2025. november 22.]

ERDA

2025 *Külfejtések digitális felmérése analitikus fotogrammetriai módszerrel*. URL: <https://erda.hu/hu/referenciak/egyedi-fejlesztések/kulfejtések-digitális-felmerese-analitikus-fotogrammetriai> [2025. szeptember 6.]

FLORES

2021 A method for accurate and efficient propagation of satellite orbits: A case study for a Molniya orbit. *Alexandria Engineering Journal* 60. 2. 2661–2676. DOI: [10.1016/j.aej.2020.12.056](https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.12.056).

FÖMI

2025 *Topográfiai térkép*. URL: https://geocaching.hu/images.geo?id=44363&group=3833&table=cache_images&wi=800&he=600 [2025. június 12.]

FONSTAD

2013 Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms* 38. 4. 421–430. URL: <https://doi.org/10.1002/esp.3366>.

GARRISON M.

2024 NASA Earth Observatory maps by Michala Garrison, based on data from Roland, T.P., et al. 2024./NASA Earth Observatory maps by Michala Garrison, based on data from Roland, T. P. et al. *Earth Observatory*.

GEOPARD

2024 Applications of GIS in Agriculture. URL: <https://geopard.tech/blog/applications-of-gis-geoinformatics-in-agriculture/> [2025. augusztus 16.]

GEORGIEV G.

2022 Remote Sensing Assessment of the Expansion of *Ips typographus* Attacks in the Chuprene Reserve, Western Balkan Range. *Forests* 13, 1. 39. URL: <https://doi.org/10.3390/f13010039>.

GIM

2025 SfM photogrammetry for 3D terrain mapping. *GIM International*. URL: <https://www.gim-international.com/content/article/sfm-photogrammetry-for-3d-terrain-mapping> [2025. június 29.]

GIS GEOGRAPHY

2025 *Geosynchronous vs Geostationary Orbits*. URL: <https://gisgeography.com/geosynchronous-geostationary-orbits/> [2025. november 17.]

GIS

2021 How to visualize layers from ArcGIS\QGIS project in their order. *Geographic Information Systems*. URL: <https://gis.stackexchange.com/questions/387480/how-to-visualize-layers-from-arcgis-qgis-project-in-their-order> [2025. szeptember 29.]

GRABSKA

2019 Forest Stand Species Mapping Using the Sentinel-2 Time Series. *Remote Sensing* 11. 10. 1197. URL: <https://doi.org/10.3390/rs11101197>.

GRASS GIS

2025 *Grass Gis 8.4.0*. URL: <https://www.fileeagle.com/software/2154/Grass-Gis/8.4.0> [2025. október 2.]

GRILLO A.

2025 *Low Earth Orbit (LEO): An Overview*. URL: <https://www.deepinsecurity.com/low-earth-orbit/> [2025. november 15.]

GUO Y.

2024 Dark-object subtraction atmosphere correction for water body information extraction in Zhuhai-1 hyperspectral imagery. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 27. 2. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2024.04.007>.

HAUGH C.

2024 *Satellite Limbo: VELO's take sats to new lows*. URL: <https://freedomtechnologiesinc.com/satellite-limbo-vleos-take-sats-to-new-lows/> [2025. november 15.]

HIRSCHMUGL

2023 Review on the Possibilities of Mapping Old-Growth Temperate Forests by Remote Sensing in Europe. *Environmental Modeling & Assessment* 28. DOI: 10.1007/s10666-023-09897-y.

HOPP B. – KEMÉNY L. – SMAUSZ KOLUMBÁN T. – MORVAI M. – ÓNODI K. – DEGOVICS D.

2015 Az elektromágneses spektrum, in: *Lézerek az orvostudományban, TÁMOP-4.1.1.C-12/1/KONV-2012-0005 projekt.*

JANCsó T.

2010 *Fotogrammetria 12. Digitális fotogrammetria.* Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar. URL: <https://ojs.emt.ro/foldmero/article/download/992/937> [2025. szeptember 16.]

JRC

2022 EU 2021 wildfire season was the second worst on record, finds new Commission report. *European Forest Fire Information System (EFFIS).*

LECHNER KÖZPONT

2025 Fotogrammetria. URL: <https://lechnerkozpont.hu/oldal/fotogrammetria> [2025. augusztus 30.]

LEDITZNIG T.

2024 Estimating carbon stock in unmanaged forests using field data and remote sensing. *Geographical Information Science & Systems* – UNIGIS MSC Thesis.

LIN

2021 Leaf-Off and Leaf-On UAV LiDAR Surveys for Single-Tree Inventory in Forest Plantations. *Drones* 5. 4. 115. URL: <https://doi.org/10.3390/drones5040115>.

LUMEN

2025 *Pontok ábrázolása a derékszögű koordináta-rendszerben.* URL: <https://courses.lumenlearning.com/slcc-mathforliberalartscorequisite/chapter/plotting-points-on-the-rectangular-coordinate-system/> [2025. október 3.]

MASSONNET et al.

1993 Radar interferometry: limits and potential. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 31. 2. 455–464. URL: <https://doi.org/10.1109/36.214922>.

MERRELL

2017 *Geode Sub-meter GPS Receiver testing.* URL: <https://blog.junipersys.com/the-geode-gps-receiver-under-dense-tree-canopy/> [2025. június 8.]

MICROGEO

2025 *Microgeo.* URL: <https://www.microgeo.it/fotogrammetria/> [2025. június 18.]

MIKITA et al.

2016 Forest Stand Inventory Based on Combined Aerial and Terrestrial Close-Range Photogrammetry. *Forests* 7. 8. 165. URL: <https://doi.org/10.3390/f7080165>.

MILLER

1958 The Digital Terrain Model. Theory and applications. *Photogrammetric Engineering* 24. 3. 433–442.

MOLNÁR T. – KIRÁLY G.

2023 Gépi tanulási módszerek alkalmazása felszínborítás osztályozásra a Google Earth Engine segítségével, Sárvár városára. In: Abriha-Molnár Vanda Éva (szerk.): *Az elmélet és gyakorlat találkozása a térinformatikában XIV*. Theory meets practice in GIS.

MUCSI L.

2011 Jelenségek modellezése, vektor és raszter alapú modellek in: *Geoinformatika alapjai*. URL: <http://earth.geo.u-szeged.hu/~laci/ab-Geoinfo-tananyag/ch03s03.html> [2025. szeptember 5.]

MUCSI L.

2013 *Műholdas távérzékelés, Elmélet és gyakorlat*. SZTE Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék.

NASA

2021 *Earth Observation Satellite*. NASA/USGS.

PENMAN

2023 An instructional workflow for using terrestrial laser scanning (TLS) to quantify vegetation structure for wildlife studies. *Forest Ecology and Management* 548.

PETZOLD et al.

1999 Laser scanning surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. URL: [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00005-2).

PIROTTI

2011 Analysis of full-waveform LiDAR data for forestry applications: a review of investigations and methods. *iForest – Biogeosciences and Forestry* 4. 100–106.

Polidori

2020 *On Laussedat's contribution to the emergence of photogrammetry*, s.l.: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B2-2020, 2020.

PRĂVĂLIE R.

2022 NDVI-based ecological dynamics of forest vegetation and its relationship to climate change in Romania during 1987–2018. *Ecological Indicators* 136. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108629>.

QGIS

2023 QGIS 3.30: Global Map Terrain. <https://www.northrivergeographic.com/qgis-3-30-global-map-terrain/> [2025. szeptember 16.]

RABUS B.

2003 The shuttle radar topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. URL: [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(02\)00124-7](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(02)00124-7).

RIEBEEK H.

2009 CATALOG OF EARTH SATELLITE ORBITS. NASA, *EARTH OBSERVATORY*.

ROMATSA

2025 Aeronautical Information Poortal Romania. URL: <https://flightplan.romatsa.ro/init/drones/index> [2025. július 9.]

SHIPPERT P.

2020 Radiometric Calibration and Corrections. *Humboldt State University, Geospatial Online*.

SHUNLIN L.

2020 Chapter 1 – A systematic view of remote sensing, *Advanced Remote Sensing (Second Edition)*. *Academic Press*, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815826-5.00001-5>.

SILVA C. A.

2021 Fusing simulated GEDI, ICESat-2 and NISAR data for regional above-ground biomass mapping. *Remote Sensing of Environment* 253. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112234>.

SPOT

2025 Mount Etna, Italy, post eruption satellite image. URL: <https://space-solutions.airbus.com/resources/satellite-image-gallery/spot/mount-etna-italy-eruption-spot/> [2025. augusztus 6.]

TAKÁCSNÉ

2013 Eltérés a CAD és GIS adatszerkezetek között. URL: <https://slideplayer.hu/slide/2089519/> [2025. július 19.]

TAKASHI

2025 Surface of the forest (3D – anaglyph). URL: <https://ca.pinterest.com/pin/136304326196737447/>.

TARGET3D

2025 *3D PluraView*. URL: <https://www.target3d.co.uk/product-page/schneider-digital-3d-pluraview> [2025. július 2.]

TECHNOSKY

2025 *Fotogrammetria és légi fotogrammetria*. URL: <https://technosky.ro/servicii/fotogrammetrie/> [2025. június 12.]

TELBISZ

2023 *Digitális terepmodellek alkalmazása a geomorfológiában, illetve a természet-társadalom kapcsolatok kvantitatív vizsgálatában*. MTA doktori értekezés. https://real-d.mtak.hu/1536/7/telbisztom%40ludens.elte.hu_69_23_doktori_mu.pdf [2025. november 2.]

THOMAS G. R.

2022 *CSIS Aerospace Security Project*. Aerospace Security.

TURAI Endre

2019 *Geoinformatika*. Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Kar Műszaki Földtudományi alapszakának geoinformatika tantárgya.

UNIV. BAMBERG

2025 *Fieldwork – Introduction to Airborne Laser Scanning Data Processing and Interpretation*. URL: <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.uni-bamberg.de%2Fen%2Fiadk%2Farchaeology%2Fevents%2Fartikel%2Ffieldwork-introduction-to-airborne-laser-scanning-data-processing-and-interpretation> [2025. június 6.]

USGS

2023 *Landsat imagery of the Aral Sea from 1992 to 2020*. Landsat Missions.

VÁGÓ et al.

2009 *Alkalmazott térinformatika*. TÁMOP 4.1.2-08/1/A-2009-0033 pályázat alapján.

VÁGÓ J. – SERES A. – HEGEDŰS A.

2011 *Alkalmazott térinformatika*. Digitális Egyetem, Oktatási Hivatal.

VERŐNÉ WOJTASZEK

2010 *A távérzékelés fizikai alapjai*. Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar, Fotointerpretáció és távérzékelés 1.

VESTNIK–GLONASS

2025 3D digitális modellek drónok segítségével. URL: <http://vestnik-glonass.ru/upload/medialibrary/e45/e45c6ccf17c22dc5b943a91bc61d8358.png> [2025. július 9.]

VMEK

2025 *Terepismeret, térképismeret, tájékozódás*. OSZK, Magyar Elektronikus Könyvtár.

WOLFRAM

2025 *Képkoordináták*. <https://support.wolfram.com/25330>.

YANG et al.

2023 Refined fine-scale mapping of tree cover using time series of Planet-NICFI and Sentinel-1 imagery for Southeast Asia (2016–2021). *Earth System Science Data*. URL: <https://doi.org/10.5194/essd-15-4011-2023>.

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra.	A távérzékelés különböző fajtái, forrás: saját szerkesztés	33
2. ábra.	A távérzékelés folyamata, forrás: saját szerkesztés.	37
3. ábra.	Passzív távérzékelés, forrás: Equator 2023	39
4. ábra.	Aktív távérzékelés, forrás: Equator 2023	40
5. ábra.	Elektromágneses sugárzás útja, saját szerkesztés	42
6. ábra.	Az elektromágneses spektrum, forrás: Hopp–Kemény–Smausz Kolumbán–Morvai–Ónodi–Degovics 2015	42
7. ábra.	Multispektrális szenzor rögzítette spektrális jellegzőgörbék, forrás: Csornai–László 2011 alapján saját szerkesztés	42
8. ábra.	Az elektromágneses hullám összetevő. E – elektromágnes tér, M – mágneses tér, C – fénysebesség, λ – hullámhossz, forrás: Verőné Wojtaszek 2010	44
9. ábra.	Különböző közet elektromágneses sugárzást visszaverő tulajdonságai a hullámhossz függvényében, forrás: Vágó et al. 2009	44
10. ábra.	Különböző közegek elektromágneses sugárzást visszaverő tulajdonságai a hullámhossz függvényében, forrás: Vágó et al. 2009 . . .	45
11. ábra.	Az elektromágneses hullám összetevői: E – elektromágnes tér, M – mágneses tér, C – terjedés, λ – hullámhossz, forrás: Verőné Wojtaszek 2010	47
12. ábra.	Műholdas felvételek korrekciója és kompozit felvétel készítése, forrás: Aldrich 2023	58
13. ábra.	A Föld forgásából eredő torzítás, forrás: Vágó–Seres–Hegedűs 2011 .	59
14. ábra.	A domborzati torzítás, forrás: Vágó–Seres–Hegedűs 2011	59
15. ábra.	A Föld görbületéből származó torzítás, forrás: Vágó–Seres– Hegedűs 2011	60
16. ábra.	A perspektív leképzésből származó torzítás, forrás: Vágó–Seres– Hegedűs 2011	60
17. ábra.	Az ortorektifikáció folyamata, forrás: saját szerkesztés.	62
18. ábra.	A víz–szárazföld elkülönítésének eredményei a DOSW légköri korrekció előtt és után, (a) A FLX műholdkép DOSW-korrekció utáni változata, (b), (c) és (d) nagyított helyi részleteket mutatnak, (b) A vizuális értelmezés eredménye, forrás: Guo 2024.	64
19. ábra.	Radiometriai torzulások keletkezésének folyamata, forrás: Shippert 2020	66
20. ábra.	Pályahajlás/inklináció. A P1 és P2 síkok által bezárt szög (i), forrás: Brandir 2006.	76
21. ábra.	Műholdak pályaelemei az egyenlítői koordináta-rendszerben, forrás: Mucsi 2013.	76

22. ábra.	Alacsony Föld körüli pálya, forrás: Grillo 2025.	79
23. ábra.	Nagyon alacsony műholdpálya, forrás: Haugh 2024.	80
24. ábra.	Közepes magasságú műholdpálya, forrás: Grillo 2025.	82
25. ábra.	Geostacionárius műholdak, forrás: Shunlin 2020	84
26. ábra.	Geostacionárius pálya, forrás: GIS Geography 2025	85
27. ábra.	Földszinkron pálya, forrás: GIS Geography 2025.	86
28. ábra.	Magasan excentrikus pályán keringő Molnyija, forrás: Grillo 2025	89
29. ábra.	Molnya- és Tundra-műholdpálya, forrás: saját szerkesztés	91
30. ábra.	A poláris pálya, forrás: Thomas 2022.	94
31. ábra.	Napszinkron pálya, forrás: saját szerkesztés	96
32. ábra.	Napkelte–napnyugta, avagy terminátor–követő pálya, forrás: saját szerkesztés	97
33. ábra.	Egyenlítői pálya, forrás: saját szerkesztés.	98
34. ábra.	Dőlt pálya illusztrációja, forrás: saját szerkesztés	99
35. ábra.	A Landsat 9 műhold, forrás: NASA 2021	108
36. ábra.	A nyári időszakra vonatkozó átlagos NDVI-értékek Romániában az 1987–2002 (a) és a 2003–2018 (b) időszakban, valamint a két időszak közötti átlagos NDVI-értékek osztályozatlan (c) és osztályozott (d) különbségei, forrás: Prăvălie 2022	110
37. ábra.	<i>Ips typographus</i> fertőzési foltok a Chuprene Rezervátum északkeleti részén, forrás: Georgiev 2022	111
38. ábra.	Európai erdőtűzesetek műholdas térképe, forrás: JRC 2022	113
39. ábra.	Az Aral-tó területi változása 1992 és 2020 között, forrás: USGS 2023	115
40. ábra.	Szénlekötés becslése távérzékelési megközelítéssel, forrás: Leditznig 2024.	116
41. ábra.	Felhasználási Landsat 9-es műholdfelvétel, forrás: saját szerkesztés	117
42. ábra.	Sentinel műhoddal megfigyelt felszíni süllyedés Kolozsvár környékén, forrás: Descopera 2020	118
43. ábra.	Erdős területek idősoros összehasonlító elemzése műholdfelvételek alapján, 2016–2021 között, forrás: Yang et al. 2023.	119
44. ábra.	Fafajok megkülönböztetésére alkalmas Sentinel 2A műholdfelvételek, forrás: Grabska 2019.	120
45. ábra.	Felületborítás változása 1990–2018 között a Déli-Kárpátokban, forrás: saját szerkesztés	121
46. ábra.	Kovácsna megye CLC felületborítási térképe, forrás: saját szerkesztés	123
47. ábra.	Natura 2000-es területek földrajzi elhelyezkedése Romániában, forrás: saját szerkesztés	124
48. ábra.	Föld feletti biomaszabecslés műholdas lézerszkenneléssel, forrás: Silva 2021	127

49. ábra.	Az Antarktisz növényzettel való borítottságának növekedése a jég olvadása mentén, forrás: Garrison 2024	129
50. ábra.	Az Aimé Laussedat által készített Buc település tervrajza 1861-ből, forrás: Polidori 2020	137
51. ábra.	Postagalambokra rögzített kamerák és légi felvételezés, forrás: Anil 2016	139
52. ábra.	Analitikus fotogrammetriai eljárással vizsgálták az egyiptomi I. Széthi-királysír szarkofágtermének mennyezetét, forrás: ERDA 2025	141
53. ábra.	Digitális domborzatmodell készítése, forrás: Lechnerközpont, 2025	144
54. ábra.	Egyképes kiértékelési mód illusztrációja, forrás: Jancsó 2010	153
55. ábra.	Sztereoszkopikus felvételezés illusztrációja, forrás: Dial 2003	155
56. ábra.	Topográfiai képtérkép (A) és 3D topográfiai térkép (B), forrás: Ahmad 2017.	156
57. ábra.	A Structure from Motion (SfM) alapú fotogrammetria alkalmazása háromdimenziós tereptérképezésre, forrás: GIM 2025)	157
58. ábra.	Erdőfelszín 3D anaglif képen, forrás: Takashi 2025.	159
59. ábra.	Osztott képernyős szemlélés, forrás: saját szerkesztés	160
60. ábra.	A váltott képes vetítéshez szükséges folyadékkristályos szemüveg és infra jeladó, forrás: Jancsó 2010	161
61. ábra.	Passzív polarizációs technika ábrázolása, forrás: Target3D 2025	162
62. ábra.	Fotogrammetriai elemzés, forrás: Aero Laser 2025	164
63. ábra.	Földi fotogrammetria példája, forrás: Microgeo 2025.	168
64. ábra.	Fasor elemzése drónos felméréssel, forrás: Envirosense 2025	169
65. ábra.	Fatömeg, térfogatszámítás távérzékeléses eszközökkel, forrás: Envirosense 2025	170
66. ábra.	Síkfotogrammetria illusztrálása, forrás: Technosky 2025.	171
67. ábra.	Térfotogrammetria illusztrálása, forrás: Vestnik–Glonass 2025	172
68. ábra.	Optikai-mechanikus sztereoplotter, forrás: Anon 1992	173
69. ábra.	Erdőrészlet felvételezése 2025. 11. 18-án DJI Mavic 3M-mel, forrás: saját fotó	176
70. ábra.	Légtéri korlátozások UAV-repülésekre vonatkozóan, forrás: ROMATSA 2025	178
71. ábra.	Lézerszkennelés folyamata, forrás: Anon 2024	180
72. ábra.	Minta pontfelhő magasságnormalizálási eredmény, amely a pontfelhőket mutatja (a) normalizálás előtt és (b) normalizálás után, forrás: Lin 2021	181
73. ábra.	Lézerszkennelés eredményei	182
74. ábra.	(A) Erdős borításról érkező teljes hullámformájú visszatérő jel sémája; (B) a digitalizáló számlálók időfüggvényben történő ábrázolása; (C) modellezett hullámforma, ahol minden csúcst egy tartomány, szélesség és amplitúdó jellemez, forrás: Pirotti 2011	183
75. ábra.	Légi lézerszkennelés illusztrációja, forrás: Univ. Bamberg 2025	184

76. ábra.	Repülő- és UAV-alapú lézerszkennelés	184
77. ábra.	Földi lézerszkennér és fákra rögzített célpontok; (b) az ugyanazon helyszínről származó szkennelt adatok 25×20 m-es parcellaszegmense, forrás: Penman 2023.	185
78. ábra.	Háttra rögzített mobil lézerszkennelés, forrás: Bohlin 2025.	186
79. ábra.	Valós idejű és közvetlen georeferálás illusztrálása	187
80. ábra.	Földi irányítópontok alkalmazása a térbeli elhelyezés folyamatában	188
81. ábra.	A digitális domborzatmodell (DTM) és a digitális felszínmodell (DSM) előállítás	189
82. ábra.	Faállomány-jellemzők meghatározásához használt pontthalmaz, forrás: Czímber (szerk.) 2025	190
83. ábra.	Pixel koordináta-rendszer illusztrációja, forrás: saját szerkesztés	193
84. ábra.	Nézethálós képp koordináta-rendszer, forrás: Lumen 2025	194
85. ábra.	Kamera-koordinátarendszer, forrás: 3D Modelling 2022	195
86. ábra.	Topográfiai térkép illusztrálása, forrás: FÖMI 2025	200
87. ábra.	Topográfiai térképen való magassági értékek, pontok és szintvonalak ábrázolása, forrás: VMEK 2025	201
88. ábra.	Változatos domborzati viszonyok illusztrálása	201
89. ábra.	Topo to Raster modul eredménye az ArcGIS-programban	202
90. ábra.	Digitális terepmodell (DTM) elkészítése.	204
91. ábra.	Borított felszínmodell egy erdőrészeletről, forrás: Czímber et al. 2025	205
92. ábra.	Sepsiszentgyörgy NDVI-térképe 2024. 08. 12-én	208
93. ábra.	Az ArcGIS-szoftvercsalád fejlődése	212
94. ábra.	Grass GIS 8.4.0 verziója, forrás: GRASS GIS 2025	213
95. ábra.	Térinformatika a mezőgazdaságban, forrás: GeoPard 2024	216
96. ábra.	Térinformatika az erdészetben, forrás: Hirschmugl 2023.	218
97. ábra.	Agrárerdő-faültetések és mezőgazdasági elemek nyomon követése QGIS segítségével, forrás: Alchemecology 2025.	219
98. ábra.	A Geode Submeter GPS-vevő sűrű erdő lombkoronája alatti tesztelése, forrás: Merrell 2017	220
99. ábra.	Az adat és az információ közötti átmenet folyamata, forrás: saját szerkesztés	221
100. ábra.	Grafikus és leíró adatok kapcsolata, forrás: Takácsné 2013.	222
101. ábra.	Analóg térkép (bal) és vektoros digitális térkép (jobb), forrás: Detrekői–Szabó 1995.	225
102. ábra.	Spagetti-modell az objektumtáblázattal, forrás: Mucsi 2011	227
103. ábra.	Területi jelenségek ábrázolása topologikus modellben, forrás: Mucsi 2011.	229
104. ábra.	Pontszerű (I), vonalas (II.) és területi (III.) jelenségek ábrázolása topologikus modellben, forrás: Mucsi 2011	229

105. ábra.	<i>Sorok és oszlopok a raszterhálóban, forrás: Mucsi 2011</i>	<i>.234</i>
106. ábra.	<i>Egyazon jelenség megjelenítése különböző felbontással, forrás: Mucsi 2011</i>	<i>.235</i>
107. ábra.	<i>Pont, vonal és területi jelenségek ábrázolása raszteres modellben, forrás: Mucsi 2011</i>	<i>.237</i>
108. ábra.	<i>Cellaérték-megállapítási módszerek, forrás: Mucsi 2011</i>	<i>.238</i>
109. ábra.	<i>Folytonos jelenségek ábrázolása raszteres adatmodellben, forrás: Mucsi 2011</i>	<i>.239</i>
110. ábra.	<i>Az ArcGIS felépítése és fő moduljai, forrás: saját szerkesztés</i>	<i>.244</i>
111. ábra.	<i>Az ArcGIS/QGIS rétegeinek illusztrációja, forrás: GIS 2021</i>	<i>.244</i>
112. ábra.	<i>QGIS-ben megjelenített LIDAR-adatok, forrás: QGIS 2023</i>	<i>.247</i>

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat.	<i>A távérzékelés alkalmazási területei az erdészetben.</i>	17
2. táblázat.	<i>Összehasonlító áttekintés a passzív és aktív rendszerek tekintetében.</i>	41
3. táblázat.	<i>A műholdak térbeli felbontása, jellemző alkalmazásai</i>	48
4. táblázat.	<i>Az elektromágneses spektrum fő tartományai a távérzékelésben</i>	50
5. táblázat.	<i>Távérzékelési rendszerek spektrális felbontás szerint</i>	50
6. táblázat.	<i>Felszíni objektumokra jellemző spektrális jelleggörbe</i>	51
7. táblázat.	<i>Multi- és hiperspektrális rendszerek összehasonlítása.</i>	51
8. táblázat.	<i>A spektrális indexek szerepe</i>	52
9. táblázat.	<i>Anyagazonosítás spektrális felbontás segítségével</i>	52
10. táblázat.	<i>Alkalmazási területek</i>	53
11. táblázat.	<i>A műholdrendszerek időbeli felbontása.</i>	56
12. táblázat.	<i>Távérzékelési műholdrendszerek – felbontási jellemzők összehasonlítása.</i>	57
13. táblázat.	<i>Fontosabb geostacionárius meteorológiai műholdrendszerek</i>	83
14. táblázat.	<i>A HEO-pályák legfontosabb jellemzőinek összefoglaló táblázata</i>	88
15. táblázat.	<i>Molnyija- és Tundra-pályák.</i>	91
16. táblázat.	<i>Nemzetközi poláris meteorológiai műholdrendszerek</i>	92
17. táblázat.	<i>Napszinkron pálya összefoglalója.</i>	96
18. táblázat.	<i>Napkelte–napnyugta pálya, avagy terminátorkövető pálya</i>	97
19. táblázat.	<i>A Sentinel műhold spektrális sávjai és funkciói</i>	102
20. táblázat.	<i>Globális és regionális műholdrendszerek összehasonlító táblázata.</i>	132
21. táblázat.	<i>Összegző táblázat a fotogrammetria típusairól.</i>	169
22. táblázat.	<i>Összefoglaló táblázat a kiértékelési eljárások típusairól, erdészeti kutatások és gyakorlati felmérések tekintetében</i>	190
23. táblázat.	<i>Összehasonlító táblázat az analóg és digitális képek jellemzőiről</i>	192
24. táblázat.	<i>UAV-fotogrammetria erdészeti alkalmazásainak részletes áttekintése</i>	206
25. táblázat.	<i>NDVI-értékek értelmezése erdészeti környezetben</i>	208
26. táblázat.	<i>Felbontás, sor- és oszlopszám, cellaméret, forrás: Mucsi 2011</i>	235

RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE

Rövidítés	Magyar nyelven	Román nyelven	Angol nyelven
AACR	Polgári Légügyi Hatóság	Autoritatea Aeronautică Civilă Română	Romanian Civil Aeronautical Authority
ArcGIS	ArcGIS térinformatikai rendszer	Sistemul GIS ArcGIS	ArcGIS Geographic Information System
ArcMap	ArcGIS térképszerkesztő modulja	Modul de editare a hărților din ArcGIS	ArcGIS map editing module
ArcToolbox	Térinformatikai eszköztár	Set de instrumente GIS	GIS toolbox
CART	Klasszifikációs és regressziós fa	Arbore de clasificare și regresie	Classification and Regression Tree
CNN	Konvolúciós neurális hálózat	Rețea neurală convoluțională	Convolutional Neural Network
DTM	Digitális domborzatmodell	Model digital al terenului	Digital Terrain Model
DSM	Digitális felszínmodell	Model digital al suprafeței	Digital Surface Model
ESRI	Environmental Systems Research Inst.	Institutul de Cercetare a Sistemelor de Mediu	Environmental Systems Research Institute
FPV	Első személyű nézet	Vedere din perspectivă proprie	First Person View
GEDI	Globális erdőstruktúra szkennер	Instrument pentru structura pădurii globale	Global Ecosystem Dynamics Investigation
GIS/FIR	Térinformatikai rendszer	Sistem informațional geografic	Geographic Information System
GNSS	Globális navigációs műholdrendszer	Sistem global de navigație prin satelit	Global Navigation Satellite System
GPS	Globális helymeghatározó rendszer	Sistem de poziționare globală	Global Positioning System
GRS	Földrajzi referenciarendszer (SPOT)	Sistem de referință geospațială (SPOT)	Georeferenced Reference System (SPOT) (SPOT, 2025)
ICP	Erdőmegfigyelési program	Programul internațional de cooperare	International Co-operative Programme
IFN	Országos Erdőleltár (RO)	Inventarul Forestier Național	National Forest Inventory
IMU	Inerciális mérőegység	Unitate de măsurare inerțială	Inertial Measurement Unit
ISODATA	Iteratív osztályozó algoritmus	Algoritm de clasificare iterativă	Iterative Self-Organizing Data Analysis
LiDAR	Fényalapú radar	Detecție și măsurare cu lumină	Light Detection and Ranging
NDVI	Normalizált vegetációs index	Indicele de vegetație diferențial normalizat	Normalized Difference Vegetation Index

Rövidítés	Magyar nyelven	Román nyelven	Angol nyelven
OBIA	Objektumalapú képértelmezés	Analiză bazată pe obiect a imaginii	Object-Based Image Analysis
PCA	Főkomponens-analízis	Analiza componentelor principale	Principal Component Analysis
QGIS	Nyílt forráskódú GIS-rendszer	Sistem GIS cu sursă deschisă	Quantum Geographic Information System
RTK	Valós idejű kinematikus korrekció	Corecție cinematică în timp real	Real Time Kinematic
SfM	Mozgásból történő térképpalkotás	Reconstrucție 3D din mișcare	Structure from Motion
SHP	Shapefile fájl	Fișier shapefile	Shapefile
SHX	Shapefile indexfájl	Fișier index SHX	Shapefile Index File
DBF	Attribútum fájl	Fișier dBase pentru atribut	dBase Table File
SVM	Támogató vektorgép	Mașină cu vectori de suport	Support Vector Machine
UAV	Pilóta nélküli légi jármű	Vehicul aerian fără pilot	Unmanned Aerial Vehicle
UTM	Egységes vetületi rendszer	Sistemul de proiecție UTM	Universal Transverse Mercator
VHR	Nagyon nagy felbontás	Rezoluție foarte mare	Very High Resolution
VIS	Látható fény	Spectru vizibil	Visible Spectrum

REZUMAT

Teledetecția, fotogrammetria și geoinformatica într-o abordare integrată

Lucrarea de față oferă o prezentare amplă și coerent structurată a teledetecției și fotogrammetriei cu aplicație directă în silvicultură, punând accent pe fundamentele teoretice, evoluția istorică, tehnologiile actuale și aplicațiile practice în monitorizarea pădurilor. Conținutul este organizat în mod logic în opt capitole principale, abordând treptat noțiunile introductive, principiile fizice, tipurile de senzori și platforme, fotogrammetria aeriană și terestră, analiza imaginilor satelitare, integrarea în GIS și scanarea laser, culminând cu aplicațiile silvice concrete.

Teledetecția și fotogrammetria reprezintă instrumente moderne fundamentale în managementul forestier, facilitând colectarea de date multisursă, înalt detaliate și repetabile. Istoria acestor domenii pornește de la dezvoltarea fotografiei în secolul al XIX-lea, urmată de aplicarea acesteia în scopuri cartografice odată cu apariția zborurilor cu balon și ulterior cu avionul. După al Doilea Război Mondial, tehnologia cunoaște o accelerare semnificativă, culminând cu lansarea satelitului Landsat în 1972, care marchează începutul teledetecției spațiale. De-a lungul decadelor, s-au integrat noi generații de senzori, platforme UAV, precum și procesări bazate pe cloud și inteligență artificială.

Capitolul doi al lucrării detaliază principiile fizice ale radiației electromagnetice și interacțiunea acesteia cu suprafața terestră. Sunt explicate diferențele dintre teledetecția pasivă și activă, precum și importanța rezoluțiilor spațiale, spectrale, radiometrice și temporale în alegerea senzorului potrivit pentru o anumită aplicație forestieră. Senzorii optici (ex. Landsat, Sentinel, SPOT), multispectrali, radar și LiDAR sunt contextualizați în funcție de capacitățile lor de detecție. Sunt abordate și metodele de corecție geometrică, atmosferică și radiometrică, necesare pentru ca datele să poată fi analizate comparativ și precis.

Următorul capitol detaliază bazele fotogrammetriei. Fotogrammetria este prezentată ca știință a extragerii informației spațiale tridimensionale din imagini suprapuse. Sunt explicate tipurile de fotogrammetrie – aeriană, terestră, spațială – precum și diferențele dintre abordările planare și spațiale. Legătura cu GIS și geodezia este esențială pentru integrarea datelor fotogrammetrice în fluxuri analitice coerente. Sunt discutate sistemele de coordonate ale imaginilor și metodele de transformare între acestea, aspecte esențiale pentru precizia reconstrucțiilor spațiale.

În capitol patru sunt prezentate metodele de evaluare monoculară (monoplotting) și stereoscopică, inclusiv diverse moduri de vizualizare (anaglif, polarizare activă/pasivă). Accentul este pus pe generarea modelelor digitale de teren (DTM)

și de suprafață (DSM) din imagini aeriene, inclusiv prin digitalizarea curbilor de nivel și aplicarea de interpolări avansate. Sunt discutate problemele metodologice legate de densitatea punctelor, erori de interpolare și alegerea metodelor optime (ex. Kriging vs. Natural Neighbour). Aplicațiile forestiere includ măsurători topografice în sezonul fără frunziș, estimarea parametrilor dendrometrici (înălțime, acoperire, densitate) și evaluarea sănătății vegetației pe baza imaginilor procesate.

Capitolul cinci introduce conceptele de bază din geoinformatică și modul în care GIS integrează date spațiale vectoriale și raster. Se discută structura datelor în formate topologice și netopologice, precum și modele de stocare și analiză. Aplicațiile GIS în educația forestieră, agricultură și planificare teritorială sunt exemplificate prin utilizarea programelor ArcGIS și QGIS, evidențiind funcționalitățile acestora pentru analiza spațială și modelarea geografică.

Un scurt capitol prezintă interfața și componentele software-urilor GIS utilizate în practică: ESRI ArcGIS/ArcInfo și QGIS. Sunt ilustrate funcționalități precum editarea hărților, analiza raster, geoprocesare, integrarea imaginilor satelitare și automatizarea fluxurilor de lucru, esențiale pentru analizarea datelor forestiere și generarea de produse cartografice tematice.

În cadrul capitolului următor LiDAR-ul este prezentat ca tehnologie activă capabilă să genereze puncte 3D din mediul forestier prin măsurarea timpului de întoarcere a unui fascicul laser. Sunt explicate conceptele fizice, tipurile de senzori (aerieni, mobili, terestri, UAV) și avantajele lor. Procesarea datelor LiDAR include orientarea și georeferențierea punctelor, extragerea modelelor de teren și suprafață, precum și identificarea obiectelor (copaci, construcții). SLAM și algoritmi de filtrare permit chiar și determinarea structurii arborilor (voxelizare, segmentare de coronamente, estimare a diametrului și volumului trunchiului).

Capitolul final tratează sateliții majori utilizați în teledetecția forestieră: Landsat, Sentinel, SPOT, IRS, precum și sistemele rusești (GLONASS), chinezești (Gaofen, BeiDou). Sunt prezentate aspecte legate de preprocesarea imaginilor, îmbunătățiri (ex. NDVI, PCA), clasificări (pixeli vs. obiecte) și algoritmi (SVM, Random Forest, CNN etc.). Aplicațiile silvice sunt ilustrate prin identificarea perturbățiilor forestiere (tăieri, foc, dăunători), cartarea speciilor și determinarea biomasei. Este subliniat rolul rețelelor naționale (ex. IFN România), al datelor ICESat-2 și GEDI, precum și al inițiativelor europene Copernicus și Corine Land Cover în monitorizarea pădurilor și a biodiversității.

Lucrarea constituie un ghid didactic complet pentru studenții facultăților silvice, dar și pentru profesioniștii din domeniul geoinformaticii și managementului forestier. Prin abordarea integrată a teledetecției, fotogrammetriei și GIS, lectorii au la dispoziție cunoștințele teoretice și practice necesare în epoca digitală pentru a sprijini o silvicultură sustenabilă, precisă și rezilientă în fața provocărilor climatice și antropice.

ABSTRACT

Remote Sensing, Photogrammetry, and Geoinformatics in an Integrated Approach

This work provides a comprehensive and logically structured overview of remote sensing and photogrammetry with direct applications in forestry. It emphasizes theoretical foundations, historical development, current technologies, and practical implementations for forest monitoring. The content is organized into eight main chapters, gradually addressing introductory concepts, physical principles, sensor and platform types, aerial and terrestrial photogrammetry, satellite image analysis, GIS integration, and laser scanning, culminating in practical forestry applications.

Remote sensing and photogrammetry are fundamental modern tools in forest management, enabling the collection of highly detailed, multi-source, and repeatable data. The history of these fields dates back to the development of photography in the 19th century, followed by its use for cartographic purposes with the advent of balloon and later airplane flights. Following World War II, technological advancements accelerated rapidly, culminating in the launch of the Landsat satellite in 1972, which marked the beginning of satellite-based Earth observation. Over the following decades, new generations of sensors, UAV platforms, and cloud- and AI-based processing methods have been incorporated.

Chapter two details the physical principles of electromagnetic radiation and its interaction with the Earth's surface. The distinctions between passive and active remote sensing are explained, along with the importance of spatial, spectral, radiometric, and temporal resolution in selecting the appropriate sensor for a specific forestry application. Optical (e.g., Landsat, Sentinel, SPOT), multispectral, radar, and LiDAR sensors are discussed in relation to their detection capabilities. Furthermore, geometric, atmospheric, and radiometric correction methods are introduced, which are essential for comparative and precise data analysis.

The next chapter covers the fundamentals of photogrammetry, which is presented as the science of extracting three-dimensional spatial information from overlapping images. The main types of photogrammetry – terrestrial, aerial, and satellite – are discussed, as well as the differences between planar and spatial approaches. The connections with GIS and geodesy are highlighted as essential for integrating photogrammetric data into coherent analytical workflows. The coordinate systems of images and transformation methods between them are addressed, which are critical for accurate spatial reconstruction.

Chapter four presents monocular (monoplotting) and stereoscopic evaluation methods, including various visualization techniques (anaglyph, active/passive

polarization). Emphasis is placed on generating digital terrain models (DTMs) and digital surface models (DSMs) from aerial images, including through contour line digitization and advanced interpolation techniques. Methodological challenges related to point density, interpolation errors, and the choice of optimal methods (e.g. Kriging vs Natural Neighbour) are discussed. Forestry applications include topographic surveys during leaf-off seasons, estimation of dendrometric parameters (height, canopy coverage, density), and vegetation health assessment based on processed imagery.

Chapter five introduces core concepts of geoinformatics and how GIS integrates both vector and raster spatial data. The structure of data in topological and non-topological formats is discussed, along with storage and analysis models. GIS applications in forestry education, agriculture, and spatial planning are exemplified through the use of ArcGIS and QGIS, highlighting their functionalities for spatial analysis and geographic modelling.

A short chapter presents the interface and components of GIS software commonly used in practice: ESRI ArcGIS/ArcInfo and QGIS. Functionalities such as map editing, raster analysis, geoprocessing, satellite image integration, and workflow automation are illustrated – critical for forest data analysis and the generation of thematic cartographic products.

In the following chapter, LiDAR is introduced as an active remote sensing technology capable of generating 3D point clouds in forest environments by measuring the return time of laser pulses. Physical principles, sensor types (aerial, mobile, terrestrial, UAV), and their respective advantages are explained. LiDAR data processing includes orientation and georeferencing of points, creation of terrain and surface models, as well as object extraction (trees, buildings). SLAM techniques and filtering algorithms even allow for structural modelling of trees (e.g. voxelization, crown segmentation, trunk diameter, and volume estimation).

The final chapter addresses the major satellite systems used in forestry remote sensing: Landsat, Sentinel, SPOT, IRS, as well as Russian (GLONASS) and Chinese (Gaofen, BeiDou) systems. Key aspects include image preprocessing, enhancements (e.g. NDVI, PCA), classification techniques (pixel- vs object-based), and classification algorithms (SVM, Random Forest, CNN, etc.). Forestry applications are illustrated through the identification of disturbances (logging, fire, pests), species mapping, and biomass estimation. The role of national monitoring networks (e.g. IFN Romania), ICESat-2 and GEDI data, and European initiatives like Copernicus and Corine Land Cover are emphasized in supporting forest and biodiversity monitoring.

This work serves as a comprehensive didactic guide for students in forestry faculties, as well as professionals in geoinformatics and forest management. By integrating remote sensing, photogrammetry, and GIS, readers are equipped with both theoretical knowledge and practical skills necessary to support sustainable, precise, and resilient forestry in the face of climate and anthropogenic challenges.

A SZERZŐRŐL

Sebestyén Tihamér-Tibor a Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem Sepsiszentgyörgyi Karának egyetemi adjunktusa, több mint egy évtizedes tapasztalattal rendelkezik a megújuló energiaforrások kutatási területén. PhD-fokozatot a Babeş–Bolyai Tudományegyetemen szerzett 2020-ban. Kutatásának középpontjában a megújuló energiaforrások potenciálbecslése és hasznosítása állt Románia Központi Fejlesztési Régiójában. Számos EU-s K+F projektben vett részt, mint például a Horizon 2020 keretprogramban, ahol a bioenergia hasznosítását és a fenntartható fejlődést támogató kezdeményezésekben vállalt aktív szerepet.

Tudományos munkássága során több mint 20 publikációt jegyzett megújuló energiaforrásokkal, biomassza-alapú vidékfejlesztéssel és fenntartható energiegazdálkodással kapcsolatos témákban. Oktatási tevékenységében a topográfia és kataszter, távérzékelés és éghajlat témakörökre fókuszál. A szerző kitartóan keresi azokat a lehetőségeket, ahol a hallgatók bevonásával innovatív és alternatív megoldásokat dolgozhatnak ki helyspecifikus és egyedi kihívásokra az erdőgazdálkodás és agrárium széles körű területén.

Scientia Kiadó

400112 Kolozsvár (Cluj-Napoca)

Mátyás király (Matei Corvin) u. 4. sz.

Tel./fax: +40-364-401454

E-mail: scientia@kpi.sapientia.ro

www.scientiakiado.ro

Műszaki szerkesztés:

Dobos Piroska

Borítóterv:

Tipotéka Kft.

Korrektúra:

Szenkovics Enikő

Tipográfia:

Könczey Elemér

A távérzékelés, a fotogrammetria és a térinformatika rohamos fejlődése az elmúlt évtizedben gyökeresen átformálta az erdészeti kutatás és gyakorlat mindennapjait. Ez a jegyzet annak az átalakuló világnak kíván érthető és szakmailag hiteles lenyomata lenni, amelyben az adattudomány, a műholdas megfigyelés, a dróntechnológia és a geoinformatika már nem különálló eszközök, hanem egy közös gondolkodási keret részei.

Napjainkban a korszerű erdőgazdálkodás már nem képzelhető el multispektrális elemzések, UAV-alapú felmérések, digitális domborzatmodellek vagy éppen műholdas LiDAR-adatok nélkül. Ám a jövő erdőmérnökei számára ezek az eszközök nem csupán lehetőségeket jelentenek, hanem egyben felelősséget is: felelősséget az ökoszisztémák jobb megértéséért, a fenntartható döntésekért és a hosszú távú erdőállapot megőrzéséért.

Bízom benne, hogy ez a jegyzet nemcsak tudást ad, hanem inspirál is arra, hogy a tanulás közben felmerülő kérdések kutatássá, a kutatások pedig új felismerésekké formálódjanak, tekintve, hogy a térbeli gondolkodás ma az erdészet egyik legizgalmasabb és legfontosabb nyelve, amit a jövő szakembereinek jól kell ismernie.

ISBN 978-606-975-108-4



9 786069 751084