

Modellek a geoinformatikában

Dr. Szatmári, József, SZTE Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék
<szatmari@geo.u-szeged.hu>

Dr. habil. Mucsi, László, SZTE Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék
<mucsi@geo.u-szeged.hu>

Dr. habil. Nagyváradi, László, PTE Természetföldrajz és Geoinformatika Tanszék
<nagyvarl@gamma.ttk.pte.hu>

Dr. habil. Szabó, Szilárd, DE Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék
<szaboszilard.geo@gmail.com>

Dr. Barta, Károly, SZTE Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék
<barta@geo.u-szeged.hu>

Dr. Bugya, Titusz, PTE Természetföldrajz és Geoinformatika Tanszék
<titusz@gamma.ttk.pte.hu>

Dr. Czigány, Szabolcs, PTE Talajtani és Klimatológiai Tanszék
<tsczigany@gamma.ttk.pte.hu>

Dr. Pirkhoffer, Ervin, PTE Talajtani és Klimatológiai Tanszék
<pirkhoff@gamma.ttk.pte.hu>

Rábay, Andor, PTE Természetföldrajz és Geoinformatika Tanszék
<andorpp@gamma.ttk.pte.hu>

Tobak, Zsolt, SZTE Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék
<tobak@geo.u-szeged.hu>

Dr. van Leeuwen, Boudewijn, SZTE Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék
<leeuwen@geo.u-szeged.hu>

Bartus, Máté, SZTE Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék
<bartus.mate@gmail.com>

Szerkesztette Szatmári, József

Modellek a geoinformatikában

írta Dr. Szatmári, József, Dr. habil. Mucsi, László, Dr. habil. Nagyvárad, László, Dr. habil. Szabó, Szilárd, Dr. Barta, Károly, Dr. Bugya, Titusz, Dr. Czigány, Szabolcs, Dr. Pirkhoffer, Ervin, Rábay, Andor, Tobak, Zsolt, Dr. van Leeuwen, Boudewijn, Bartus, Máté, és Szatmári, József

Publication date utolsó módosítás: 2013.05.04.

Szerzői jog © 2013

TÁMOP-4.1.2.A/1-11/1 MSc Tananyagfejlesztés

Interdiszciplináris és komplex megközelítésű digitális tananyagfejlesztés a természettudományi képzési terület mesterszakjaihoz

Tartalom

Előszó	xi
1. Rendszer és modell. A modellek típusai	1
1.1.1. A modellek szerepe a környezeti kutatásokban	1
1.2. Modell és rendszer kapcsolata	1
2.1. 1.2.1. A hasonlóság szerepe az emberi gondolkodásban	2
2.2. 1.2.2. Rendszerelmélet	2
1.3. Modellek és földrajzi alkalmazásai	3
3.1. 1.3.1. A modellek általános sajátosságai	5
3.2. 1.3.2. A modellek jellemzői	7
3.3. 1.3.3. A modellek típusai	7
1.4. Számítógépes szimuláció a természetföldrajzban	8
4.1. 1.4.1. A számítógépes modellek típusai	9
1.5. A modellek tesztelése	11
6. Ellenőrző kérdések	12
7. Irodalomjegyzék	12
2. Numerikus szimulációk megoldásának matematikai alapjai	14
1. 2.1. Kompartment (kamra) modellek	14
2. 2.2. Avar-talaj ciklus	15
2.1. 2.2.1. Tároló egyenletek	16
2.2. 2.2.2. Transzport törvények	17
2.3. 2.2.3. A modell kalibrációja és megoldása	17
3. 2.3. Megoldás numerikus módszerekkel	19
4. Ellenőrző kérdések	22
5. Irodalomjegyzék	22
3. Világmodellek	23
1. 3.1. A növekedés határai	23
1.1. 3.1.1. Az LtG és a World3 modell kritikája	25
2. 3.2. A növekedés határain túl	25
3. 3.3. A növekedés határai – harminc év múltán	26
4. 3.4. A World3 modell validálása	30
5. Ellenőrző kérdések	32
6. Irodalomjegyzék	32
4. Eróziós modellek: Talajerózió	33
1. 4.1. A talajerózió fogalma és jelentősége	33
2. 4.2. A talajeróziós modellezés	37
3. 4.3. A vízeróziós modellezés története	38
3.1. 4.3.1. Az EUROSEM modell összefoglaló jellemzése	42
4. 4.4. Az EROSION3D modell bemutatása	44
5. Ellenőrző kérdések	45
6. Irodalomjegyzék	45
5. Hidrológiai modellek I. Hidrológiai modellezés alapjai	47
1. 5.1. Bevezetés	47
2. 5.2. A hidrológia rövid története	47
3. 5.3. A hidrológiai ciklus	48
4. 5.4. Vízyűjtő	53
5. 5.5. Hidrológiai modellek	56
6. Ellenőrző kérdések	62
7. Irodalomjegyzék	62
6. Hidrológiai modellek II. Hidrológiai modellek tesztelése, kalibrálása és validálása	64
1. 6.1. Bevezetés	64
2. 6.2. Kalibrálás	64
2.1. 6.2.1. Kalibráló adatok	64
2.2. 6.2.2. Kalibrálás a HEC-HMS modellben	65
2.2.1. A kalibrálás előfeltételei	65
2.2.2. Kalibráló futtatás beállítása	65
2.2.3. 6.2.2.3. Az optimalizáció eredményei	67

2.2.4. 6.2.2.4. A kalibrált paraméterek behelyettesítése	71
3. 6.3. Kalibrációs teszt	71
3.1. 6.3.1. Teszt környezet	71
3.2. 6.3.2. Teszt eredmények	72
3.3. 6.3.3. A teszt eredményeinek ellenőrzése	73
4. 6.4. Eredmények	73
5. Ellenőrző kérdések	74
6. Irodalomjegyzék	75
7. TáJVáltozási, tájmetriai modellek	76
1. 7.1. A táJVáltozások vizsgálatának módszertani kérdései	76
2. 7.2. TáJVáltozás vizsgálata logikai rétegekkel (2 kategória esetén)	79
3. 7.3. TáJVáltozás vizsgálat felszínborítás rétegek között (több kategória esetén)	80
4. 7.4. TáJVáltozás vizsgálata fuzzy alapokon	83
5. 7.5. Térképek közötti korreláció vizsgálata	83
6. 7.6. TáJmetriai modellek	84
7. Ellenőrző kérdések	91
8. Irodalomjegyzék	91
8. Fuzzy modellek	93
1. 8.1. A fuzzy halmazok általános bemutatása	93
2. 8.2. A fuzzy halmazok típusai	94
3. 8.3. Fuzzy modellek a földtudományokban	96
3.1. 8.3.1. Fuzzy halmazok földtudományi felhasználása a hidrogeológiai védőterületek kijelölésének példáján	96
3.2. 8.3.2. Döntéstámogatás: optimális helyszín kiválasztása	98
3.3. 8.3.3. Térképek összehasonlítása fuzzy alapon	101
4. Ellenőrző kérdések	106
5. Irodalomjegyzék	106
9. Fraktálmodellek a földtudományokban	107
1. 9.1. Parttagoltság meghatározása	107
2. 9.2. Partvonalmérési probléma	108
3. 9.3. Fraktálok, a fraktáldimenzió	111
3.1. 9.3.1. Cellaszámlálási dimenzió	115
4. 9.4. Fraktálok alkalmazása a geoinformatikában	117
5. Ellenőrző kérdések	118
6. Irodalomjegyzék	118
10. Mesterséges neurális hálózatok, neurális modellek	119
1. 10.1. Mesterséges neurális hálózatok áttekintése	119
2. 10.2. Mesterséges neurális hálózatok felépítése	120
3. 10.3. ANN-ok típusai	122
3.1. 10.3.1. A hálózatok tanítása	123
4. 10.4. ANN-ok alkalmazása	124
4.1. 10.4.1. Koordináta-transzformáció WGS84 és EOVS rendszerek között ANN-tal	124
5. Ellenőrző kérdések	125
6. Irodalomjegyzék	125
11. Térbeli terjedés, diffúziós modellek	126
1. 11.1. A diffúzió fogalma	126
2. 11.2. A térbeli terjedés típusai	126
3. 11.3. Diffúziós hullámok időben és térben	127
4. 11.4. Növekedés behatárolt környezetben, a logisztikus modell	128
5. 11.5. Hagerstrand szimulációs modellje: mezőgazdasági innovációk terjedése	129
5.1. 11.5.1. Sztochasztikus szimuláció	129
5.1.1. 11.5.1.1. Monte Carlo módszer	130
6. 11.6. Módosított Hagerstrand modell és további alkalmazások	132
6.1. 11.6.1. Járványterjedés	133
6.2. 11.6.2. Szennyeződés terjedése	135
7. Ellenőrző kérdések	135
8. Irodalomjegyzék	135
12. Folyamatmodellezés térinformatikai környezetben I.	136
1. 12.1. Statikus és dinamikus modellek	136
2. 12.2. A folyamat, mint GIS fogalom	136

3. 12.3. A folyamatmodellezés lehetséges céljai	137
4. 12.4. A prediktív folyamatmodellezés módszere	138
5. 12.5. A folyamatmodellezés várható pontossága, megbízhatósága	141
6. 12.6. A vektoros GIS környezet előnye: objektumorientáltság	141
7. Ellenőrző kérdések	142
8. Irodalomjegyzék	142
13. Folyamatmodellezés térinformatikai környezetben II.	143
1. 13.1. Modellezés GIS környezetben	143
2. 13.2. Modell típusok	143
3. 13.3. Geoprocessing eszköztár	144
3.1. 13.3.1. Eszközök futtatása	145
4. 13.4. ModelBuilder	146
4.1. 13.4.1. Folyamatok kezelése	146
5. 13.5. Modellek dokumentálása és megosztása	147
6. 13.6. Példa alkalmazások	148
7. Ellenőrző kérdések	152
8. Irodalomjegyzék	153
14. Térbeli modellek	154
1. 14.1. A 3D modell meghatározása	154
1.1. 14.1.1. 2,5D modellek	154
1.2. 14.1.2. Valós 3D modellek	155
2. 14.2. A térbeli modellek felépítése	156
3. 14.3. Digitális magassági modellek (DEM)	159
4. 14.4. A voxel modell	161
5. 14.5. A tetrahedronok	163
6. Ellenőrző kérdések	165
7. Irodalomjegyzék	165
15. Űrfelvételek radiometrikus korrekciója – modellezés raszteres adatokkal grafikus felületen ..	166
1. 15.1. Radiometrikus korrekció elméleti háttere	166
2. 15.2. Modellalkotás gyakorlati lépései	166
2.1. 15.2.1. Radiancia értékek kiszámítása az intenzitásértékekből	166
2.2. 15.2.2. Reflektancia érték számítása radiancia adatokból	167
3. 15.3. Radiometrikus korrekció modellje grafikus felületen	169
3.1. 15.3.1. Beépített model megnyitása	170
3.2. 15.3.2. Új, grafikus modell szerkezete	170
3.3. 15.3.3. Új, grafikus modell készítése a reflektanciaérték kiszámításához	171
4. Ellenőrző kérdések	176
5. Irodalomjegyzék	177

Az ábrák listája

1.1. A rendszerek kétdimenziós csoportosítása néhány példával	3
1.2. A földrajzi modellezés sémája	4
1.3. Az egyszerűsítés és generalizálás viszonya térképészeti alkalmazáskor	6
1.4. Az egyszerűsítés és generalizálás viszonya szimulációs alkalmazáskor	6
1.5. A modellezés és a modellek tesztelésének fázisai (KVVM kiadványok)	11
2.1. Rövid periódusú globális szenciklus modell. Zöld értékek: tárolókban a tárolt, becsült szénmennyiség (GT); piros értékek: éves szénforgalom a tárolók között (GT/év)	14
2.2. Rövid periódusú szenciklus modell transzportfolyamatai, a tárolt és szállított szénmennyiségek (Kerényi, 1995 alapján)	14
2.3. Rövid periódusú szenciklus, hulladék(avar)-talaj részrendszer	15
2.4. Newton-féle hűlési törvény analitikus megoldása és numerikus számítása Euler-módszerrel ..	20
2.5. Newton-féle hűlési törvény analitikus megoldása és numerikus számítása másodrendű Runge-Kutta-módszerrel	20
2.6. Newton-féle hűlési törvény analitikus megoldása és numerikus számítása negyedrendű Runge-Kutta-módszerrel	21
3.1. A World3 modell felépítése	23
3.2. A World3 modell szerkezeti növekedési pályái: a) folyamatos (exponenciális) a növekedés, ha a fizikai korlátok messze vannak, vagy azok is exponenciálisan növekednek; b) logisztikus, S alakú a növekedési görbe, ha a növekvő fizikai entitás pontos és azonnali jeleket kap arról, hogy a korlátokhoz képest hol van és ezekre a jelekre gyorsan és pontosan válaszol; c) ha a visszajelzések a korlátokról késnek, torzultak és a rendszer ezeket megkérdőjelezi, nem veszi figyelembe, vagy csak késéssel válaszol, ekkor bekövetkezik a túllövés, de ha a határok még nem erodálódnak a rendszer képes a korrekcióra; d) ha a korlát felől érkező válasz késik és ha a korlát (pl. környezet) irreverzibilisen erodálódik, akkor a rendszer túllő a korlátain, elpusztítja erőforrásbázisát és bekövetkezik az összeomlás (Meadows, 2005 alapján)	24
3.3. A World3 szimulációs modell Powersim változata	26
3.4. A World3-03 modellváltozat (Hetesi, 2011)	26
3.5. World3-03 1. Forгатókönyv – Referenciapont (Meadows, 2004 alapján)	28
3.6. World3-03 5. Forгатókönyv – Átfogó technológiai-gazdasági növekedési modell (Meadows, 2004 alapján)	29
3.7. World3-03 9. Forгатókönyv – Korlátozott és stabilizált modell (Meadows, 2004 alapján)	30
3.8. Az 1970 és 2000 közötti valós és az LtG által becsült népességi adatok összehasonlítása. (1) standard modell, (2) átfogó gazdasági növekedési modell, (3) stabilizálási kísérlet	31
3.9. Az 1970 és 2000 közötti valós és az LtG által becsült normált adatok összehasonlítása négyzetes középhiba (RMSD) alapján. (1) standard modell, (2) átfogó gazdasági növekedési modell, (3) stabilizálási kísérlet	31
4.1. Vízeróziós nyomok szántóföldeken	33
4.2. Eróziós barázda legelőn	34
4.3. Tipikus „footpath erosion” jelensége	35
4.4. Erősen erodált domboldal kukorica alatt	36
4.5. Példák a talajeróziós modellekben használt input paraméterekre	37
4.6. A fontosabb fizikai / elméleti modellek áttekintése (MORGAN, 1996, a web-oldal és a feltüntetett források nyomán)	39
4.7. A fizikai modellek már nemcsak a mérési tapasztalatokon alapulnak, hanem a folyamatok dinamikáját írják le a csapadék-, a növényzeti és a talajjellemzők függvényében. Az animáció egy általános sémát mutat a modellek algoritmusára a csapadékhullástól a lefolyásig.	39
4.8. A beszívárgás alakulása az idő függvényében a hortoni modell szerint A: magas, de gyorsan csökkenő víznyelés szakasza; B: lassuló beszívárgás szakasza; C: állandósuló vízáteresztés szakasza; D: felszíni tócsaképződés kezdete; E: lefolyás kezdete K(t): víznyelő-vízáteresztő képesség időbeni alakulása (mm/h vagy mm/min) Ks: telített talaj vízvezető képessége (mm/h vagy mm/min) a, b: talajra jellemző paraméterek	40
4.9. Az interaktív animáció lehetőséget biztosít a fizikai féleségtől és egyéb talajjellemzőktől függő víznyelő-vízáteresztő képesség szimulálására, ld. még 4.8. ábra)	41
4.10. A EUROSEM modell működési mechanizmusa (MORGAN et al. 1998 alapján)	43
4.11. : A EUROSEM-ben használt legfontosabb input paraméterek	43
4.12. Az E3D-ben használt legfontosabb input paraméterek	45

5.1. A hidrológiai ciklus elemei	48
5.2. A földi vízkészlet eloszlása	48
5.3. A hidrológiai ciklus kvantitatív ábrázolása. Az egyes tározókban km^3 , míg a nyilak mentén pedig $\text{km}^3/\text{év}$ a mértékegység	49
5.4. Veszteségi szintek a HEC-HMS csapadék-lefolyás modell alapján	49
5.5. Intercepció veszteség a csapadékmennyiség függvényében (bal oldali ábra), valamint törzs menti lefolyás (jobb oldali ábra)	50
5.6. A lefolyás és beszivárgás arányának változása a felszínhasználat függvényében	50
5.7. A Sematikus vízhálózat és vízgyűjtő modell a HEC-HMS szoftverben (MORGAN, 1996, a web-oldal és a feltüntetett források nyomán)	51
5.8. Ultra-kisméretű vízgyűjtőn kialakuló hirtelen árvíz, vízhozamának becslése és adatgyűjtés Q-H görbe modellezéséhez (video)	52
5.9. Rohanó, turbulens áramlás kialakulása műtárgy mögött, a Bükkösi-víz 2010 május 16.-i árvízi eseményekor (video)	52
5.10. Tipikus városi árvíz kialakulása Pécsen 2010. május 17.-én, a Vince utcában, műtárgy eltömődése miatt (video)	53
5.11. A vízgyűjtő, mint hidrológiai egység a Bükkösi-víz (bal felső), illetve a Pósa-völgy (jobb alsó) példáján. A jobb felső képen vízállás és vízhozam-szenzor látható. A bal alsó kép a vízgyűjtő fedettségi viszonyait mutatja be.	54
5.12. Az adat és számítógép-kapacitás igények változása a modellek dimenziószámának függvényében	56
5.13. A 2D problémák megoldásának lehetőségei és problémái 1D környezetben	57
5.14. Lefolyásmodellek sematikus folyamatábrája	57
5.15. A legegyszerűbb, előfutott flow chart típusú kockázati modell.	58
5.16. Tipikus városi árvíz kialakulása Pécsen 2010. május 17.-én, a Vince utcában, műtárgy eltömődése miatt (animáció)	59
5.17. 1D elöntés keresztmetszeti modellje, HEC-RAS környezetben(animáció)	60
5.18. 2D elöntés terjedése az idő függvényében, Flow 2D környezetben(animáció)	60
5.19. Flow chart döntéstámogatási mechanizmus árvízi kockázat előrejelzésére(animáció)	61
6.1. A kalibráló futtatás alap paraméterei	65
6.2. Az objektív függvény tulajdonságai	66
6.3. Tesztfuttatás paraméter tulajdonságok	66
6.4. A kalibrálás objektív függvényének főbb információi	67
6.5. Optimalizált paraméter értékek listája	68
6.6. A modellezett és mért vízállás értékek időbeli alakulása	68
6.7. A mért és szimulált vízhozam-értékek egymás függvényében	69
6.8. A mért és modellezett vízhozam értékek különbségének időbeli alakulása	69
6.9. Az objektív függvény értékének alakulása az iteráció során	70
6.10. Az optimalizálás eredményeinek fája	70
6.11. Az objektív függvény alakulása	72
6.12. Az optimalizált paraméter értékek	72
6.13. A kalibrált vízgyűjtő mért és szimulált vízhozam és csapadék grafikonja	72
6.14. Az ellenőrző futtatás eredményei	73
6.15. Az ellenőrző futtatás eredmény grafikonja	74
7.1. 1 km felbontású MODIS felvétel részlet Budapest és a Tisza-tó térségéből	76
7.2. 1 km felbontású MODIS felvétel részlet a Tisza-tóról	76
7.3. Nagyfelbontású GeoEye felvétel Budapest és a Tisza-tó térségéből (GoogleEarth)	77
7.4. Nagyfelbontású GeoEye felvétel Budapest és a Tisza-tó térségéből (GoogleEarth)	77
7.5. Nagyfelbontású GeoEye felvétel a Tisza-tó mellől (Kisköre)	78
7.6. Az első időponthoz tartozó réteg	79
7.7. A második képhez tartozó réteg	79
7.8. A kereszttabuláció eredménye	80
7.9. A Felső-Hegyköz (Zempléni-hegység) tájváltozása 1951 és 2005 között, kereszttabuláció (1952 [oszlop] és 2005 [sor] térképei között [pixelszám])	80
7.10. A Felső-Hegyköz felszínborítottsága 1952-ben (1: település, 2: erdő, 3: gye, 4: gyümölcsös, 5: szántó, 6: tarvágás)	81
7.11. A Felső-Hegyköz felszínborítottsága 2005-ben (1: település, 2: erdő, 3: gye, 4: gyümölcsös, 5: szántó, 6: tarvágás)	81
7.12. A Felső-Hegyköz 1952-es és 2005-ös felszínborítottsági térképének kereszttabulációja	82
7.13. Az NDVI és NDWI kapcsolatának vizsgálata raszteres geoinformatikai környezetben	84

7.14. Egy zempléni tájrészlet tájmetriai mutatóinak kiszámítása. A vLATE bővítmény használatának folyamata	86
7.15. Szegély és magterület egy folton belül	87
7.16. A terület és magterület összefüggése	87
7.17. A terület-magterület különbségének és az alak index (Shape Index) összefüggése	88
7.18. A vizsgálati terület felosztottsági mutatói	89
7.19. A foltok közötti legkisebb euklideszi távolság (NNDist) és a közelségi index (Proximity Index) számításának sematikus ábrája	90
7.20. A Proximity Index alakulása változó elérési távolság mellett(video)	90
8.1. A crisp és fuzzy halmazok	93
8.2. Szigmoidális függvények lefutása és paraméterei	95
8.3. Lineáris függvények lefutása és paraméterei	95
8.4. J-alakú függvények lefutása és paraméterei	95
8.5. Egyedileg definiált fuzzy függvény	96
8.6. Példa a fuzzy halmazok alkalmazására hidrológiai védőterületek kijelölése kapcsán	97
8.7. Vizimadarak optimális élőhelyének keresési folyamata hagyományos módszerrel	98
8.8. Vizimadarak optimális élőhelyének keresési folyamata fuzzy módszerrel	99
8.9. A hagyományos (crisp) megközelítés eredménye	99
8.10. A fuzzy halmaz alapú megközelítés eredménye	100
8.11. Helytelenül georeferált műholdfelvételek miatt keletkező hiba (Szabó, 2003)	101
8.12. Egy Tisza menti terület felszínborításának interpretációja egy 2004-es légifotóról	103
8.13. Egy Tisza menti terület felszínborításának interpretációja egy 2005-ös légifotóról	103
8.14. Két térkép összehasonlítása Map Comparison Kit szoftverrel (video)	104
8.15. A hagyományos, Kappa Index-en alapuló összehasonlítás eredménye	104
8.16. A lágy határokkal dolgozó Fuzzy Kappán alapuló összehasonlítás eredménye	105
9.1. Parttagoltság meghatározása Celebesz példáján (animáció)	107
9.2. Angol-sziget partvonalhossza geoinformatikai mérési módszer alapján	108
9.3. Partvonalhossz mérés eredménye és az értékek logaritmusa	109
9.4. Partvonalhossz mérés eredményének log/log diagramja	109
9.5. Koch-féle hópehelygörbe előállítás(forrás, animáció)	111
9.6. Mandelbrot és julia halmazok(forrás, animáció)	113
9.7. Tengerpart: az ön hasonlóság legegyszerűbben vizuálisan vizsgálható. Ha valamely jelenség ön hasonlító, bármely részletét felnagyítjuk, annak megkülönböztethetetlenül hasonlítania kell az egész jelenségre, illetve akármely más részletére; ha egy természeti jelenség ön hasonlító, akkor annak méretaránya meghatározhatatlan. Az ábrázolt ön hasonlító alakzatról, tengerpartról készített képen nem tudjuk eldönteni, hogy egy teljes partvonalat, vagy csupán egy öböl részletét látjuk, így nincs vizuális támpontunk a kép méretarányának becslésére sem (Peitigen, 1986).	113
9.8. Folyóhálózat fraktálrajzolata	114
9.9. Cella-számlálási dimenzió meghatározása egy sziget példáján(animáció)	115
9.10. Cellaszámlálás eredménye az Angol-szeigetre	117
10.1. ANN szerkezete	119
10.2. Neurális hálózat sematikus működési modellje egy neuronnal és egy bemeneti jellel (Hagan et al. 1996 alapján)	120
10.3. Neurális hálózat sematikus működési modellje egy neuronnal és többszörös bemeneti értékkel (Hagan et al. 1996 alapján)	121
10.4. Neurális hálózat sematikus működési modellje két, S számú neuronból álló réteggel és többszörös bemeneti értékkel (Hagan et al. 1996 alapján)	121
10.5. Az első réteg súlymátrixa	122
10.6. A megoldás folyamatábrája (animáció)	124
11.1. A térbeli terjedés típusai (Haggett, 2006 alapján)	126
11.2. A térbeli terjedés három dimenziós ábrázolása: trendfelület (Nemes Nagy, 1998 alapján) ...	128
11.3. Logisztikus függvény	128
11.4. Két kockával történő dobás elméleti és 10000 dobás után a tapasztalati valószínűségei	130
11.5. Az átlaginformációs (MIF) mező cellái. (a) az információ terjedésének valószínűségi értékei a középső cellától számítva; (b) az információ terjedésének kumulatív valószínűségi értékei	131
11.6. Az átlaginformációs (MIF) mező cellái. (a) az információ terjedésének valószínűségi értékei a középső cellától számítva; (b) az információ terjedésének kumulatív valószínűségi értékei	132
11.7. Középkori pestisjárvány európai elterjedése 1350 körül	133
11.8. A járványterjedési modell algoritmusai. (1) A fertőzött egyedet a piros szín jelöli. A betegség a vele közvetlenül érintkező két kékkel jelölt egyedre terjedhet tovább. Két szomszéd immunis. (2) Két további	

egyed megbetegedett, öt szomszéd viszont immunisnak bizonyult. További két beteg egyed fertőzőképes, a betegség a kékkel jelölt egyedekre terjedhet tovább. (3) Öt beteg egyed van, amelyeket az immunisak szinte teljesen körbezárnak. A terjedés további irányai a két kék egyed felé mutatnak.	134
11.9. A diffúzió, az advektív transzport és a hidrodinamikai diszperzió okozta anyagáramok a szivárgási sebesség függvényében (Kovács, 2004)	135
12.1. Időléptékes térkép tömegközlekedési elérési idők modellezésére Pécs városában (Készítette Balassa Bettina, PTE-TTK)	136
12.2. Főútvonal belterületi szakaszán való átlagos áthaladási sebesség modellezése GPS-es mérések alapján	137
12.3. ArcGIS ModelBuilder – modellezést segítő eszköz az ArcGIS vektoros geoinformatikai szoftverben	138
12.4. HEC-HMS hidrológiai modellező szoftver – a modellezett és a mért eredmények számszerű összevetése	139
12.5. HEC-HMS hidrológiai modellező szoftver – új mérési eredmények és a modell összevetése: vízhozam változása az idő függvényében	140
12.6. HEC-HMS hidrológiai modellező szoftver – speciális kapcsolatok az objektumok között, pl. vízgyűjtők és kifolyási pont összekapcsolása a modellben	142
13.1. A valós világ modellezése GIS rétegekkel alkalmasság vizsgálat céljából A komplex valóságot leegyszerűsítve a legfontosabb jelenségeket reprezentáló GIS rétegekkel modellezhetjük, melyek alapján a megadott kritériumrendszernek megfelelő területek kijelölhetők	143
13.2. Ismétlődő művelet sorok hatékony végrehajtása egymással összefűzött eszközökkel A modell futása során, az input adaton végrehajtott Add Field műveletet követően, értéket is számol az új mezőbe	143
13.3. Különböző térbeli problémák, melyek megoldására modelleket építhetők. Ilyen például egy üzlet megfelelő helyének kiválasztása GIS rétegek és megadott kritériumok alapján; egyenetlen terepen a leggyorsabb útvonal megkeresése A és B pontok között; adott épületekhez legközelebbi tűzcsapok kijelölése; vagy egy szennyezés által érintett terület és népesség lehatárolása.	144
13.4. Az ArcToolbox felépítése, kereső és előzmény funkciói Az ArcToolbox-ban a geoprocessing eszközök hierarchikus struktúrában böngészhetők, kulcsszavak és nevük alapján kereshetők, illetve a korábban futtatott folyamatok input és output paraméterei visszanezhetők	145
13.5. A geoprocessing eszközök futtatásának lehetséges módjai. A Select eszköz futtatható dialógusablakban és parancssorban, illetve felhasználható modellekben valamint script-ekben is. Utóbbi két esetben más eszközökkel összefűzve komplex művelet sorok hozhatók létre alapján kereshetők, illetve a korábban futtatott folyamatok input és output paraméterei visszanezhetők	146
13.6. Egymásba kapcsolódó folyamatok egy modellen belül. Az eszközöket téglalap, az input és output adatokat ellipszisek jelölik	147
13.7. Modell dokumentáció szerkesztése A panelen rögzíthetők a modell metaadatai, mint a rövid szöveges összefoglaló, a kulcsszavak vagy a szerző. Az eszköz sűgő szerkesztése során szöveges és ábrákkal illusztrált bejegyzések tárolhatók.	147
13.8. A létrehozott modell grafikus diagramja. A példaalkalmazásban létrehozott modell grafikus diagramján láthatók a felhasznált eszközök – Add Join, Select, Union, Clip – és azok kapcsolódásai	148
13.9. Egy láthatósági elemzést végző modell felépítésének folyamata 1. rész (video)	149
13.10. Egy láthatósági elemzést végző modell felépítésének folyamata 2. rész (video)	150
13.11. Egy láthatósági elemzést végző modell felépítésének folyamata 3. rész (video)	151
13.12. Egy láthatósági elemzést végző modell felépítésének folyamata 4. rész (video)	151
13.13. Egy láthatósági elemzést végző modell felépítésének folyamata 5. rész (video)	152
14.1. A kétdimenziós modell	154
14.2. Kétdimenziós terepmodell – a hagyományos domborzati térkép. A Mecsek nyugati- és középső része a Pécsi-síksággal	154
14.3. Három dimenziós látszati kép 2 dimenziós térképből: 2,5D modell. Kétszeres túlmagasítással, 5500 méter magasból, délkeleti megvilágításban, délről szemlélve a 2. ábrán látható területet (video) .	155
14.4. A három dimenziós modell	155
14.5. Példa a valós 3D-re. Egy felszín alatti tömeg elhelyezkedése a GRASS-ban megjelenítve (forrás)	156
14.6. Delaunay-háromszögek készítése pontfelhőből	157
14.7. Magassági értékek pontszerű adatokként a Jakab-hegy (Mecsek) DK-i részén	158
14.8. A 14.7. ábra pontjaira illesztett Delaunay-háromszögek. Síkbeli kép, noha a hálózat ritkulása és sűrűsödése már mutatja a domborzatot is.	158
14.9. A 14.7. ábrán látható magassági pontok alapján, a 14.8. ábra Delaunay-háromszögeiből készült 3D látszati kép. Az ábrázolt terület nagyobb, mint az ábrák területe. A Jakab-hegy a Mecsekben, 3-szoros túlmagasítással, dél-keletről.	159

14.10. Példa nem a felszín magasságát mutató 2,5D modellre: Magyarország népsűrűsége. Budapest egyes kerületeinek a népsűrűsége túl nagy volt ahhoz, hogy jól ábrázolható legyen.	160
14.11. A voxel modell kocka alakú térfogati elemei	161
14.12. Példa a valódi 3D modellre. A várható évi átlagos csapadékösszeg térbeli eloszlása közép- és kelet-Szlovákiában. Az egyes felületek izofelületek, az azonos értékű (tehát azonos éves átlagos csapadékösszegű) pontok által alkotott felületek. Az egyes felületek alulról felfelé: 600 mm 700 mm 800 mm 900 mm 1000 mm 1100 mm. A háttérben a terület túlmagasított terepmodellje látható, ami voltaképpen egy 2,5D raszteres modell. Természetesen a felületek közötti, üresnek látszó térfogatban is várható csapadék, csak éppen nem a fent megadott értékek valamelyike.	162
14.13. Példa a valódi 3D modellre. A várható évi átlagos csapadékösszeg térbeli eloszlása közép- és kelet-Szlovákiában. A valós térbeli modellt ebben az esetben négy síkkal metszettük el, egy vízszintessel és három észak-déli csapású függőlegessel (a három függőleges sík a Magas-Tátra területére esik). Jól látszik az egyes metszések a várható éves csapadékösszeg térbeli eloszlása: minél sötétebb kék, annál nagyobb a csapadékösszeg. A sötétkek foltok mutatják, hogy a legtöbb csapadék a Magas-Tátrában és közvetlen közelében várható. Ettől távolodva mind vízszintes, mind függőleges irányban csökken a mennyisége. Természetesen a felületek közötti, üresnek látszó térfogatban is várható csapadék, csak ott nem készült metszet.	162
14.14. A tetrahedron. Megfigyelhető, hogy mindegyik oldala egy-egy háromszög	163
14.15. Térfogat kitöltése tetrahedronokkal. Négy, különböző színű tetrahedron tölti ki vonatkozó teret. A tájékozódást segíti a háttérben levő 3D koordináta-rendszer tengelyeinek feltüntetése és az, hogy a képzeletbeli alapsíkra felfekvő részeket halvány színezés jelöli. A kék test ugyanaz, mint a 14.14. ábrán látható.	164
14.16. A 14.15. ábra tetrahedronjai síkkal elmetszve. A sík (sárga) párhuzamos az alappal, amin a tetrahedronok felfeksznek. Megfigyelhető, hogy a metszés eredménye négy poligon, melyek három vagy négy oldalúak. A poligonok színezése ugyanaz, mint a tetrahedroné, amelynek a metszésével előálltak.	164
15.1. Kalibrációs adatok Landsat 5 TM szenzorához (Chandler-Markham, 2003)	166
15.2. Az USGS Glovis felülete a példában szereplő űrfelvétellel	168
15.3. A Föld (ill. más bolygók) és a Nap távolságát kiszámító interaktív felület	168
15.4. Az átlagos külső-atmoszférikus irradiancia ($ESUN\lambda$) értékei $W/m^2 \cdot \mu m$ -ben	169
15.5. Beépített model betöltése a Modeler Model Maker menüjéből	170
15.6. Az Erdas Modeler Model Maker nyitófelülete és az eszközpaletta	170
15.7. Egyszerű grafikus modell az Erdas Imagine 9.1. modellezőjében	171
15.8. A Model Maker input raszterréteg szerkesztőfelülete	172
15.9. Függvény megadása a Model Maker-ben	173
15.10. Radiancia és reflektancia értékeket számító modell szerkezete 1 sávra	174
15.11. Radiancia és reflektancia értékeket számító modell szerkezete sávonként összefűzéssel ...	175
15.12. Radiancia és reflektancia értékeket számító modell teljes struktúrája sávonként összefűzéssel	175

Előszó

A jelen digitális tananyag a TÁMOP-4.1.2.A/1-11/1-2011-0025 számú, "Interdiszciplináris és komplex megközelítésű digitális tananyagfejlesztés a természettudományi képzési terület mesterszakjaihoz" című projekt részeként készült el.

A projekt általános célja a XXI. század igényeinek megfelelő természettudományos felsőoktatás alapjainak a megteremtése. A projekt konkrét célja a természettudományi mesterképzés kompetenciaalapú és módszertani megújítása, mely folyamatosan képes kezelni a társadalmi-gazdasági változásokat, a legújabb tudományos eredményeket, és az info-kommunikációs technológia (IKT) eszköztárát használja.



A Modellek a geoinformatikában c. digitális tananyag a TÁMOP 4.1.2.A/1-11/1 pályázat támogatásával jött létre. A pályázatban az SZTE mellett a Debreceni Egyetem és a Pécsi Tudományegyetem oktatói vettek részt a tananyagfejlesztésekben.

A Modellek a geoinformatikában c. tananyag a geográfus és földtudományi mesterszakos hallgatók számára készült a Modellezés és szimuláció, Környezettervezési modellek, Modellezés és szimuláció a földtudományokban, Modellek a geoinformatikában és Hidrológiai modellezés című egyetemi MSc kurzusokhoz. Az egyes képzésekben természetesen a különböző fejezetek más hangsúlyt kaphatnak, így a hasonló tartalmú tárgyaknál az oktató eldöntheti, hogy a tananyagból mit használ fel. A fejezetek logikailag nem épülnek szigorúan egymásra, de az 1-3., 4-6., 7-11. és 12-15. fejezetcsoportok elsajátítása együtt, a sorrendet megtartva ajánlott.

A tananyag megértéséhez és megfelelő szintű elsajátításához a földrajzi tudásanyagon kívül az alapképzésben megszerzett felsőbb matematikai (kalkulus), statisztikai és geoinformatikai alapismeretek szükségesek. A tananyag a digitális tartalom miatt folyamatosan, könnyen bővíthető az igények szerint, és egyes moduljai bővebb tartalommal más kurzusokhoz köthetők.

A szimulációs gyakorlófeladatok többségének elkészítéséhez, valamint az interaktív animációk használatához ingyenes programokat és lejátszót választottunk (pl. Powersim, Simile, World3-3, HEC-HMS, Wolfram Mathematica CDF player), amelyeket telepítve a gyakorlatok önállóan is elvégezhetők. A 8., 13., 15. fejezetek gyakorlatainak végrehajtásához viszont a geoinformatikai laborokban megtalálható Idrisi, ArcGIS és Erdas szoftverek szükségesek!

A tananyag fejezetekre bomlik, minden fejezet végén ellenőrző kérdések találhatók. A teljes anyaghoz teszt jellegű feladatsor kapcsolódik, mely a felsőoktatási intézmények helyi keretrendszerén keresztül (pl. SZTE CooSpace) felhasználhatók az évközi vagy a vizsgaidőszaki számonkérés során.

A tananyag mozgóképeinek és animációinak megfelelő lejátszásához:

1. Kérjük használja a tesztelt és ajánlott böngészőket: Firefox 20.x; Chrome 26.x!
2. Kérjük telepítse a következő programokat a segédletekben leírtak alapján: videók lejátszása , animációk lejátszása

Tankönyv, v1.0, TÁMOP 4.1.2.A/1-11/1

Lektorálta: **Dr. Kitka Gergely PhD**



INTERDISZCIPLINÁRIS ÉS KOMPLEX MEGKÖZELÍTÉSŰ DIGITÁLIS
TANANYAGFEJLESZTÉS
A TERMÉSZETTUDOMÁNYI KÉPZÉSTERÜLET MESTERSZAKJAIHOZ
TÁMOP- 4.1.2.A/1-11/1-2011- 0025

Nemzeti Fejlesztési Összeírás
www.ujkezesek.hu
06 40 620 620



A projektek az Európai Unió
támogatásával valósulnak meg.

1. fejezet - Rendszer és modell. A modellek típusai

A fejezet céljai: A fejezetben megismerjük a modellezés szerepét a környezeti kutatásokban, a rendszer és modell kapcsolatát, a rendszerelméleti elgondolásokat. Példákat találunk a modellek földrajzi alkalmazásaira, osztályozására, típusaira. Végigkövetjük a modellek tesztelésének főbb lépéseit.

Szükséges ismeretek, fogalmak: környezeti információ, kölcsönhatás, absztrakció, zárt és nyílt rendszer, determinisztikus és sztochasztikus folyamatok, kvantitatív, kvalitatív, fekete-szürke-fehér doboz modellek, tömegegyensúly, energiamegmaradás, tároló egyenletek, verifikáció, kalibráció, validáció.

1. 1.1. A modellek szerepe a környezeti kutatásokban

„... more glamorous to polish mathematical equations (even bad ones) in the office than muddied boots (even good ones) in the field.” /Klemes, J./

Kutatáson, hagyományos értelmezés szerint, a (környezeti) rendszerek természetes és kísérleti körülmények közötti megfigyelését, tanulmányozását értjük. Ezek a megfigyelések segítik a kutatót annak eldöntésében, hogy milyen hipotéziseket állíthat fel a rendszerek felépítéséről és működéséről. A hipotézisek további megfigyelésekkel tesztelhetők és amennyiben igaznak bizonyulnak, azaz megfelelően írják le a rendszert és annak szerkezetét, funkcióit, akkor nevezhetjük végül is ezeket tesztelt elméleteknek, vagy általános törvényeknek.

Mit is ért a tudományos kutató modellen? A modell a valóság absztrakciója, amely a modellezés céljának megfelelő legegyszerűbb módon reprezentálja a komplex valóságot. Az a jó modell, amelyik a legkevesebb paraméterrel és legkisebb komplexitással legjobban megközelíti a valóságot. A modellezés nem helyettesítheti a megfigyelést, de hozzásegíthet a megfigyelések megértéséhez, elméletek kidolgozásához és teszteléséhez.

A modellezés, a tudományos kutatás részeként, az 1950-es évektől vált egyre jelentősebbé. Ezt a folyamatot a modellezési technikák és a számítástudomány fejlődése, a környezeti rendszerek megismerésének egyre nagyobb igénye, valamint az idő- és térbeli extrapoláció, azaz az előrejelzés fontosságának felismerése segítette elő. Gyorsan a környezetkutatók eszköztárának fontos alkotóelemévé vált az ökoszisztémák, a környezet és a különböző populációk – köztük az emberi – kölcsönhatásainak vizsgálatában. Az interakciók megértése, az ember környezetre gyakorolt hatásának egyre mélyebb feltárása és tevékenységének fenntarthatóvá tétele az elmúlt évtizedekben mind fontosabbá vált és ez napjaink legnagyobb globális kihívása.

A környezettudós, geográfus, ökológus szakember a szaktudományok (biológus, fizikus, vegyész, stb.) képviselőihez képest az absztrakció egy sokkal magasabb szintjén vizsgálja a rendszereket (Wainwright, J., Mulligan, M. 2004).

2. 1.2. Modell és rendszer kapcsolata

„...minden modell információt adó rendszer.” [De: nem minden információt adó rendszer modell!](Szücs E., 2003)

A modell tehát rendszer:

- célja az emberi megismerési folyamat elősegítése, újabb ismeretek szerzése;
- egymással kölcsönhatásban lévő részekből (a modell elemeiből) összeálló (összeállított) szerves egész;
- meghatározott “környezetével” (az ún. modellezettel) hasonlósági összefüggésben van, nélküle nem is értelmezhető.

Modell definíció: a modell bonyolult, részleteiben nem ismert fizikai, kémiai, biológiai, környezeti stb. rendszerek működésének megismerésére készített sematikus elképzelés, amelyből új összefüggésekre lehet következtetni, vagy amely alkalmas arra, hogy a rendszer jelenségei matematikailag leírhatók legyenek. A

modell a valódi rendszereknek többnyire csak főbb tulajdonságait tükrözi, egyszerűsített formában. Hogy melyek ezek a tulajdonságok mindig attól függ, hogy miért van szükségünk a modellre (Horváth, 1987).

2.1. 1.2.1. A hasonlóság szerepe az emberi gondolkodásban

Szigorúan véve a világ minden jelensége (minden rendszere) különbözik egymástól, nem lehet két azonosat találni közöttük. De ugyanaz a rendszer sem azonos önmagával, ha két különböző időpontban vizsgáljuk. Ebből arra a következtetésre lehetne jutni, hogy a végtelen sok, egymástól különböző jelenség megismerése lehetetlen. Az emberi gondolkodás alapja azonban az általánosítás, az absztrakció. Az ember a világ megfigyelése során igyekszik felismerni az egyes jelenségek közös tulajdonságait.

2.2. 1.2.2. Rendszerelmélet

RENDSZER = csoport, rend, szerkezet, berendezés...? „minden mindennel összefügg” helyett „mi, mivel, hogyan függ össze”!(Szücs E. 2003)

Természettudományi lexikon: anyagi rendszer az egymással kölcsönhatásban lévő anyagi testek összessége, amelyeket sajátosságaik tanulmányozása céljából elkülönítünk a környező világ több tárgyától. Mindent, ami nem számít a rendszerhez, környezetnek nevezünk.

Jövőkutatási fogalomtár: egymással meghatározott viszonyban (összefüggésben, kölcsönhatásban) levő elemek egységes egész képező halmaza. Alkatrészeinek kapcsolódási módja adja a rendszer szerkezetét. A rendszer mint egész, olyan integratív tulajdonságokkal is rendelkezik, amelyeket alkatrészei (alrendszerei, elemei) nem mutatnak. Minden rendszer elkülönül, megkülönböztethető környezetétől (háttérétől), viszonylagos önállósággal rendelkezik; ugyanakkor többé-kevésbé szoros kapcsolatban van környezetével, hatásokat vesz fel, s ad át. A rendszerek hierarchiát alkotnak és alrendszerekre bonthatók. Az elemei közötti kapcsolat erősebb az elemek adott aspektusból vizsgált környezeti, külső kapcsolatainál.

Bertalanffy rendszerének fogalma: a tudomány fejlődése során egyre specializáltabbá vált. Ennek a veszélynek a felismerése vezette a tudósokat az az irányba, hogy keressék a különböző tudományágak közötti kommunikáció lehetőségét, az egyes szaktudományok eredményeiben az általánost. Ez az irány vezetett el az általános rendszerelmélet koncepciójának kialakításához. Az általános rendszerelmélet megalapítója, akinek a munkájában ez a kifejezés először megjelent, Ludwig von Bertalanffy, magyar származású amerikai biológus.

„A rendszerek kölcsönhatásban álló elemek olyan együttese, amelyekre bizonyos rendszertörvények alkalmazhatók”. Ez a definíció meglehetősen általános, szinte csak kiindulópontot jelent. A benne szereplő fogalmak (kölcsönhatás, elem, törvények) visszatérnek a további definíciókban is. Itt Bertalanffy azt mondja ki, hogy a rendszer vizsgálata mindig valamilyen konkrét nézőpontból, konkrét szempontok szerint történhet csak. Ezeket a "bizonyos rendszertörvényeket" tehát a szaktudományoknak kell megadni. A rendszer ugyanis soha nem "általában" rendszer, hanem mindig "valamilyen" rendszer, s a milyensége specifikálódik a rendszertörvényekkel.

A határvonal a rendszer és a környezet között igen sok esetben nem húzható meg élesen. A rendszer-környezet viszony megértéséhez feltétlenül látnunk kell, hogy a való világ rendszerek hierarchikus rendszere; azaz, bármely rendszer egy tágabb rendszer része, alrendszere, s ugyanakkor neki is alrendszerei vannak. Tehát egy adott rendszer valamely magasabb rendszerszinten éppen a "környezet" elemeivel kapcsolódhat össze.

A rendszerek klasszikus osztályozásai közé tartozik Bertalanffy által tett megkülönböztetés, amely szerint léteznek zárt és nyílt rendszerek. A zárt rendszerek azok, amelyek a környezettel kizárólag energiát cserélnek, míg a nyílt rendszerekre az energiacsere mellett az anyagcsere is jellemző. Zárt rendszereknek tekinthetjük pl. az egyszerű gépeket, míg a nyílt rendszerek sorába tartoznak általában az élő rendszerek.

Boulding kilenc, egymásra hierarchikus rendben épülő osztályba sorolta a rendszereket:

1. Statikus struktúra vagy másképpen a vázak szintje
2. Egyszerű dinamikus rendszerek ("óraművek") szintje
3. Vezérlő mechanizmusok vagy kibernetikai rendszerek szintje

- 4.Önfenntartó struktúrák szintje
- 5.Genetikai társadalom, a növény szintje
- 6.Az állatok szintje
- 7.Az emberi szint
- 8.A társadalmi szervezetek szintje
- 9.Transzcendentális rendszerek

Stafford Beer a rendszerek kettős szempontú, azaz kétdimenziós csoportosítását végezte el (1.1.ábra). Egyik osztályozási szempontja szerint a rendszer bonyolultságától függően megkülönböztet egyszerű, bonyolult és különlegesen bonyolult rendszereket. Másik osztályozási szempontja: ha a kölcsönhatások pontosan előrejelezhetők, determinisztikus rendszerről van szó, ha ezt nem tehetjük meg, a rendszer sztochasztikus.

1.1. ábra - A rendszerek kétdimenziós csoportosítása néhány példával

<i>A rendszer</i>	<i>Egyszerű</i>	<i>Bonyolult</i>	<i>Különlegesen bonyolult</i>
<i>Determinisztikus</i>	ablakzár, biliárdjáték, üzemsamok	naprendszer, számítógép, automaták	
<i>Sztochasztikus</i>	pénzfeldobás, medúza, statisztikai minőség-ellenőrzés	feltételes reflexek, készletezés, vállalati jövedelmezőség	agy, vállalat, gazdaság

3. 1.3. Modellek és földrajzi alkalmazásaik

A modelleket ma leghatékonyabban arra használják, hogy leírják, magyarázzák, ill. analizálják egy rendszer működését. Gyakran találkozunk velük a földrajz elméletében, ahol többnyire a megértést segítik és gyakorlatában, mint pl. a regionális tervezésben, a környezeti hatásértékelésben, vagy épp a döntéshozókészítésben, ahol e tevékenységek szerves részei (Mezősi, 1995).

Ugyanúgy modellnek tekinthető tehát a valóság grafikus, mint ahogy a matematikai képe is. Általában mondhatjuk, hogy a modell a valóság egy speciális vetülete, annak idealizált képe. Mondhatni minden tudományág elkészítheti a saját álláspontja szerinti definíciót, ha nem a természettudományos megközelítést tekintjük, akkor pl. a modell tartalmilag akár elmélet, törvény, vagy strukturalizált koncepció is lehet.

Ebből az igen szerteágazó kérdéskörből a lényeges számunkra az lehet, hogy a rendszereket a tartalmuktól elvonatkoztatva is lehet együttesen tanulmányozni (vö. von Bertalanffy-féle általános rendszerelmélet, azok hordoznak közös tulajdonságokat, amelyek nagyon sajátosan jellemzőek egy-egy rendszerre továbbá a tapasztalt sajátosságok, törvényszerűségek átvihetők.

A modell és a rendszer közötti kapcsolatot vizsgálva hasznos és szemléletes lehet Huggett (1980) által elkülönített rendszeranalízis fázisokra hivatkozni. Szerinte a rendszerek elemzésénél az alábbi 4 fázis épül egymásra:

- lexikai fázis, amikor próbáljuk megérteni a rendszer határait, tartalmát (változóit), az állandó változók értékeit;
- feltáró fázis, amikor a rendszer változói közti kapcsolatot próbáljuk definiálni, matematikailag, fizikailag, vagy verbálisan;
- modellező fázis, amikor egyrészt megkonstruáljuk a modellt, másrészt "futtatjuk" azt;
- elemző fázis, amelyben a modell érvényességét elemezzük.

Ez persze nem jelenti azt, hogy modellel csak a 3. szinttől felfelé találkozhatnánk. Nagyon sok, a megértést könnyítő modell található pl. a lexikai fázishoz kapcsolhatóan (a tankönyvekben számos ilyen sémát találunk, s megállapodás kérdése, hogy ezeket minek nevezzük). Gyakori a feltáró fázis kimaradása is egyszerűen azért,

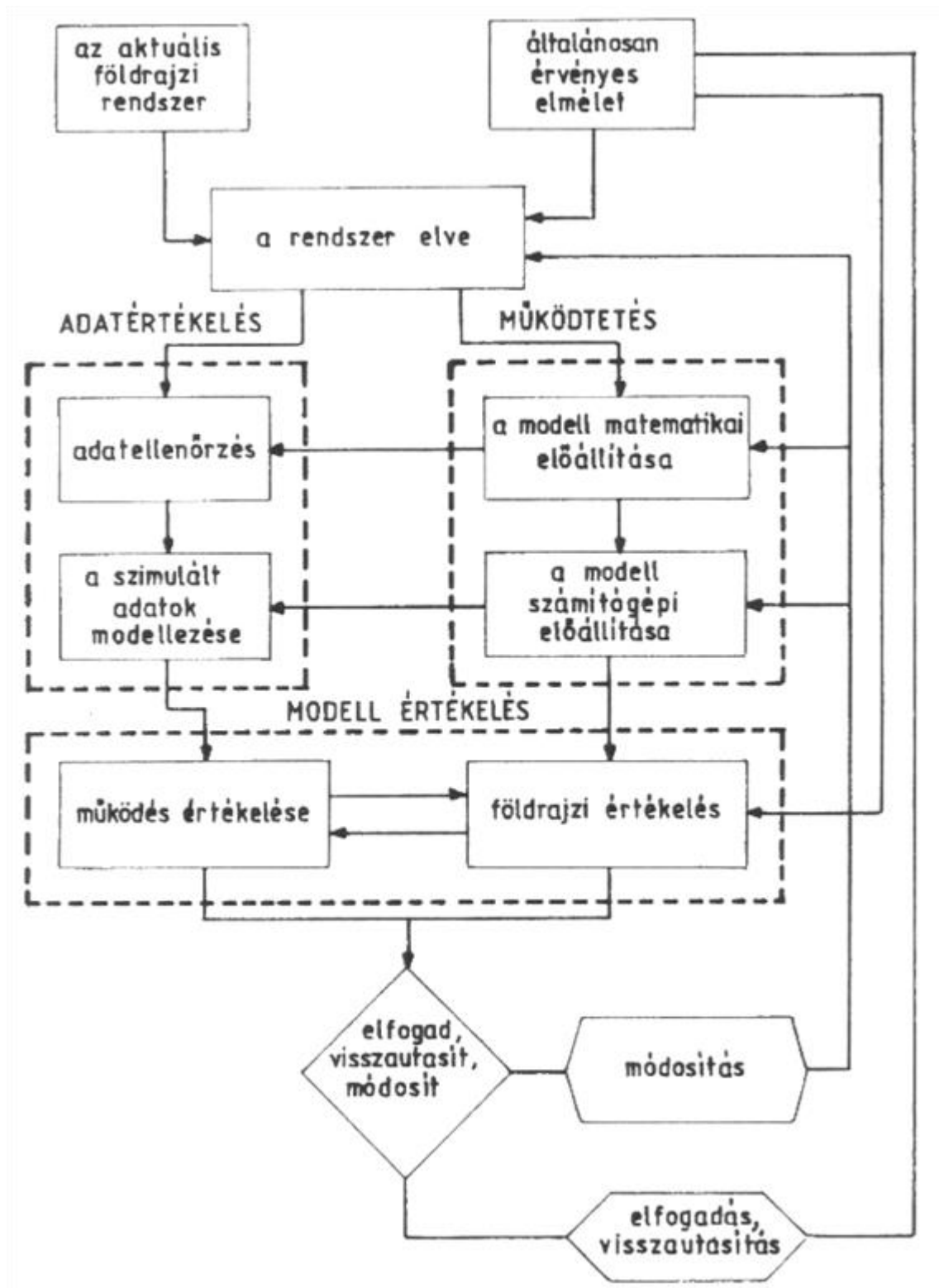
mert a tényezők nehezen kvantifikálhatók. A modellezésnek hasonlóan felállítható egy releváns sorrendje (1.2.ábra):

-a modellalkotás, amely felhasználja a modell paramétereit és a köztük lévő kapcsolatot figyelembe véve az absztrakció, általánosítás és egyszerűsítés szabályait;

-a modell alkalmazása, amelynek célja pl. új információ, ismeret létrehozása, beleértve pl. a szimuláció nyújtotta lehetőségeket is;

-a modell értékelése (a modellezés kommunikációs része), amely a modell érvényességét az előállított eredmények figyelembe vételével elemzi, különböző scenáriókat és alternatívákat vizsgál.

1.2. ábra - A földrajzi modellezés sémája



Ezek alapján sejthetők talán azok az előnyök, amelyek a modellek földrajzban történő használata mellett szólnak. Ilyen lehet többek között, hogy a szakmai kommunikáció egyik legkönnyebb módja, benne információk, elméletek, vélemények koncentráltan jelennek meg. Alkalmazásukkal különböző típusú problémák vethetők össze, s törvényszerűségek, szabályszerűségek adaptálhatók.

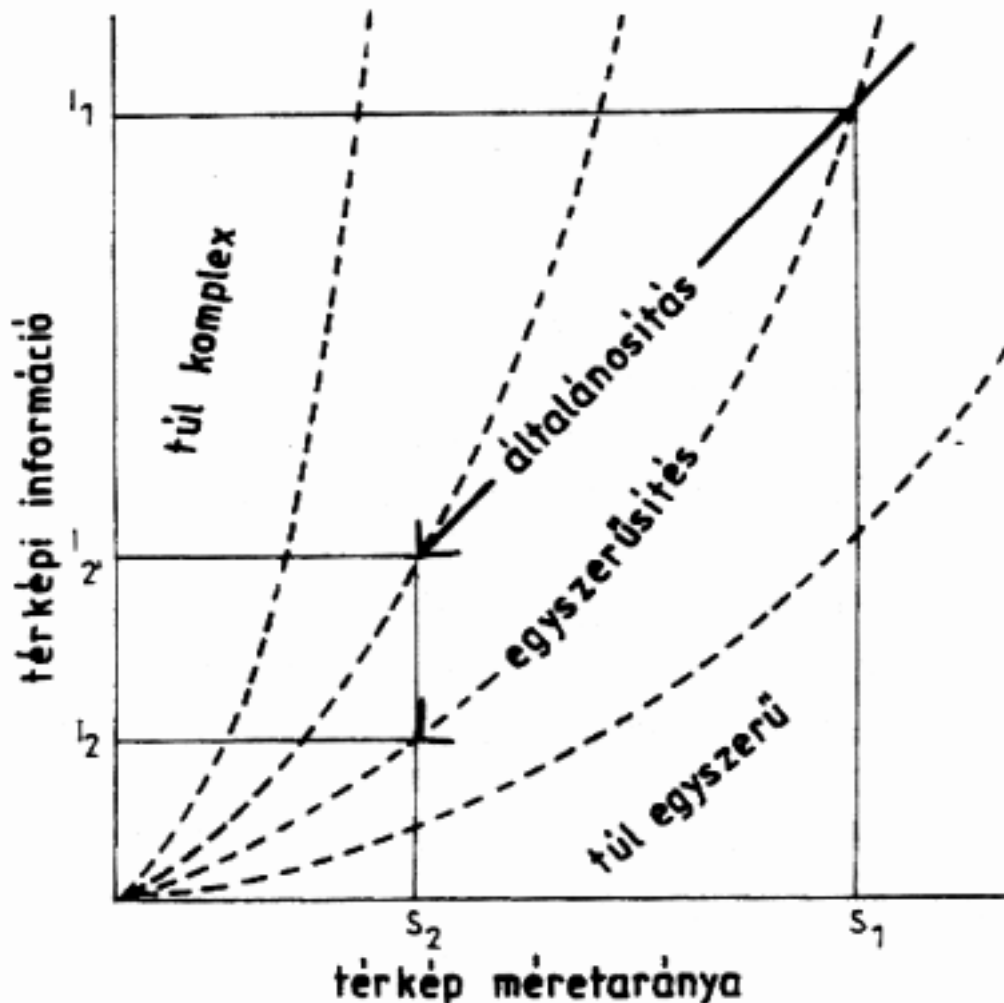
3.1. 1.3.1. A modellek általános sajátosságai

A modellek alkalmazásának célja, funkciói

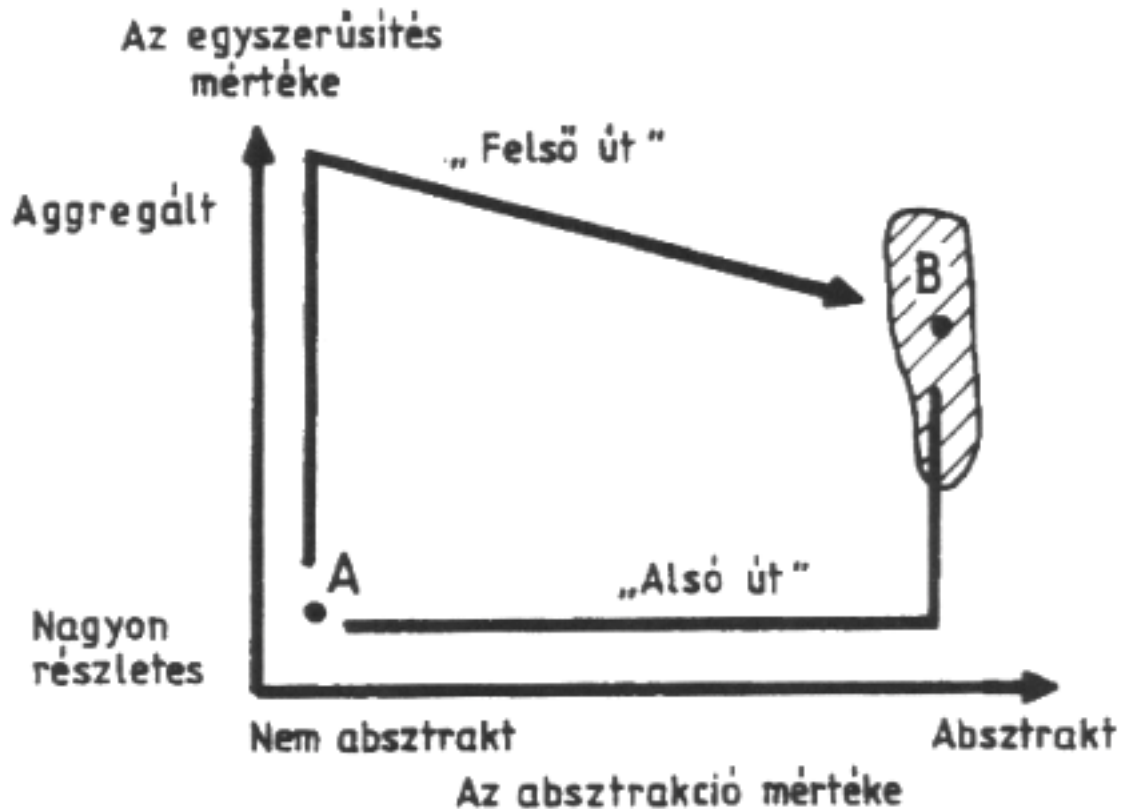
A modellek alkalmazásakor alapvetően két nagy célcsoportot szoktak emlegetni. Az egyikbe a gyakorlatban (pl. a tervezésben, előrejelzésben, hatásértékelésben) használatos modellek tartoznak, amelyekkel valamit kiszámolunk, prognosztizálunk, értékelünk stb. A másikba - eléggé pejoratív használat - a megértést célzó modellek kerülnek. Ez az igen gyakori csoportosítás azért sántít, mert az ún. gyakorlati, tervezési célú modellek is természetesen szolgálják a rendszer működésének megértését, másrészt a megértési célú modellek olykor nem tudnak végighaladni a rendszerépítés, modellalkotás fázisain a rendkívül nehézkes kvantifikáció miatt.

Valószínűleg a legbonyolultabb kérdések egyike a modellekkel kapcsolatban az egyszerűsítés, általánosítás (idealizálás) viszonya, ill. ezekkel szoros kölcsönhatásban a méretarány szerepe. Az minden modellépítéssel foglalkozó könyvben olvasható, hogy a modell alkalmazásának sikere nagyban függ az absztrakciótól. Arra nézve azonban már nagyon kevés információval rendelkezünk hogyan oldjuk meg az egyszerűsítést. Ami az egyszerűsítés és az általánosítás viszonyát illeti, arról a 1.3. sz. ábra térképészeti példája segít eligazodni. Mind az egyszerűsítés mind az általánosítás információvesztéssel jár. Ha lecsökkentem a méretarányt pl. 1:10 000-ről 1:100 000-re hirtelen túldúsul az információ, ellenkező esetben meg kiürül a térkép. Ilyenkor az a megoldás kínálkozik, hogy S1-ről S2-re való átmenetkor a pontsorról jelzett sávban maradunk az általánosítással, aggregált egységekkel a I2 helyett az I2' javasolt (Mezősi, 1995). A modellezés, ill. a (dinamikus) szimuláció gyakorlatában általában azt az utat javasolják (POWERSIM, 1993), hogy először végezzük el az egyszerűsítést majd utána az általánosítást (az un. "felső út"), aki mégis az alsót választja, "adjon fel minden reményt" lásd (1.4. ábra).

1.3. ábra - Az egyszerűsítés és generalizálás viszonya térképészeti alkalmazáskor



1.4. ábra - Az egyszerűsítés és generalizálás viszonya szimulációs alkalmazáskor



3.2. 1.3.2. A modellek jellemzői

A modellek jellemzőit Chorley, R.J. - Haggett, P. (1967) az alábbiakban foglalja össze:

-approximatív, azaz elég egyszerűnek kell lennie, a használatot, a megérthetőséget figyelembe kell venni, de ez nem járhat a komplexitás elvesztésével;

-szuggesztív, azaz le kell határolni mi a modell érvényességi köre, mi a viszonya a teljes modellhez (a földrajzban a méretarányok miatt ez igen fontos), mennyire képes a predikcióra stb.;

-szelektív, azaz információszűkítés árán - bizonyos esetekben a tényezőket eliminálva – csak "lényeges" paramétereket vesz tekintetbe;

-szerkezetes, azaz mind a rendszer taxonometrikus, mind viszonystruktúráját hordozza

-a modell különbözik a valós világtól, csak az analógia jelleg van meg;

-és valószínűleg a legvitatottabb jellemző az, hogy a modelleknek alkalmazhatóknak kell lenniük.

3.3. 1.3.3. A modellek típusai

A típusainak csoportosítását leginkább csak azért mutatjuk be, hogy kitűnjön milyen sokszínű a modellek világa. Chorley, R.(1967) pl. így csoportosította azokat:

1. *Analógián alapuló rendszerek:*

a) történeti analógia ("a jelen a múlt kulcsa" Lyell pl. a geológiában, vagy a tájfejlődésnél, denudációs kronológia);

b) térbeli analógia (ezt a kategóriát méltán kritizálták, mert pl. a korábbi globális felmelegedés Budiko 1987 elve csak nagyon korlátozottan vihető át a jövőre).

2. Fizikai modellek:

a) hardver modellek (ezeknél a modelleknek - főként természetes - anyagot használnak, de tágabb értelemben a természetes anyagokkal kapcsolatba hozható minden modell ide tartozhat pl. talajerózió modellezése);

b) matematikai modellek

-determinisztikus (pl. lineáris egyenletrendszerek, differenciál egyenletek használata)

-sztochasztikus (statisztikai eljárások).

3. *Általános rendszerek* (ezek többnyire elméleti modellek, és mint az előzőekben erre utaltunk, ezek egyúttal a részletesség, ill. a felbontás problémáját is jelzik)

a) szintetikus (fehér doboz minden kapcsolat és a folyamatok is ismertek, ezek többnyire ún. homomorf modellek, azaz csak néhány elemet tartalmaznak)

b) parciális (szürke doboz itt a tényezők kapcsolatait ki tudjuk matematikailag fejezni, de a folyamatokat nem tudjuk leírni)

c) fekete doboz modellek (csak a ki- és a bemeneti információk ismertek, ilyenek pl. az izomorf modellek, amelyek minden elemet tartalmaznak).

4. 1.4. Számítógépes szimuláció a természetföldrajzban

A legegyszerűbb esetben a szimuláció során értékek helyettesíthetők be egy összefüggésbe vagy egy számítási sor végezhető el. A legbonyolultabb modellekkel viszont a valós világban lejátszódó folyamatok jó közelítéssel szimulálhatók.

A legtöbb, a tananyagban tárgyalt modell determinisztikus, ami azt jelenti, hogy egy adott bemeneti adatsorhoz a szimuláció egy egyértelmű előrejelzést rendel. Más, ún. sztochasztikus modellek tartalmazhatnak véletlenszerű, vagy valószínűségi elemeket is akár a folyamatok működésében, akár az input adatok között, így egyénél több, általában nagyszámú kimenete lehetséges a szimulációnak.

A modellek sohasem reprezentálhatják a maga teljességében a valós világot, de annak analógiái lehetnek, néhány elemük és viselkedésük hasonlatossá teheti őket ahhoz. A hasonlóság fokát és még sok más szempontot tekintve különböző mértékben térnek el valós prototípusaiktól, pl. különböznek abban, hogy fizikailag mennyire hasonlítanak és mennyire tudják előre jelezni azok viselkedését. A fizikai hasonlóság nem feltétlenül garantálja a modell hatékonyságát.

Pontos skálamodelleket használunk esetenként felszínformák modellezéséhez és fejlődésük előrejelzéséhez. Ez a megközelítés sikerrel használható például partfalerózió és szedimentáció, mederfejlődés, vagy vízgyűjtő modellezéshez. A fizikai értelemben vett egyezés nem feltétlenül követeli meg a fizikai hasonlóságot, de a modellben és a valós világban azonos fizikai törvényeknek kell működniük.

Nyilvánvaló, hogy a felszíni formák és folyamatok számítógépes modelljei pusztán csak ezen az elvont matematikai szinten lehetnek hasonlatosak a valós világhoz. Ez a fajta hasonlóság nem erősíti és nem is gyengíti a modellek azt a fajta tulajdonságát, hogy prognózisaik mennyire realisztikusak. Egyszerű – de nyilvánvalóan helytelen – azt feltételezni, hogy mivel a számítógépes modellek absztrakt matematikai kifejezéseken alapulnak, ezért az előrejelzéseik minden esetben helytállóak. Hasonlóan leegyszerűsítő és éppen olyan hibás azt mondani, hogy mivel a számítógép semmiben sem hasonlít pl. a modellezendő felszínhez, vagy a tájhoz, ezért az előrejelzéseik inkorrektek. Az igazság e két szélsőség között helyezkedik el mindenféle modellre, hipotézisre, vagy elvre vonatkoztatva. Semelyik modell sem lehet jobb, mint azok feltételek és adatok, amelyeken alapul. Azon körülmények között, ahol a kezdeti feltételek érvényesek és az előrejelzések belül vannak az input adatok által meghatározott határokon, a modell valószínűleg valóságos eredményt ad. Amikor a prognózis a teszteléssel meghatározott megbízhatósági határon kívülre kerül, a modell további tesztvizsgálatok nélkül biztonságosan nem alkalmazható. A „Hulladék be - hulladék ki” régi számítógépes közhelyet a szimulációs modellekre is – akárcsak más számítógépes műveletekre – alkalmazhatjuk.

A modellek, amelyek alkalmasak a számítógépes programozásra, leírhatók kell legyenek szigorúan numerikus és/vagy logikai eljárásokkal. A tananyagban szereplő példák többsége determinisztikus, de néhányuk van számottevő véletlen alkotóeleme is. Logikai eljárások szükségesek, ha a modellezést számítógéppel valósítjuk meg, de nem minden logikai modellt érdemes programozni. Némely esetben a logikai eljárások programozásánál nehézségek adódhatnak, amelyek megoldásával nem érdemes az időt vesztegetni, különösen, ha a modellt csak ritkán használjuk.

4.1. 1.4.1. A számítógépes modellek típusai

A következő részben a számítógépes modellek elemzésénél bizonyos értelemben az egyszerűbbektől a bonyolultabbak felé haladunk, de a kategóriák határozottan átfedik egymást és számos modell egyes elemei különböző típusokba sorolhatók. Általában a következő főbb kategóriákat használjuk:

- *fekete doboz (black box)* modellek (1),
- *folymat (process)* modellek (2),
- *tömeg egyensúly (mass balance)* modellek (3),
- *sztochasztikus modellek* (4), bár nincs igazán egyetértés a modell-típusok kategorizálásában semelyik létező beosztásnál sem.

(1) A legegyszerűbb modellekben a működés láthatatlan a felhasználó számára, aki betáplálja a bemenő (input) adatokat és végeredményként megkapja a prognózist. A legtöbb számítógépes modellt a felhasználók ezen a módon kezelik, ezeket a modelleket nevezzük „*fekete doboz*” (*black box*), vagy *input-output* modelleknek. Ezt a terminust általában azokra a modellekre alkalmazzák, amelyeknél a modell belső működése nem feltétlenül reprezentálja a valóságban lejátszódó folyamatot, legfeljebb elvont matematikai szinten. Talán a leginkább elterjedt példa az ilyen típusú modellre, ahol az input és az output adatok közötti összefüggést a statisztikából ismert illeszkedő görbéből, vagy valamely más regressziós eljárásból kapjuk. A kimenő adatot így a bemenő adatból becsüljük és keveset tudunk a közben lejátszódó folyamatról. Ezek a modellek nagyon hatékonyak lehetnek és abban az esetben, ahol a folyamatok csak kis mértékben ismertek az elérhető legpontosabb előrejelzéseket szolgáltathatják. Abban az esetben viszont, amikor az input adatok kívül esnek a modell eredeti tesztadatai által meghatározott intervallumon, az input-output modellek rosszabbul viselkednek, mint a folymat, vagy tömeg egyensúly modellek.

A folymat és a tömeg egyensúly modellek engednek némi fényt a fekete dobozba. Ha minden folymat és kapcsolat teljeskörűen ismert, akkor „*fehér doboz*” (*white box*) modelltől beszélünk. Az ilyen típusú modell általában rendkívül bonyolult, még ha rendelkezünk is a szükséges ismeretekkel a felépítéséhez, így a legtöbb elérhető modell inkább felfogható (sötét) szürke doboz modellként. A valóság modellben való megjelenítéskor folyamatos konfliktus tapasztalható a komplexitás magasabb fokával együtt járó nagyobb valóságűség és a részletek elvesztésével járó, de elkerülhetetlen egyszerűsítés között. Az a „legjobb” modell, amelyik leginkább megfelel az eredeti célnak, amiért létrejött.

(2) A *folymat modellek* a valós folyamatok partikuláris működéseit, részfolymatait írják le: pl. a talajerózió fekete doboz modelljével becsülhetjük az erózió értékét tapasztalati összefüggések alapján, a csapadékmennyiségből, a lejtőhosszból és a lejtőszögéből. A folymat modellben az erózió elkülöníthető csepperózióra és lejtőleöblítésre. A csepperózió kifejezhető a csapadékinzintitásból és a talajtulajdonságokból, míg a lejtőleöblítés becsülhető a felszíni lefolyásból és ennek szállítási kapacitásából. Más szóval a modell egy folymatára (ld. Y fejezet/x. ábra) alapján építhető föl, amely a valós világ fizikai tárolóit és/vagy energia- és anyagáramlási folymatait reprezentálja. A folymat modell sohasem lehet teljes és tökéletes, de a konceptuális viselkedése közelebb áll a valósághoz, mint a fekete doboz modellé. Általában a modellben a legtöbb folymat egy alkalommal működik és kölcsönhatásba lép egy másikkal. A teljes modell ezért számos al(szub)modellből épül föl, amelyek egy-egy folymatot, vagy folymatok halmazát reprezentálják.

Egy effektív modellben az szubmodelleknek megegyező anyagok áramlását kell biztosítaniuk, általában energia- vagy tömegáramlást; és ugyanazon tér- és időbeli felbontással kell működniük. Pl. rendkívül nehéz összehangolni a légköri modellt (amely 100x100 km-es cellákkal működik), egy hidrológiai modellel, amely szabálytalan alakú, néhány km²-es vízgyűjtőkkel dolgozik.

(3) *Tömeg egyensúly modellek*: a legtöbb modellnél – kivéve a nukleáris robbanásokat és a radioaktív bomlást – nagyon fontos megfontorításként kell figyelembe vennünk, hogy sem tömeg, sem energia nem keletkezik és nem

vész el. Ez a törvény nem csak a teljes tömegre érvényes, hanem az egyes kémiai alkotóelemek tömegére is, így pl. a vasra és a szénre is. Ugyancsak vonatkozik ez a vegyületekre, megengedve a kémiai átalakulásokat és állapotváltozásokat. Talán a legnyilvánvalóbb és a fizikai földrajzban legfontosabb példa erre a víz körforgása (hydrological cycle). A víz össztömege megőrződik a kémiai változások, mint pl. vulkánkitörés, vagy az üledékekbe történő beépülés során, illetve az állapotváltozásoknál, mint a fagyás, olvadás, párolgás. stb. Hasonlóan igaz ez a teljes közetanyag, és talajmennyiség megmaradására. A későbbiekben kitérünk a mállási folyamat, vagy a tápanyagforgalom során megőrződő szilikátokra és a szénre (carbon cycle). Mindezekből a tömegháztartásokból csak kis mennyiségű anyag kerül ki, így ez alapján lehet a meghatározó egyensúlyt megtalálni a legtöbb rendszert alapjaiban mozgó folyamatokban. Bár az energia is megőrződik, az energia egyensúly kevésbé bizonyul használhatónak, mint a tömeg egyensúly a legtöbb általunk vizsgált esetben. A tömeg egyensúly előtérbe kerülésének az az oka, hogy a legtöbb mechanikai rendszerben nagy az energiavesztés, amelynek az okai kevésbé ismertek, így az energiaegyenleg meghatározó összefüggései bizonytalanok. Ennek ellenére van egy fontos kivétel, ahol az energiaegyenleg meghatározóan fontos: a Föld felszín hőmérséklete és ebből az evapotranspiráció a modellezése (animáció). Az energiavesztés ebben az eredendő termodinamikai rendszerben viszonylag kicsi.

Minden esetben, ha tömeg vagy energia egyensúlyt használunk, a modell leírható a „tároló egyenletek” néhány formájával:

Input - Output = Nettó növekedés a tárolóban.

Ez az egyenlőség nem csak a teljes rendszerre alkalmazható, hanem minden részrendszerre is. Leggyakrabban a víztestre, vagy a Földet alkotó anyagok tömegére alkalmazzuk és kevésbé használatos egyes kémiai elemekre, a teljes vagy a kisugárzott energiára és a biológiai populációkra. A tömeg egyensúly fontosságát nem lehet eléggé hangsúlyozni. Ez a vizsgált modellek közös jellemvonása, illetve egy megkülönböztető csoportjegyet kölcsönöz soknak közülük. Ha felnyitjuk a fekete dobozt modellt, a tömeg és energia egyensúly határozza meg a fizikai alapú modellek szerkezetét, amelyen belül az egyes folyamat modellek működnek. A tároló egyenleteknek szintén fontos a szerepük a formális kapcsolatok megteremtésében a térbeli folyamatok változási mértéke és az időbeli állapotváltozás mértéke között egy adott pontban. Az <szénciklus, fejezet/egyenlet> egyenleteiben a folyamatok határozzák meg a bemenő és kimenő értékeket a bal oldalon, míg az állapotváltozás a tárolóban bekövetkezett (előjeles) növekedés a jobb oldalon. Egy utolsó és nagyon praktikus előnye a tömeg vagy az energia tárolóegyenleteinek az, hogy sokkal jobban ismert a fizikai hátterük, mint azon folyamatoknak, amelyekkel kapcsolatban állnak a modellen belül, így ezek segítenek az előrejelzéseket az elfogadható határokon belül tartani. Valójában bebizonyítható, hogy némely nagy modellben a prognózis jósága sokkal inkább a tömeg egyensúly korlátozó szerepén múlik, mint a ható folyamatok megbízható megértésén (pl. globális klíma modellek)!

(4) A negyedik típus a *sztochasztikus* modell. Ez a kategória megjelenik az összes többi típusnál is, bár a legegyszerűbb modellekből hiányzik a sztochasztikus elem. A véletlen elemek általában arra szolgálnak, hogy olyan folyamatokat vagy műveleteket reprezentáljanak, amelyek kívül esnek a modell keretein. A valóságot, amelyet modellezni akarunk, általában szigorúan determinisztikusnak képzeljük, így elvben a folyamatok nem véletlenszerűek. Sohasem vehetjük azonban figyelembe az összes folyamat kiváltó okát modellünkben. Ezek a folyamatok véletlen számok sorozatával reprezentálhatók, amelyeket adott valószínűségi eloszlásokból kapunk. Néhány példa megvilágítja azokat az eseteket, amelyekben ez a megközelítés hasznos lehet. Ha van egy hidrológiai szimulációs modellünk, amellyel a csapadék adatokból a folyó vízállását becsüljük, akkor ez a modell használható arra is, hogy egy adott csapadék adatsorból jelezzük előre a vízállást. Másképpen, ha a 100 évenként bekövetkező várható maximális vízállásokat akarjuk tudni, akkor az ismert lokális csapadék-eloszlási adatokból egy véletlen csapadéksort generálunk. Ezt a sorozatot használhatjuk fel az áradások mértékének és eloszlásának előrejelzéséhez anélkül, hogy rendelkeznénk egy nagyon hosszú valós mérési adatsorral. Ez a megközelítés valószínűleg költséghatékonyabb és megbízhatóbb, mint a csapadékmennyiség előrejelzése egy globális cirkulációs modellből.

Egy másik példa: a sztochasztikus modell alkalmas lehet arra, hogy meghatározzuk az eróziós folyamat kezdeti (iniciális) felszínét. Ennek a reliefnek mindig vannak szabálytalan, bizonytalan részletei, de ezek egzakt formája általában nem fontos számunkra. Ezért a szabálytalanságokat, mint megfelelő véletlen számokat generáljuk ahelyett, hogy vizsgálnánk és modelleznénk a mikrorelief okait. Mindkét példára igaz, hogy a véletlen számok használata nem jelenti azt, hogy a csapadék, vagy a relief tetszés szerinti értéket felvehet. A véletlen értékek egy jól meghatározott valószínűségi eloszlásból származhatnak. A véletlen érték előállhat pl. egy 100-as átlagértékből és egy 1 értékű szórásból, így a legtöbb érték 98 és 102 közé esik. A véletlenszerűség korlátozható erre, vagy bármely más mértékre, de bizonyosan nem azt jelenti, hogy a modell kimenetekből hiányzik a szabályosság, hanem csak azt jelenti, hogy az outputok nem egyértelműen meghatározottak.

Még egy fajta sztochasztikus érték van, amelyik fontos a modellek tesztelésénél. Bármely modell kimenetét meghatározzák a paraméterek, melyekkel a kezdőállapotot, a folyamatváltozó konstansának értékét, stb. adjuk meg. A legtöbb ilyen paramétert nem pontosan ismerjük, pl. a mérési hibák, bizonytalanságok miatt, vagy azért, mert ezek az értékek helyről-helyre változnak. Ha minden paramétert véletlen eloszlásból számítunk, amelyek meghatározzák a lehetséges értékek sorozatát, akkor a modell futtatások sorozata, még ha determinisztikus modellről is van szó, a kimenetek egy eloszlását fogja adni. Ez az eloszlás összehasonlítható a terepi mérési eredményekkel és eldönthető, hogy a valós mérési eredmények azon határok között vannak-e, amelyeket a modell kimenetekből előrejeleztünk.

5. 1.5. A modellek tesztelése

A modellnek, akár gyakorlati, akár elméleti felhasználásra kerül, tesztelhető kimenetet kell szolgáltatnia. A számítógépes modellek, mivel a kvantitatív modellek családjába tartoznak, szükségszerűen numerikusak vagy logikaiak, így véges kimenetet eredményeznek minden futtatáskor. A legtöbb esetben ezek az előrejelzések számszerűen összehasonlíthatók a valós mérésekkel (amelyeknek függetleneknek kell lenniük a modellalkotásnál felhasznált adatoktól), így a modell nagyon pontos teljesítményvizsgálata végezhető el. A modell outputból egy kevésbé precíz – de nem feltétlenül „rossz” – szinten kvalitatív következtetéseket is levonhatunk. Valójában, amikor a modellnek sztochasztikus eleme is van, akár a folyamatok, akár az input konstansok között, a numerikus eredmény kevésbé lesz jól meghatározott, így a modellek egy folytonos sorozata építhető fel az egyértelmű kimenettel rendelkező szigorúan determinisztikus kvantitatív modellektől, a többé-kevésbé valószínű outputtal bíró sztochasztikus modellek sorozatán keresztül, a teljesen kvalitatív modellekig, mint többek között a természeti földrajz tradicionálisan sikeres modelljei közé tartozó Davis ciklustana.

A számítógépes modellek használata során a következő nélkülözhetetlen lépések során juthatunk el a szimulációig (1.5. ábra):

1.*Verifikáció:* a verifikáció során arról kell meggyőződnünk, hogy egyszerű, általában analitikusan is megoldható esetekben a modell kielégítő megoldást szolgáltat-e. Erről leggyakrabban a modell dokumentációjából tájékozódhatunk.

2.*Számítási háló meghatározása:* a számítási háló meghatározza az elérhető pontosságot, és numerikus modellek esetében a futási időt is. Nagyobb felbontású, sűrűbb háló esetében pontosabb, részletesebb kimeneti adatbázist kaphatunk, viszont a futási idő indokolatlanul megnőhet. A számítási háló meghatározásában segítségünkre lehetnek az érzékenységi vizsgálatok.

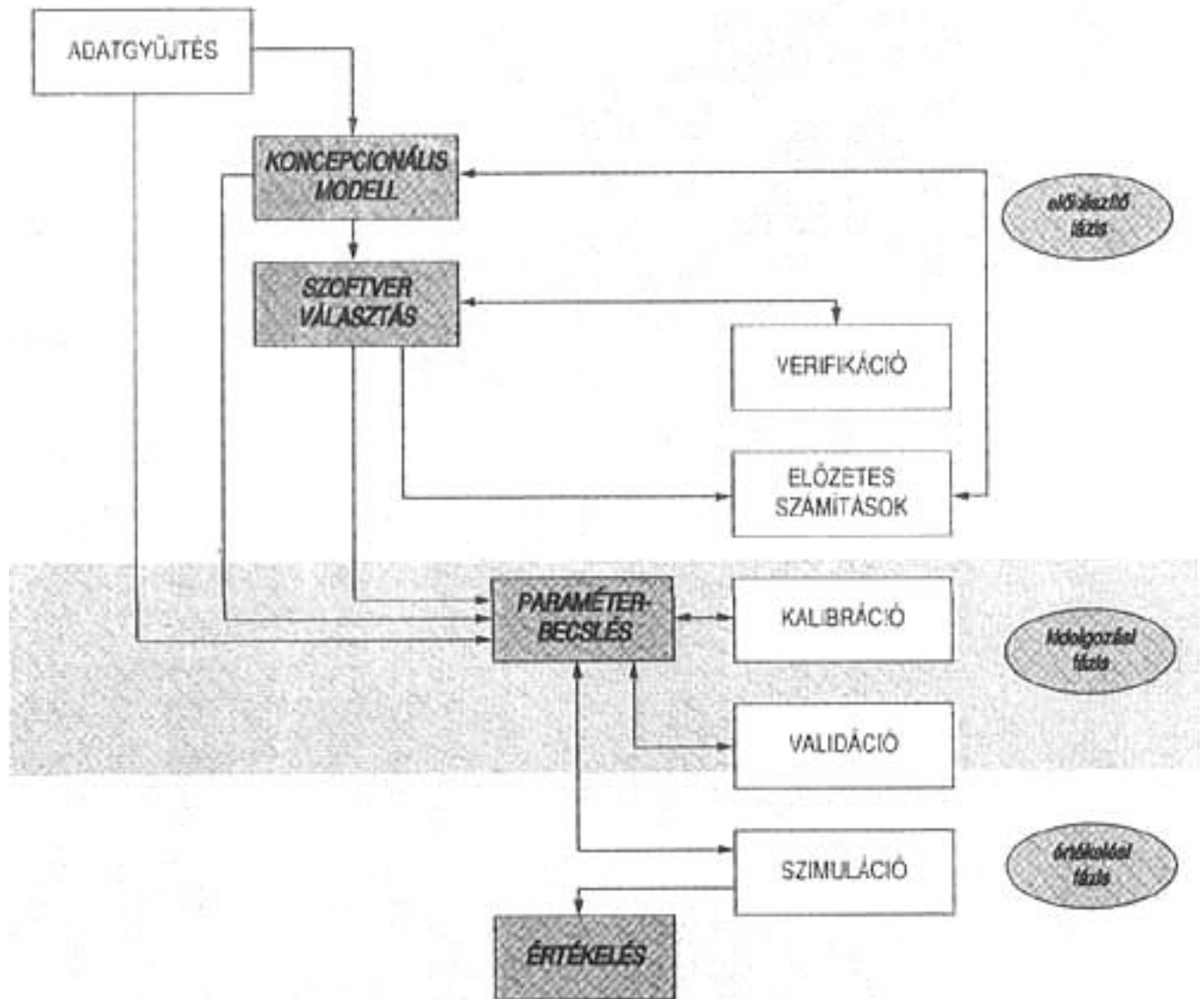
3.*Paraméterek megadása:* a modell számára a szükséges paraméterek megadását jelenti. Modelltől függően kötelező minden paraméter megadása, vagy egyeseket akár el is hagyhatunk. Értéküket gyakran csak becsléssel tudjuk meghatározni.

4.*Érzékenységi vizsgálat és kalibráció:* a „trial and error” érzékenységi vizsgálat során arra keressük a választ, hogy bizonyos paraméterek értékeinek +/- 10%-os változtatása milyen mértékű változást generál a modell által szolgáltatott eredményekben. A modellek egyes paramétereik értékének változására jobban, másokra kevésbé érzékenyek. Ennek tudatában szükséges egyes paraméterek minél pontosabb megadása. A kalibráció során a terepen mért eredményeket hasonlítjuk össze a modell által szolgáltatottakkal.

5.*Validáció:* a kalibráció során fel nem használt események adataival futtatjuk a modellt, és vizsgáljuk a szimuláció és a terepi mérések eredményei közötti kapcsolatot.

6.*Szimuláció:* a kalibrált és validált modell alkalmas arra, hogy bizonyos tényezők hatását a többitől függetlenül vizsgáljuk, valamint eddig még be nem következett szituációk eredményeit elemezhetjük.

1.5. ábra - A modellezés és a modellek tesztelésének fázisai (KVVM kiadványok)



6. Ellenőrző kérdések

1. Ismertesse a rendszerfeltárás fázisainak sorrendjét!
2. A modellezés gyakorlatában melyik a „felső út” helyes sorrendje?
3. Mi okozhatja a legnagyobb problémát, ha pl. egy globális demográfiai modellt a regionális tervezésben akarnánk felhasználni?
4. A ciklusmodellekben az egyensúlyi állapotok kereséséhez melyik törvényt alkalmazzuk a leggyakrabban?
5. Az alábbi rendszerek mely rendszertípusba sorolhatók: mezőgazdaság, éghajlat, egészségügy, globális?

7. Irodalomjegyzék

Chorley, R. J. - Haggett, P. 1967. Models in geography. Methuen, London p. 816

Hardisty, J. et al. 1993. Computerized Environmental Modelling. Wiley, Chichester p. 204

Horváth L. 1989. Modellezés és szimuláció. Bp. ELTE p. 117

- Huggett, R. 1980. System analysis in Geography. Calderon Press, Oxford p. 210
- Kerényi A. 1995. Általános környezetvédelem. Mozaik Kiadó, Szeged. p. 383
- Kirkby, M. J. et al. 1987. Computer simulation in Physical geography. Wiley, Chichester p . 227
- Kovács B. 2004. Hidrodinamikai és transzportmodellezés I. Miskolc-Szeged. p.159
- Mezősi G., Szatmári J. (szerk.) 1995. Modellek a természetföldrajzban. Acta Geographica Szegediensis különszáma T. XXXV. p. 72
- POWERSIM 1993. Reference Guide Ver. 1.1, Bergen p. 278
- Szücs E. 2003. A modellezés elmélete és gyakorlata. A szerző saját kiadása. (Ellenőrizve: 2013.02)
- Wainwright, J.- Mulligan, M. (Eds.) 2004. Environmental Modelling. Finding Simplicity in Complexity. John Wiley & Sons. p. 408

2. fejezet - Numerikus szimulációk megoldásának matematikai alapjai

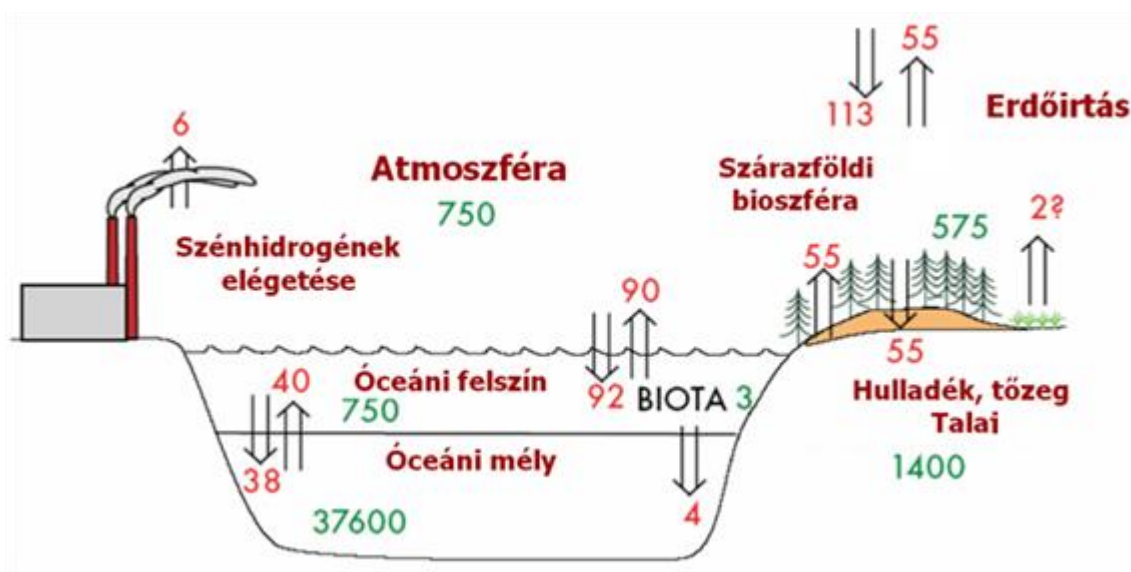
A fejezet céljai: a fejezetben a rövid periódusú szén ciklus avar-talaj részrendszerének modellegyenleteit írjuk fel, majd a tárolóegyenletek egyenletrendszerének két megoldását – egy algebrai és és egy numerikus – adjuk meg. Betekintést kapunk a numerikus szimulációs programokban alkalmazott közelítő számítási módszerekbe.

Szükséges ismeretek, fogalmak: szén ciklus, transzport ráta, mátrix műveletek, differencia egyenlet, Newton-féle hűlési törvény

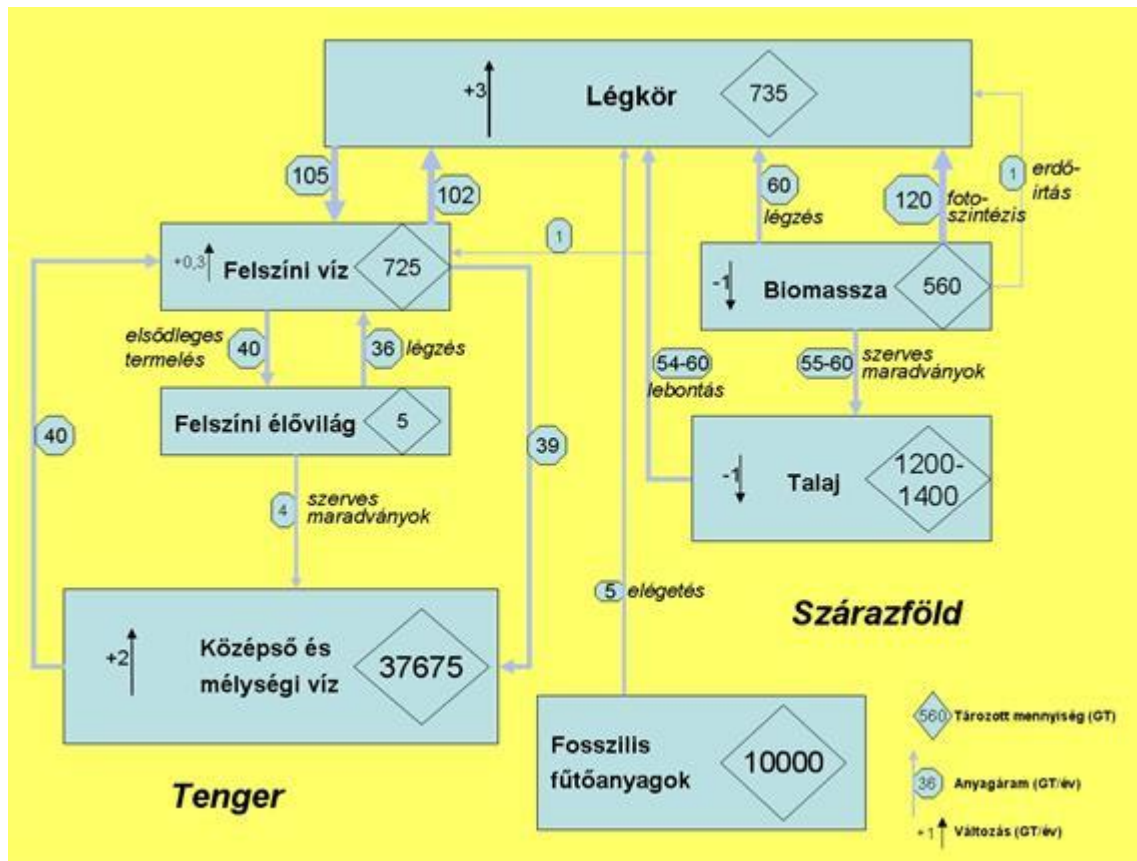
1. 2.1. Kompartment (kamra) modellek

A különböző ásványi anyagok mozgásai, ciklusai az ökoszisztémákban jól tanulmányozhatóak az ún. kamra (kompartment) modellezési módszerrel. A folyamatok, legyen az globális pl. szén ciklus (2.1. ábra), vagy lokális, pl. vízerózió egy kisvízgyűjtőn, megjeleníthetők tárolókamrák, vagy rezervoárok halmazaként, amelyek között a kapcsolatot a be- és kiáramló anyagok mozgása jelenti (2.2. ábra, animáció).

2.1. ábra - Rövid periódusú globális szén ciklus modell. Zöld értékek: tárolókban a tárolt, becsült szénmennyiség (GT); piros értékek: éves szénforgalom a tárolók között (GT/év)



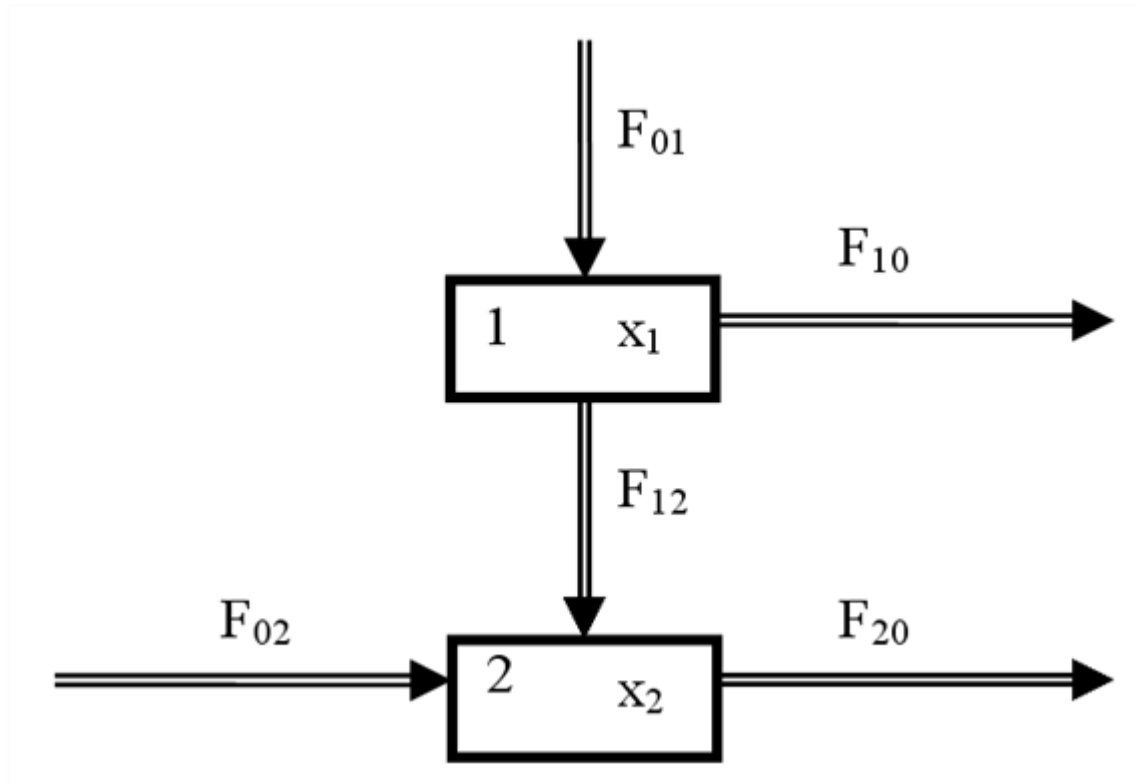
2.2. ábra - Rövid periódusú szén ciklus modell transzportfolyamatai, a tárolt és szállított szénmennyiségek (Kerényi, 1995 alapján)



2. 2.2. Avar-talaj ciklus

A legegyszerűbb geokémiai ciklusok csak néhány tárolót tartalmaznak. Az alábbi példában az egyszerűség és a könnyebb megértés kedvéért csak két tárolókamrát – hulladék (avar) és talaj – vesszünk figyelembe (2.3. ábra).

2.3. ábra - Rövid periódusú szenciklus, hulladék(avar)-talaj részrendszer



Jelölések: 1 : avar tároló; 2 : talaj tároló; x_1 : széntartalom 1-ben; x_2 : széntartalom 2-ben; t : idő; Δt : időlépcső; $x_1(t)$: széntartalom 1-ben t időpontban; F_{12} : anyagáramlás adott idő alatt (= Fluxus) – két tároló között; 0 : környezet; F_{10} : anyagáramlás adott idő alatt az avar (1) tárolóból a környezetbe (0); F_{02} : anyagáramlás adott idő alatt a környezetből (0) a talaj (2) tárolóba

2.1. 2.2.1. Tároló egyenletek

A tárolók széntartalmának változását a bejövő és a kimenő szénmennyiségek összege határozza meg. Δt idő alatt x_1 és x_2 tárolókban a széntartalom-változást felírhatjuk:

$$x_1(t + \Delta t) = x_1(t) + (F_{01} - F_{10} - F_{12}) \Delta t$$

$$x_2(t + \Delta t) = x_2(t) + (F_{02} + F_{12} - F_{20}) \Delta t$$

Másrészt igaz, hogy:

$$\Delta x_1 = x_1(t + \Delta t) - x_1(t)$$

$$\Delta x_2 = x_2(t + \Delta t) - x_2(t)$$

A jobb oldalakat egyenlővé téve és átrendezve kapjuk:

$$\frac{\Delta x_1}{\Delta t} = F_{01} - F_{10} - F_{12}$$

$$\frac{\Delta x_2}{\Delta t} = F_{02} + F_{12} - F_{20}$$

Ezek az egyenletek fejezik ki a kalibrálatlan modell alapállapotát.

2.2. 2.2.2. Transzport törvények

A levelek, ágak és a gyökök pusztulásából származó F01 és F02 szén inputokat tekinthetjük állandó értéknek. Az F10, F20 és F12 értékeket a modell kalibrálásával kapjuk meg.

Az outputokat lineáris transzport összefüggés adja meg, mely szerint a tárolók közötti anyagáramlás a „donor” kamrákban tárolt széntartalom valamely függvénye, általánosan

$$F_{ij} = f(x_i)$$

$$F_{ij} = k_{ij} x_i$$

ahol k_{ij} a transzport rátája (üteme). További elnevezései: transzfer együttható, ráta állandó, körforgási ráta.

Példa: dinamikus egyensúlyban tárolt mennyiség 1000 kg/ha, output: 10 kg/ha/év, akkor $k_{10} = 10/1000 = 0,01 = 1\%$.

A k_{ij} transzport ráta reciproka a körforgási idő, vagy a geológiában tartózkodási idő.

A modellre alkalmazva a lineáris transzporttörvényt:

$$F_{10} = k_{10} x_1$$

$$F_{20} = k_{20} x_2$$

$$F_{12} = k_{12} x_1$$

2.3. 2.2.3. A modell kalibrációja és megoldása

A modell egyenletrendszerének megoldásával két kérdésre kaphatunk választ:

a.) hány év alatt, és

b.) milyen szinten áll be az egyensúlyi állapot az egyes tározókban?

Alkalmazzuk először a megoldás mátrixos módszerét. Behelyettesítve a transzport-egyenletekbe kapjuk:

$$\frac{\Delta x_1}{\Delta t} = F_{01} - k_{10}x_1 - k_{12}x_1$$
$$\frac{\Delta x_2}{\Delta t} = F_{02} + k_{12}x_1 - k_{20}x_2$$

Ezzel megkaptuk a modell alapját képező szimultán differencia-egyenlet rendszert. A modell kalibrációja jelenti, tehát az F_{01} , F_{02} inputok és a k_{10} , k_{20} , k_{12} körforgási ráták meghatározását a rendszer outputjából.

A rendszer egyensúlyi állapotba kerül, ha a tárolók széntartalma t idő eltelte után tovább már nem változik:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = 0$$

Azaz:

$$0 = F_{01} - (k_{10} + k_{12})x_1$$
$$0 = F_{02} + k_{12}x_1 - k_{20}x_2$$

Átrendezve és mátrixokkal kifejezve, ahol a mátrixokat rendre jelöljük F , k , X , ekkor:

$$\begin{bmatrix} F_{01} \\ F_{02} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{10} + k_{12} & 0 \\ -k_{12} & k_{20} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

$$F = kX$$
$$X = k^{-1}F$$

Kiszámítva k^{-1} inverz mátrixot és elvégezve a mátrixszorzást megkapjuk a b.) kérdésre a választ: egyensúlyi állapotban az állapotváltozók x_1 és x_2 értékét. Ez a megoldás nem ad választ az a.) kérdésre!

3. 2.3. Megoldás numerikus módszerekkel

A dinamikus rendszerek – melyek a legtöbb esetben folytonos állapotváltozással jellemezhetők (égitestek mozgása, hőmérsékletváltozás, stb.) - számítógépes modellszimulációja nem képes a tökéletesen egzakt megoldás előállítására, ehelyett diszkrét számítási eredmények sorozatával közelíti az elméleti (analitikus) megoldást.

A diszkrét rendszerekben a változók értékének számítása időlépcsőnként történik, pl. bankbetétünk után a kamatszámítás. A modell futtatásakor a program sztenderd numerikus számítási módszereket használ az egyenletrendszerek megoldásához.

Jelöljük:

$x(t)$: x tároló (állapotváltozó) értéke t időpontban

$F = F(x(t))$: anyagáramlás (folyamatváltozó) értéke x tárolóhoz t időpontban

A tároló értékét a $(t+\Delta t)$ időpontban megadja a következő véges differencia egyenlet:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + F\Delta t$$

$$\frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t} = F$$

Azaz F anyagáramlás értékét megadja az x tároló értékének Δt időtartam alatti megváltozása. Áttérve a differenciális formulára ($\Delta t \rightarrow 0$):

$$\frac{dx}{dt} \approx \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t} = F$$

Ahonnán:

$$x = \int_{t_{start}}^{t_{stop}} F dt$$

Ezt a kifejezést nevezik az elsőrendű differenciálegyenlet merőleges, vagy az Euler-integráljának. A valós folytonos rendszerekben tehát az állapotváltozó értékét a folyamatváltozó integrálásával határozhatjuk meg. A tárolók a modellekben a rendszerelemek állapotát, vagyis a változások eredőjét fejezik ki.

A folytonos változást numerikusan kifejezni nem lehetséges, ezért a változók értékét kis időlépésenként számítjuk. A szimuláció során minden időlépésben az állapotváltozók a rendszer pillanatnyi állapotának megfelelő értéket vesznek fel. Minden időtartamra a rendszer állapotváltozásának és az állapotváltozók differenciáinak számítása a feladat, amely integrálszámítási problémát jelent.

A véges differenciaegyenletek megoldása elméletileg egyszerű és a következő lépésekből áll:

1. Inicializálási fázis: az összes szükséges egyenlet sorbarendezése; az állapot- és folyamatváltozók kezdőértékeinek számítása.

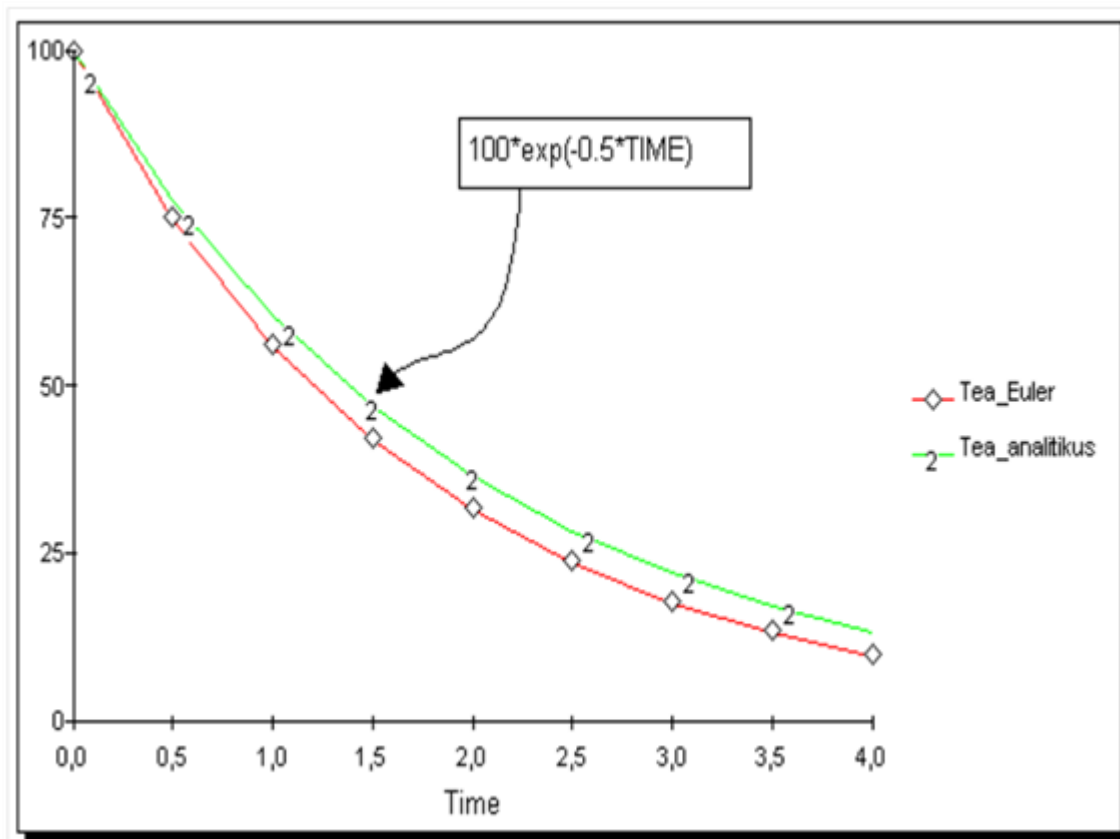
2. Iterációs fázis: becslés az állapotváltozó értékének Δt időtartam alatti megváltozására. A tároló új értékének számítása a becslés alapján; a tárolók új értékének felhasználásával a folyamatváltozók új értékének számítása, majd a szimuláció léptetése Δt -vel. Az iteráció leállítása, ha $t_{\text{start}} \geq t_{\text{stop}}$.

A legkritikusabb az iterációs fázis első lépése: hogyan becsülhető meg az állapotváltozó értékének Δt alatti megváltozása? A dinamikus rendszer-szimulációs programok erre a becslésre általában az ún. Euler- és Runge-Kutta (másod-, harmad-, negyedrendű) numerikus integrálási módszereket alkalmazzák. Egyszerű példa: Newton-féle hűlési törvény analitikus megoldása és numerikus számítása (animáció).

1. Euler-módszer

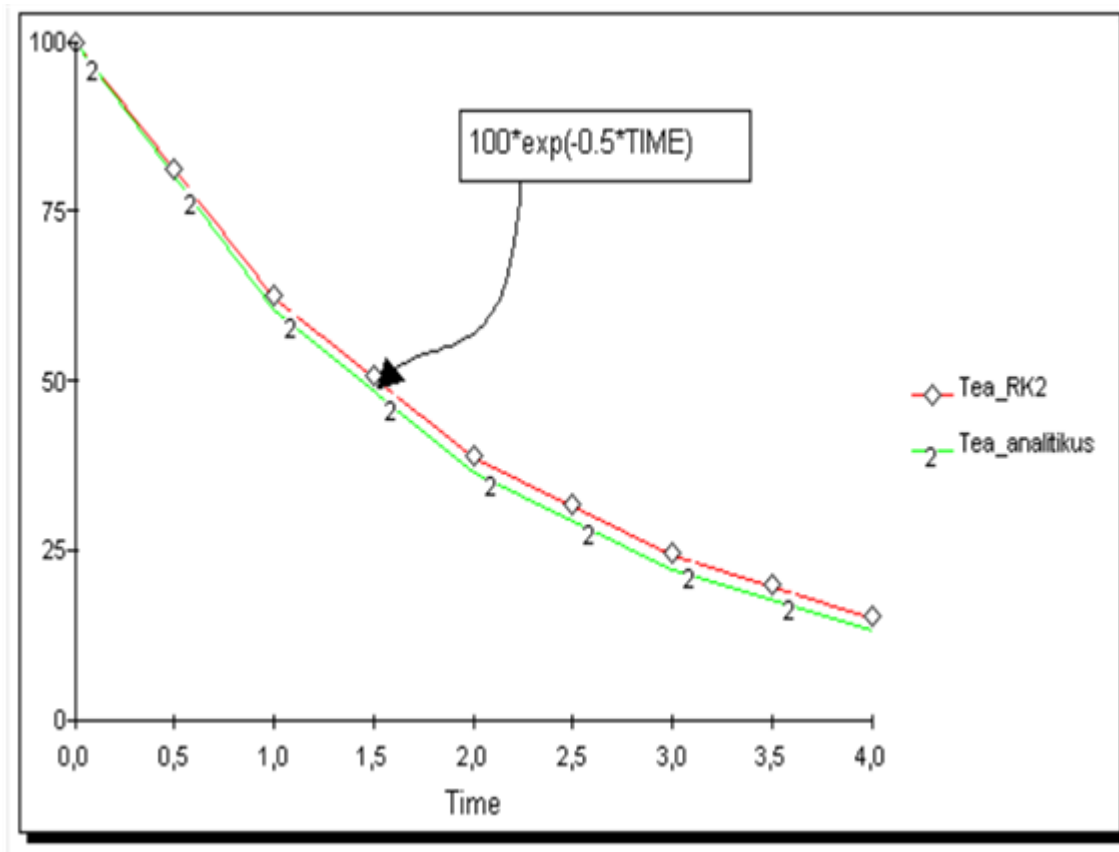
Összehasonlítva a grafikonokat láthatjuk, hogy a választott megoldási módszertől függően eltérés adódik az analitikus és a numerikus megoldás között (2.4-6. ábrák). Az analitikus és az Euler-módszerrel kapott görbe közötti eltérés az integrálási hiba, amely az Euler-módszernél a legnagyobb. A Δt időlépcső csökkentésével a hiba kisebb lesz, zérus közelében az Euler-módszer is az egzakt megoldást szolgáltatja. Ezzel viszont növekszik a számítási idő és a kerekítésnél elkövetett hiba. A Runge-Kutta módszerek nagyobb időlépcsőnél is pontosabb megoldást szolgáltatnak, viszont számítási igényük nagyobb az Euler-módszerénél.

2.4. ábra - Newton-féle hűlési törvény analitikus megoldása és numerikus számítása Euler-módszerrel



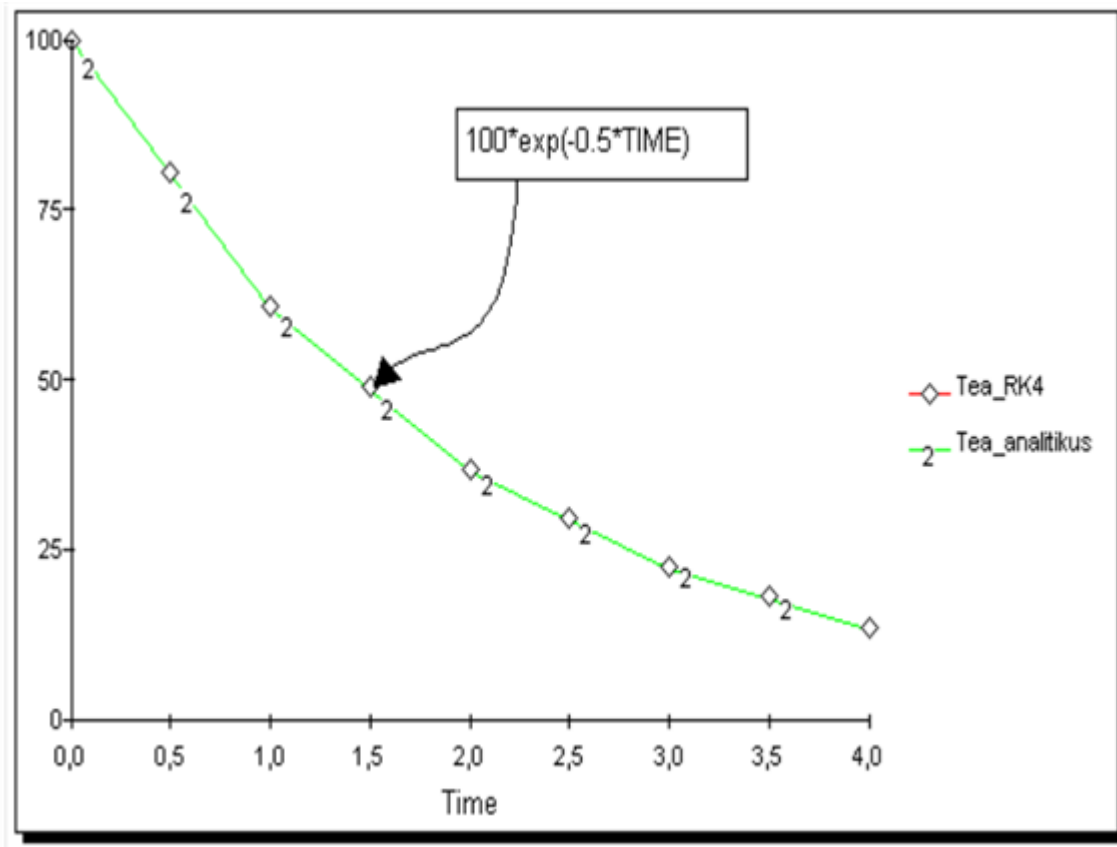
2. Másodrendű Runge-Kutta-módszer (javított Euler-módszer)

2.5. ábra - Newton-féle hűlési törvény analitikus megoldása és numerikus számítása másodrendű Runge-Kutta-módszerrel



3. Negyedrendű Runge-Kutta-módszer

2.6. ábra - Newton-féle hűlési törvény analitikus megoldása és numerikus számítása negyedrendű Runge-Kutta-módszerrel



4. Ellenőrző kérdések

1. A szénkörforgás modellben mely részrendszerek a legnagyobb széntárolók?
2. Ismertesse az „avar-talaj szénciklus” modellre felírt egyenletrendszer algebrai megoldását!
3. Melyek a hátrányai a numerikus integrálás lineáris módszerének?
4. Melyek a magasabb rendű numerikus integrálási módszerek előnyei?
5. A szimulációs numerikus számítási módszerek közül ugyanannyi időlépcső esetén melyek legnagyobb a számítási igényű módszerek, miért?

5. Irodalomjegyzék

- Kerényi A. 1995. Általános környezetvédelem. Mozaik Kiadó, Szeged. p. 383
- Kirkby M.J. et al. 1987. Computer Simulation in Physical Geography. John Wiley Sons. Chichester. p. 227
- Rakonczai J. 2003. Globális környezeti problémák. Lazi Kiadó. p. 191
- Rakonczai J., 2008. Globális környezeti kihívásaink. Universitas Szeged, Szeged, p. 204

3. fejezet - Világmodellek

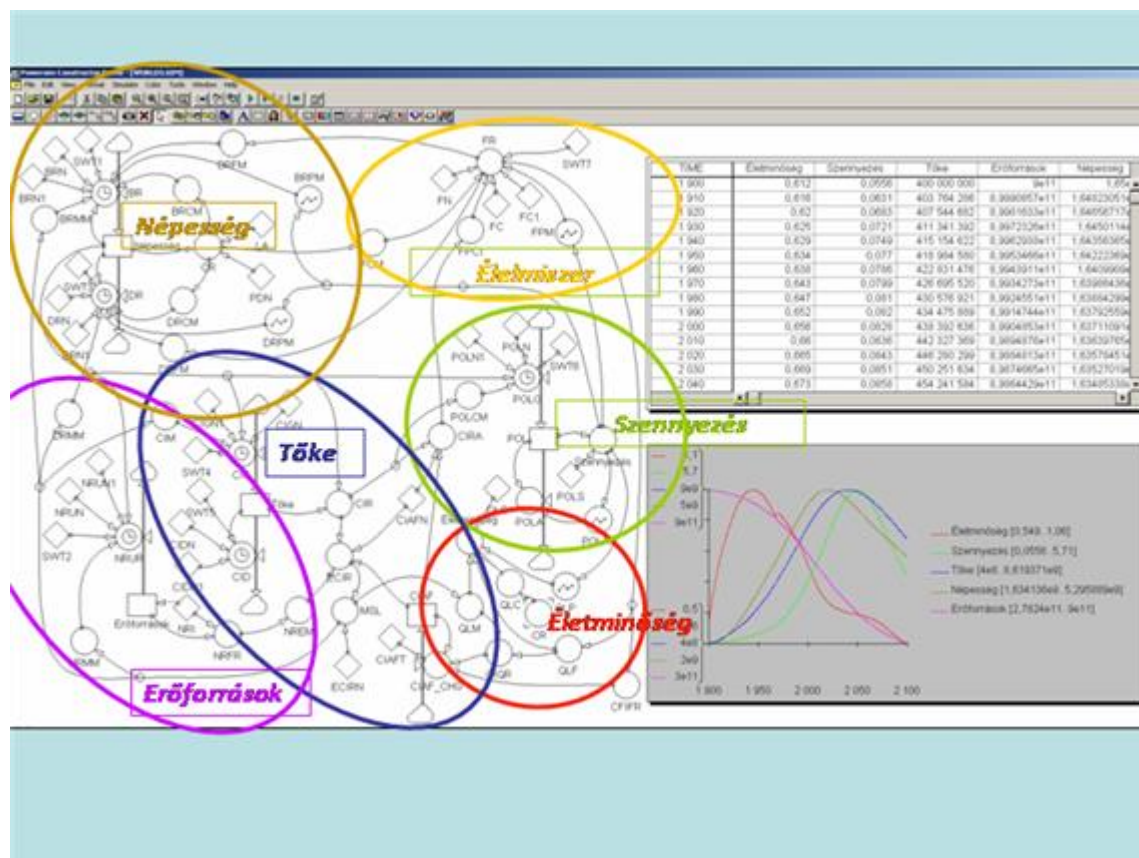
A fejezet céljai: áttekintjük röviden a „A növekedés határai” projekt és a World3 világmodell létrejöttének körülményeit, az első változat előrejelzéseit és ezek fogadtatását. Részletesen elemezzük a harmadik változat szcenárióit, megismerkedünk a szimulációs környezettel és előállítjuk a lehetséges jövőképek néhány változatát. Megvizsgáljuk, hogy mennyire váltak be az előrejelzések az első harminc évre vonatkozóan.

Szükséges ismeretek, fogalmak: Római Klub jelentései, numerikus modellezés, szimuláció, szcenáriók, modell validálása, négyzetes középhiba

1. 3.1. A növekedés határai

Az Massachusetts Institute of Technology (MIT) kutatócsoportja 1970-72 között dolgozott „A növekedés határai” (Limits To Growth, LtG) projekten, amelyben azt elemezték, hogy a világ népességében és az anyagi gazdaságban megfigyelhető növekedést hosszú távon mi határozza meg és a növekedésnek milyen következményei lehetnek. Vizsgálataikhoz a rendszerdinamikai elméletet (J. Forrester) és számítógépes modellezést alkalmaztak.

3.1. ábra - A World3 modell felépítése



A Római Klub felkérésére, a „világ problémáinak” elemzésére fejlesztették ki az MIT-on a World3 számítógépes modellt, Dynamo nevű programozási nyelven. A World3 modell segítségével lehetővé vált a globális gazdaság 5 alrendszerének – népesség, élelmiszertermelés, ipari termelés, környezetszennyezés és a nem megújuló természeti erőforrások – és az alrendszerek egymásra hatásainak vizsgálata (3.1. ábra). A modell időskálája 1900-tól indul és 2100-ig tart. A modell első változatáról, létrejöttének körülményeiről és értékeléséről lásd Rakonczai János (2003) írását..

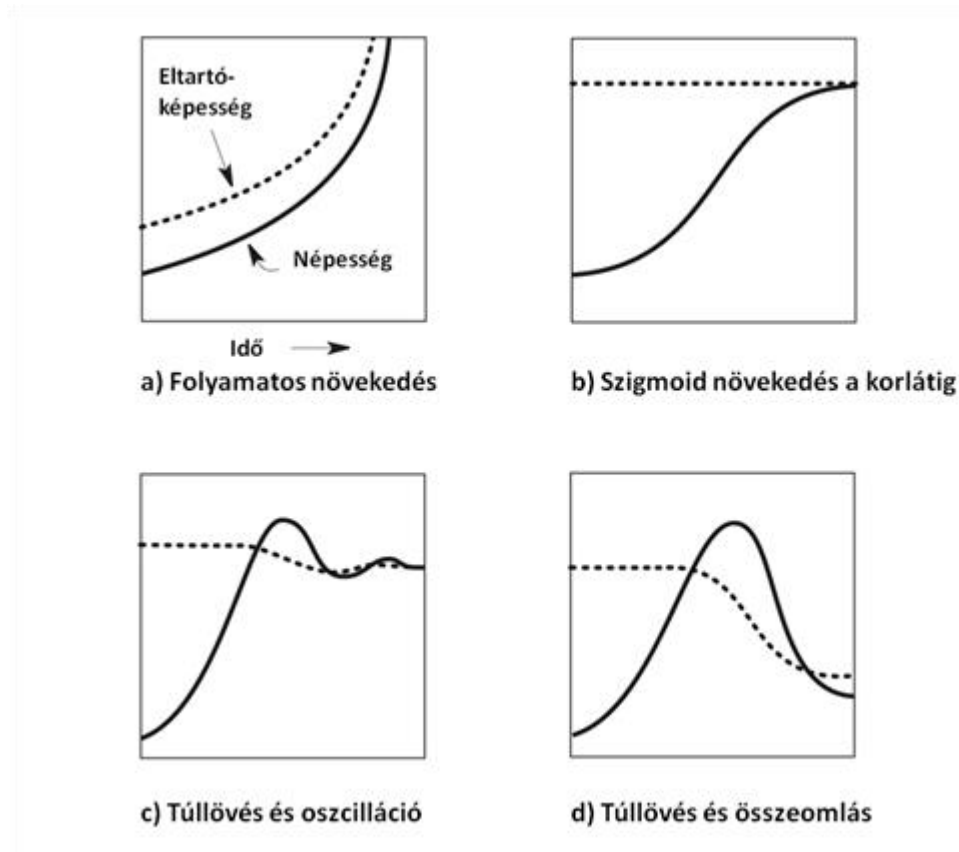
A munka tudományos hatásai között meg kell említeni Forrester „Rendszerdinamikai” számítógépes modellezési eljárásának bevezetését a tudományok számos területén, valamint a környezeti kvantitatív predikciós szimulációs modellezés elterjedését.

A LtG vizsgálat alapkérdése: hogyan alakul az életminőség, a növekvő népesség és termelés, illetve a csökkenő nyersanyagkészletek mellett? A modellezés legtöbb vitát kiváltó üzenete az volt, hogy a globális gazdaság változatlan ütemű, folytonos növekedése mellett az emberiség léte a Földön valamikor a 21. században már fenntarthatatlanná válik, a világgazdaság összeomlik. Az összeomlás azonban elkerülhető, amennyiben az emberiség korlátozza a népességnövekedést és megfelelő globális gazdaságpolitikát, valamint technológiai újításokat vezet be.

A World3 modellt – és későbbi változatait – nem pontos és részletes előrejelzések előállítására alkották, hanem a komplex globális népességi-gazdasági rendszer viselkedésének, folyamatainak tanulmányozására, jobb megértésére. Meadows és munkatársai a kísérleti szimulációkban különböző paraméterkészleteket használva egymástól kisebb-nagyobb mértékben eltérő lehetséges jövőképeket, forgatókönyveket, scenáriókat generáltak. A World3mal generált táblázatok és grafikonok számai nem egy adott évben várható érték pontos előrejelzései, hanem egészében a rendszer(ek) viselkedésének tendenciáit jelző mutatószámok.

A szimulációk eredménye szerint csak a stabilizációs feltételeket tartalmazó modellváltozatok esetén nem jelentkezik súlyos probléma, a többi esetben túllövéshez és összeomláshoz (3.2. ábra) vezethetnek a változások (Rakonczai, 2003). A standard modellek a 21. század közepére már olyan mértékű problémákat jeleznek, amelyek a népesség drasztikus csökkenésében és a szennyezés nagy mértékű növekedésében csúcsosodnak ki. Az átfogó modelleket megfigyelve láthatjuk, hogy az intenzív mezőgazdaság és ipari tevékenységek esetén hiába van redukált környezetszennyezés, ez – igaz időkéssel – mégis komoly környezeti problémákat okoz, amely hatására visszazuhan az élelemtermelés, s ennek következtében a népességszám. Abban az esetben pedig, ha a születésszabályozást önkéntes alapon végeznénk (azaz megvalósítása elhúzódik), az élelemtermelés nem tudna lépést tartani az igényekkel.

3.2. ábra - A World3 modell szerkezeti növekedési pályái: a) folyamatos (exponenciális) a növekedés, ha a fizikai korlátok messze vannak, vagy azok is exponenciálisan növekednek; b) logisztikus, S alakú a növekedési görbe, ha a növekvő fizikai entitás pontos és azonnali jeleket kap arról, hogy a korlátokhoz képest hol van és ezekre a jelekre gyorsan és pontosan válaszol; c) ha a visszajelzések a korlátokról késnek, torzultak és a rendszer ezeket megkérdőjelezi, nem veszi figyelembe, vagy csak késéssel válaszol, ekkor bekövetkezik a túllövés, de ha a határok még nem erodálódnak a rendszer képes a korrekcióra; d) ha a korlát felől érkező válasz késik és ha a korlát (pl. környezet) irreverzibilisen erodálódik, akkor a rendszer túllő a korlátain, elpusztítja erőforrásbázisát és bekövetkezik az összeomlás (Meadows, 2005 alapján)



1.1. 3.1.1. Az LtG és a World3 modell kritikája

A politikai támadások mellett számos, jogos szakmai kritika is megfogalmazódott az első változattal szemben. Kétségtelenül igaz, hogy nem foglalkozott az egyes témákhoz kötődően a regionális különbségekkel, nem vette kellően figyelembe a tudomány jövőbeli szerepét, jelentőségét. Az LtG elemzésnek azonban pozitív eredménye, hogy:

- reális adatokból lehetséges alternatívákat vázol fel,
- a sokkoló eredménnyel valós problémára irányította a figyelmet,
- egyértelművé tette, hogy a korabeli folyamatok súlyos következmények nélkül nem tarthatók fenn tartósan,
- nyilvánvaló vált, hogy egy újfajta, mégpedig globális gondolkodásra van szükség a problémák eredményes megoldásához,
- felhívta a figyelmet, hogy nincs sok idő a cselekvésre (a reakcióidő fontossága), mert a helyes, de késleltetett intézkedés már sikertelen lehet.

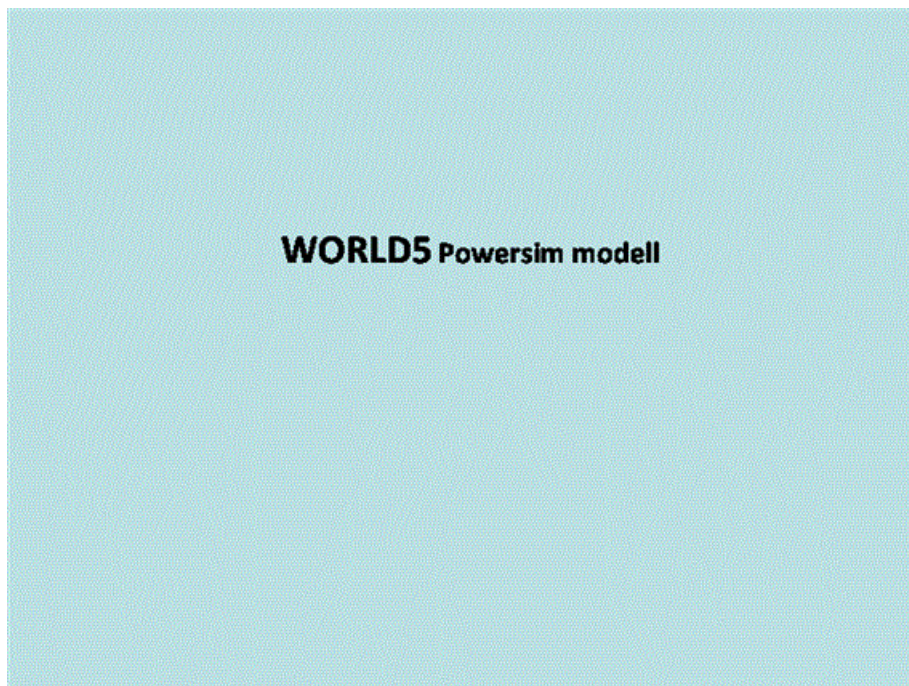
Ez volt az első átfogó, problémafelvető, lényegi összefüggésekre választ kereső gondolati kísérlet. Szerepe, érdeme vitathatatlan: elindította a globális problémák körüli gondolkodást (Rakonczai, 2008).

2. 3.2. A növekedés határain túl

Az 1970-1990 közötti években bekövetkezett globális változások elemzésével és az ezekből levont következtetésekkel aktualizálták a szerzők a World3 modellt, amelynek eredményeit A növekedés határain túl c. könyvben összegezték. A cím utal rá, hogy a modellalkotók szerint az emberiség már túllépte a Föld eltartóképességének határait, a túllövés állapotába került. A forgatókönyvek elemzésével a kutatók legfőbb feladatuknak a fenntartható állapot visszaállításának lehetőségét elemző jövőképek, intézkedések bemutatását tekintették. A szimulációs modell verziója a World3-91-es volt, amelyet már Stella környezetbe fordítottak az

eredeti nyelvről. A Stella modellhez hasonló Powersim környezetben követhetjük a modell felépítését (3.3 ábra).

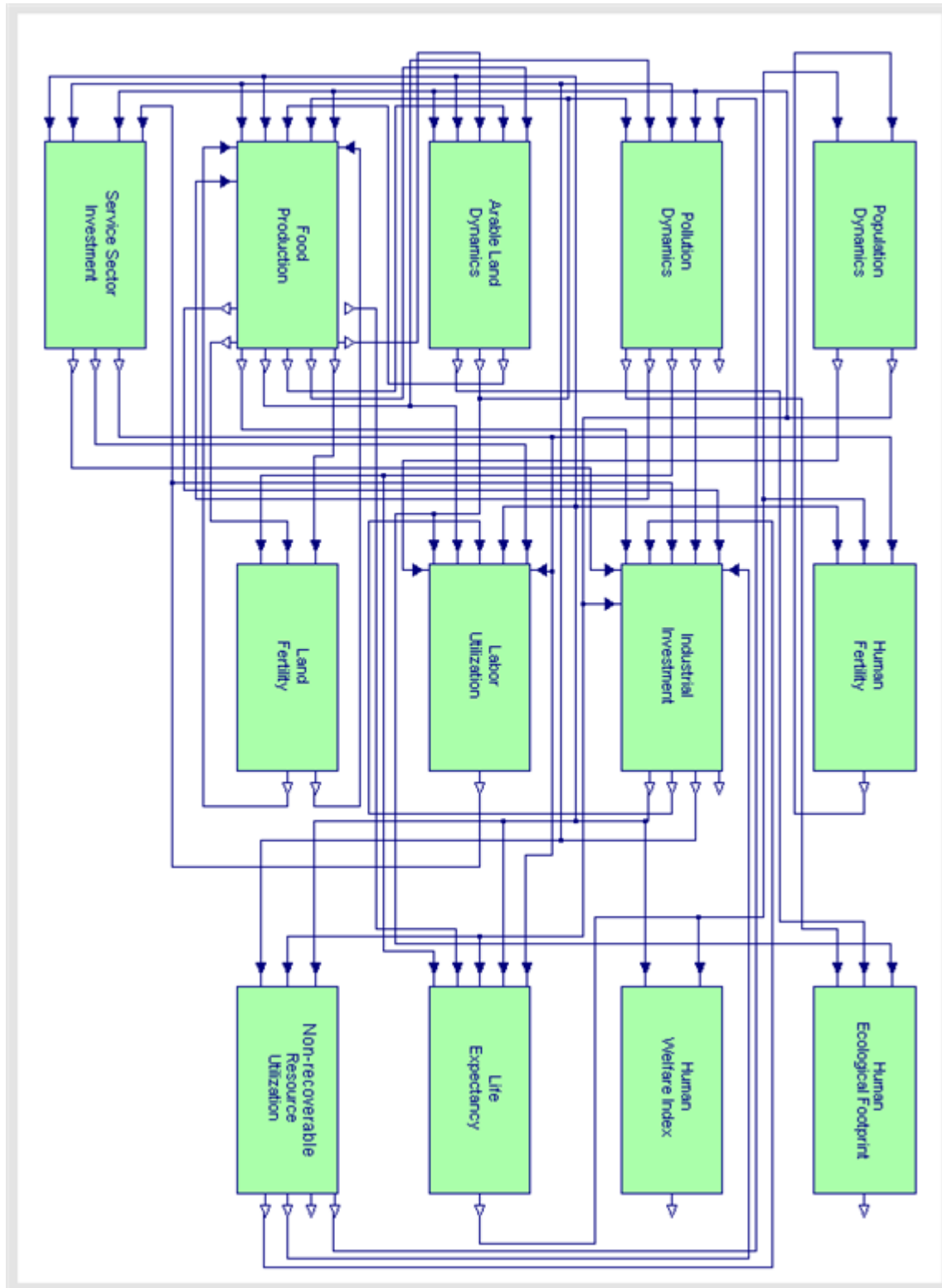
3.3. ábra - A World3 szimulációs modell Powersim változata



3. 3.3. A növekedés határai – harminc év múltán

Az LtG megjelenésének 30. évében kezdte el a kutatócsoport a harmadik változat előkészítését. Legfontosabb céljaik – többek között – a következők voltak: újra és nyomatékosan felhívni az emberiség figyelmét, hogy a politikai kinyilatkoztatások ellenére nem jó úton járunk, a globális rendszerünk már egyértelműen a túllövés állapotában van, de a bekövetkező károk hosszú távú gondolkodással és megfelelő szakpolitikákkal mérsékelhetők. A World3-03 modellváltozatba (3.4 ábra) két új változót építettek be: a humán jóléti indexet (HWI) és az ökológiai lábnyomot (HEF).

3.4. ábra - A World3-03 modellváltozat (Hetesi, 2011)



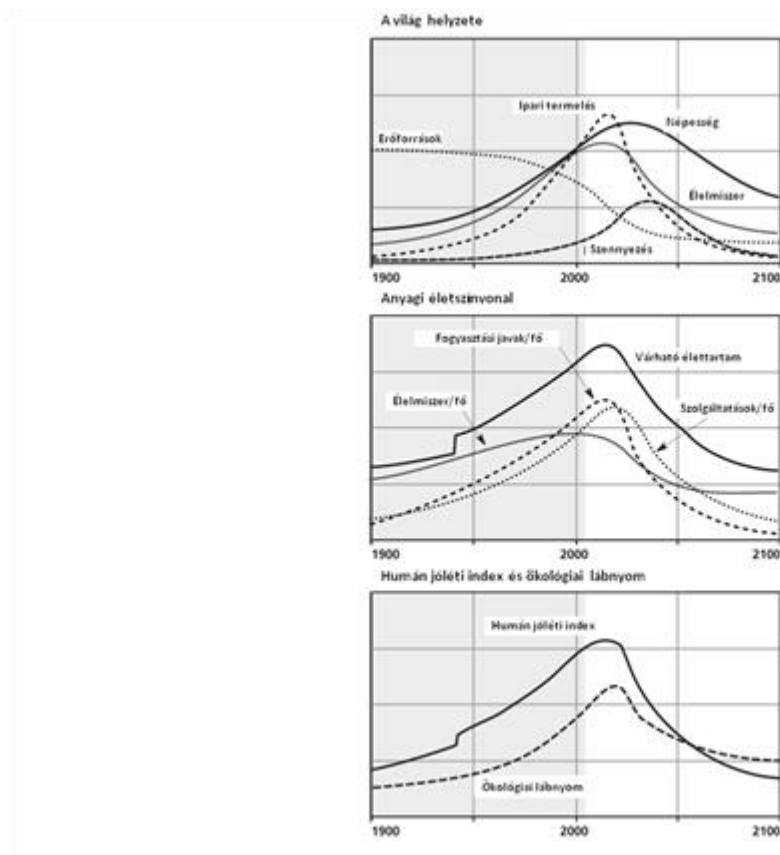
A változat alternatív forgatókönyveinek (Sc_N) száma tíz, tartalmuk a következő:

SC_1: Referenciapont (standard)

A társadalom a 20. században megszokott, hagyományos utat követi anélkül, hogy bármilyen jelentősebb szakpolitikai változtatást kezdeményezne. A világ népességszáma és a termelés mindaddig növekszik, amíg ezt a nem megújuló természeti erőforrások költségeinek rohamos növekedése meg nem akasztja. Az újabb erőforrások eléréséhez egyre nagyobb tőkeberuházásokra van szükség. Végül, a beruházási alapok hiánya a

gazdaság más ágazataiban is (gazdasági javak, szolgáltatások) hanyatlást indukál. Ezekkel együtt az élelmiszerellátás és az egészségügyi szolgáltatások is visszaesnek, csökken a várható élettartam (3.5 ábra).

3.5. ábra - World3-03 1. Forгатókönyv – Referenciapont (Meadows, 2004 alapján)



SC_2: Még több nem megújuló erőforrás

Az SC_1-ben feltételezett erőforrások megduplázásával, valamint az erőforrások gazdaságos (az emelkedő kinyerési költségeket kompenzáló) kinyeréséhez szükséges technológiák fejlődésével az ipari termelés még 20 évig növekedhet. A népességszám a 8 milliárd fő körül tetőzik 2040-ben, emelkedő fogyasztási szint mellett. A szennyezés mértéke viszont rendkívül magas lesz a XXI. sz. közepére, a terméshozamok lecsökkennek és hatalmas beruházások szükségesek a mezőgazdaság helyreállításához. Az élelmiszerhiány és a magas szennyezési szint egészségügyi hatásai miatt a népesség lecsökken.

SC_3: Még több nem megújuló erőforrás és szennyezés-ellenőrző technológiák alkalmazása

A SC-2-ben feltételezett és rendelkezésre álló kétszeres erőforrásmennyiség mellett növekvő hatékonyságú szennyezés-ellenőrzési technológiával 2002-től évi 4%-os szennyezés-csökkenést érünk el. Ezzel a jóléti index 2040 után is tovább marad magas szinten, de az élelmiszertermelés visszaesése tőkét szív el az ipari szektorból, amellyel végül bekövetkezik az összeomlás.

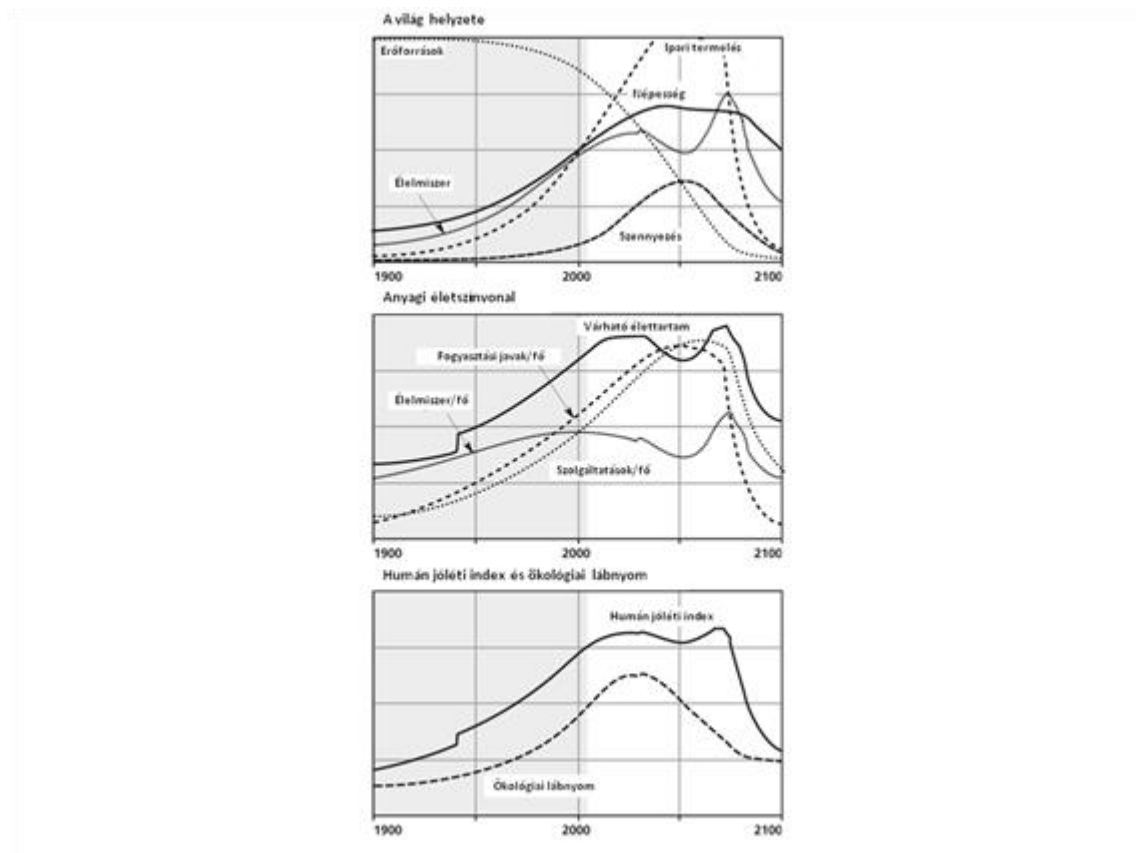
SC_4: Még több nem megújuló erőforrás, szennyezés-ellenőrző technológiák alkalmazása és a talaj termékenységének növelése

Amennyiben az előző scenárióban feltételezett technológiák mellett a modellvilágba további, az élelmiszerhozamokat jelentősen megnövelő technológiákat is beépítünk, akkor a magas intenzitású mezőgazdaság felgyorsítja a földterületek zsugorodását. Így a gazdálkodók mind nagyobb és nagyobb hozamokat kénytelenek kiperéslni az egyre kevesebb földből. Ez nem fenntartható folyamat.

SC_5: Még több nem megújuló erőforrás, szennyezés-ellenőrző technológiák alkalmazása, talaj termékenységének növelése és talajerózió elleni védelem

Talajvédelmi technológia is hozzáadódik az előző scenárió technológiáihoz, így az összeomlás a XXI. század végére tolódik ki (3.6. ábra).

3.6. ábra - World3-03 5. Forгатókönyv – Átfogó technológiai-gazdasági növekedési modell (Meadows, 2004 alapján)



Sc_6: Még több nem megújuló erőforrás, szennyezés-ellenőrző technológiák alkalmazása, talaj termékenységeinek növelése, talajerózió elleni védelem és erőforrás-hatékonyság növelése

A szimulált világ jelentős, együttesen ható technológiai eredményeket mutat fel a szennyezés csökkentésében, a talaj termékenységeinek növelésében, a föld, és a nem megújuló erőforrások védelemében. A technológiák bevezetése jelentős költségekkel és legalább 20 év globális elterjedési idővel jár. Ez a kombináció nagy és prosperáló világot eredményez mindaddig, míg az egyre nagyobb technológiai költségek miatt ez az életszínvonal már fenntarthatatlanná válik.

Sc_7: 2002-től a világ korlátozza a népességnövekedést

A forgatókönyvben feltételezzük, hogy a világon minden pár vállalja a kétgyermekes családmódot és ehhez rendelkezésre is állnak a hatékony születésszabályozási technológiák. A népesség még egy generáción keresztül tovább növekszik a korstruktúra változási tehetetlensége miatt. A lassuló népességnövekedés gyorsabb ipari termelésnövekedést tesz lehetővé mindaddig, amíg azt a szennyezés növekvő költségei meg nem állítják.

Sc_8: 2002-től a világ korlátozza a népességnövekedést és az egy főre jutó ipari termelést

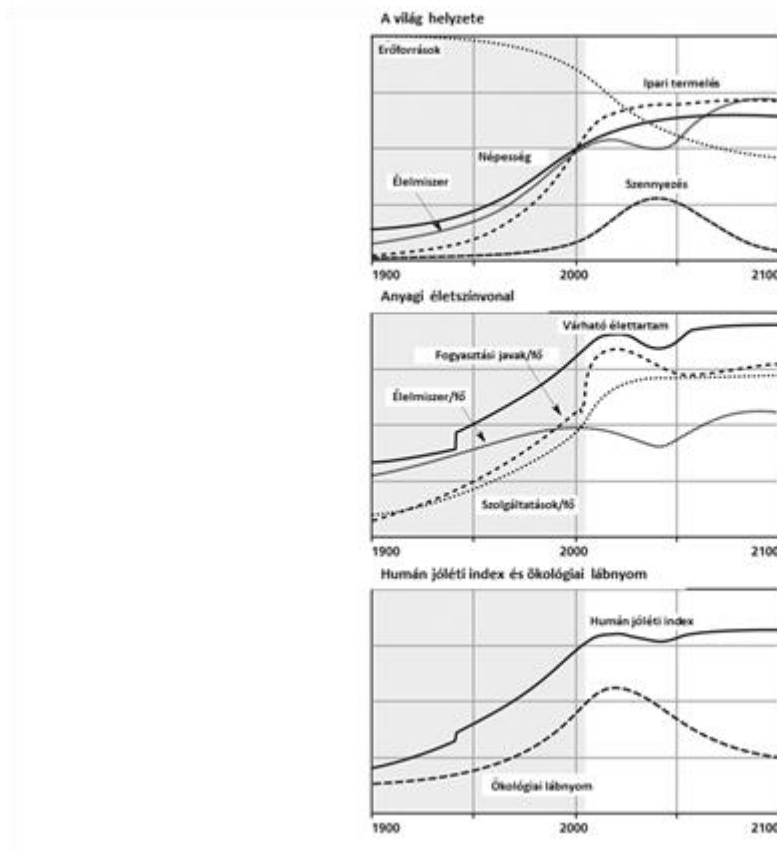
Ha modelltársadalom a kétgyermekes modellen kívül az egy főre jutó ipari termelésre is egy korlátot vezet be, akkor némileg kitolhatja az „aranykort” 2020-2040 közé. A növekvő szennyezés miatt azonban az élelmiszertermelés 2010 után csökkenésnek indul, melynek következtében a várható élettartam és a népességszám is visszaesik.

Sc_9: 2002-től a világ korlátozza a népességnövekedést, az egy főre jutó ipari termelést és fejlett szennyezés-ellenőrzési, erőforráshatékonysági és mezőgazdasági technológiákat alkalmaz

Ebben a futtatásban az előző forgatókönyvhöz hasonlóan a népességnövekedés és az ipari termelés korlátozott, továbbá technológiai fejlesztések kerülnek bevezetésre a szennyezés-ellenőrzéssel, talaj termékenységének növelésével, talajerózió elleni védelemmel és erőforrás-hatékonyság növelésével kapcsolatban. Ezek a korlátozások és fejlesztések együttesen azt eredményezik, hogy globális társadalom fenntartható, közel 8 millárd ember számára biztosított a magas jóléti szint, miközben az emberiség ökológiai lábnyoma csökken.

A rendszer egyensúlyi állapotba kerül, vagyis a rendszerszemléleti megközelítéssel magyarázva a pozitív és negatív visszacsatolási hurkok kiegyenlítődnek és a rendszer legfontosabb állapotváltozói (népesség, tőke, talaj, termelés, szennyezés, erőforrások) kiegyensúlyozott állapotban maradnak (3.7. ábra).

3.7. ábra - World3-03 9. Forgatókönyv – Korlátozott és stabilizált modell (Meadows, 2004 alapján)



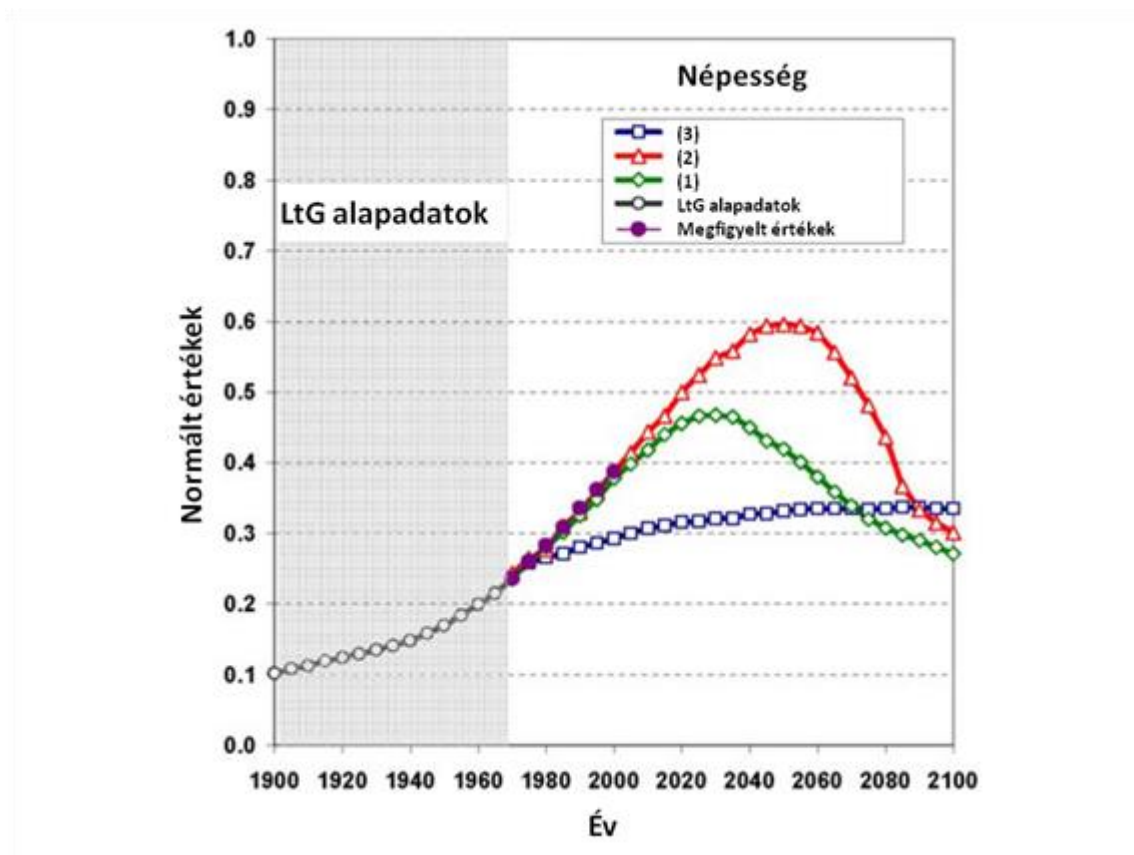
Sc_10: A 9. forgatókönyv fenntarthatósági szakpolitikai 20 évvel korábban, 1982-től bevezetve

Ebben a futtatásban az előző szcenárió összes változtatása bevezetésre kerül, de 2002 helyett 1982-ben. A fenntartható társadalmi-gazdasági fejlődés 20 évvel korábbi bevezetése alacsonyabb népességet, kisebb szennyezési szintet, több nem megújuló erőforrást és kissé magasabb átlagos jólétet eredményez.

4. 3.4. A World3 modell validálása

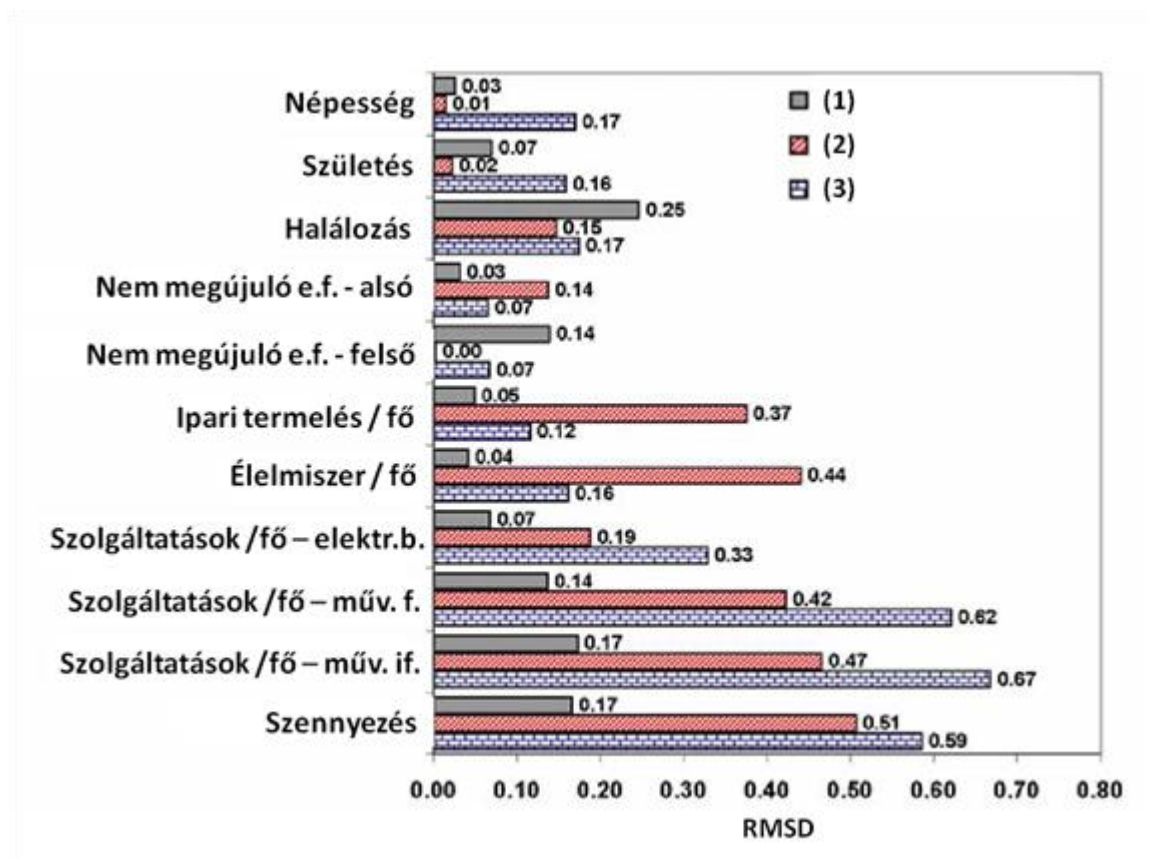
Az LtG harmadik változatának megjelenése után összehasonlították a World3 1-3 fő csoportjainak 1-1 szcenárióját az 1970-2000 között mért, megfigyelt és számított adatokkal (Turner, 2008). A World3 modell nyolc output értékét vonták be az összehasonlításba: globális népesség, születési és halálozási ráta, az egy főre jutó szolgáltatások, élelmiszer és ipari termelés, a nem megújuló erőforrások és a tartósan megmaradó szennyezés alakulását. A 3.8. ábrán népesség alakulására vonatkozóan azt a megállapítást tehetjük, hogy a valós értékek és a modellel szimulált forgatókönyvek közül az (1) standard, valamint (2) átfogó növekedés futtatás eredménygörbéi illeszkednek egymáshoz legjobban, míg a (3) stabilizálási forgatókönyv mintegy 25%-kal alacsonyabb népességszámot becsül.

3.8. ábra - Az 1970 és 2000 közötti valós és az LtG által becsült népességi adatok összehasonlítása. (1) standard modell, (2) átfogó gazdasági növekedési modell, (3) stabilizálási kísérlet



A további hét paraméterre is hasonlítsuk össze és elemezzük az eredményeket a tanulmány és 3.9. ábra alapján!

3.9. ábra - Az 1970 és 2000 közötti valós és az LtG által becsült normált adatok összehasonlítása négyzetes középhiba (RMSD) alapján. (1) standard modell, (2) átfogó gazdasági növekedési modell, (3) stabilizálási kísérlet



5. Ellenőrző kérdések

1. A MIT Világmodelljének melyek az alapvető alrendszerei?
2. Melyik az a részrendszer, amelyet – a korábbi világmodellektől eltérően – a Forrester-Meadows modell már tartalmazott?
3. Melyek az alapvető szerkezeti növekedési pályák, ismertesse és elemezze ezeket!
4. Elemezze a World3-03 modellváltozat “Korlátozott és stabilizált” forgatókönyveit!
5. A valós és modellezett adatok összehasonlításával milyen megállapításokat tehetünk a World3 modell érvényességére vonatkozóan?

6. Irodalomjegyzék

Hetesi Zs.: 2011. Rendszermodellek és kilátások a jövőre nézve

Meadows, D., Tapley, E. 2004. Learning Environment: Limits to Growth – The 30-Year Update. CD. Chelsea Green Publishing.

Meadows, D., Randers, J., Meadows, D. 2005. A növekedés határai – harminc év múltán. Kossuth Kiadó, Budapest, p. 318

Rakonczai J. 2008. Globális környezeti kihívásaink. Universitas Szeged, p. 204

Turner, G. 2008. A Comparison of The Limits To Growth with Thirty Years of Reality. Socio-Economics and the Environment in Discussion CSIRO Working Paper Series 2008-2009.

4. fejezet - Eróziós modellek: Talajerózió

A fejezet céljai: ebben a fejezetben a talajerózió folyamatáról, tudományos vizsgálati módszereiről és modellezéséről lesz szó. Alkalmazási példákon keresztül mutatjuk be a teljes modellezési folyamatot.

Szükséges ismeretek, fogalmak: vízerózió, kvantitatív modellezés, optimális területhasználat, USLE-Egyetemes Talajvesztési Egyenlet, EUROSEM, Erosion3D-GIS

1. 4.1. A talajerózió fogalma és jelentősége

Erózió fogalmán a földfelszín valamilyen közeg (víz, levegő, jég) általi lepusztítását értjük. Amennyiben ez a folyamat az emberiség számára hasznosítható (termékeny) talajréteget érinti, talajerózióról beszélünk. Gyakorlatban a víz és a szél pusztító hatásával érdemes foglalkoznunk, ennek megfelelően víz- és szélerózióról beszélünk. Mind a nemzetközi, mind a hazai szakmai szóhasználatban is elterjedt, hogy a közeg megjelölése nélkül használt talajerózió (soil erosion) kifejezés alatt sokszor csak a vízeróziót értjük, míg a szél által okozott eróziót a ténylegesen ezt kifejező szélerózió (wind erosion) névvel illetjük.

Bár a talajtakaró természetes fejlődése során kialakuló dinamikus egyensúly is sérülékeny (pl. klímaváltozások, tektonikus mozgások, erdőtüzek), a talajképződés ütemét tartósan meghaladó ún. gyorsított eróziót az erdőirtások és a rendszeres mezőgazdasági művelés hozta magával. Már a bronzkorból vannak erózióra vonatkozó adataink, a római időkből pedig már számos bizonyítékunk van arra, hogy a földművelés és az erdőirtások óriási lehordódást eredményeztek a lejtős területeken, amely természetesen az adott terület vízgazdálkodására és a folyók, források vízjárására is nagy hatással volt. Az erózió elleni védekezés legősibb formái (teraszolás, kőszáncok rakása) már ekkor megjelentek. A középkori Európában – így hazánkban is – a 15-16. századtól kezdve találunk nagyobb számban olyan leírásokat, amelyekből egy-egy terület fokozott erodáltságára lehet következtetni.

Napjainkban az intenzív földhasználatnak köszönhetően szinte minden művelt területen (szántókon, legelőkön) jelentkezik talajerózió (4.1-4. ábrák): lejtős térszínen vízerózió, a homokos vagy homokos vályog fizikai féleségű területeken pedig szélerózió.

4.1. ábra - Vízeróziós nyomok szántóföldeken



4.2. ábra - Eróziós barázda legelőn



4.3. ábra - Tipikus „footpath erosion” jelensége



4.4. ábra - Erősen erodált domboldal kukorica alatt



2. 4.2. A talajeróziós modellezés

A 20. sz. első évtizedeiben meginduló talajeróziós modellezés eredeti célja egy adott területen bekövetkező erózió becslése volt a befolyásoló tényezők segítségével, ugyanakkor a költséges terepi mérések mellőzésével. Mára ezen elsődleges cél mellett sokkal fontosabbá vált az előrejelzés, illetve a klimatikus, talajtani, domborzati és egyéb adottságok figyelembevételével a területhasznosítás optimalizációja.

A kiindulási körülményeket leíró kvantitatív vagy kvalitatív adatokat nevezzük bemeneti paramétereknek (input), a folyamat végeredményét jellemző adatokat kimeneti paramétereknek (output), míg a kettő közötti összefüggérendszer megadása maga a modell.

A valóság bonyolultságának és információhiányunknak köszönhetően a legtöbb modell egyszerűsít, azaz a folyamat kimenetele szempontjából kevésbé fontosnak vélt összefüggésektől és bemeneti paraméterektől eltekint, ez azonban nem mehet a folyamat valósághű leírásának rovására. Az egyszerűsítések miatt viszont nagyon fontos megadni a modell érvényességi körét is. Ezek alapján tehát akkor nevezhetünk „jónak” egy modellt, ha kezelhető mennyiségű (és előteremthető) input paraméterekkel dolgozik, minél szélesebb körben alkalmazható, ugyanakkor outputjaiban jól közelíti a valóságot.

A talajerózió folyamatát szinte kizárólag csak determinisztikus modellek írják le. A bemeneti paraméterek osztályozását alapvetően négyféleképpen tehetjük meg:

1. Az alapján, hogy a paraméter mely környezeti elemet jellemzi, megkülönböztetünk meteorológiai, növényzeti, topográfiai, talaj- és egyéb paramétereket (4.5. ábra).
2. Kvantitatív és kvalitatív paraméterek. Kvantitatív például a lejtőhossz, szélsébség és a talaj nedvességtartalma, kvalitatív például az őszi búza - kukorica - szója vetésforgó vagy a lejtőre merőleges művelés. Természetesen ezen kvalitatív paraméterek is számszerűsítve fognak a modellbe kerülni.
3. Mérhető és „nem mérhető” paraméterek. A „nem mérhető” paraméterek fogalma itt nem azt jelenti, hogy nem létezik módszer a mérésükre, csupán azt, hogy mérésük a modellezni kívánt területeken a rendelkezésünkre álló lehetőségek keretein belül nem valósítható meg (pl. időhiány, technikai felszereltség hiánya, pénzühiány, vagy egyszerűen a paraméter térbeli és időbeli változékonysága miatt). A leírtakból is látszik, hogy ez a felosztás nem egzakt, vagyis a körülmények változásával változhat egy-egy paraméter besorolása, de szinte minden vizsgálatnál – bármilyen modellt alkalmazunk – számolnunk kell néhány ilyen paraméterrel.
4. Érzékeny és „nem érzékeny” paraméterek. Az eróziót befolyásoló paraméterek között lesznek olyanok, amelyek változása rendkívül érzékenyen érinti az erózió mértékét (pl. beszivárgási ráta, szélsébség, csapadékkintenzitás, erodibilitás), értelemszerűen ezeket nevezzük érzékeny paramétereknek.

4.5. ábra - Példák a talajeróziós modellekben használt input paraméterekre

Paramétertípus	Példák
Meteorológiai paraméter	csapadékkintenzitás, erozivitás, hőmérséklet, szélsébség
Növényzeti paraméter	felszínborítottság, csapadékraktározás, növényzet magassága
Topográfiai paraméter	lejtőhossz, lejtőszög, felszínerdesség
Talajparaméter	vízáteresztés, térfogattömeg, talajnedvesség, fizikai talajféleség
Egyéb paraméter	vetésforgó típusa, erózió elleni védekezés módja

A modellezés során a legtöbb problémát az érzékeny, de nem mérhető paraméterek okozzák. Ilyen esetben általában nincs más választásunk, mint korábbi, hasonló körülmények között (hasonló talajtípuson) elvégzett méréseken alapuló irodalmi adatokat használni fel. A legtöbb modell táblázat, egyenlet vagy nomogram formájában tartalmaz ilyen segédleteket (összefoglalóan ezeket hívjuk paraméterkatalógusnak), és pontosan ezek a segédletek jelentik a modellek alkalmazhatóságának a korlátait is, illetve ezek adott területre vonatkozó érvényesítését nevezzük a modell kalibrálásának. Ehhez mindenképpen rengeteg mérési adatra van szükségünk, hogy a mért erózióból meg tudjuk alkotni az adott alkalmazási területre vonatkozó paraméterkatalógust.

A kimeneti paraméterek között első helyen szerepel az eróziós ráta, amelyet a legtöbb modell t/ha-ban ad meg. Emellett a modell típusától és részletességétől függően leggyakrabban a lefolyt vízmennyiség, hordalékkoncentráció (vízeróziós modelleknél), az erodált talaj szemcseösszetétele, esetleg a tápanyagok,

szennyeződések mennyisége (anyagforgalmi modelleknél), vagy a terméshozam (termésbecslést is végző modelleknél) szokott szerepelni outputként.

Az input és az output adatok közötti összefüggésrendszer definiálása adja általában a modellek mibenlétét. A rendkívül összetett és messzire vezető felosztásukból itt csak azt emeljük ki, hogy amennyiben a modell nagyszámú mérés alapján felírt tapasztalati képleteken alapszik, és nélkülöz minden – a folyamat hátterét leíró – matematikai összefüggést, akkor tapasztalati, ha a folyamat hátterét leíró egzakt matematikai és fizikai egyenleteken alapszik, akkor fizikai / elméleti modellnek nevezzük.

A modellek érvényességi körében is óriási eltérések tapasztalhatóak. A bevezetőben már érintőlegesen említettek szerint három fő kérdéskört kell tisztázni egy modell alkalmazása előtt:

1. Időtényező: a legjobb felbontású modellek képesek perces pontossággal output adatokat produkálni (általában ezek az „egyesemenyes” modellek), vannak amelyek csak havi, évi, vagy még hosszabb időtávra alkalmazhatók.

2. Területméret, méretarány problémaköre: egyes modellek csak néhány ha-os, maximum néhány 10 ha-os területre alkalmazhatók, míg mások akár több ezer km²-re is.

3. Az előzővel szorosan összefügg a modellezhető terület jellege is: általában a kifejezetten parcellákra, mezőgazdasági táblákra kidolgozott modellek csak nagy méretarányban dolgoznak, míg a kisvízgyűjtőtől (max. néhány 10 km²) a nagyobb folyók vízgyűjtője (1000-10.000 km²) felé haladva a modellek felhasználhatósága is eltolódik az egyre kisebb méretarányok (felbontás) felé. A vízgyűjtőkre is alkalmazható modellekkel szemben ma már alapkövetelmény valamilyen GIS-modul megléte.

Általánosságban elmondható, hogy minél nagyobb méretarányban, minél kisebb területre alkalmazható egy modell, annál többféle és pontosabb bemeneti paraméterre van szüksége, tehát alkalmazása annál gondosabb előkészületeket igényel. A nagyobb területekre alkalmazott, kis méretarányú modelleknél viszont a becslések és a generalizálás miatti információvesztés következtében a pontosság fog sérülni, illetve elveszítjük a kontrollmérések lehetőségét.

Összegezve a leírtakat elmondható, hogy talajeróziós modellnek azokat a számítási módszereket, képleteket nevezhetjük, amelyek jól definiált bemeneti paraméterek segítségével outputként számszerű becslést adnak egy terület talajeróziójára vonatkozóan.

3. 4.3. A vízeróziós modellezés története

Több évtizedes kísérletezések, próbálkozások, majd szisztematikus mérésorozatok eredményeképpen született meg a ma már USLE néven közismertté vált „Egyetemes Talajvesztési Egyenlet” (Universal Soil Loss Equation) végleges formája (WISCHMEIER et al. 1978). A később számos eróziós modell alapjául is szolgáló USLE tulajdonképpen az első használható talajeróziós modell, hiszen eleget tesz az előző fejezetben megfogalmazottaknak.

Legfőbb ismérvei az alábbiakban foglalhatók össze:

- az eróziót alapvetően az esőenergia alapján határozza meg,
- az esőenergiából nagyszámú mérés alapján felírt tapasztalati képletekkel számolja az eróziót, azaz tapasztalati modell,
- parcellára, illetve mezőgazdasági táblára alkalmazható,
- az éves talajpusztulás mértékét adja meg t/ha-ban az adott éghajlati viszonyok között,
- statikus modell, tehát az erózió időbeni lefolyásáról nem szolgáltat információt.

A hiányosságokkal és korlátokkal terhelt USLE továbbfejlesztése nem váratott sokáig magára. Elsőként az egyes faktorok módosításával alkalmassá tették a modellt az egyedi csapadékesemények eróziós hatásainak a jellemzésére is, megalkotva a MUSLE-t (Modified Universal Soil Loss Equation). További jelentős módosítások után a modell már nemcsak szántóföldekre, hanem legelő- és erdőterületekre is alkalmazhatóvá vált (RUSLE – Revised Universal Soil Loss Equation). A még mindig USLE-alapokon nyugvó EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) modell kidolgozásának célja a farmerek számára egy olyan kis hardver- és szoftverigényű, könnyen kezelhető modell létrehozása volt, amely a vízerózió becslésén túl a szélerózió

becslésére is alkalmas, és ezek alapján a terméshozamokat is előrejelzi. Segítségével a területhasznosítás optimalizálása is megoldható. Outputjai között szerepel pl. a lefolyás, az evapotranszspiráció, a talajvízszintváltozás is. Rendkívül sokoldalú használhatósága mellett továbbra is tapasztalati és statikus maradt. A tapasztalati modellek rendkívül nagyszámú mérési szükséglete miatt a 80-as évek elejétől kezdődően helyettük a dinamikus fizikai modellek ugrásszerű elterjedését figyelhetjük meg. Az utóbbi 30 évben több tucat eróziós modell látott napvilágot, amelyek közül a fontosabbak jellemzőit a 4.6. ábrán foglaltuk össze.

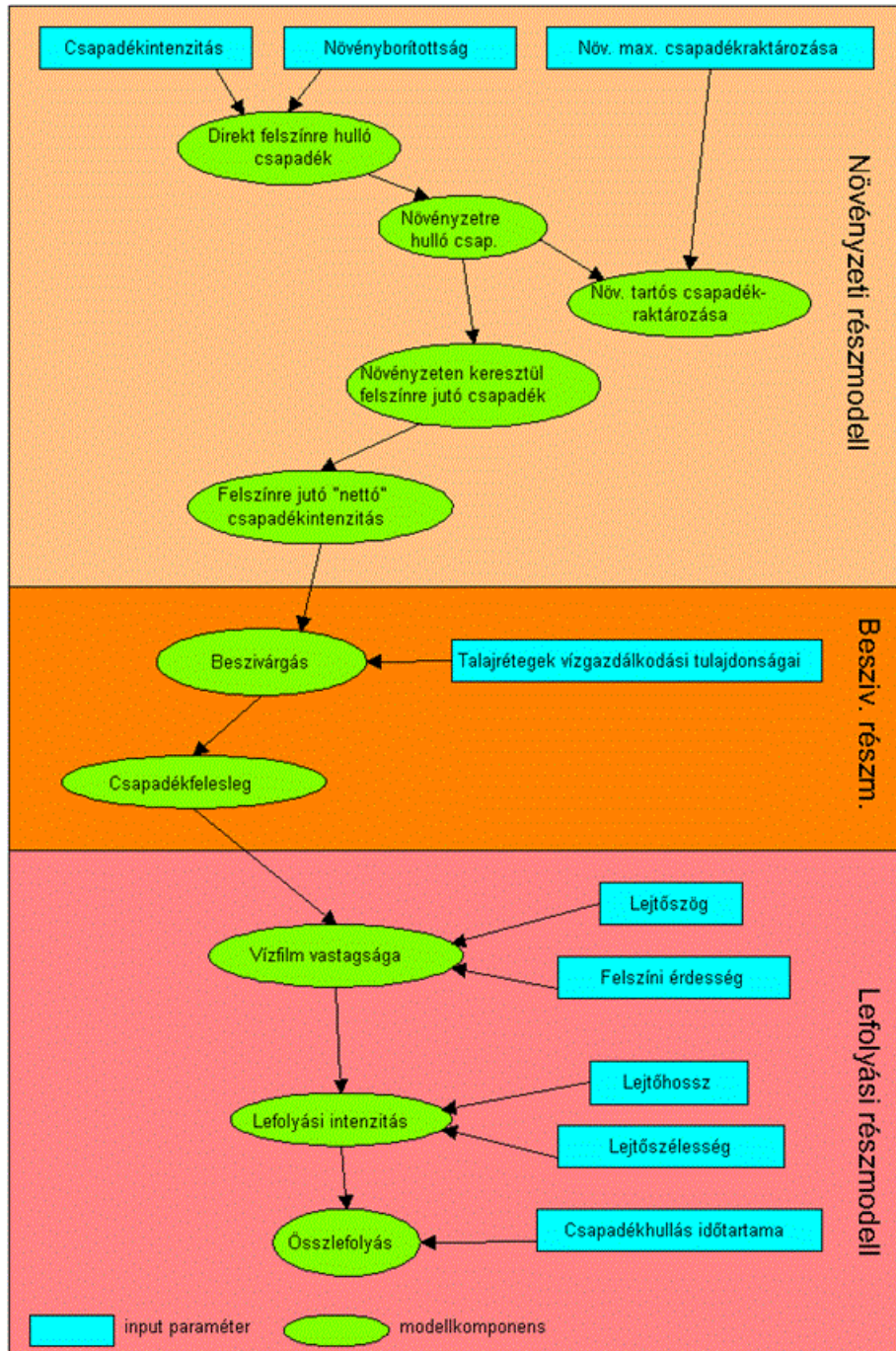
4.6. ábra - A fontosabb fizikai / elméleti modellek áttekintése (MORGAN, 1996, a web-oldal és a feltüntetett források nyomán)

A modell neve	Területi érvényesség	Időbeli érvényesség	Forrás
ANSWERS ¹	vízgyűjtő	csapadékesemény	BEASLEY et al. 1980
CREAMS ²	összetett lejtő	csapadékesemény	KNISEL 1980
GUESS ³	parcella	csap. esemény - év	ROSE et al. 1983
WEPP ⁴	parcella, vízgyűjtő	csap. esemény - év	NEARING et al. 1989
KINEROS ⁵	parcella, vízgyűjtő	csapadékesemény	WOOLHISER et al. 1990
EUROSEM ⁶	parcella, vízgyűjtő	csapadékesemény	MORGAN et al. 1992
MEDRUSH ⁷	vízgyűjtő	1 óra - 100 év	KIRKBY 1992
AGNPS ⁸	vízgyűjtő	csap. esemény - év	YOUNG et al. 1994
EROSION2D/3D	parcella, vízgyűjtő	csapadékesemény	WERNER et al. 1996
LISEM ⁹	vízgyűjtő	csapadékesemény	JETTEN et al. 1996

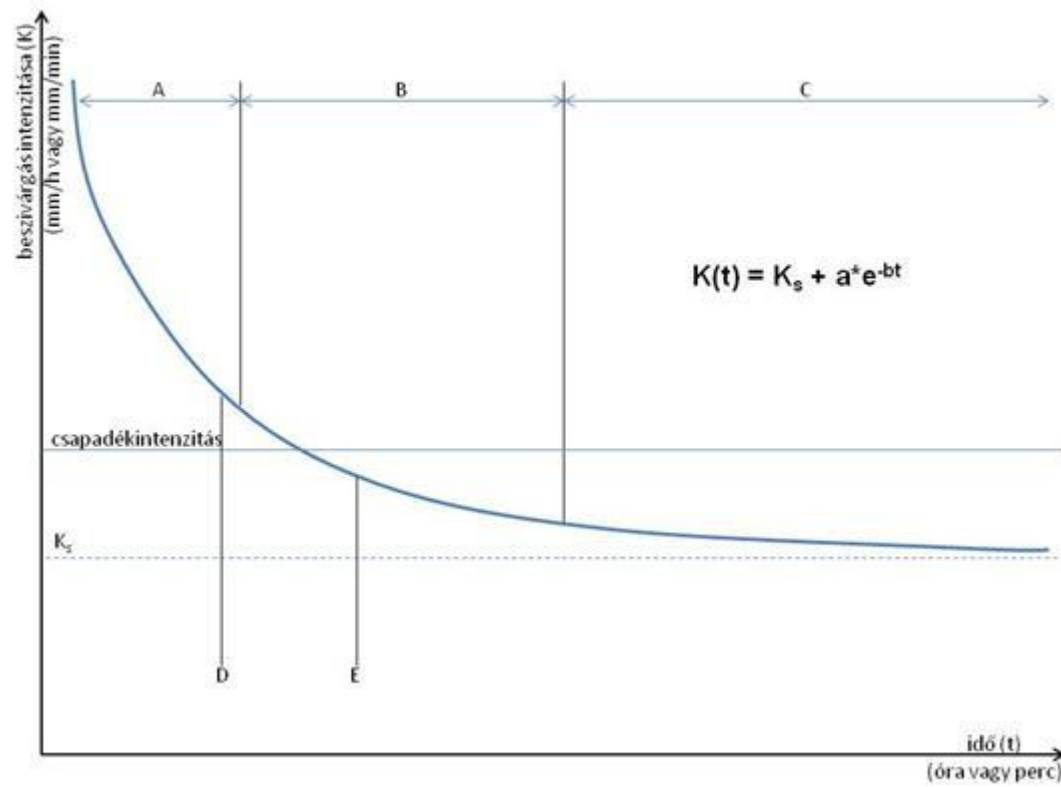
¹Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation, ²Chemical Runoff and Erosion from Agricultural Management System, ³Griffith University Erosion Sedimentation System, ⁴Water Erosion Prediction Project, ⁵Kinematic Runoff and Erosion Model, ⁶European Soil Erosion Model, ⁷Mediterranean Runoff Simulation on Hillslopes, ⁸Agricultural Non-Point-Source Pollution Model, ⁹Limburg Soil Erosion Model

A felsorolt fizikai és elméleti modellekre jellemző, hogy a lefolyást és az eróziót már képesek külön kezelni, többségük kétváltozós differenciálegyenletek segítségével írja le a lejtőmenti lefolyást (4.7.ábra), majd a csepperózió és a lefolyó víz hordalékszállítási dinamikájának matematikai leírásával határozza meg a talajvesztiséget. A modellek egyik legfontosabb kulcskérdése a beszivárgás alakulása, mely alapvetően a fizikai talajféleségtől függ, és időbeli lefolyását a Green-Ampt-modell vagy a Horton-képlet alapján adja meg a legtöbb modell (MORGAN, 1996) (4.8. ábra, 4.9.ábra).

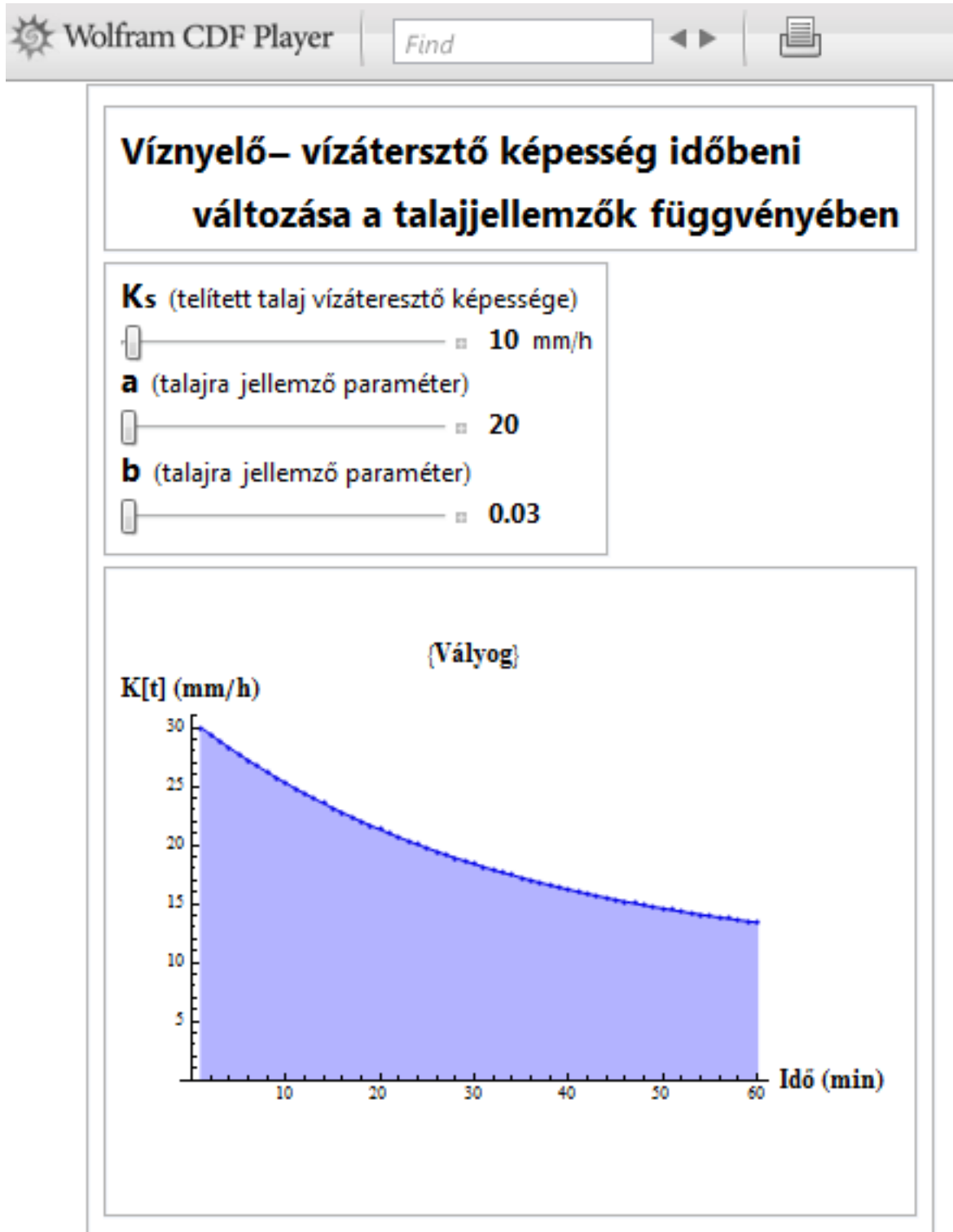
4.7. ábra - A fizikai modellek már nemcsak a mérési tapasztalatokon alapulnak, hanem a folyamatok dinamikáját írják le a csapadék-, a növényzeti és a talajjellemzők függvényében. Az animáció egy általános sémát mutat a modellek algoritmusára a csapadékhullástól a lefolyásig.



4.8. ábra - A beszívárgás alakulása az idő függvényében a horton model szerint A: magas, de gyorsan csökkenő víznyelés szakasza; B: lassuló beszívárgás szakasza; C: állandósuló vízáteresztés szakasza; D: felszíni tócsaképződés kezdete; E: lefolyás kezdete K(t): víznyelő-vízáteresztő képesség időbeni alakulása (mm/h vagy mm/min) Ks: telített talaj vízvezető képessége (mm/h vagy mm/min) a, b: talajra jellemző paraméterek



4.9. ábra - Az interaktív animáció lehetőséget biztosít a fizikai féleségtől és egyéb talajjellemzőktől függő víznyelő-vízáteresztő képesség szimulálására, ld. még 4.8. ábra)



A felsorolt vízeróziós modellek közül az alapvetően parcellákra kidolgozott EUROSEM-et és a GIS-alapú EROSION3D-t mutatjuk be.

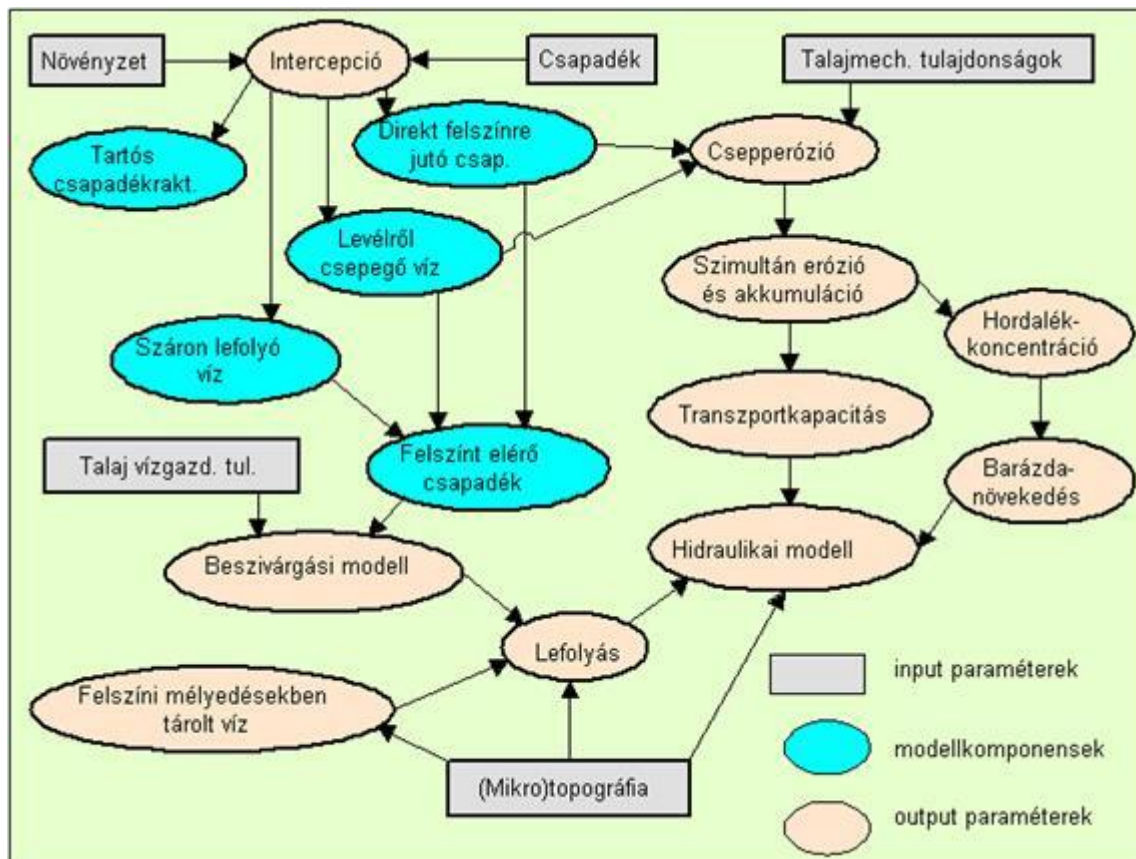
3.1. 4.3.1. Az EUROSEM modell összefoglaló jellemzése

A EUROSEM (European Soil Erosion Model) talajeróziós modellt a 90-es évek elejére dolgozták ki az Egyesült Királyságban, Silsoe-ban a University of Cranfield kutatóinak vezetésével. Létrejöttében nagy szerepet játszott a 80-as évek második felében megerősödő „modellgyártási hullám”, a megalkotása idején azonban már működtek a CREAMS és a WEPP modellek. Ezen modellek azonban csak statikus outputtal rendelkeznek, azaz csak a

vizsgált területről távozó vízmennyiséget és talajvesztést adják meg, továbbá számos olyan bemeneti paraméterrel dolgoznak, amelyek csak közvetett hatással vannak az erózióra (pl. evapotranszpiráció). Emiatt az európai országokban, ahol általában az éves talajvesztés döntő többségét egy-két nagyobb csapadékesemény okozza, alkalmazásuk nem szerencsés. Ezért az Európai Közösség 1986-os brüsszeli tanácskozásán létrehoztak egy talajeróziós szakemberekből álló kutatócsoportot, amely célja az alábbi követelményeknek megfelelő talajeróziós modell (4.10. ábra) megalkotása volt:

1. alkalmas legyen az európai országok fent említett viszonyai között az erózió becslésére és előrejelzésére, azaz
2. egyesemenyes dinamikus modell legyen,
3. az eseményen belül is képes legyen a lefolyás és a hordalékmozgás időbeni jellemzésére,
4. viszonylag kevés, csak egy-egy csapadékesemény során az erózióra direkt hatást gyakoroló input paramétereket használjon,
5. egyesemenyes dinamikus modell legyen,
6. parcellákra, mezőgazdasági táblákra és kisebb vízgyűjtőkre is alkalmazható legyen.

4.10. ábra - A EUROSEM modell működési mechanizmusa (MORGAN et al. 1998 alapján)



Az egyes bemeneti paramétereket a 4.11. ábra foglalja össze.

4.11. ábra - : A EUROSEM-ben használt legfontosabb input paraméterek

Csapadéparaméterek		Növényzeti paraméterek	
A közel azonos intenzitású szakaszokra bontott csapadékeseményt a szakaszhatárok időpontjaival és a hozzájuk tartozó kumulált csapadékmennyiségekkel adjuk meg táblázatos formában. Tehát inputként időpontok és csapadékmennyiségek szerepelnek a modellben. Input paraméter még a hőmérséklet (C°).		Név	M. egys.
		növényborítottság	-
		max. csapadékraktározás	mm
		növényborítás magassága	cm
		felszíni szárazsúly	-
		száradás	fok
(Mikro)topográfiai paraméterek		Talajparaméterek	
Név	M. egys.	Név	M. egys.
lejtőhossz	m	vízáteresztő képesség	mm/h
lejtőszélesség	m	kapilláris vízvezetés	mm
lejtőszög	m/m	kezdeti talajnedvesség	m ³ /m ³
lejtőirányú érdesség	cm/m	maximális talajnedvesség	m ³ /m ³
lejtőre merőleges érdesség	cm/m	porozitás	m ³ /m ³
beszív. visszahúzóási faktor	mm	Manning-féle n-érték	m ^{1/6}
		szemcseátmérő mediánja	μm
		talajkohézió	kPa
		csepperodibilitás	g/J
		térfogatos közetarány	m ³ /m ³
		felszíni közetarány	-

Az egyes tényezők közötti összefüggéseket nem tapasztalatokra alapozva, hanem fizikai törvényekkel írja le a modell, azaz a háttérét egzakt matematikai egyenletek adják.

Az eddig leírt struktúra homogén parcellákra és mezőgazdasági táblákra alkalmazható. Ezeket a homogén, minden paraméterében egységes területeket a modell „plane element”-eknek nevezi. Magyarul a tájfelrajzi eredetű, de a hazai talajeróziós szakirodalomban már használatos erotóp kifejezés alkalmazása javasolt. Mivel a modell fejlesztői nem kapcsolták a modellt semmilyen geoinformatikai rendszerhez, így kisvízgyűjtőkre történő kiterjesztése csak bonyolult topológia megadásával lehetséges:

1.A lineáris vízvezetést végző, barázdánál nagyobb méretű, önálló vízgyűjtővel rendelkező medrekre bevezették a „channel element” (mederegység) fogalmát, és az erotópokhoz hasonlóan paramétereket rendeltek hozzá. Természetesen ez új paraméterek alkalmazását is maga után vonta.

2.Ezek ismeretében a modellezni kívánt vízgyűjtőt felosztjuk erotópokra és mederegységekre.

3.A létrehozott egységek között topológiát definiálunk, melyben egyértelműen meghatározzuk az egységek közötti hidrológiai kapcsolatokat (kimondatlanul itt deklaráljuk, hogy a modell konvergens lefolyással dolgozik, azaz bármelyik egység csak egy egységnek adhatja tovább a vizét), és a térbeli elhelyezkedésüket (jobb- és baloldali egység megadása).

4.A modellt lefuttatjuk a topologikus egységekre.

A modell legutóbbi verziója 2010-ben jelent meg, és az alábbi honlapról bárki számára ingyenesen letölthető.

4. 4.4. Az EROSION3D modell bemutatása

Az EUROSEM-mel ellentétben az EROSION3D már egy GIS-alapú, vízgyűjtőkre kidolgozott egyesemenyes fizikai modell (WERNER & SMITH, 1996). Elsősorban mezőgazdasági területekre tervezték, s ennek megfelelően a vízerózió túl a tápanyagok és a diffúz szennyeződések mozgásának modellezésére is alkalmas. Németország egyes tartományaiban a modell be van építve a talajvédelmi programok döntéshozói mechanizmusába, hazánkban a Velencei-hegységben és a Szekszárdi-dombságban alkalmazták egy-egy kisvízgyűjtőn (KITKA et al. 2008, BORCSIK et al. 2011).

Raszteres alapú bemeneti paramétereit célszerű ArcGIS-ben előállítani. Alkalmazásának felső korlátja 1000*1000-es méretű rácsháló, azaz 1 m-es felbontás esetén csak 1 km²-nyi, 10 m-es felbontásnál már 100 km²-nyi területet tudunk vele modellezni. Alapját a vízgyűjtő domborzatmodellje adja, melyet ascii formátumban

konvertálunk a szoftver futtatása előtt. A EUROSEM-nél jóval kevesebb, összesen 7 talaj- és növényzeti input paramétert használ fel (4.12. ábra).

4.12. ábra - Az E3D-ben használt legfontosabb input paraméterek

Csapadékpáráméterek		Domborzati páráméterek	
A csapadékadatokat 10 perces intenzitások formájában tudjuk megadni egy külön (pr kiterjesztésű) fájlban		A modellezendő terület domborzatmodellje ascii formátumúvá konvertálva.	
Növényzeti páráméter		Talajpáráméterek	
Név	M. egys.	Név	M. egys.
felszínborítottság	%	szemeloszlás	m/m%
Egyéb páráméter		szervesanyag	m/m%
korrekciós faktor	-	térfogattömeg	kg/m ³
		kezdeti talajnedvesség	m ³ /m ³
		talajkohézió	kPa
		Manning-féle n-érték	s/m ^{1/3}

A talajpáráméterek közül az egyik legfontosabb a szemeloszlás, mely 3-3 frakcióméretet különít el az agyag, iszap és homok mérettartományában is (összesen 9 kategóriát). Ez alapján határozzuk meg a talaj fizikai féleségét, besorolva azt a német osztályozás 31 kategóriájának valamelyikébe. Amennyiben bármely további talajjellemzőről nincs mérési adatunk, az előbbieken meghatározott kategória alapján a páráméterkatalógusból tudjuk becsülni az adott páráméter értékét. A szemeloszlás másik jelentősége, hogy belőle, illetve a térfogattömeg és a szervesanyag-tartalom értékeiből számolja a modell a talaj hidraulikus vezetőképességét. A víznyelési görbéhez pedig az említett párámétereken kívül a kezdeti talajnedvességet is felhasználja. Az E3D a Green-Ampt-formulával dolgozik.

A talajkohézió és a felszín érdességét leíró Manning-féle n-érték a transzportfolyamatokat, azaz a hordalékszállítást határozza meg. A 4.12. ábrán feltüntetett korrekciós faktor szerepe a mért és modellezett értékek összehangolása. Rendkívül érzékeny rá a modell, terepi mérésekkel történő kalibrálása elengedhetetlen.

A felszínborítottságot legtöbbször a területhasznosítási térkép alapján vektoros formában adjuk meg, míg a talajpárámétereket a rendelkezésünkre álló adatbőség függvényében vagy talajtérképek és kartogramok alapján poligonokkal, vagy pontszerű méréseken alapuló interpolációs eljárások segítségével raszteres állományként állítjuk elő. A 4.12. ábrán felsorolt talaj- és növényzeti párámétereket, illetve a korrekciós faktort tartalmazó térképi állományokat gridekké alakítjuk, majd – a DDM-hez hasonlóan – ArcInfo ascii fájlokat gyártunk belőlük. Ezzel előkészítettük az adatbázisunkat a modellfuttatásra: először az E3D Preprocessorában „talajfájl” és „relieffájl” állítunk elő a beolvasott állományokból, illetve ugyanitt készítjük el a csapadékfájl is, majd az elkészített 3 fájlra lefuttatjuk az E3D-t.

A modell legfontosabb kimeneti páráméterei a cellákra, illetve a cellákhoz tartozó részvízgyűjtőkre számolt lefolyás és erózió, valamint a hordalék szemeloszlása. Az eredmények megjelenítése és további feldolgozása megfelelő geoinformatikai szoftverekkel (ArcView, ArcGIS) történhet.

5. Ellenőrző kérdések

1. Mi a legfontosabb célja napjainkban a talajerózió modellezésének?
2. Mit jelent egy modell esetében az érzékeny bemeneti páráméter fogalma?
3. Melyik minősül érzékeny, de „nem mérhető” páráméternek?
4. Hogyan lehet kisvízgyűjtőket modellezni a EUROSEM segítségével?
5. Hogyan tudjuk kalibrálni az EROSION3D modellt?

6. Irodalomjegyzék

BORCSIK Z. – FARSANG A. – BARTA K. – KITKA G., 2011: Humuszanyagok mennyiségi és minőségi eróziójának mérése a Tolna megyei Szálka település melletti vízgyűjtőn. Talajvédelem különszám. Talajtani Vándorgyűlés, Szeged, 2010. szeptember 3-4. Talajvédelmi Alapítvány, Budapest pp. 127-137.

KITKA G., 2009: Az Erosion 3D modell magyarországi adaptálása és alkalmazhatóságának vizsgálata kisvízgyűjtők tájhasználati tervezésében. Szeged. PhD disszertáció

KITKA G. – FARSANG A. – BARTA K., 2008: A jelen talajeróziós folyamatok sebességének vizsgálata korábbi területhasználati scénáriók függvényében. Esettanulmány egy mezőgazdasági hasznosítás alatt álló kisvízgyűjtőn. In: Recens geomorfológiai folyamatok sebessége Magyarországon (szerk: Kiss T. – Mezősi G.). SzEK-JGyFK Szeged. pp. 97-108.

MORGAN, R. P. C., 1996: Soil Erosion and Conservation. Longman London. p. 198.

MORGAN, R. P. C. - QUINTON, J. N. – SMITH, R. E. – GOVERS, G. – POESEN, J. W. A. – AUERSWALD, K. – CHISCI, G. – TORRI, D. – STYCZEN, M. E. – FOLLY, A. J. V., 1998: The European Soil Erosion Model (EUROSEM): documentation and user guide. Version 3.6, July 1998. Silsoe College, Cranfield University. p. 89.

STEFANOVITS P. – FILEP GY. – FÜLEKY GY., 2010: Talajtan. Mezőgazda Kiadó, Bp.

THYLL SZ. (szerk.), 1992: Talajvédelem és vízrendezés dombvidéken. Mezőgazda Kiadó, Bp.

WERNER, M. – SCHMIDT, J., 1996: Erosion-3D. Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser. In: Sächs. Landesanst. f. Landwirtsch. u. Sächs. Landesamt f. Umwelt und Geol.: Erosion 2D/3D. Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser. Bd. 3, Dresden. p.135.

WISCHMEIER, W. H. - SMITH, D. D., 1978: Predicting Rainfall Erosion Losses. Agricultural Research Service Handbook No. 282. United States Department of Agriculture, Washington. p. 58.

További ajánlott weboldalak: Silsoe, Eurosem

5. fejezet - Hidrológiai modellek I.

Hidrológiai modellezés alapjai

A fejezet céljai: a hidrológia, mint interdiszciplináris tudomány keretében a víz körforgását, valamint folyamatainak nagyságát befolyásoló környezeti paraméterek elemzése. A hidrológiai modellezés (hidrológia segédtudománya), mint összetett absztrakciós folyamat bemutatása.

Szükséges ismeretek, fogalmak: áramlástan, hidrodinamika, párolgás, transpiráció, köztes és felszíni lefolyás, Chezy-képlet, Darcy-törvény, Reynolds-féle szám, vadózus zóna,

1. 5.1. Bevezetés

A hidrológia interdiszciplináris tudomány, amely a vízzel, annak elterjedésével, fizikai és kémiai jellemzőivel, valamint globális körforgásával foglalkozik. A víz körforgását, más néven a hidrológiai ciklust, valamint folyamatainak nagyságát számtalan környezeti paraméter befolyásolja, ezért a kapcsolódó tudományok (talajtan, meteorológia, geológia, ökológia) és a hidrológia határa meglehetősen diffúz. A hidrológia más társtudományokkal is szoros kapcsolatban áll: ilyenek például az áramlástan, hidrodinamika, valamint a mérnöktan.

A hidrológiai modellezés (hidrológia segédtudománya), mint az összes modellezéssel foglalkozó tudományterület összetett absztrakciós folyamat. Amint láttuk a hidrológiai tárgyköre a felszíni, és felszínalatti vizekre terjed ki. A modellezés folyamata is ehhez kapcsolódik, de mint a hidrológia, így az itt létrejövő folyamatokhoz kapcsolódó modellezés is szerteágazó.

Bár a folyadékok leírására és mozgásjelenségeik jellemzésére szolgáló fizikai matematikai egyenletek, modellek azonosak, a modellek nagyon sokfélék és szerteágazóak. Természetesen nem csak a modelleknek, hanem az ezeket alkalmazó szoftvereknek is nagyon széles palettája található meg a programok piacán.

A számítógépek elterjedésével már lehetőség nyílt a nagyobb számolási kapacitást igénylő komplex hidrológiai számítások elvégzésére is az 1960-as és 1970-es évektől kezdődően. Az ilyen komplex hidrológiai és csapadék-lefolyás modellek segítségével reprodukálhatók megfigyelt korábbi hidrológiai események, valamint megválaszolhatók bonyolult vízügyi problémák, vagy akár segítséget nyújthatnak a mérnöki döntéshozatalban is. Az első átfogó, azaz vízgyűjtő méretekben használt hidrológiai modellt a Stanford Egyetemen (Kalifornia állam, Egyesült Államok) hozták létre (Stanford Watershed Model). Ez a modell már képes volt a hidrológiai ciklus összes fontos elemét modellezni, beleértve a csapadékot, párolgást, beszivárgást, felszíni lefolyást, a felszín alatti vizek mozgását, valamint a mederbeli lefolyást.

A hidrológiai modellezés fogalmkörét talán kicsit tágítanunk is kell, és ebben a tágabb megközelítésben a hidroinformatika kifejezést kell használnunk. Ez azért is fontos, hiszen a modellezés egy sokkal szűkebb megfogalmazása annak a folyamatnak, amely az adatgyűjtés (mérés), tárolás, adat asszimilálás, elemzés, modellezés, megjelenítés (előrejelzés tájékoztatás) egészét magában foglalja.

A modellezés napjaink egyik tudományos „main stream” kifejezése és egy kicsit tudományos ködbe próbálja burkolni az amúgy egyszerűbb megközelítéseket. Ha nagyon egyszerűen és mindenki számára érthető módon szeretnénk egy példát adni arra, hogy mi is a „hidrológiai modellezés” akkor: ha valaki bedigitalizál egy folyószakaszt a számítógép és az adott program számára érthető módon, akkor elmondhatja, hogy megtette az első lépést a modellezés irányába.

Természetesen a példa megmosolyogtató, de szemlélteti, hogy a digitális reprezentációk (számítógép számára érthető és felhasználható adatok) mindenképpen modellek, még ha nagyon egyszerűek és primitív formában utalnak a valóságra.

A modellekkel kapcsolatban külön ki kell emelni – mert nagyon sokszor esünk ebbe a hibába -, hogy a belőlük kapott eredmények nem a valóságot adják vissza, hanem csak ezekből az eredményekből lehet a valóságról következtetéseket levonni!

2. 5.2. A hidrológia rövid története

A jegyzetnek nem célja a hidrológia tudományának bemutatása, azonban a legfontosabb mérföldköveket szeretnénk megemlíteni, hiszen a modellek nagy része azokon az alapösszefüggéseken, képleteken alapszik, amelyeket már akár több évszázada megismertek és leírtak.

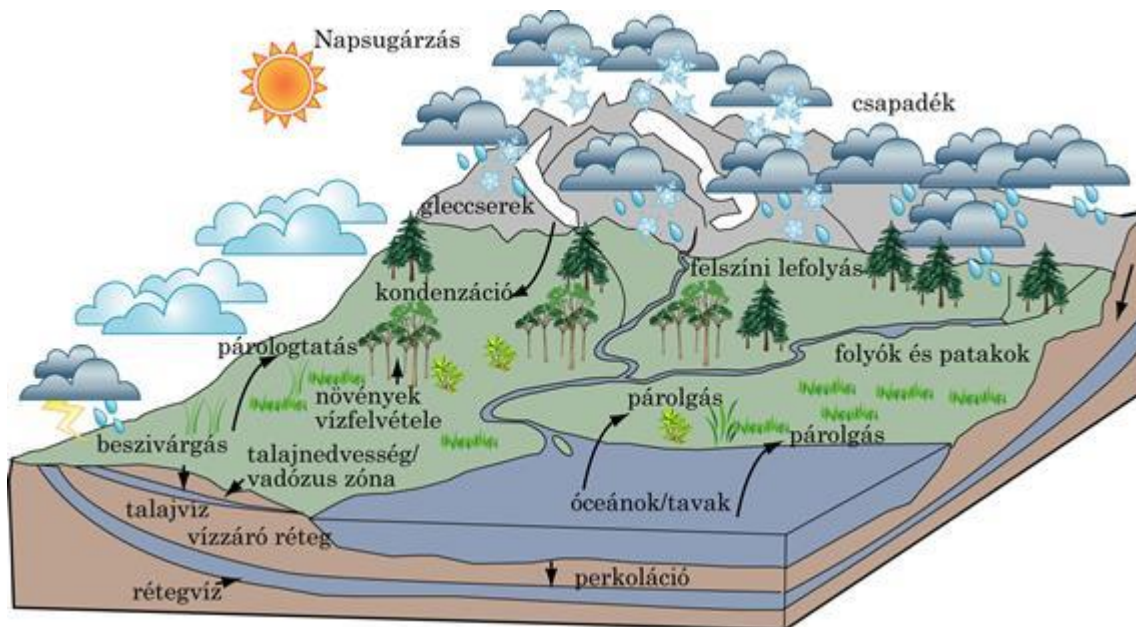
Az első csapadék és vízhozam mérések Pierre Perrault (1608-1680) nevéhez fűződnek a 17. századból, aki a Szajna vízhozamát vizsgálta a csapadék, valamint a vízgyűjtő nagyságának függvényében. Perrault már rámutatott a párolgás, transpiráció, a köztes és felszíni lefolyás szerepére hidrológia ciklusban. Edme Mariotte (1620-1684) a Szajna vízsebesség és keresztmetszet mérések segítségével először végzett vízhozam méréseket. Edmund Halley (1656-1742), angol csillagász már egyszerű párolgásméréseket végzett arra vonatkozóan, hogy kiszámítsa annak nagyságát a Földközi-tenger felszínéről. Eredményei alapján arra a következtetésre jutott, hogy a folyók által a Földközi-tengerbe szállított víz pótolja a párolgás következtében fellépő vízvesztést. Ezek az alapvető vizsgálatok vezettek azoknak a törvényszerűségeknek a megfogalmazásához, amelyek a 18. század folyamán születtek, s amelyek a hidraulika és áramlástan alapját képezik. Ilyen egyenletek pl. Bernoulli-törvénye és a Chezy-képlet.

A 19. században további összefüggések feltárására került sor, főként a felszín alatti vizek folyamatai terén: ekkor foglalták meg és írták le pl. Darcy- és Hagen-Poiseuille törvényét. A 20. században több beszivárgási modell is leírásra került, ezek pl. Kosztjakov, Lewis, Horton, Green és Ampt valamint Philip nevéhez fűződnek. Robert Manning (1816-1897) egy gyakorlati képletet fogalmazott meg a nyílt csatornában végbemenő vízáramlás leírására, felhasználva Philippe Gauckler egy francia mérnök 1867-ben leírt egyenletét. George Stokes számításai alapján Osborne Reynolds (1842-1912) tanulmányozta a lamináris és turbulens áramlás jellemzőit: nevét a Reynolds-féle szám örökölte meg.

3. 5.3. A hidrológiai ciklus

Elsőként nézzük meg, hogy valójában mi is a hidrológia és a hidrológiai modellezés szorosabban vett tárgyköre. Ez nem más, mint a hidrológiai ciklus (5.1. ábra), melynek rövid leírásával, a modellek könnyebb megérthetőségét is támogatjuk.

5.1. ábra - A hidrológiai ciklus elemei



A teljes földi vízkészlet mintegy 1,3 milliárd km³ vizet jelent, melynek mintegy 97,5%-a az óceánokban található (5.2. ábra). A hidrológiai ciklus egy olyan körfolyamat, amelyben az energia forrása és a mozgatórugója a Napsugárzásból származó energia. A felszínre érkező energia következtében a víz elpárolog az óceánok felszínéről, nedves légtömegek formájában a szárazföldek fölé áramlik, s megfelelő környezeti feltételek mellett csapadék formájában kihull (5.3. ábra).

5.2. ábra - A földi vízkészlet eloszlása

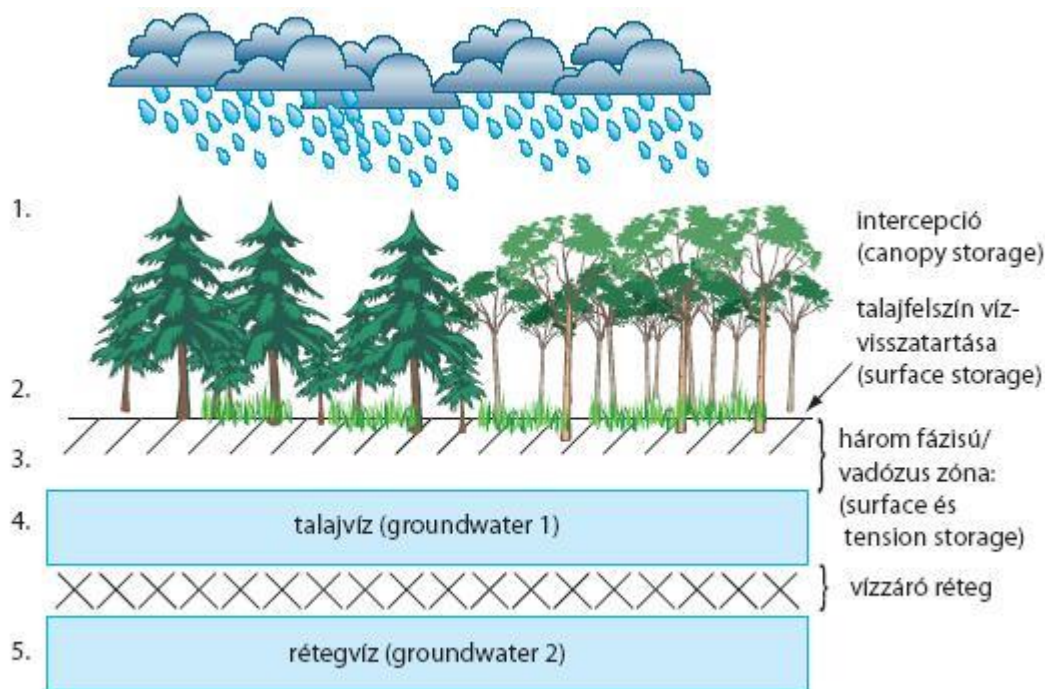


5.3. ábra - A hidrológiai ciklus kvantitatív ábrázolása. Az egyes tározókban km^3 , míg a nyilak mentén pedig $\text{km}^3/\text{év}$ a mértékegység

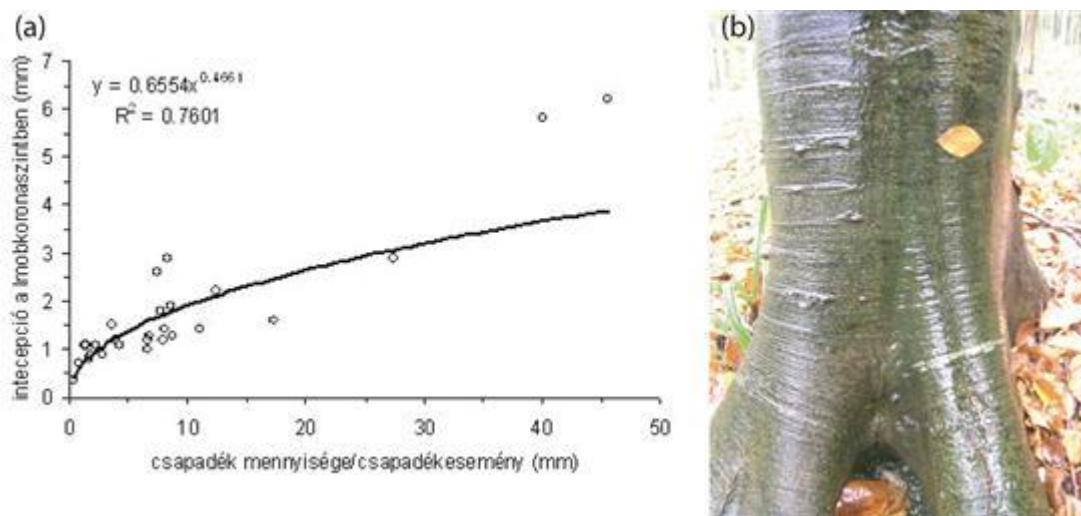


A talaj felszínét elérő csapadék egy része a talajba szivárog, ha azonban a csapadék intenzitása meghaladja a talaj beszívargási sebességét, megfelelő lejtőszög esetén felszíni lefolyás lép fel (5.4. ábra). A csapadék egy része (kb. 2 mm) fent maradhat a leveleken, ezt a folyamatot nevezzük intercepciónak, illetve ennek egy része törzsminti lefolyás következtében mégis eljuthat a talajfelszínre (5.5. ábra).

5.4. ábra - Veszteségi szintek a HEC-HMS csapadék-lefolyás modell alapján

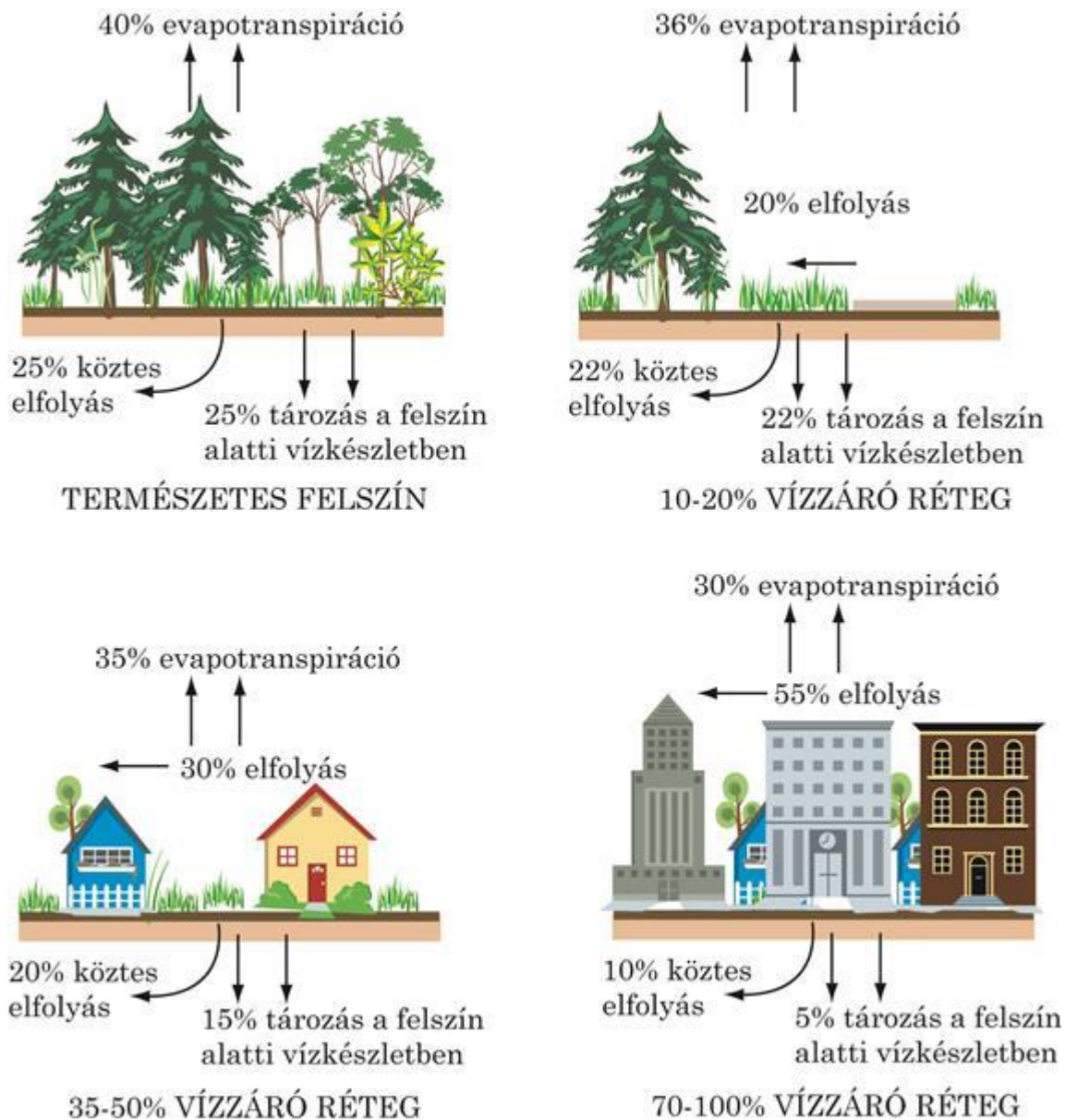


5.5. ábra - Intercepciós veszteség a csapadékmennyiség függvényében (bal oldali ábra), valamint törzs menti lefolyás (jobb oldali ábra)



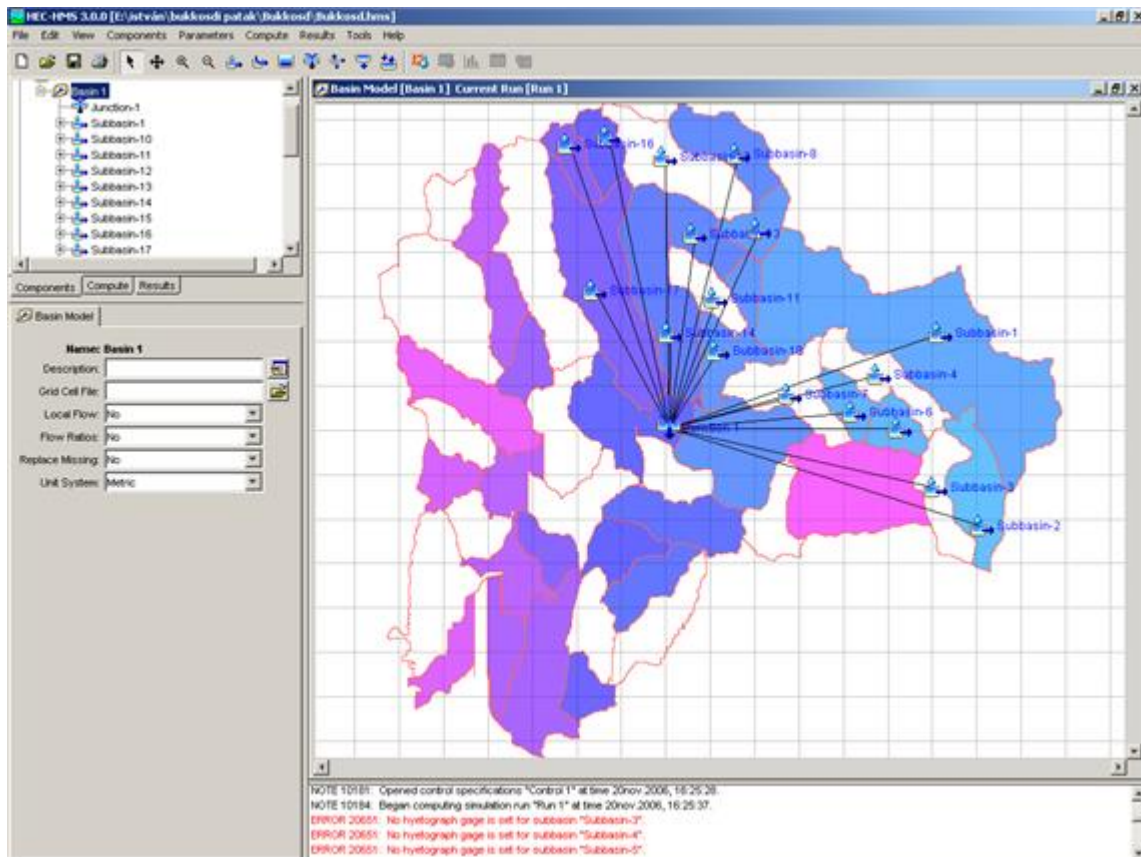
A felszínhasználatváltozás következtében, a betonfelszínek és vízzáró rétegek területi arányának növekedése következtében azonban a beszivárgás és a felszíni elfolyás aránya jelentősen megváltozhat (5.6. ábra). A talajba kerülő víz egy része visszakerül a légkörbe párolgás (evaporáció) és párologtatás (transpiráció) következtében. A felszíni elfolyás, valamint a háromfázisú (vadózus) zónában végbemenő közteslefolyás (angolul interflow) következtében időszakos, majd állandó vízfolyások révén a víz visszakerül az óceánokba és tengerekbe, ezáltal bezárva a körfolyamatot. A víz egy része eljuthat a mélységi víztározókba is, mint pl. a talaj- és a rétegvízbe is, amelyekből, igaz lassabban, de visszakerül a víz az óceánokba. A víz egy része pedig eljut a tektonikai folyamatokat magába foglaló hidrogeológiai ciklusba is. Vízyűjtő-szinten azonban több részfolyamat, mint pl. a beszivárgás és az evapotranspiráció (párolás és párologtatás együttesen) is nehezen mérhető, illetve időben és térben is jelentősen változhat.

5.6. ábra - A lefolyás és beszivárgás arányának változása a felszínhasználat függvényében



A modellalkotás, modellezés során, végső soron arra törekszünk, hogy a hidrológia ciklus egyes elemeit parametrizáljuk és matematikai és fizikai összefüggéseik alapján egyszerűsítsük egy számítógépes reprezentáció keretében (5.7. ábra)

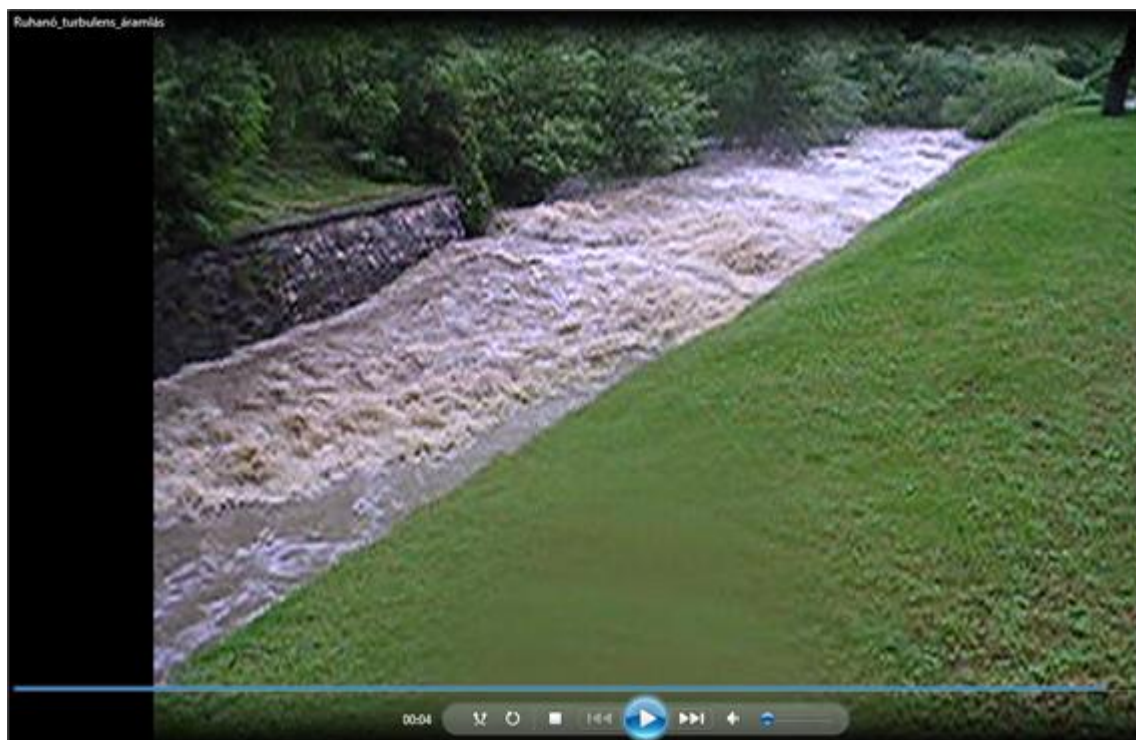
5.7. ábra - A Sematikus vízhalózat és vízgyűjtő modell a HEC-HMS szoftverben (MORGAN, 1996, a web-oldal és a feltüntetett források nyomán)



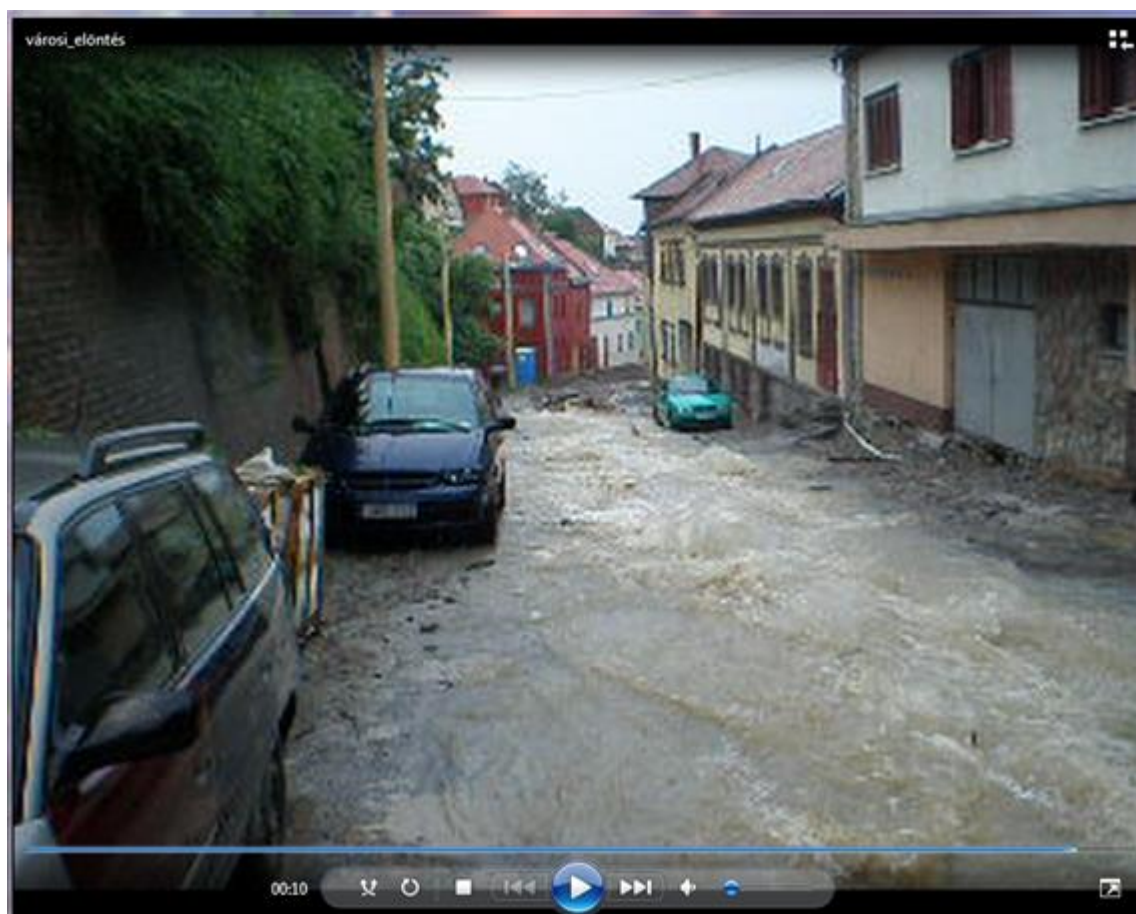
5.8. ábra - Ultra-kisméretű vízgyűjtőn kialakuló hirtelen árvíz, vízhozamának becslése és adatgyűjtés Q-H görbe modellezéséhez (video)



5.9. ábra - Rohanó, turbulens áramlás kialakulása műtárgy mögött, a Bükkösi-víz 2010 május 16.-i árvízi eseményekor (video)



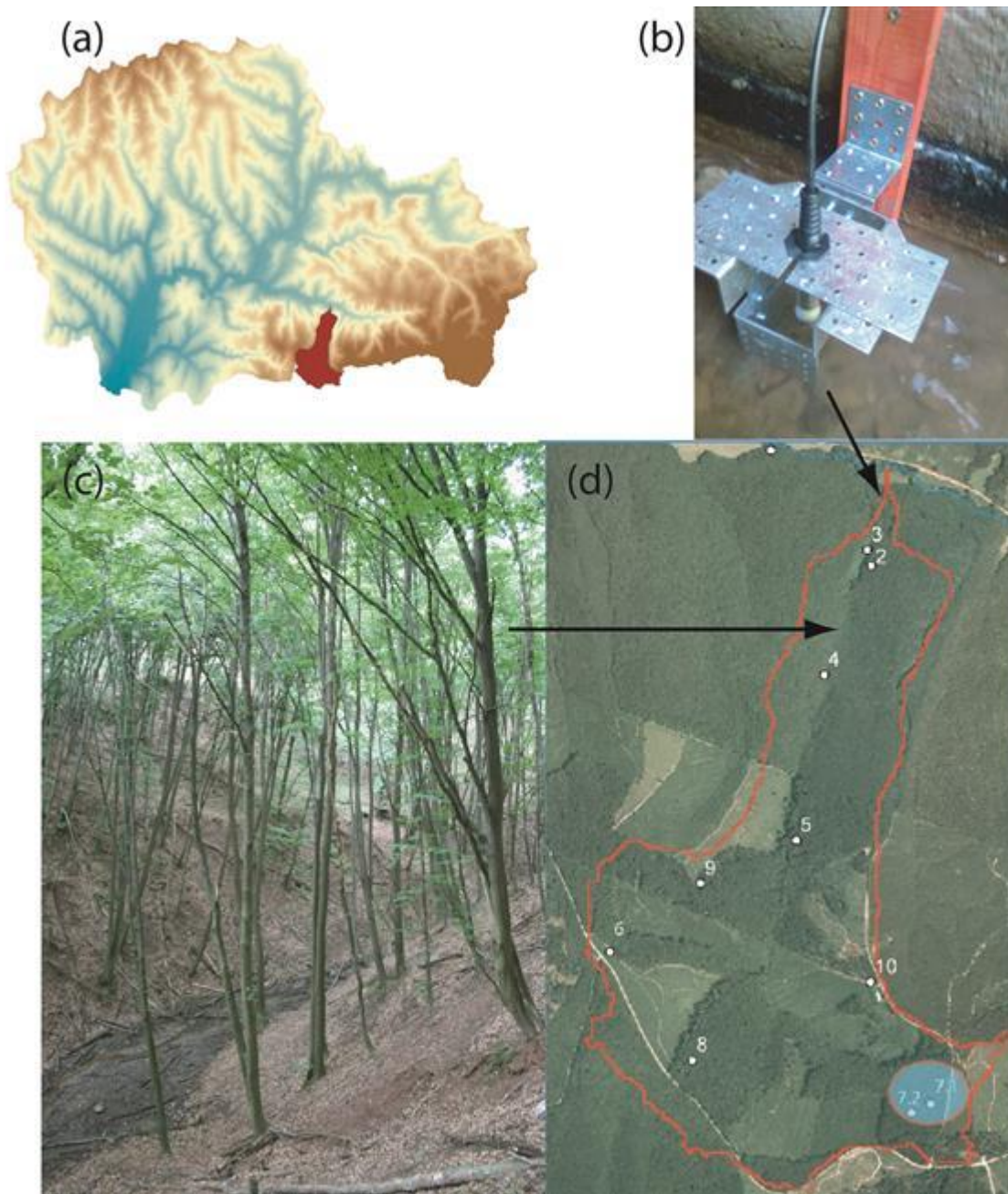
5.10. ábra - Tipikus városi árvíz kialakulása Pécsen 2010. május 17.-én, a Vince utcában, műtárgy eltömődése miatt (video)



4. 5.4. Vízgyűjtő

A vízgyűjtő nem más, mint a hidrológiai modellezés természetes térbeli alapegysége. Egy olyan összefüggő terület, amelynek egy kifolyási pontja van, és határát a vízválasztó vonal jelöli ki. Ezek a meghatározások egy kicsit árnyaltabbá válnak, abban az esetben, ha ún. városi vízgyűjtőkről beszélünk. Hiszen ebben az esetben, mind a felszíni tereptárgyak, mind a felszínalatti elvezető rendszerek megváltoztatják a vízgyűjtő természetes funkcióját (pl. lehetséges több kifolyási pont). A végpontban értelmezett alap-vízhozamot meghaladó kifolyás akkor jelenhet meg, ha a vízgyűjtőre csapadék hullik. Ennek szélsőséges esete az, amikor a talaj már vízzel teljesen telített vagy betonfelszínről van szó (vagy fagyott a felszín) a vízgyűjtő teljes területén, és a párolgás elhanyagolható, akkor a vízgyűjtőre lehullott csapadék térfogata megegyezik a vízgyűjtő kifolyó pontján távozó vízmennyiséggel. A valóságban a lehullott és kifolyó vízmennyiség aránya az előbb felvázolt két extrém helyzet közé esik. A vízgyűjtő így egy olyan hidrológiai egység, ahol hidrológiai ciklus elemei kvantifikálhatók, s hasonlóan a hidrológiai mérleg egyes elemeinek nagysága, többek között a lefolyó (kifolyó) vízmennyiség is kiszámolható (5.11. ábra). A vízgyűjtő szinten tehát, a megfelelő környezeti paraméterek ismeretében kiszámolható, hogy a lehullott csapadék mekkora hányada jelentkezik majd lefolyás formájában illetve, jelenik meg a vízgyűjtő kifolyási pontján.

5.11. ábra - A vízgyűjtő, mint hidrológiai egység a Bükkösdi-víz (bal felső), illetve a Pósa-völgy (jobb alsó) példáján. A jobb felső képen vízállás és vízhozam-szenzor látható. A bal alsó kép a vízgyűjtő fedettségi viszonyait mutatja be.



A vízgyűjtő terület nagysága széles határok között változhat, nagysága önkényesen határozható meg. A szomszédos vízgyűjtőket, a legmagasabb pontokon haladó vízválasztó vonal választja el egymástól. Ez azonban a síksági vízgyűjtők esetében nem szükségszerűen egyértelmű határ, pl. a síksági vízgyűjtők esetében bekövetkezhet a bifurkáció jelensége (pl. Pripjaty-mocsarak vagy Casiquiare az Orinoco és a Rio Negro/Amazonas között). A vízgyűjtők lehatárolása topográfia és domborzati alapon működik: lehatárolásának legkorszerűbb módja digitális domborzati modelleken segítségével végezhető el.

Általánosságban minél nagyobb a vízgyűjtő terület, annál nagyobb a lefolyó víz mennyisége. Különböző formulák léteznek a vízgyűjtő terület nagysága és a tetőző vízhozamok közötti kapcsolat számszerűsítésére a lefolyási tényezők alapján (pl. Vízügyi Segédletek). Egyszerűbb és általánosabb formában az összefüggés a $Q_t = cA^n$ formában írható le, ahol Q_t a kifolyó vízmennyiség, c és n regressziós konstansok, amelyek empirikus alapon határozhatók meg, A pedig a vízgyűjtő területe.

A vízgyűjtő alakja leggyakrabban körte vagy csepp alakhoz hasonlítható. Azonban a vízgyűjtők alakja tág határok között változhat, s a következő formulával számszerűsíthető: $K = A/L^2$, ahol K az alaktani tényező (mértékegység nélküli), A a vízgyűjtő terület nagysága, L pedig a vízgyűjtő hossza a leghosszabb vízfolyás

mentén mérve. Például, $K = 1$ egy kör alakú vízgyűjtő esetében és egynél kisebb, ha a körhöz képest elnyúlt alakú a vízgyűjtő.

A vízgyűjtő domborzata jellemezhető a relieffel és a maximális relieffel. A maximális relief a vízgyűjtő legmagasabb pontja és a kifolyási pont magassága között mért magasságkülönbség. A főmeder hosszanti profilja (hossz-szelvénye, magasságváltozás a horizontális távolság függvényében, $\Delta h/\Delta z$) is tükrözi a vízgyűjtő általános domborzati jellemzőit, valamint jellemzi a meder esését. Legtöbb esetben a főmeder esése a kifolyási pont felé haladva csökken. A meder esése legtöbb esetben 0,1 m/m (hegységeken) és 0,0001 m/m (torkolat közelében) változik.

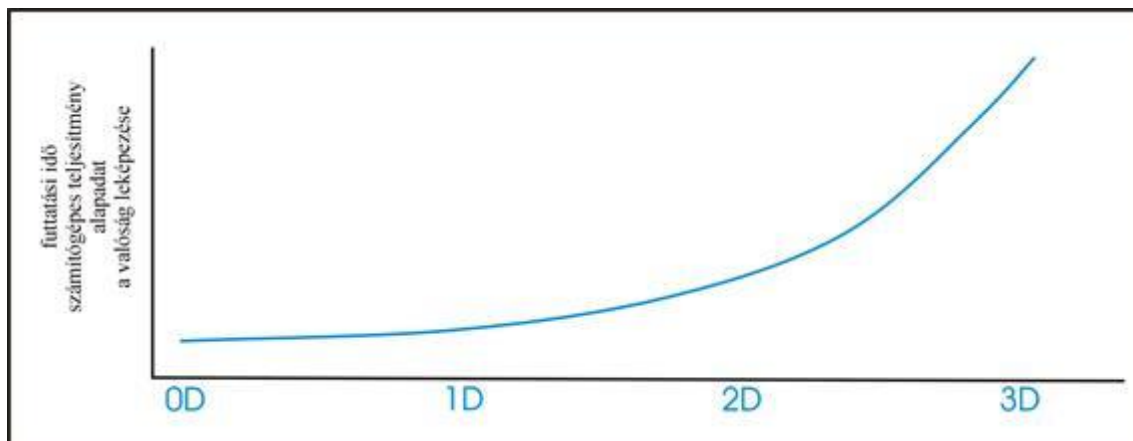
Lineáris távolságok, mint például a felszíni lefolyási pályák hossza, vagy a vízgyűjtő hossza hasznos információk arra nézve, hogy egy csapadékesemény hatására milyen hidrológiai válasz következik be vízgyűjtő szinten. A hidrológiai válasz egyik, gyakorlati szempontból legfontosabb jellemzője az összegyülekezési idő (t_c). Az összegyülekezési idő többféle módon becsülhető, de alapvetően a csapadék intenzitása és a domborzat, valamint a felszínhasználat jellemzői határozzák meg. Legtöbb esetben viszonylag szoros fordított összefüggés figyelhető meg a csapadék intenzitás és az összegyülekezési idő között.

5. 5.5. Hidrológiai modellek

A hidrológia tudománya régóta alkalmaz modelleket. Az elmúlt húsz évben azonban megsokszorozódtak azok a számítógépes programok, amelyek lehetőséget biztosítanak a teljes hidrológiai folyamat, vagy annak egyes elemeinek modellezésére. Fontos leszögezni, hogy ezek mind tudásszintben, modellezhetőségi lehetőségeikben, mind árban igen széles körben mozognak.

Ahogy azt már korábban is megfogalmaztuk a modellezés igen tág eljáráskört foglal magában. Ezért nem feltétlenül szükséges a legdrágább és legteljesebb programcsomagot megvásárolni. Hiszen aki egy egyszerű összegyülekezési modellt szeretni kialakítani annak egy GIS szoftver is elegendő, vagy aki egy csapadék-lefolyás összefüggést szeretne megtudni annak elégségesek az 1D ingyenes szoftverek is (5.12. ábra).

5.12. ábra - Az adat és számítógép-kapacitás igények változása a modellek dimenziószámának függvényében



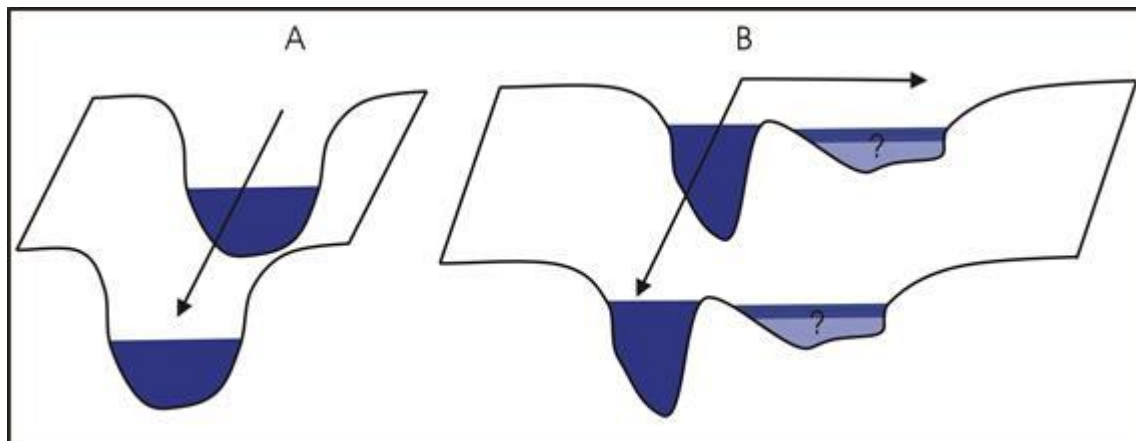
Nagyon gyakran a hidrológiai modellezés során találkozunk a „dimenziók” fogalmával. Pontosabban a szoftverek 1D, 2D esetleg 3D névvel jelölődnek és nem mindig egyértelmű, hogy mit is takarhatnak ezek a fogalmak. Nem célunk, hogy részletes elemzését adjuk a modellek dimenziószámának pontos meghatározására inkább egy jól alkalmazható és könnyen érthető szabályt szeretnénk bemutatni.

Abban az esetben, ha csak a vízrendszerünk statikus paramétereire vagyunk kíváncsiak (vízgyűjtő karakterisztika, lejtés, érdességi paraméterek, vagy általánosságban alap (térinformatikai paraméterek) akkor 0D, vagy dimenzió nélküli modellekről beszélhetünk.

Ha a modellünk tartalmaz valamiféle mozgási jelenséget és ennek a mozgásnak vagy szállításnak egy jól kijelölhető iránya van, (pl. folyómeder, völgy) akkor 1D modelleket alkalmazhatunk.

Azonban ha a meder már nem egyszerű karakterisztikájú (trapéz, v forma stb.) hanem töltésezett, vagy a völgy hegy- és dombvidéki környezetben nagyon összetett, akkor a főmeder folyamatai jól követhetők 1D leképezéssel, azonban az ártéri medrek, vagy a töltésen túli területek vizsgálata már 2D megközelítést igényel. Lehetőség van ilyen esetekben is 1D modellek alkalmazására, azonban a megoldások csak erősen közelítik a pontos leképezést (5.13. ábra).

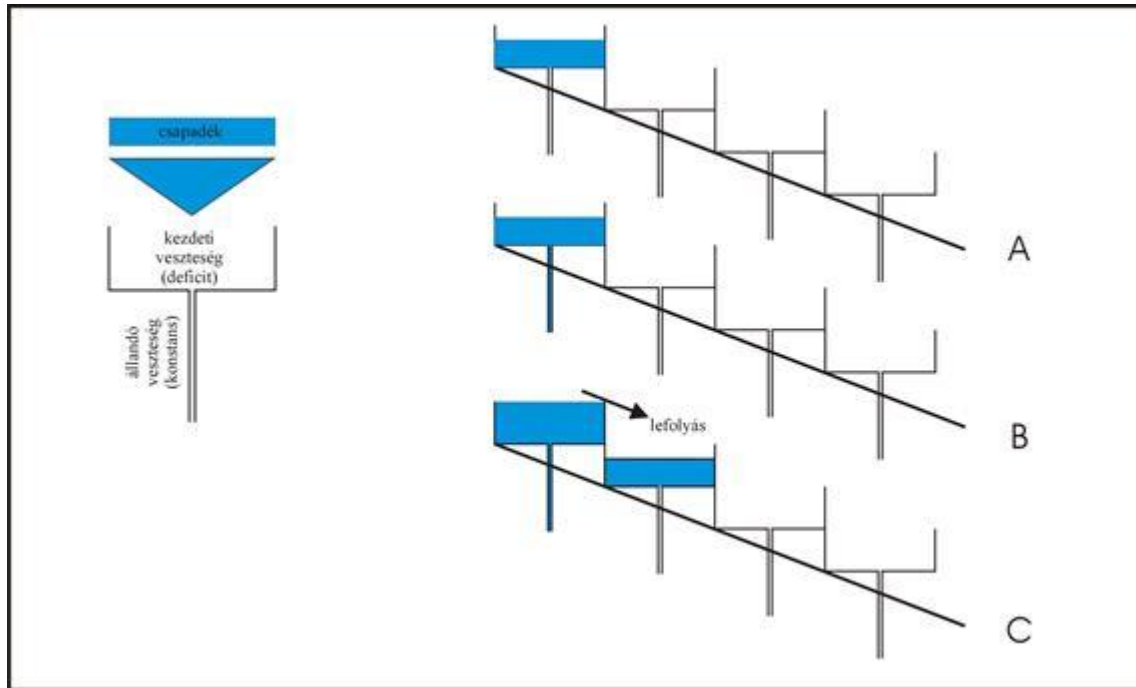
5.13. ábra - A 2D problémák megoldásának lehetőségei és problémái 1D környezetben



A valóságot legpontosabban leíró modellek a 3D megközelítésűek. Ezek a tér mindhárom főirányában képesek a változások követésére.

A csapadék összegyülekezésének és lefolyásának sematikus rendszerét. Nagyon sok tankönyv bemutatja, hogy ez az egyszerű folyamat milyen bonyolult paraméterezést igényel. Azonban a jegyzet arra is próbálja rávezetni az olvasót, hogy a feladat elvégzése előtt próbálja saját maga számára, kicsit egyszerűbben (modellezve) megfogalmazni a problémát. Ha megnézzük a 5.14. ábrát, akkor a felszínt véges térfogatú egységekkel helyettesítettük. Ezeknek a térfogatoknak az alján (mint a fürdőszobai kádaknak a lefolyó) van egy állandó keresztmetszetű kifolyási pont. Lefolyásnak azt az időpontot, vízmennyiséget stb. nevezzük, amikor egy folyásirányba lévő térfogatba a felette lévőből folyadék kerül át. Könnyen belátható, hogy a lefolyás megindulása egyrészt függ a csapadék mennyiségétől, valamint a kifolyási pont áteresztő képességétől. A véges térfogatok modellezik a felszíni egyenetlenségeket, a lombozatot, a talajt stb., amik a felszíni lefolyás megindulása előtt tárolják a csapadékot, míg az állandó keresztmetszetű kifolyási pont a talaj vízvezetési tulajdonságait reprezentálják (5.14. ábra).

5.14. ábra - Lefolyásmodellek sematikus folyamatábrája



Ezt a modellt alkalmazza a HEC programcsalád, amikor a Deficit and Constant veszteségi metódus használjuk a modelljeinkben. A modellezés végső célja, hogy valamilyen előrejelzést adjon az adott természeti jelenségről (5.16. ábra). Mivel a lefolyást számtalan környezeti paraméter befolyásolja, emiatt, mint a legkézenfekvőbb megoldás, a folyamatábrán alapuló megközelítés használata a legnyilvánvalóbb, a bemeneti paraméterek egyszerűsítésével (5.15. 17-19. ábrák).

5.15. ábra - A legegyszerűbb, előfuttatott flow chart típusú kockázati modell.

Csapadéközóna elhelyezkedése
Magyarország 1 km -es felosztású hálózata
Kód: 1-93000

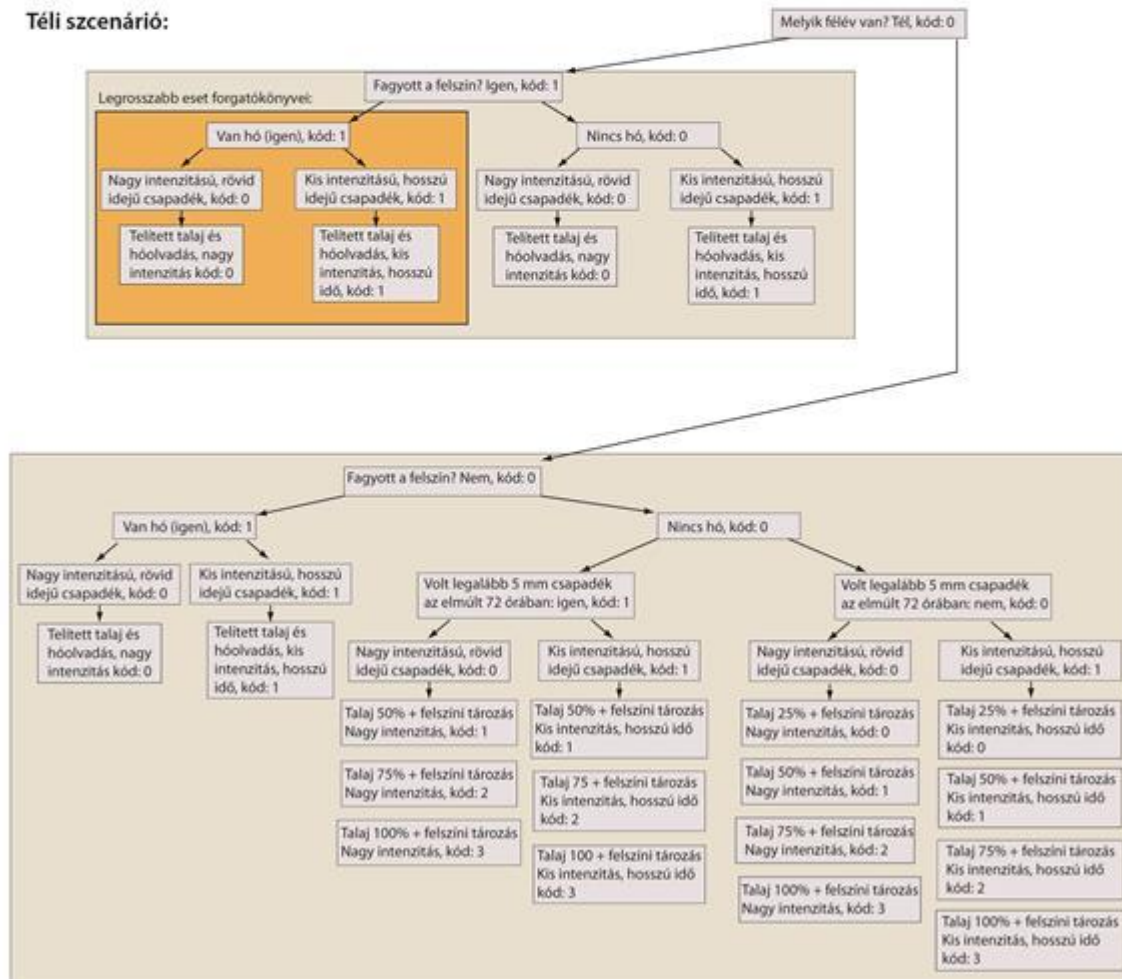
Csapadéközóna által kijelölt vízgyűjtők
Kód: 1-1082

Csapadékinintzés várható értéke és tartalma
Kód: mm/óra és óra

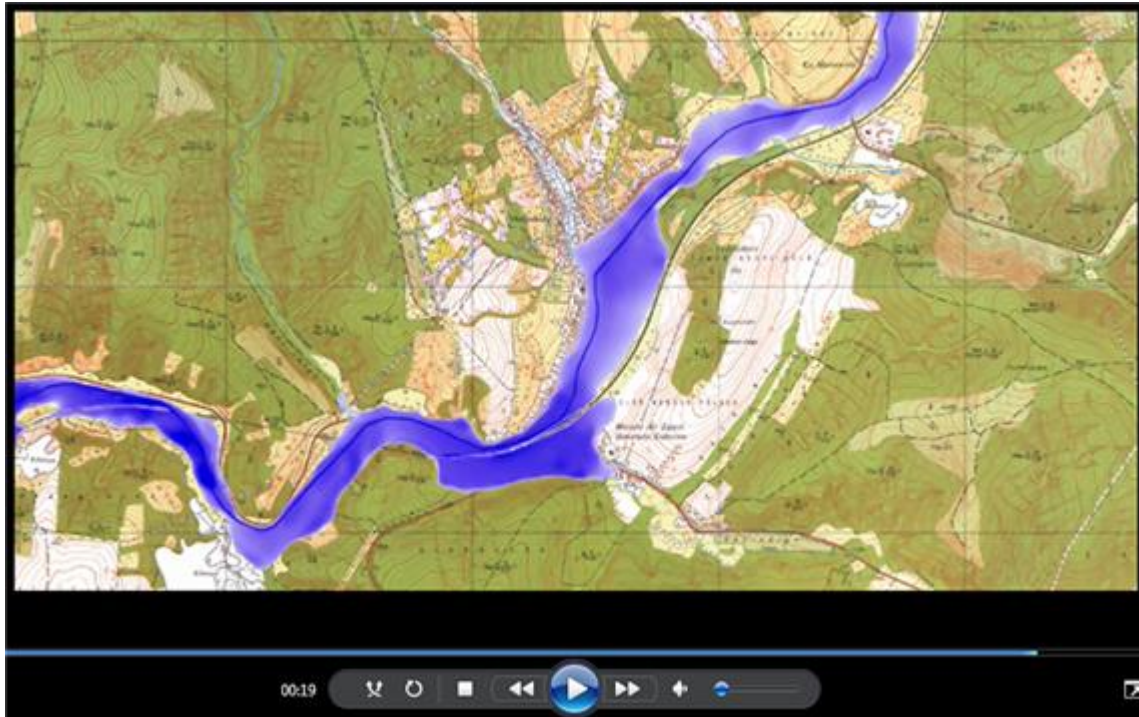
Ha a csapadékinintzés várható értéke és tartalma
kisebb, mint a legrosszabb várható eset akkor nincs risztás Kód: 0

Példa a kódtáblázat használatára: nyár, volt csapadék az elmúlt 36 órában, risztás nem volt, a talaj 50%-osan telített.
A megfelelő kódsor: 11011

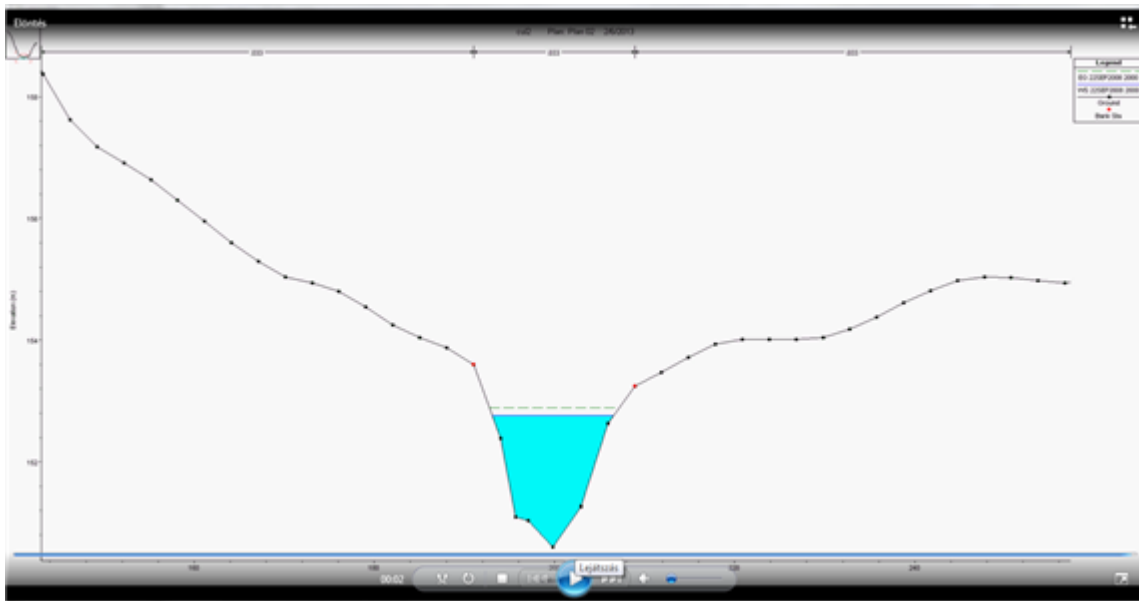
Téli szcenárió:



5.16. ábra - Tipikus városi árvíz kialakulása Pécsen 2010. május 17.-én, a Vince utcában, műtárgy eltömődése miatt (animáció)

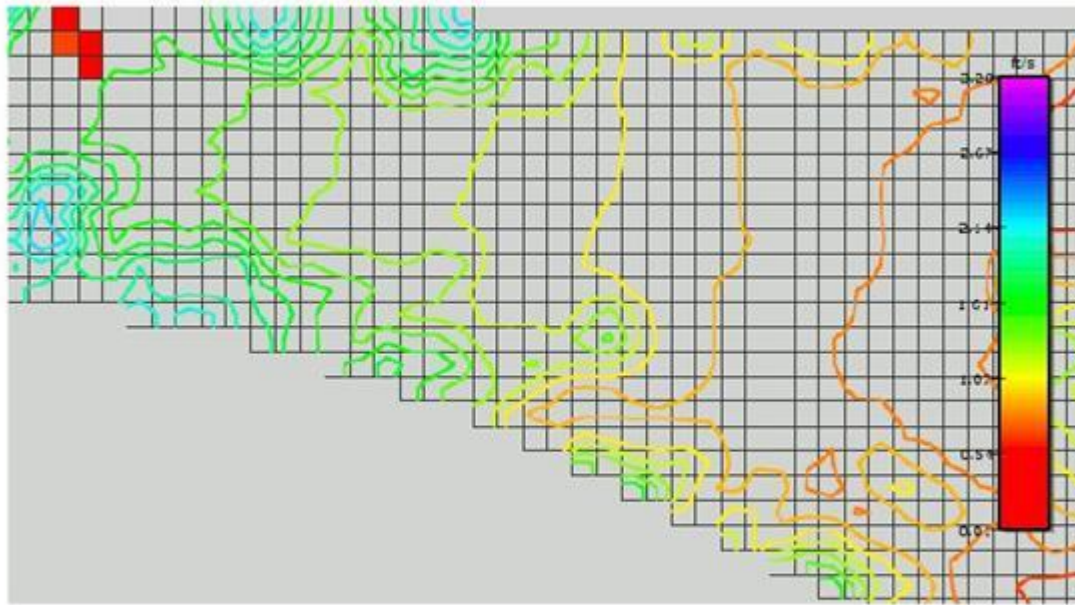


5.17. ábra - 1D elöntés keresztmetszeti modellje, HEC-RAS környezetben(animáció)



5.18. ábra - 2D elöntés terjedése az idő függvényében, Flow 2D környezetben(animáció)

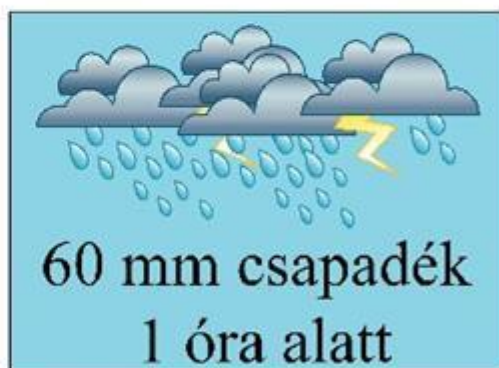
2D elöntési modell



Futtatás

5.19. ábra - Flow chart döntéstámogatási mechanizmus árvízi kockázat előrejelzésére(animáció)

Folyamat rendszerű árvíz kockázati modell



Kilépés

6. Ellenőrző kérdések

1. Mi a mozgatórugója a hidrológiai ciklusnak?
2. Sorolja fel a halmazállapot-változással járó folyamatokat a hidrológiai ciklusban!
3. Milyen tényezők befolyásolják a hidrológiai ciklus folyamatát?
4. Mi a különbség az 1D illetve 2D modellek között?
5. Mennyi idő szükséges az óceánok kiszáradásához, ha csak párolgási veszteséggel számolunk és nincs vízutánpótlás?
6. Mi a lényegi különbség a természetes és a városi vízgyűjtő fogalma között?

7. Irodalomjegyzék

KALICZKA L. 1998. hegy és dombvidéki víztrendezés. Főiskolai jegyzet. Eötvös József Műszaki Főiskola, Baja.

KORIS, K 2002. A hazai hegy- és dombvidéki kisvízgyűjtők árvízhozamainak meghatározása. Vízügyi Közlemények LXXXIV, 1. füzet, 64-77.

PIRKHOFFER, E. – CZIGÁNY, S.- GERESDI, I. 2009a. Impact of rainfall pattern on the occurrence of flash floods in Hungary. Zeitschrift für Geomorphologie, 53, 139-157.

STELCZER, K. 2000. A vízkészletváltozás hidrológiai alapjai. ELTE Eötvös Kiadó, Budapest. ISBN: 963 463 249 1

6. fejezet - Hidrológiai modellek II.

Hidrológiai modellek tesztelése, kalibrálása és validálása

A fejezet céljai: ebben a fejezetben a modellek tesztelésének, ellenőrzésének a folyamatát követjük végig a kalibrációtól kezdve az optimalizáción keresztül a validációig a HEC-HMS hidrológiai modell alkalmazási példáján.

Szükséges ismeretek, fogalmak: kalibrálás, iteráció, tolerancia, Trial and Error módszer, RMS hiba, optimalizálás, validáció

1. 6.1. Bevezetés

A hidrológiai modellek, más matematika modellekhez hasonlóan, a való világ folyamatainak működését hivatottak bemutatni, utánozni, szimulálni. Sajnos ezen modellek sem időbeli sem térbeli felbontásban nem képesek a valós körülményeket folyamatokat reprezentálni. Csak bizonyos megkötések és közelítések segítségével tudjuk a környezetünk történéseit a matematika és a számítógépek nyelvére lefordítani. Ugyanakkor, mivel ezek a közelítések rendszerbe szedve alkalmasak a valós események leírására, oly mértékben, hogy több-kevesebb pontossággal lehetőségünk van a valós folyamatokat előre jelezni. Az egyszerűsítések alkalmazási kényszere miatt szükség van a modellek kalibrálására, illetve az eredmények validálására, ellenőrzésre és összehasonlításra a valóságban lezajló folyamatokkal. A kalibrálás során a modell általunk beállítandó paramétereinek olyan együttesét kell meghatározni, aminél a modell eredmények és a megfigyelések eltérése a legkisebb. A validálási folyamat során képet kaphatunk a hidrológiai modell megbízhatóságáról, előrejelző képességéről, egy a kalibráló adatsortól független adatsor segítségével olyan körülmények között, amelyekhez a kalibrálás nem igazította a modell paramétereit.

2. 6.2. Kalibrálás

A modelleknek léteznek olyan paramétereik, melyeket nem lehet determinisztikus módon és egyértelműen meghatározni. Ennek a problémának a megoldására szolgál a kalibrálás, ami egy iteratív eljárás, melynek során a modell paramétereit értékeljük, és finomítjuk, úgy, hogy a modellezett értékek egyre inkább közelítsenek a kiválasztott adatsorok által reprezentált értékekhez.

A modelleket többféleképpen lehet kalibrálni. Talán a legegyszerűbbnek a manuális kalibrálás tűnik, amikor a paramétereiket egy szakember az egyes tesztfuttatások után kézzel módosítja, amíg a kellő pontosságot el nem éri az eredmények. Ez a módszer azonban időigényes és nagy tapasztalatot kíván meg a kalibrálást végző személytől. Minél több paraméter van egy modellben, annál többféle lehetséges beállítás létezik, amit próbálkozással nehézkes lehet megtalálni. Egy másik módszer lehet még az összes lehetséges paraméter kombináció kiszámítása, majd a megkapott végeredmények közül a mérésekhez legjobban illeszkedő eredmény beállításainak elfogadása. Ez azonban ismét felveti a problémát, hogy időigényes, mert a paraméterek lehetséges beállításainak száma igen nagy, és ezek minden újabb paraméter bekapcsolódásával összeszoródnak. Így ez a módszer már nem csak időigényes, hanem erőforrás igényes is.

A hidrológiai modellek fizikájának és kémiájának fejlődése a valóság egyre pontosabb reprezentálását teszi lehetővé, ez azonban a várakozásokkal szemben nem járt a paraméterek számának és a kalibrálás fontosságának csökkenésével. Ennek okán egyre keresettebbek lettek azok a megoldások, amelyekkel a kalibrálást automatikusan, optimális erőforrás igénytel lehet megoldani. Ennek a keresési folyamatnak a során jelentek meg a különböző matematikai optimalizáló eljárások a modellek kalibrálásának segítésére.

Ezek miatt az egyes hidrológiai modellek a fent vázoltakhoz képest már szofisztikáltabb kalibrációs eljárásokat használnak, több lépcsőben, vagy matematikai algoritmusok segítségével, iteratív úton állítják elő a legoptimálisabb paraméter együttest.

2.1. 6.2.1. Kalibráló adatok

A kalibráláshoz szükséges egy megfelelő méretű adatsor, amelynek segítségével a modell paraméterek beállítása elvégezhető. Ezeknek az adatsornak több tulajdonságuk is fontos. Mind a vízhozam, mind a meteorológiai adatsorokra vonatkozóan szükséges, hogy az adatsorok időbeli hossza megfelelő legyen. Ez a hossz függ a vizsgált, vagy modellezni kívánt vízgyűjtő komplexitásától. Ha csak egy speciális típusú eseményt szeretnénk modellezni, akkor elegendő az esemény karakterisztikus időhosszának megfelelő hosszúságú idősor, mind bemeneti, mind kimeneti oldalon, illetve az adatsorok tartalma is elég, ha csak speciálisan az eseményre vonatkozó információkat tartalmaz. Nagyobb skálájú folyamatok esetén, pedig olyan idősorokra van szüksége, melyeknél nem csak az időtartam hossza lényeges, hanem az is hogy minél többféle esemény legyen benne reprezentálva. A bemenő csapadék és kimenő vízhozam adatsorok ugyan arra az időintervallumra kell vonatkozzanak.

A mérési adatok időbeli felbontását is a modellezni kívánt eseményhez célszerű megválasztani. Egy nagy intenzitású, gyorsan lezajló esemény vizsgálatához nagy időbeli felbontású adatsor szükséges. Nagyobb időtávon való, az átlagos körüli viselkedést vizsgáló modellezés esetén pedig kisebb felbontás is elegendő.

2.2. 6.2.2. Kalibrálás a HEC-HMS modellben

A HEC-HMS modellt a fejlesztők ellátták egy program résszel, ami lehetővé teszi az automatizált kalibrálás elvégzését. Ennek a fentiekben látottakat figyelembe véve nagy a jelentősége, hiszen egy könnyen elérhető és elsajátítható megoldás segítségével jelentős erőforrás és időmegtakarítás érhető el, szemben a tapasztalati úton kézzel végrehajtott kalibrálással.

2.2.1. A kalibrálás előfeltételei

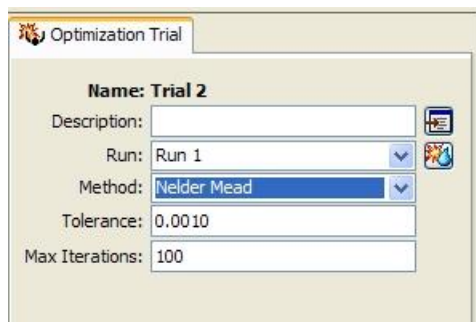
Első lépésben, ha még nem áll rendelkezésre, akkor meg kell alkotni a használni kívánt modellt. Ennek kalibráláshoz szükséges rendelkezni a vízgyűjtőre érvényes vízhozam mérésekkel, illetve ezekkel egy időben reprezentatív csapadék adatsorral, illetve adatsorokkal attól függően mekkora területet fed le a modellünk. Az adatsoroknak hiánytalanoknak kell lenniük, hogy a kalibrálás el tudjon indulni.

2.2.2. Kalibráló futtatás beállítása

A kalibráló, a programban trial-nak nevezett futtatási környezetet a Compute menu Create Optimization Trial menüpontjában lehet létrehozni. A létrehozás során első lépésben meg kell adnunk a kalibráló futtatás nevét, majd ki kell választanunk, hogy melyik már létező futtatás alapján szeretnénk a kalibrációt elvégezni, és végül azok közül a medence elemek közül tudunk választani, amelyekhez tartozik vízhozam mérés.

Miután létrehoztuk a kalibráló futtatást, a tovább léphetünk a kalibrálás paramétereinek beállításához. A létrehozott futtatást a böngészőben tudjuk kibontani. Az első fülön a futtatás alapvető tulajdonságait tudjuk beállítani (6.1.ábra).

6.1. ábra - A kalibráló futtatás alap paramétere



Kiválaszthatjuk, hogy melyik már meglévő futtatás alapján szeretnénk a tesztet futtatni. A második lényeges paraméter a kalibrálási módszer. Kétféle minimumkereső eljárás közül választhatunk, az egyik az Univariate Gradient a másik a Nelder Mead módszer. Mindkettőről volt szó a korábbiakban. Az optimumkeresést a maradék két paraméterrel lehet kontrollálni. A tolerancia értékkel tudjuk megadni, hogy mekkora objektív függvényérték változás alatt tekintjük elfogadottnak a keresést. A másik paraméter az iterációk maximális száma. Ha a keresés során az objektívfüggvény változása nem csökken a kívánt érték alá, akkor ennyi iterációs lépés után leáll a futás. Annak, hogy maximális iteráció számot eléri a futtatás több oka is lehet. Ha a tolerancia

értéket túl kicsinek választottuk, és az iteráció során az objektív függvény értéke folyamatosan csökken, akkor növelni kell az iterációs lépések számát. A másik esetben az objektív függvény értéke iterációról iterációra növekszik, ilyenkor nem lesz sikerül az optimalizálás. Ebben az esetben az objektív függvény megválasztását kell felülvizsgálni.

A következő általános lépés az objektív függvény tulajdonságainak meghatározása. Ezt a felületet a böngészőben a próba-futtatás fájának kibontása után tudjuk elérni (6.2. ábra).

6.2. ábra - Az objektív függvény tulajdonságai

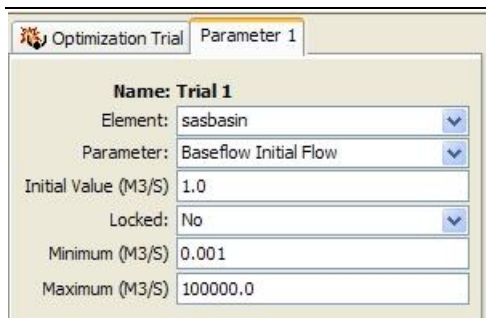
A legelső paraméter mindjárt maga az objektív függvény. Erre a HEC-HMS hét választási lehetőséget kínál.

- Csúcs-súlyozott négyzetes hiba négyzetgyöke (RMS) az alap RMS módosítása, úgy hogy az átlag feletti vízhozamok nagyobb, míg az átlag alatti hozamok kisebb súllyal szerepelnek.
- A maradékok (a mért és a modellezett vízhozam különbsége) négyzetes összege nagyobb hangsúlyt helyez a nagy hibákra, míg a kisebb hibákat kevésbé veszi figyelembe.
- Az abszolút maradékok összege egyenlő mértékben veszi figyelembe a kis és nagy hibákat.
- A vízhozam csúcs százalékos hibája figyelmen kívül hagyja a teljes hidrográfot, csak a maximális vízhozamot méri.
- A teljes térfogat százalékos hibája nem veszi figyelembe sem a vízhozam csúcsot sem időzítési megfontolásokat, térfogat érdekében.
- Az RMS log hiba a vízhozamok logaritmusának, négyzetes hibájának négyzetgyökét számolja. Ez a függvény az alacsony vízállásokat hangsúlyozza ki.
- Az idő súlyozott függvény nagyobb hangsúlyt helyez az időablak vége felé található hibákra és kisebbet az időablak elején találhatóakra.

A következő állítható paraméter a medence elem, amire a futtatás vonatkozik. Majd megadhatjuk, hogy milyen mértékű adathiányt engedünk meg a vízhozam mérésekben. Ha az itt megadott százalékos értéknél nagyobb az adathiány, akkor a kalibrálás nem fog lefutni. Az időablak alapértelmezésben a futtatás időablakának időtartama. Ennél lehet szűkebb intervallumot is választani, de az alapfuttatás időablakából nem lóghat ki a kalibráló futtatás idő intervalluma semelyik irányban sem.

A kalibráláshoz szükséges a kalibrálandó paraméterek megadása, amelyeket hangolni akarunk. A kiválasztható paraméterek a kiválasztott medence elemében vagy annak felső folyásánál megtalálható kell hogy legyen. Azokat a paramétereket, amiket pontosan kell megmérni terepen, nem lehetséges módosítani. Ilyen például egy medence területe. A kalibrálható paraméterek listáját böngészőben jobb egér gombbal a próba-futtatás ikonjára kattintás után az Add Parameter paranccsal lehet bővíteni (6.3. ábra).

6.3. ábra - Teszt-futtatás paraméter tulajdonságok



Optimization Trial	
Parameter 1	
Name: Trial 1	
Element:	sasbasin
Parameter:	Baseflow Initial Flow
Initial Value (M3/S)	1.0
Locked:	No
Minimum (M3/S)	0.001
Maximum (M3/S)	100000.0

Az első pontban azt adhatjuk meg, hogy melyik vízgyűjtőelemre vonatkozóan akarunk paraméter kalibrálni. A második pontban a legördülő menüben megkapjuk a módosítható paraméterek listáját. A módosítható paraméterek teljes listáját a HEC-HMS program felhasználói kézikönyve tartalmazza. A paraméter kiválasztása után a megadhatjuk annak kezdeti értékét, ahonnan az optimalizálás elkezd keresni a megfelelő értéket. A Locked tulajdonság beállításával a paramétert zárolhatjuk. A zárolt paramétert a program a kezdeti értéken hagyja, figyelembe veszi az optimalizálás során, de annak értékét nem változtatja. Végül pedig a paraméter által felvehető legkisebb és legnagyobb értékeket tudjuk meghatározni. A keresési tartományt lehet szűkíteni előzetes mérések, vagy kézi kalibráció során meghatározott értékek segítségével. A tartományt a keresési eljárás nem veszi szigorúan. Ez azt jelenti, hogy a megadott tartományon kívül is keres értékeket, de az ilyen értékeket kisebb súllyal veszi figyelembe, ez által kikényszerítve azt, hogy a paraméter érték visszakerüljön a megadott minimum és maximum értékek közé.

Lehetőség van a paraméterek és beállítások ellenőrzésére. Bár a kalibrálás futtatása előtt a program ellenőrzi, hogy minden szükséges adatsor, illetve paraméter és azok értékei megfelelőek-e, ez kézzel is elvégezhető. Ha a megfelelő próbafuttatás ki van választva, akkor a Compute menü Check Parameters pontjával ez az ellenőrzés elvégezhető.

Az optimalizálás futtatására több lehetőség is rendelkezésre áll. Az eszköztárról, ha a próbafuttatás ki van választva, Compute menüből, illetve a böngésző ablakban a próbafuttatásra jobb egér gombbal kattintva és a Compute menüpontot kiválasztva. A futtatáskor megjelenik egy folyamat ablak, amit a folyamat végén kézzel kell bezárni.

2.2.3. 6.2.2.3. Az optimalizáció eredményei

Az optimalizáló futtatás eredményeit a böngésző Results fülén tudjuk elérni az Optimisation Results csomópont kibontásával. Ha kibontjuk az ellenőrizni kívánt futtatást megkapjuk a rendelkezésre álló táblázatok és grafikonok listáját. A lista tetején található a teljes futtatásra vonatkozó információk, lent pedig a vízgyűjtő elemekre vonatkozó eredmények találhatók. A legelső táblázat az objektív függvény viselkedésének összegzése (6.4. ábra). Itt megtalálhatók a futtatás időtartományának adatai és a választott objektív függvény fajtája. A lenti táblázatban pedig a mért és a kalibrálás során reprodukált fontosabb mértékek találhatók. Itt első ránézésre láthatjuk, hogy a fő mennyiségeket tekintve mennyire volt sikeres a kalibrálás. Ezek a mennyiségek az esemény során a mérési ponton átfolyt teljes vízmennyiség, a legnagyobb vízállás, illetve a legnagyobb vízállás jelentkezésének időpontja, és a víztömeg középpontjának időpontja. Ezekből jól látszik, hogy a kalibrált adatokkal mind mennyiségileg, mind időben hogy viselkedik majd a modell.

6.4. ábra - A kalibrálás objektív függvényének főbb információi

Objective Function Results for Trial "Trial 2"

Project: sas2 Optimization Trial: Trial 2

Start of Trial: 01jan.2000, 03:00

End of Trial: 02jan.2000, 06:00

Compute Time: 07dec.2012, 17:41:32

Basin Model: sas2

Meteorologic Model: Met 1

Control Specifications: Control 1

Objective Function at Basin Element "sasbasin"

Start of Function : 01jan.2000, 03:00

End of Function : 02jan.2000, 06:00

Type : Sum of Squared Residuals

Value : 1,1

Volume Units: ☒ MM ☐ 1000 M3

Measure	Simulated	Observed	Difference	Percent Difference
Volume (MM)	15,92	15,97	-0,05	-0,32
Peak Flow (M3/S)	1,9	1,9	-0,0	-2,4
Time of Peak	01jan.2000, 14:00	01jan.2000, 14:30		
Time of Center of Mass	01jan.2000, 15:49	01jan.2000, 15:42		

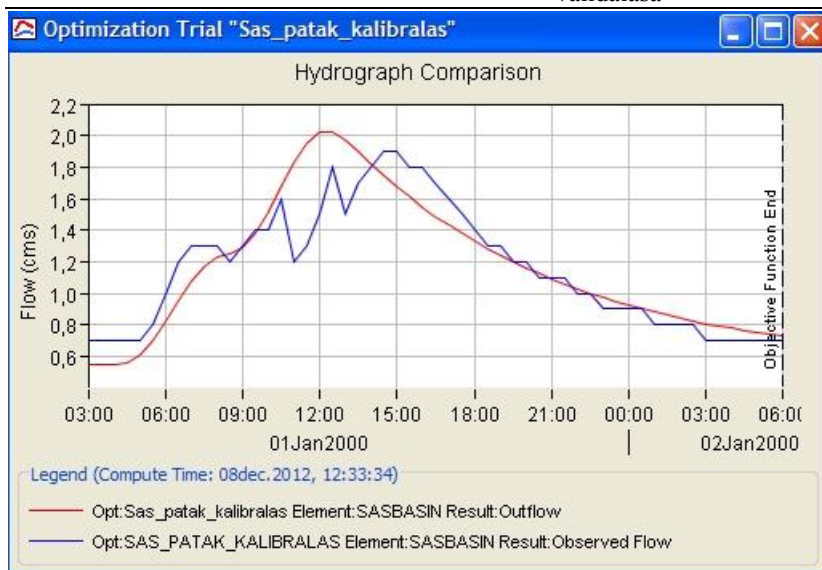
A listában következő táblázat a kalibrált paraméterek mértékegységeit, kezdeti és végső értékeit írja le (6.5. ábra). A táblázat utolsó oszlopában található adat az objektív függvény érzékenysége. Ez a százalékos érték azt jelzi, hogy az adott végső paraméter értékek 1%-os megváltozása mekkora változást idéz elő az objektív függvény értékében. Ezt a program az iterációs eljárás végén számolja ki, amikor már nem változnak a paraméterek.

6.5. ábra - Optimalizált paraméter értékek listája

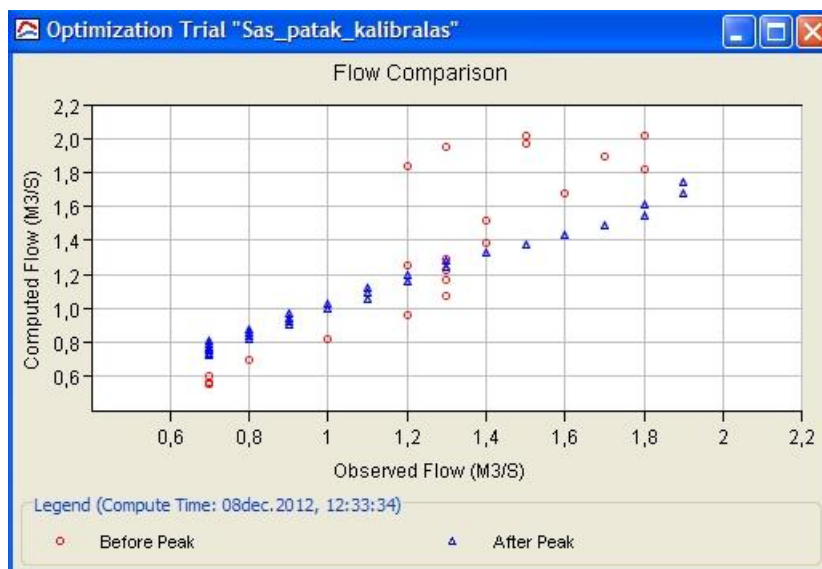
Optimized Parameter Results for Trial "Trial 2"					
Project: sas2		Optimization Trial: Trial 2			
Start of Trial:	01jan.2000, 03:00	Basin Model:	sas2		
End of Trial:	02jan.2000, 06:00	Meteorologic Model:	Met 1		
Compute Time:	07dec.2012, 15:11:33	Control Specifications:	Control 1		
Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value	Objective Function Sensitivity
sasbasin	Baseflow Initial Flow	M3/S	0.5	0.90483	0.44
sasbasin	Clark Storage Coeffic...	HR	1	4.1573	-0.04
sasbasin	Clark Time of Concen...	HR	0.5	8.0438	-0.07
sasbasin	Constant Loss Rate	MM/HR	3	3.4226	-0.14
sasbasin	Initial Loss	MM	10	12.218	0.84
sasbasin	Recession Constant		0.1	0.77729	0.08

A táblázatok mellett még négy grafikon áll a rendelkezésünkre, melyek további értékes információkkal szolgálnak a kalibrálás végeredményét illetően. Az elsőn (Hydrograp Comparison) a mérési pontunknál jelentkező mért illetve szimulált vízállás időbeli alakulását tudjuk összehasonlítani. (6.6. ábra) A következő grafikon a (Flow Comparison) a mért és a szimulált értékeket időben párba állítva hasonlítja össze (6.7. ábra). Külön jelzi a maximális vízállás előtti értékpárokat és a maximum vízállás utáni értékpárokat. Ideális esetben, amikor a számított értékek fedik a mért értékeket, egy 45°-os egyenes mentén szóródnak a pontok.

6.6. ábra - A modellezett és mért vízállás értékek időbeli alakulása



6.7. ábra - A mért és szimulált vízhozam-értékek egymás függvényében



A harmadik grafikonon (Flow Residuals) a modellezett vízhozamok hibájának alakulása elemezhető (6.8. ábra). A mért és számított vízhozamok különbségének időbeli változása mutatja, hogy mely időszakokban volt nagy a modellezés hibája, illetve hol alakult. Az értékek nagysága jelzi, a paraméterbecslés jóságát, illetve ha szisztematikus hiba van a paraméter becslés végeredményében.

6.8. ábra - A mért és modellezett vízhozam értékek különbségének időbeli alakulása



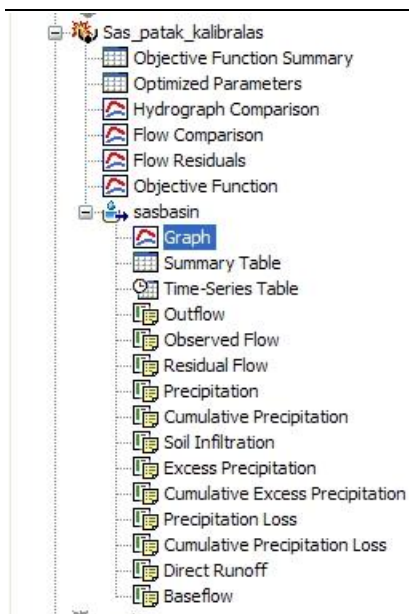
Az utolsó, közvetlenül a kalibrálás tulajdonságaihoz kapcsolódó grafikon, az objektív függvény értékének alakulása az optimalizáló futtatás során (6.9. ábra). Ezen a grafikonon a keresés során kiszámolt objektív függvény értékek ábrázolódnak. Jól látható a grafikonon, hogy milyen gyorsan, konvergált az optimum felé a keresés.

6.9. ábra - Az objektív függvény értékének alakulása az iteráció során



Az optimum kereső futtatás összefoglaló statisztikáin kívül a modellben az objektív függvény értékelési helyétől fölfelé elhelyezkedő vízgyűjtő elemekre is van lehetőségünk eredményeket vizsgálni (6.10. ábra).

6.10. ábra - Az optimalizálás eredményeinek fája



A rendelkezésre álló elemek állnak egyedi táblákból és grafikonokból, illetve az egymásra illeszthető adatokból, melyeket, többet egyszerre kijelölve, egy grafikonon, illetve táblázatban tudunk megjeleníteni. Az egyedi eredmények a vízgyűjtő elem fő mért és szimulált adatait ábrázoló grafikon ezek táblázatos adatsora, illetve egy összegző táblázat, melyben az egyes mért és modellezett elemek összegei találhatók.

2.2.4. 6.2.2.4. A kalibrált paraméterek behelyettesítése

A kalibráló teszt beállításakor a program a meglévő vízgyűjtő elemek beállított adatait veszi alapul a paraméterek kezdeti értékének beállításához. Ezek az értékek azonban külön tárolódnak, így a megváltoztatásuk nincs hatással az eredetileg beállított paraméter értékekre. A program nem biztosít lehetőséget a kalibrálás során meghatározott paraméterek automatikus, vagy gépi úton történő visszahelyettesítésére. Emiatt az paraméterek beállítását a kalibrált értékekre, a meglévő táblázat alapján, kézzel kell elvégezni.

3. 6.3. Kalibrációs teszt

Az alábbiakban egy konkrét példán keresztül lesz levezetve, hogy miként is zajlik egy modell kalibrálása a HEC-HMS lefolyás modellben.

3.1. 6.3.1. Teszt környezet

A modell a Sás patak vízgyűjtőjét tartalmazza, mely a Mecsek hegység nyugati felében Orfű és Abaliget közelében található. A patakon van egy vízhozam mérő műtárgy, ahonnan a 30 perces időbeli felbontású vízhozam adatsorok erednek. A meteorológiai bemeneti adatsort pedig egy orfűi automata csapadékmérő 10 perces mérései biztosítják. A kalibráláshoz 2008. október 17-18-ai adatsorok lesznek felhasználva. Az időablak hossza 27 óra, ami egy körülbelül 9 óra időtartamú csapadék eseményt tartalmaz az időintervallum elején. A modell egy vízgyűjtőből áll, és egy becsatlakozási pontból, ahol a mérési pontunk is van. A vízgyűjtő területe 7,1 km², és az egyszerűség kedvéért eltekintünk a növényzet és a felületi folyamatok figyelembe vételétől. Mindazonáltal szükség van a csapadék veszteség (Loss), a lefolyás (Transform) és az alapáramlás (Base Flow) paraméterek alapértékeinek beállítására.

A beállítható paraméter értékeket felhasználhatjuk egy már működő modellből, vagy a területen végzett mérések segítségével. Ily módon, ha már az iteráció elején is fizikailag korrekt paramétereket használunk nagyobb az esély arra, hogy az optimum kereső eljárás képes lesz minimalizálni az objektív függvényt.

Objektív függvénynek a négyzetes hibaösszeg lett kiválasztva és az optimalizálás a Nelder Mead módszer alapján zajlik. A tolerancia kritérium 0.1% a maximális iterációs lépésszám pedig kétszáz. Ebben a modellben beállításban összesen hét kalibrálható paraméter közül lehet választani. Ezek közül teszt során hat lett kiválasztva, amelyeknek az optimális értékére kíváncsiak vagyunk.

3.2. 6.3.2. Teszt eredmények

A kezdeti paraméterekkel a futás 69 lépés után elérte a 0.1%-os objektív függvény változási küszöbértéket így sikerült találni egy optimum beállítást a vízgyűjtő paramétereinek. A teszt összegzését a 6.11. ábra mutatja. A teljes térfogat hibája 1% viszont a csúcs vízhozamé már 6%. Ennél még jelentősebb az eltérés a csúcs vízállás időpontjában, a differencia itt mintegy 2 óra 30 perc, úgy hogy a modellben jelentkezik hamarabb. A tömegközéppont idejét sikerült 11 perc eltéréssel optimalizálni.

6.11. ábra - Az objektív függvény alakulása

Volume Units: ☒ MM ☐ 1000 M3				
Measure	Simulated	Observed	Difference	Percent Difference
Volume (MM)	16,14	15,97	0,16	1,02
Peak Flow (M3/S)	2,0	1,9	0,1	6,3
Time of Peak	01jan.2000, 12:00	01jan.2000, 14:30		
Time of Center of Mass	01jan.2000, 15:53	01jan.2000, 15:42		

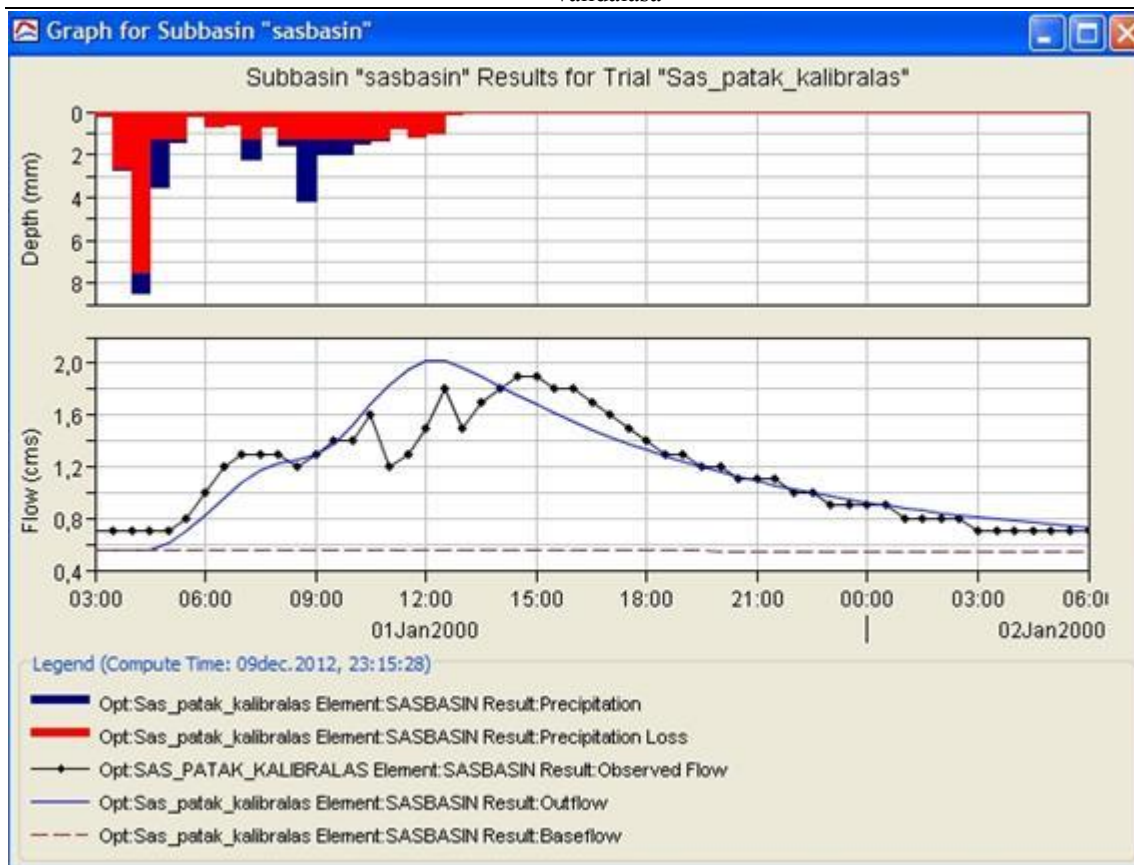
A kalibrált paraméterek táblázatát a 6.12. ábra mutatja. Itt megtekinthetők a kezdeti és a módosított értékek is. Nagy eltérést a kezdeti és végső érték között az összegyülekezési időnél találhatunk, ahol a kezdeti 1 óra 3,5 órára növekedett. A másik jelentősebb változás az állandó csapadék veszteség érétnél található, ahol a kezdeti 3 mm/óra érték 2,5 mm/óra értékre csökkent. Az objektív függvény a vízhozam csökkenési állandó és a kezdeti csapadék veszteség értékének a megváltozására a legérzékenyebb.

6.12. ábra - Az optimalizált paraméter értékek

Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value	Objective Function Sensitivity
sasbasin	Baseflow Initial Flow	M3/S	0.7	0.55099	-0.06
sasbasin	Clark Storage Coeffic...	HR	10.0	8.1808	0.06
sasbasin	Clark Time of Concen...	HR	1	3.5030	-0.09
sasbasin	Constant Loss Rate	MM/HR	3	2.5647	-0.34
sasbasin	Initial Loss	MM	10	10.342	0.61
sasbasin	Recession Constant		0.98	0.99163	0.65

A Sás patak vízgyűjtőn összegyűlt víz és a modellezett esemény közötti összehasonlítást a 6.13. ábra szemlélteti. Az ábra felső grafikonja a lehullott csapadék felszínen lefolyt és veszteségként a talajba szivárgott arányait mutatja az idő múlásával. Az alsó grafikon pedig a vízhozam időbeli alakulását szemlélteti mind mért, mind a modellezett mennyiségek ábrázolásával. A folytonos vonal a modellezett vízhozam nagyjából követi a pontvonallal jelölt mérési értékeket, azonban látszik, amit már a legelső összesítő táblázatnál is láttunk, hogy bár a maximális vízállás értéke közel azonos a mérttel, annak ideje jelentős sietést mutat. A maximális vízállás után a két görbe lefutása fokozatosan egymásra simul.

6.13. ábra - A kalibrált vízgyűjtő mért és szimulált vízhozam és csapadék grafikonja



3.3. 6.3.3. A teszt eredményeinek ellenőrzése

Ahhoz, hogy megbizonyosodhassunk az optimalizálás megbízhatóságáról, illetve értékelhessük azt, a kalibrált paraméterekkel a kalibrálótól független adatsor segítségével egy validáló futtatás végrehajtása szükséges.

A kalibrálás ellenőrzéséhez 2008. szeptember 25-26-án regisztrált csapadék és vízhozam mérési adatsor szolgált alapul. Ez egy kisebb csapadékösszeggel járó esemény volt, mint a kalibráláshoz használt adatsor.

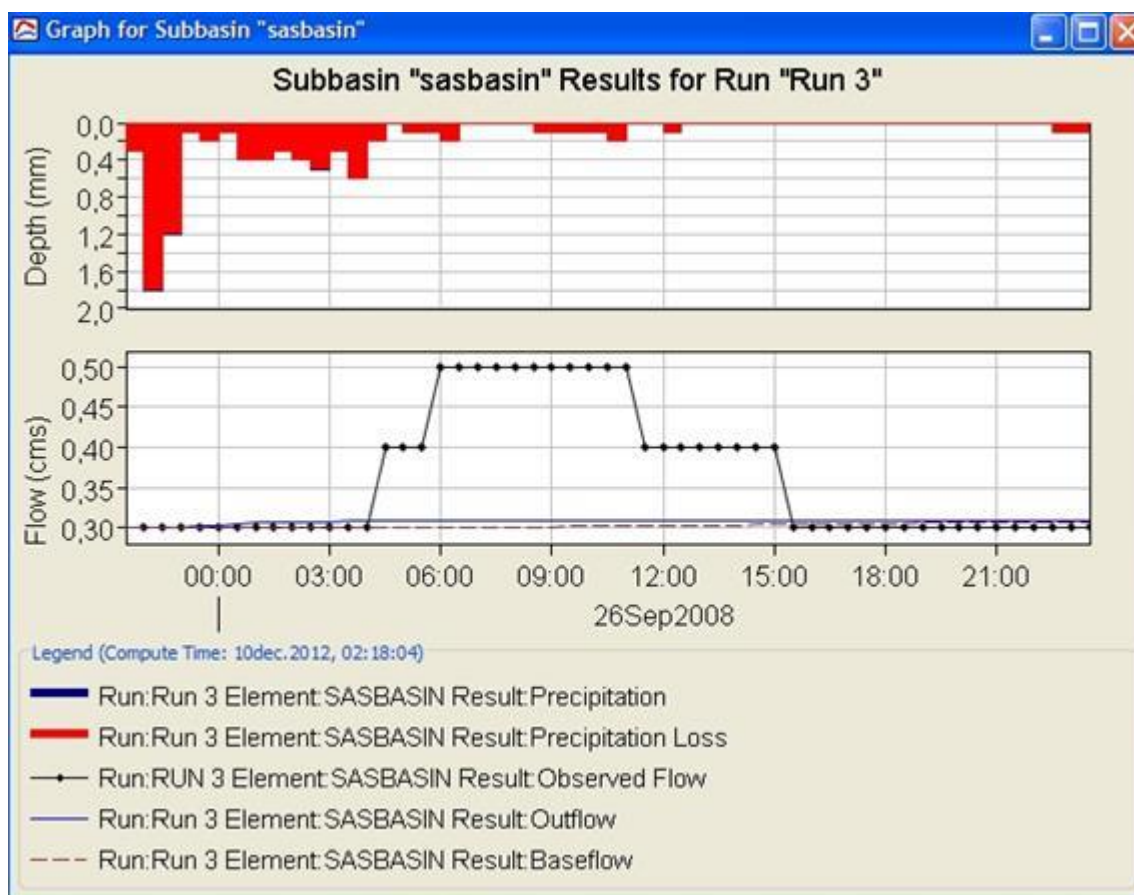
4. 6.4. Eredmények

Az összesített eredmények a 6.14. ábrán láthatók. A számított eredmények listájából rögtön látszik, hogy a teljes lehullott csapadék és a talajba elszivárgott mennyiség gyakorlatilag egyenlők. Ez azt jelenti, hogy a modell szerint a vízhozamban nem is várható növekedés, ami a 6.15. ábra grafikonján is jól látszik. Ennek ellenére a valóságban még növekedett a vízhozam. Ezek alapján több kérdést is meg kell vizsgálni. Egyrészt utána kell nézni, hogy a mérési eredmények mennyire pontosak, illetve hogy a csapadék adatsor mennyire reprezentatív. Ha ezekről meggyőződünk, akkor lehet a modell kalibrálás eredményeit felülvizsgálni, és új kalibrációba kezdeni, ami egy ilyen kis csapadéku esemény esetén is megfelelő eredménnyel jár.

6.14. ábra - Az ellenőrző futtatás eredményei



6.15. ábra - Az ellenőrző futtatás eredmény grafikonja



5. Ellenőrző kérdések

1. Melyek a lépései a modell kalibrálásának?
2. Milyen adatok szükségesek a kalibrálás végrehajtásához
3. Az objektív függvény tulajdonságainak meghatározása milyen lehetőségeket kínál a szimulációsprogram?
4. Az optimalizáció eredményeinek értékelése hogyan történhet?

5. Ismertesse egy konkrét példán keresztül a munkafolyamat gyakorlati lépéseit és értékelje az eredményt?

6. Irodalomjegyzék

Duan, Q., Gupta, V.K. and Sorooshian, S., 1993. A shuffled complex evolution approach for effective and efficient optimization. J. Optimization Theory Appl., 76(3): 501-521.

Duan et. al. 1994, Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, Journal of Hydrology 158 (1994) 265-284

Hapuarachi H. A. P., Li Zhijia, Wang Shouhui 2001, Application of SCE-UA Method for calibrating the Xinanjiang Watershed Model. Journal of Lake Sciences, 2001 Vol 12, Mo. 4., p 304

Nelder, J.A. and Mead, R., 1965. A Simplex method for function minimization. Comput. J., 7: 308-313.

Hoshin Vijai Gupta, Soroosh Sorooshian, Patrice Ogou Yapo 1998, Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information. WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 34, NO. 4, PAGES 751-763, APRIL 1998

Patrice Ogou Yapo, Hoshin Vijai Gupta, Soroosh Sorooshian 1998, Multi-objective global optimization for hydrologic models. Journal of Hydrology 204 (1998) 83-97

HEC-HMS 3.5 User Manual

7. fejezet - TáJVáltozási, tájmetriai modellek

A fejezet céljai: A fejezetben áttekintjük a tájváltozás vizsgálatának a főbb módszereit. Megismerkedünk a tájmetriai modellekkel és példákon keresztül a főbb indexekkel.

Szükséges ismeretek, fogalmak: kereszttabuláció, regresszió, indexek

1. 7.1. A tájváltozások vizsgálatának módszertani kérdései

A táji folyamatok modellezése a legkomplexebb geoinformatikai feladatok közé tartozik, mivel nemcsak az élettelen táji elemeket, hanem az élőlényeket (beleértve a növényeket és az állatokat), valamint az emberi zavaró hatásokat is be kell(ene) tudnunk építeni a modellekbe. A modellalkotás fő kérdése az, hogy mennyire egyszerűsítjük le a tájat alkotó elemeket és milyen léptékben dolgozunk. Az egyes feladatokra különböző léptékű és felbontású térképekre van szükségünk. Ha a kérdés az, hogy a Kárpát-medence gyepterületei mennyit változtak az elmúlt évtizedben, elegendő lehet az áttekintő képet adó kisebb lépték (pl. $M=1:1\,000\,000$), illetve az 1 km-es felbontású MODIS felvételek alkalmazása (7.1. és 7.2. ábrák). Ha azonban egy 10 km²-es területen szeretnénk mindezt kimutatni, akkor nagy léptékre és felbontásra van szükség ($M=1:10\,000$, 5 m). Elvi lehetőségként fennáll a nagy terület és nagy felbontás együttes alkalmazása is, de ez igen hely- és számításgényes a számítástechnika jelen szintjén (illetve sok esetben az alaptérképek, légifotók, műholdfelvételek beszerzési költsége szab gátat). Utóbbi megoldáshoz sorolhatók például a GoogleEarth-ön megjelenő GeoEye felvételek, melyek ebben a formában nem letölthetők, de a felhő alapú tárolás és szoftveres integráció (pl. a Quantum GIS-ben az OpenLayers plugin vagy az ArcGIS-ben az ArcBruTile bővítmény) miatt nagyon jól használható lehetőség. A 7.3. és 7.4. ábrákon ugyanaz a terület látható, mint a MODIS kivágaton, illetve az 7.5. ábrán már egy olyan részlet, ahol a fák lombkoronája is elkülöníthető. és számítógépes modellezést alkalmaztak.

7.1. ábra - 1 km felbontású MODIS felvétel részlet Budapest és a Tisza-tó térségéből



7.2. ábra - 1 km felbontású MODIS felvétel részlet a Tisza-tóról



7.3. ábra - Nagyfelbontású GeoEye felvétel Budapest és a Tisza-tó térségéből (GoogleEarth)



7.4. ábra - Nagyfelbontású GeoEye felvétel Budapest és a Tisza-tó térségéből (GoogleEarth)



7.5. ábra - Nagyfelbontású GeoEye felvétel a Tisza-tó mellől (Kisköre)



A táji folyamatok leírásának és megértésének a tudománya a tájökológia, mely nem túl régen született. Az első ilyen jellegű munka Trolltől 1939-ből származik, mely talaj- és növényföldrajzi témában született. A kezdeti nehézségek után tisztázódott, hogy mind a geográfiától, mind az ökológiától eltérőek a céljai és kialakult saját kutatási módszertana is.

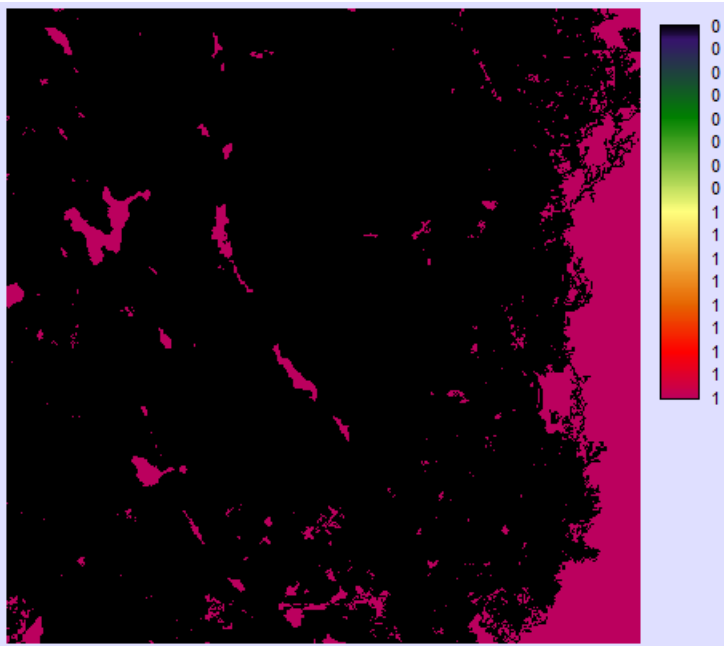
A vizsgálatok tárgya rendszerint egy felszínborítottsági térkép (ritkább esetekben nagy felbontás esetén társulás térkép), mely terepi bejárás, légifelvételek interpretációja, és/vagy műholdfelvételek elemzése révén jön létre (pl. nem ellenőrzött, vagy ellenőrzött osztályba sorolás révén). Számos térkép ingyenesen le is tölthető az internetről (pl. CLC2000, CLC2006), vagy megvásárolható (pl. CLC50, topográfiai térképek területhasználati fedvénye).

A tájökológiai vizsgálatok egyik fő kérdése a tájhasználat változásának az elemzése, a változás trendjének a kiderítése. A térképek összehasonlítására számos lehetőségünk van, melyeket a következőkben részletezünk.

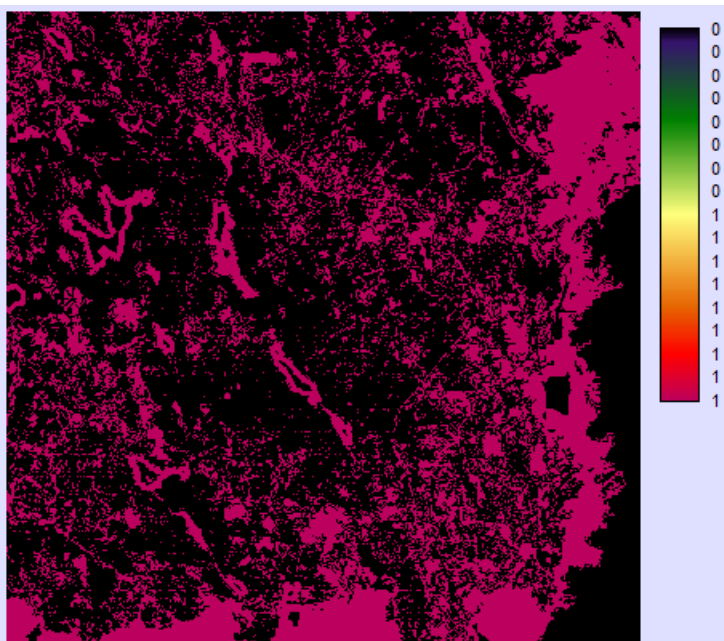
2. 7.2. Tájváltozás vizsgálata logikai rétegekkel (2 kategória esetén)

A felszínborítottsági, tájhasználati kategóriákat külön logikai (Boole) rétegekként kell elmenteni minden időpontban, majd a térképi algebra lehetőségeit kihasználva, az azonos kategóriába tartozó rétegek közötti különbségeket kereszttablációval tudjuk megvizsgálni. A művelet során a 2 réteg (7.6. és 7.7. ábra) között azt vizsgáljuk meg, hogy a két bináris változó mennyire hasonlít egymásra (statisztikai értelemben ezt a műveletet metrikus adatok esetében korrelációnak, jelen esetben a kategorizált változókkal asszociációnak nevezzük). Az eredmény lehet egy kép, ahol 4 színnel jelennek meg a lehetséges kombinációk: 0|0; 0|1; 1|0; 1|1 (7.8. ábra), ahol az első szám az első, a második szám pedig a következő időponthoz tartozó réteget jelenti, vagy egy táblázat a statisztikai paraméterekkel.

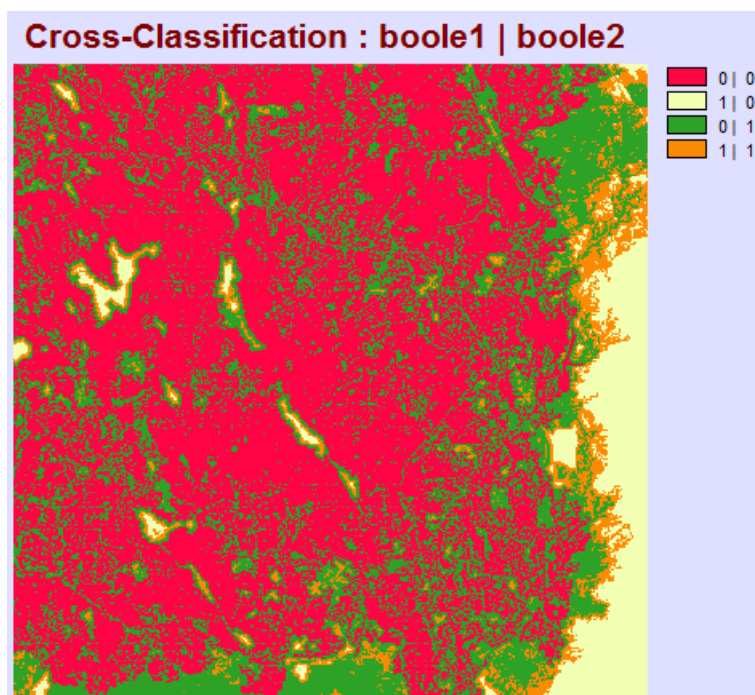
7.6. ábra - Az első időponthoz tartozó réteg



7.7. ábra - A második képhez tartozó réteg



7.8. ábra - A kereszttabuláció eredménye



A Cramer's V és KIA (overall Kappa Index of Agreement) értékek számszerűen mutatják a két kategória egyezését, vagy éppen különbségét (Acock és Stavig, 1979; Cohen, 1960). A Cramers's V hasonlóan a sokak által használt Pearson-féle korrelációs együtthatóhoz, a 0-hoz közel a kapcsolat (egyezés) hiányát, az 1-et közelítve pedig az egyre teljesebb egyezést mutatja. A fenti példa esetében a 0,06 gyenge kapcsolatot mutat. A KIA a képek közötti egyezés esetlegességét mutatja, esetünkben 0.05, azaz mindössze 5%-kal jobb az egyezés, mintha csak esetleges lenne.

3. 7.3. Tájváltozás vizsgálat felszínborítás rétegek között (több kategória esetén)

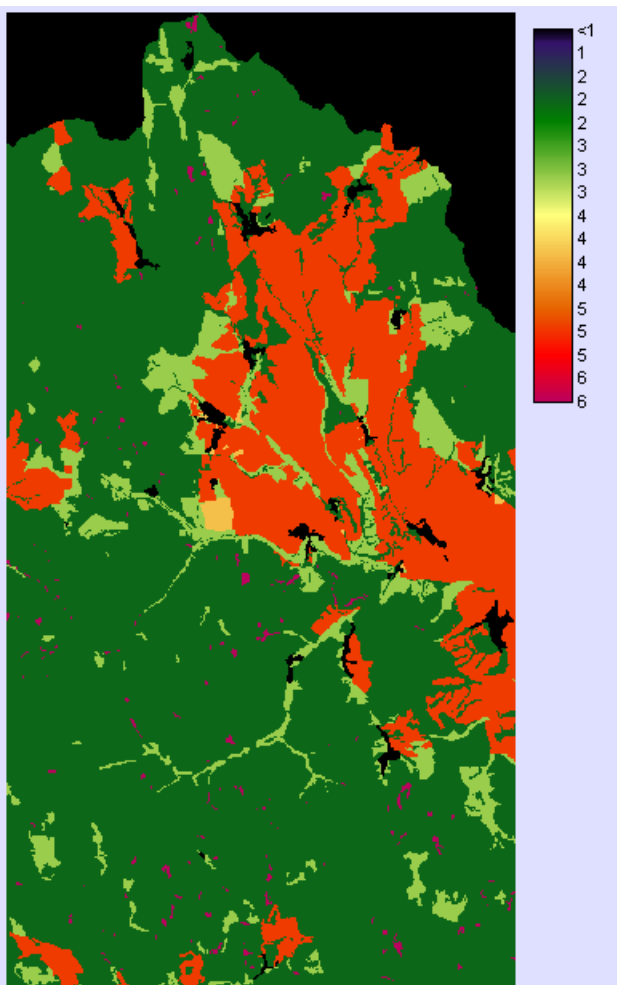
További lehetőség, hogy meghagyjuk a rétegek minden kategóriáját és így végezzük el a változások vizsgálatát, szintén kereszttabulációval. Nem előírás, de ajánlott, hogy mindkét rétegen egyezzenek meg a tájhasználati kategóriák (persze, ha a két időpont között valamelyik kategória megszűnt, vagy belépett helyette egy új, az természetesen indokolható különbség; amit kerülni kell, az a kategóriák eltérő kódolása és a kategóriák felesleges bontása). A Cramer's V és a KIA mutatók ez esetben csak egy általános képet adnak a változásokról, nem látunk a kategóriák mögé. Ehhez szükségünk van a kereszttabulációs táblázatra, melyben pixelenként, vagy százalékos formában kategóriánként láthatjuk, hogy az adott folt korábbi helyén a későbbi időpontban milyen új felszínborítási kategóriák jelentek meg (7.9.ábra). Mindemellett a KIA kategóriánként is kiszámítható. Példánkban a Zempléni-hegység területéről származó két felszínborítottsági térképet hasonlítottunk össze (7.10. – 7.12. ábrák).

7.9. ábra - A Felső-Hegyköz (Zempléni-hegység) tájváltozása 1951 és 2005 között, kereszttabuláció (1952 [oszlop] és 2005 [sor] térképei között [pixelszám])

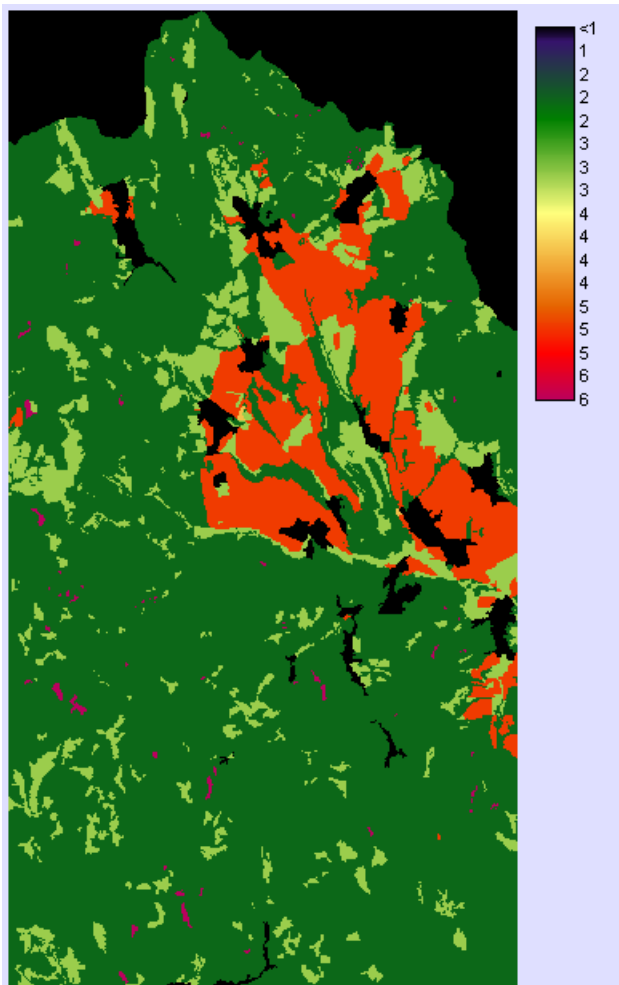
	település	erdő	gyep	gyümölcsös	szántó	tarvágás	össz	referencia réteg: 2005 KIA	referencia réteg: 1952 KIA
település	27830	12905	8217	980	32896	48	82876	0,327	0,8659
erdő	247	1587174	125598	272	89184	13582	1816057	0,5785	0,7407
gyep	153	86666	63932	223	118196	1625	270795	0,1639	0,2226
gyümölcsös	0	1	19	292	174	0	486	0,5997	0,0433
szántó	134	4404	7577	4944	231536	78	248673	0,9145	0,4321
tarvágás	0	7035	1109	0	319	331	8794	0,0314	0,0176
össz	28364	1698199	206457	6711	472306	15664	2427701		

Cramer's V: 0,4248; Overall Kappa: 0,5222

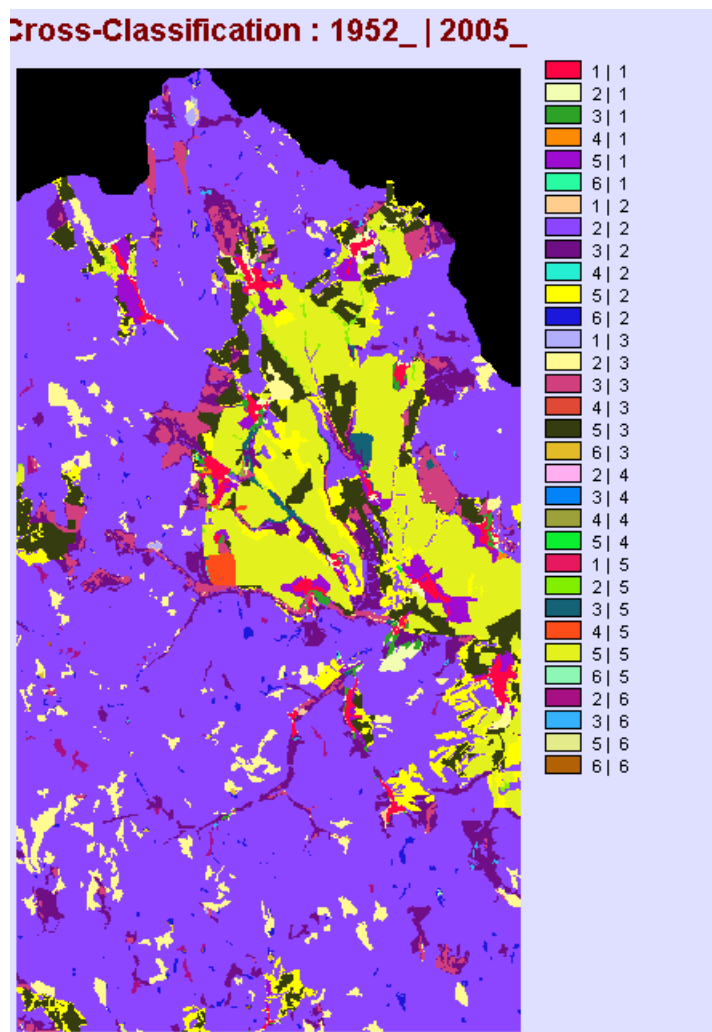
7.10. ábra - A Felső-Hegyköz felszínborítottsága 1952-ben (1: település, 2: erdő, 3: gyep, 4: gyümölcsös, 5: szántó, 6: tarvágás)



7.11. ábra - A Felső-Hegyköz felszínborítottsága 2005-ben (1: település, 2: erdő, 3: gyep, 4: gyümölcsös, 5: szántó, 6: tarvágás)



7.12. ábra - A Felső-Hegyköz 1952-es és 2005-ös felszínborítottsági térképének kereszttabulációja



A 7.9. ábrán kitűnik, hogy a két időpont között végbement változások jelentősek, az egyezés mind a Cramer's V, mind a KIA alapján kb. 50%-os. A változások pedig százalékosan kifejezhetők mind abban az értelemben, hogy „mi volt és mi lett?” (oszlopokban), illetve „miből lett azzá, ami most van azon a helyen?” (sorokban). Pl. A települések 27830 pixelen mindkét időpontban megegyeznek, a növekedésnek legnagyobb részben szántó ($32896/82876=0,39$ azaz 39%) és erdőterületek ($12905/82876=0,15$ azaz 15%) estek áldozatul. Ez a változások kategóriánkénti megítélésében, értékelésében igen hasznos eszköz. Ne feledjük azonban, hogy a kis különbségek abból is adódhatnak, hogy a két térkép nem pontosan fedi egymást (a georeferálás hibáiból adódóan).

4. 7.4. Tájváltozás vizsgálata fuzzy alapokon

A georeferálást voltaképpen mindig csak valamekkora hibával tudjuk elvégezni (minimálisra szorítva az RMS hibát), viszont ez azt jelenti, hogy a térképeink sokszor nem fedik egymást pontosan. Ez – mint ahogyan az előző módszernél láttuk – torzíthatja az eredményeinket. Ezt küszöböli ki a Fuzzy Kappa. Részleteiben lásd a fuzzy halmazokról szóló 8. fejezetben.

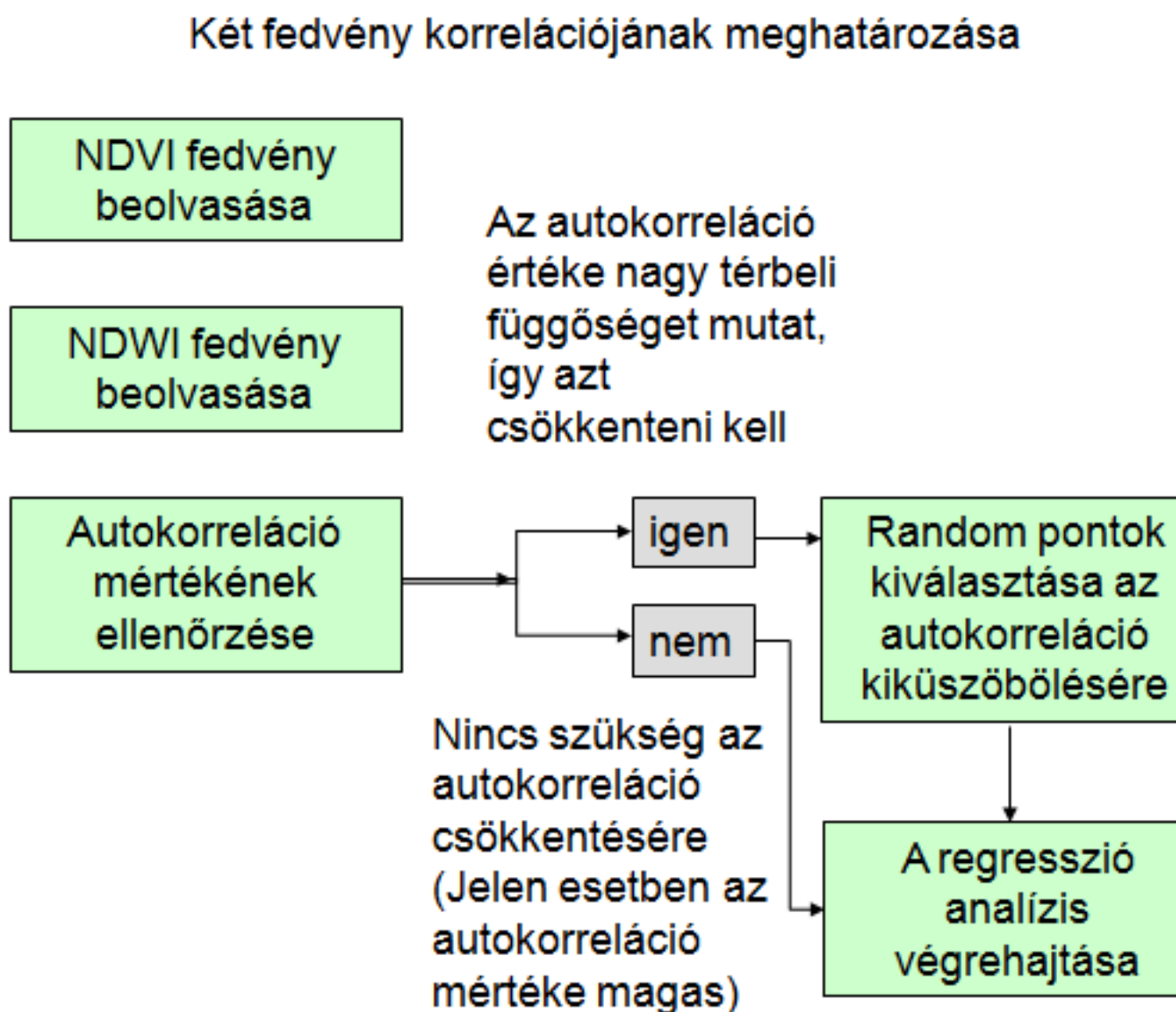
5. 7.5. Térképek közötti korreláció vizsgálata

Térképeket nemcsak kategóriánként (nominális adatokként) hasonlíthatunk össze, sokszor metrikus adatok jelentik a pixelekhez tartozó értékeket. Ilyenkor a képek közötti korrelációt számítjuk ki. A Pearson-féle korrelációs koefficiens, illetve regresszió alkalmazásakor a determinációs együtthatót határozzuk meg. A két vizsgálatba vonható változó lehet pl. 2 különböző időpontból származó NDVI fedvény, ahol a két térkép hasonlóságát kapjuk meg (minél nagyobb a korreláció, annál jobban hasonlítanak), de lehet pl. az agyagtartalom és a kémhatás fedvénye is, ahol a két fedvény kapcsolatát határozzuk meg (regresszió, az R^2 megadja, hogy az agyagtartalom hány százalékot magyaráz a kémhatás variáciájából).

A regresszió alkalmazásának fontos előfeltétele, hogy biztosítsuk az adatok függetlenségét, mivel sokszor interpolált térképekkel dolgozunk, ahol magas az autokorreláció (térképek esetében a térbeli függőség). Mivel raszteres fedvényekről van szó, az elemszám kellően magas marad akkor is, ha a pixeleknek csak 10-20%-át használjuk fel egy random mintavételezés után. Így mivel nem egymás melletti pixelekből áll össze a adatmátrixunk, a függetlenség feltételének is eleget teszünk.

Példánkban a Tisza-tó térségére kiszámítottunk két széles körben használt spektrális indexet, az NDVI-t (Normalized Difference Vegetation Index) és az NDWI-t (Normalized Difference Water Index) és megnézzük, hogy értékeik korrelációs kapcsolatban állnak-e egymással (7.13. ábra).

7.13. ábra - Az NDVI és NDWI kapcsolatának vizsgálata raszteres geoinformatikai környezetben



6. 7.6. Tájmetriai modellek

A vizsgálatok egy külön csoportját alkotják a tájmetriai indexek. Az indexek elméleti alapját McArthur és Wilson (1967) szigetbiogeográfiai megfigyelései adják. Az elmélet a szigetbiográfia elnevezést onnan kapta, hogy a szigetek fajdinamikájával kapcsolatos megfigyeléseket ültették át a szárazföldi folt-folyosó-mátrix megközelítésbe. A tájban nem lineáris elemként megjelenő környezeti eltérő viszonylag homogén egységeket

(felszínborítottsági kategóriákat, vagy részletesebb vizsgálatok alapján társulásokat) foltként; a foltok közötti fajok áramlását biztosító hosszan elnyúló (lineáris) egységeket folyosóként, a foltok beágyazó felületét (egyes esetekben legösszefüggőbb, vagy legelterjedtebb elemét) pedig mátrixként értelmezzük. Főbb megállapításaik a következők:

-a mátrix a tengerhez képest átjárhatóbb (a fajoknak nem kell repülni, vagy úszni tudniuk a foltok közötti távolságok áthidalásához);

-a nagy foltok fajgazdagsága nagyobb, mint a kisebb foltoké;

-a nagy foltokhoz (mint kontinenshez) közeli foltok fajgazdagsága nagyobb, mint a távolabbi foltoké (szigeteké), az előbbi nagyobb betelepülési rátája miatt;

-a foltok mérete és a fajok száma közötti az összefüggés csak egy bizonyos méretig lineáris, utána a fajnövekedés mérsékeltebb – a tájfoltokra vonatkoztatva ennek a megfigyelésnek a megfordítását kell alkalmazni: az élőhely-vesztés során létezik egy olyan kritikus foltméret, ami alatt a fajok kihalása felgyorsul (Forman, 1995; Kerényi, 2007).

A mérőszámok mára túlléptek azon, hogy csak az egyedi foltokra vonatkozó tulajdonságokat jellemezzék, de természetesen ezek továbbra is fontos részét képezik a tájanalízisnek. A tájmetriai indexeket 3 szinten definiálhatjuk: (1) a hagyományos folt szinten, (2) osztály szinten és (3) táji szinten. Folt szinten az indexek az egyes foltok területét, kerületét, terület/kerület arányát stb. adják meg. Az osztály szintű mutatók az ugyanabba a kategóriába tartozó foltok aggregált jellemzőit adják meg egyszerű, vagy súlyozott átlagként, vagy olyan tulajdonságaikat is figyelembe veszik, amikkel a térbeli elhelyezkedésükre (területi eloszlás, közelség, konnektivitás) tudunk következtetni. Táji szinten az indexeket a táj összes foltjának a tulajdonságai alapján számítjuk (Forman és Godron, 1995; McGarigal és Marks, 2002).

Az 1980-as évek során igen nagy mennyiségben fejlesztettek ki tájmetriai indexeket. Használatukat nagymértékben megkönnyítette a GIS szoftverek megjelenése és elterjedése, valamint az egyre olcsóbban és nem utolsósorban könnyebben hozzáférhető légifotók és műholdfelvételek alkalmazása.

Az egyes indexek között nagy az átfedés, erősen korrelálnak egymással. Az átfedések kiszűrésére több próbálkozás is történt, melyek közül a legismertebbet, Riitter és munkatársai 1995-ben írt munkáját kell kiemelni, melyben 85 térképből számított 55 tájmetriai mutatót dolgoztak fel, melyek számát a szoros keresztkorrelációk és a normalitás feltételének megsértése miatt 26-ra csökkentette. A vizsgálat során a 26 metrikát 6 főkomponensben egyesítették: foltkompaktság; folttextúra; foltalak; attribútum osztályok száma és a nagy foltok terület/terület fraktáldimenziója. Hozzá kell tenni azt is, hogy a szerzők maguk is kétségbe vonják az eredmények jelentőségét, mivel csak egyetlen vizsgálati helyszín azonosítását tették lehetővé (ami ráadásul egy kiugró értéket képviselt). Általánosan megfogalmazhatjuk, hogy nem tudjuk definiálni azoknak a mutatóknak a teljes körét, amik a tájanalízisben bárhol általánosan felhasználhatók, mert a mutatók fentebb említett korrelációja nem állandó, így a különböző statisztikai feldolgozások sem ugyanazt az eredményt adják.

A tájmetriai kutatások rendszerint a foltokat teszik a vizsgálatok tárgyává, mivel ezek geometriai tulajdonságai (terület, kerület, alak stb.), valamint relatív térbeli elhelyezkedése (pl. foltok közelsége, konnektivitás) geoinformatikai módszerekkel matematikailag egyszerűen számítható.

A tájmetriai feldolgozások során el kell fogadnunk néhány olyan korlátozó tényezőt az ökológiai-tájökológiai alaptételekkel kapcsolatban, ami miatt az eredmények interpretációja kissé eltérő. Az okok a számítástechnikai feldolgozás kötöttségével, pontosabban a módszerek egyes esetekben kevésbé kidolgozott jellegével magyarázhatók.

1.A feldolgozás során nem teszünk különbséget a lineáris és nem lineáris tájelemek között, minden környezetétől elütő egységet foltként értelmezzük.

2.A foltok rendszerint a mátrix-szal határosak, azonban sokszor a mátrix is foltokból áll, így a feldolgozás során foltként számolunk vele, mivel a mátrix és a folt között geometriai és topológiai értelemben nincs különbség (és az előző pontban megfogalmazottak miatt ide soroljuk a folyosókat is). Két dolgot tehetünk: (1) elfogadjuk ezt a tényt és a foltként értékeljük a mátrixot is; (2) a mátrixot kihagyjuk a számításból.

3.A szoftverek döntő hányadában nincs beépítve az antropogén gátak figyelembe vételének a lehetősége. A foltok közötti legrövidebb távolságok helyett több szoftverrel is van lehetőségünk „ökológiai” távolságokkal kalkulálni (azaz figyelembe venni a mátrix heterogenitását, illetve az ökológiai gátakat). A számításokat rendszerint

legkisebb távolságokkal végezzük, ezért a fragmentációra, izoláltságra és konnektivitásra tett megállapítások jó része az antropogén eredetű ökológiai gátaktól mentes természeti tájra vonatkoznak. Így valójában, amikor a fragmentációról esik szó, a természeti tájak mozaikosságát kell alatta érteni. Az eredmények interpretálása során pedig ehhez kell tartani magunkat: ha a fogalmi háttérrel tisztázuk, akkor a felhasználó is tudni fogja, hogy a megállapítások művi elemekkel „terhelt”, vagy anélküli tájra vonatkoznak.

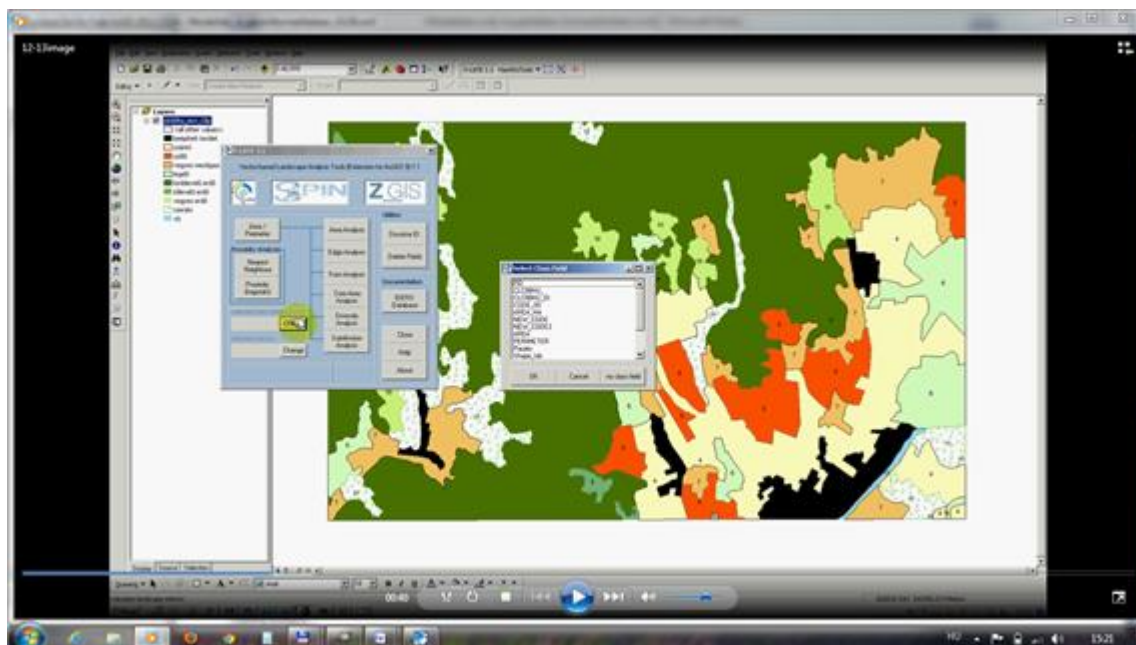
4.A tájökológiában vagy a mátrix, vagy a folyosók konnektivitásáról beszélhetünk (Forman, 1995), a szoftveres tájmetriai feldolgozás során azonban éppen ezeket nem tudjuk figyelembe venni. Létezik külön alkalmazás a folyosók konnektivitásának a mérésére is, most azonban csak a foltokból összeálló ökológiai folyosóhálózat (lépegető kövek, stepping stones) elméletére épül. A konnektivitás a fajok lehetőségét jelenti a tájelemek elérésére (Báldi, 1998), azaz nem követünk el nagy hibát, ha fajonként definiáljuk azt a minimális távolságot, amit egy faj biztosan megtesz azért, hogy eljuthasson a következő foltig és ha a foltok ezen a távolságon belül vannak, akkor beszélünk azok összekötöttségéről, összekapcsoltságáról (ez voltaképpen csak nevezéktani probléma, mivel a nem folytonos folyosók esetében is át kell hidalniuk a fajoknak a távolságot a továbbhaladáshoz).

A mérőszámok sokfélesége miatt most csak néhány példát mutatunk be. Bővebben lásd Szabó (2009) munkájában, ahol módszertani szempontból kerültek jellemzésre az indexek.

A kiindulási alapunk egy raszteres, vagy vektoros fedvény, mely a felszínborítási kategóriákat tartalmazza. A feldolgozás folt szinten kezdődik, mivel számos index osztály és táj szinten a folt szinten mért értékek számtani, vagy súlyozott átlagából kerül kiszámításra.

Példánkban egy zempléni tájrészlet tájmetriai mutatóit számítjuk ki a CLC2000 adatbázis kivágatán. A számításához az ArcGIS9 szoftverkörnyezetben futó vLATE bővítményt használjuk. A bővítmény használatához be kell állítanunk a fedvény vetületét, mely mindenképpen méter alapú koordinátarendszer kell, hogy legyen (esetünkben HD1972 EOVS). Ezt követően futtatjuk a vLATE bővítményt, melynek egy olyan oszlopra van szüksége a táblázatban, ami megadja a felszínborítási kategóriákat (newcode2). Az eredeti CLC kategóriákat az egyszerűsítés miatt összevontuk és a számításokat ezekre végeztük el. Számítsuk ki a foltok területét, kerületét, valamint az alak jellemzőket. A munka mentét lásd a 7.14. videóban.

7.14. ábra - Egy zempléni tájrészlet tájmetriai mutatóinak kiszámítása. A vLATE bővítmény használatának folyamata



Az eredmények alapján ki tudjuk értékelni az adott tájrészlet foltjainak tulajdonságait. A foltméret (AREA) kérdése egyszerű: minél nagyobb foltról van szó, annál nagyobb a fajgazdagsága és mivel ezen foltoknak a belső zónája (magterület, CORE AREA) is nagy, az értékes, szűk ökológiai tűréstartományú fajok is meg tudnak telepedni. A foltalak (SHAPE, FRAC) a kontinensek tagoltságához hasonlítható, de értékelésénél a tagolatlan határvonalat tekintjük kívánatosnak: a megnyúlt, sok félszigetszerű kiágazással tagolt foltok

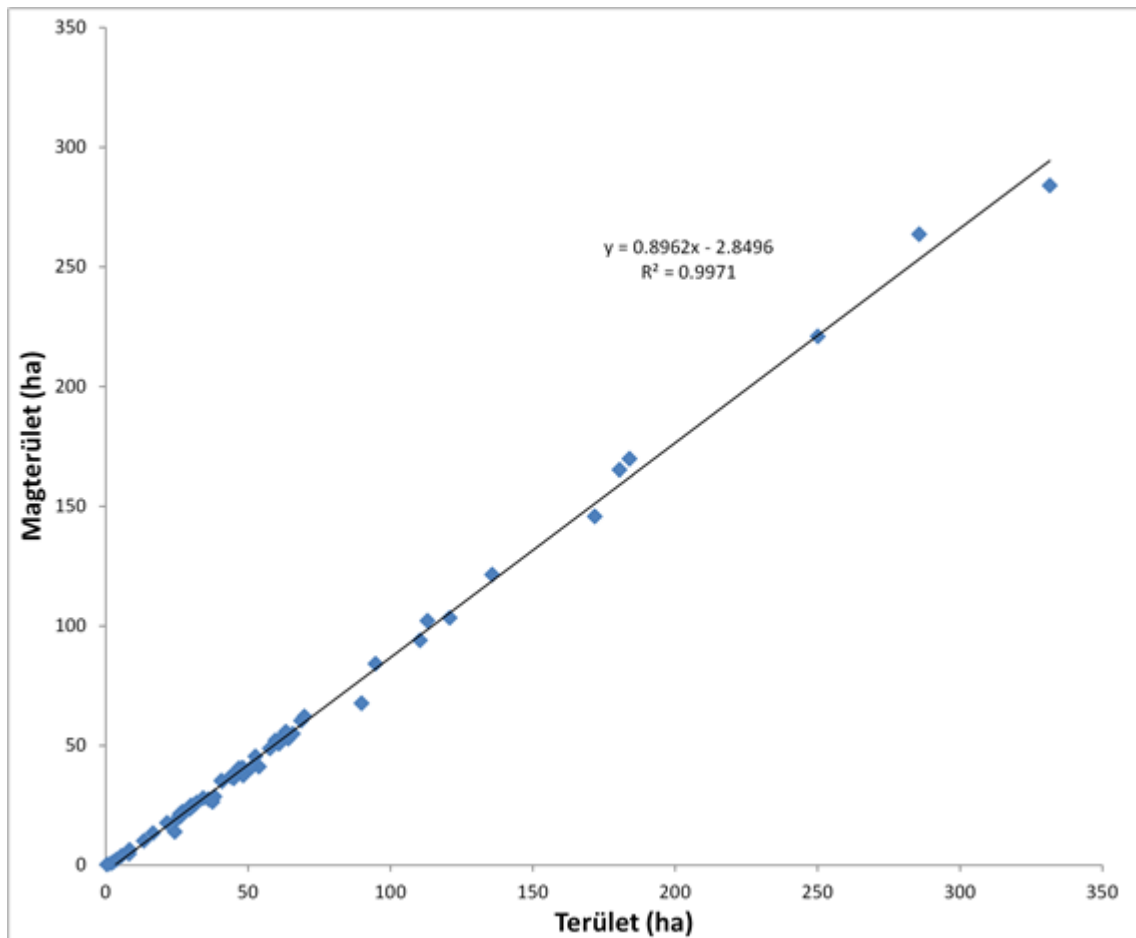
fajgazdagsága a csökkenő belső terület miatt kisebb, egyes esetekben akár a belső zóna is teljesen hiányozhat (7.15. ábra). Ezek a foltok általában sérülékenyebbek is. (Itt jegyezzük meg, hogy a tájmetriai módszerek egy részénél nem ajánlott a térképről digitalizált fedvényeket elemezni, mivel a térképeken minden objektum körvonala generalizált, így a kerület, alak stb. nem a valós képet mutatja. A térképek célja az ábrázolt terület objektumainak a bemutatása, melyek generalizáltak és nem a valós képet adják vissza, hanem annak csak egy egyszerűsített változatát. Ha számunkra fontos a foltok alakja, akkor helyesebb légifotókat, műholdfelvételeket alkalmazni.)

7.15. ábra - Szegély és magterület egy folton belül

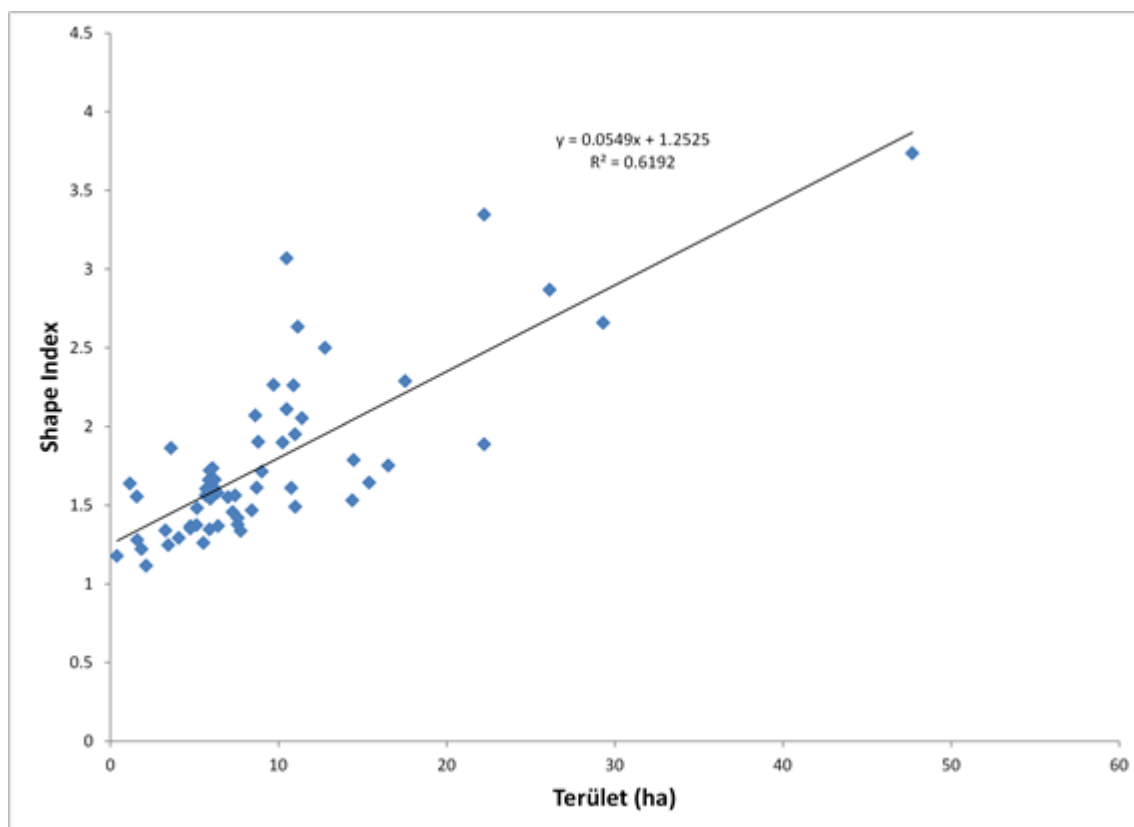


A kiértékeléshez egyszerű pontfelhő diagramot és lineáris regressziót használtunk. Eszerint mintaterületünkön igaz a korábbiakban feltételezett összefüggés a foltméret növekedése és a magterület növekedése között (a számítás során 30 m-es szegélyzónával kalkuláltunk). A kapcsolat igen szoros, a determinációs együttható (R^2) értéke 0.99 (7.16. ábra). Esetünkben az is igaz, hogy a foltok mérete és alakja szintén pozitív korrelációs kapcsolatban van: minél nagyobb egy folt mérete, annál komplexebb a formája, vagyis a kisebb foltok (ez esetben legalábbis) kompaktabbak. A foltméret 69%-ban magyarázza az alaki mutató értékeinek a variációját (7.17. ábra).

7.16. ábra - A terület és magterület összefüggése



7.17. ábra - A terület-magterület különbségének és az alaki index (Shape Index) összefüggése



Az osztály szintű mutatók alkalmasak a táji mintázatok vizsgálatára. A fragmentáció, a foltok elhelyezkedése egymáshoz képest, valamint konnektivitásuk az ökológiai, tájökológiai kutatások egyik kulcskérdése. A foltok fragmentációját szintén a vLATE bővítménnyel határoztuk meg. Ezen mutatókat osztály szinten értelmezzük, mivel ez esetben a célunk az egyes felszínborítási kategóriák konnektivitási és fragmentáltsági tulajdonságainak az értékelése. A bővítmény a Jaeger (2000) által kidolgozott fragmentációs indexeket és a foltok számát számítja ki. Jaeger felosztottsági (subdivision) mutatóknak hívja összefoglaló néven az általa kifejlesztett indexeket (MESH, SPLIT és DIVISION), melyek abból indulnak ki, hogy két véletlenszerűen elhelyezkedő állat helyzetének valószínűsége meghatározható arra nézve, hogy ugyanabban a tájfoltban legyen a vizsgálati területen, ami pedig a táj felosztottságának a függvénye.

-A DIVISION index azt adja meg, hogy mekkora a valószínűsége annak, hogy a vizsgálati területen véletlenszerűen elhelyezkedő két állat NEM ugyanazon a foltban található meg.

-A SPLIT (Splitting Index) azt adja meg, hogy hány részletre kell vágni a tájat ahhoz, hogy a fenti valószínűség állandó maradjon.

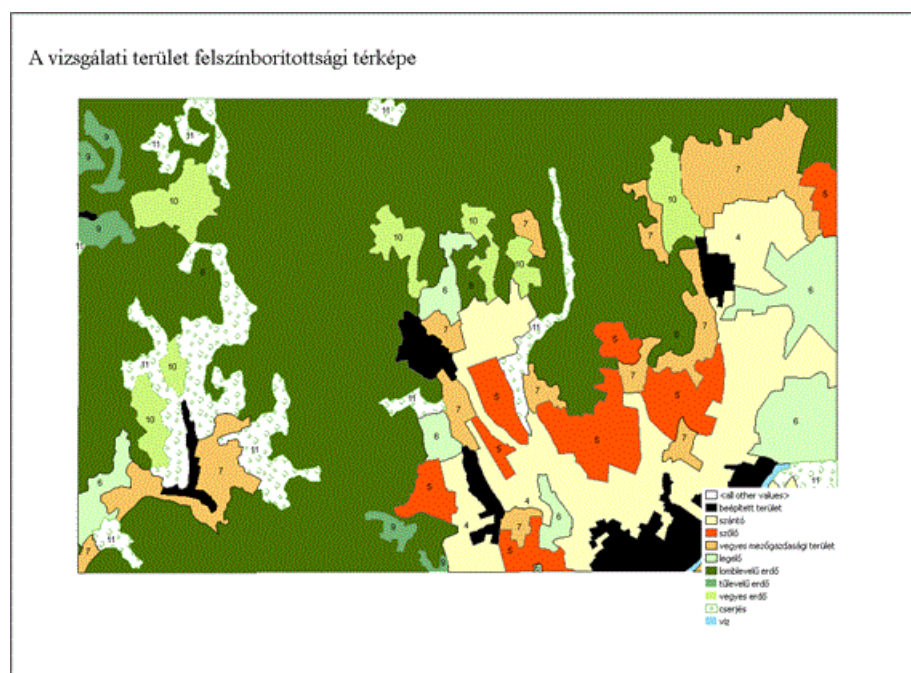
-a MESH azt adja meg, hogy mekkora az előző mérőszámában meghatározott darabszámból következő egyforma méretű területek nagysága.

7.18. ábra - A vizsgálati terület felosztottsági mutatói

Felszínborítási kategória	NP (db)	CA (ha)	DIVISION (%)	SPLIT (db)	MESH (ha)
Beépített terület	6	455,1	64,64	2,83	160,9
Szántó	5	1361,1	37,69	1,60	848,1
Szőlő	8	629,9	82,69	5,78	109,1
Gyep	7	598,9	58,06	2,38	251,2
Vegyes mezőgazdasági terület	13	860,4	82,49	5,71	150,6
Lomblevelű erdő	2	5183,9	1,72	1,02	5094,8
Tülevelű erdő	5	127,1	75,52	4,08	31,1
Vegyes erdő	7	442,7	82,73	5,79	76,5
Cserjés	12	825,7	78,68	4,69	176,0
Víz	2	24,8	3,73	1,04	23,9

Vizsgálati területünkön az erdő (11-es kategória) a legkevésbé fragmentált, míg a szőlő, vegyes erdő és cserjés (sorrendben: 5, 10 és 11-es kategóriák) a leginkább felszabdaltak (7.18. ábra). Az eredmények interpretálásánál fontos figyelembe venni, hogy valóban felszabdaltságról van-e szó, vagy ez a természetes megjelenése a foltoknak az adott tájban. További lehetőség az azonos kategóriába tartozó foltok távolságának a meghatározása euklideszi távolságként (NNDist, Euclidean Nearest Neighbour Distance). A meghatározás folt szinten történik (méterben), de kategóriánként átlagot, szórást számíthatunk az oszlopokból. További lehetőség a Proximity Index kiszámítása (7.19. ábra). Meg kell adnunk egy elérési távolságot (amit egy faj hajlandó megtenni/meg tud tenni ahhoz, hogy elérje a következő élőhely foltot) és a program azt fogja meghatározni, hogy ezen a távolságon belül átlagosan mekkora terület esik belül (7.20. ábra).

7.19. ábra - A foltok közötti legkisebb euklideszi távolság (NNDist) és a közelségi index (Proximity Index) számításának sematikus ábrája



7.20. ábra - A Proximity Index alakulása változó elérési távolság mellett(video)

PÉLDA A NEAREST NEIGHBOUR DISTANCE ÉS A PROXIMITY INDEX SZÁMÍTÁSÁRA

A következő példában 200 m sugarú körök reprezentálják a foltálózatot szabályos elrendezésben.

A foltok közötti **legkisebb távolság (Nearest Neighbour Distance, NNDist)** a térben két ugyanabba a kategóriába tartozó, egymáshoz legközelebb eső folt távolságát adja meg. Mértékegysége a méter.

A **közelségi index (Proximity Index)** azt adja meg, hogy adott folttól számítva a megadott elérési távolságon belülre mekkora terület esik az ugyanabba a kategóriába tartozó foltok közül. Dimenzió nélküli szám, összehasonlításokra alkalmas.

$$\text{Proximity Index} = \sum (a_{ijs} / h_{ijs}^2)$$

a_{ijs} : ij folt területe (m^2) a megadott elérési távolságon belül (m)

h_{ijs} : távolság (m) ij foltok között, foltszegélytől foltszegélyig

7. Ellenőrző kérdések

1. Hogyan hasonlítunk össze 2 térképet? Kell-e feltétlenül logikai rétegeket alkalmaznunk?
2. Mi a Cramer's V és a Kappa Index?
3. Milyen feltételek mellett alkalmazhatunk regressziót 2 fedvény hasonlóságának a megítélésére?
4. Mi a tájmetria és miért fontos a tájökológiai kutatásokban?
5. Mire következtethetünk a foltok kompaktságából?
6. Miért fontos a foltok belső zónája?
7. Mik azok a mérőszámok, melyek a táj fragmentáltságát fejezik ki?

8. Irodalomjegyzék

Acock, A.C., Stavig, G.R. 1979. A measure of association for nonparametric statistics. Social Forces 57:1381-1386.

Cohen, J. A. 1960 coefficient of agreement for nominal scales. Educational and Psychological Measurement 20(1):37-46.

McArthur, R.H., Wilson, E.O. 1967. The Theory of Island Geography. Princeton University Press 224 p.

Forman, R.T.T. 1995. Land Mosaics – The ecology of landscape and regions. Cambridge University Press, Cambridge 632 p.

Kerényi A. 2007. Tájvédelem. Pedellus Tankönyvkiadó. Debrecen, 184 p.

Forman, R.T.T. – Godron, M. 1986. Landscape Ecology. John Wiley and Sons, 619 p.

McGarigal, K. – Marks B.J. 1994. FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. PNW-351. 141 p.

Riitters, K.H. – O'Neill, R.V. – Hunsaker, C.V. – Wickham, J.D. – Yankee, D.H. – Timmins, S.P. – Jones, K.B. – Jackson, B.L. 1995. A factor analysis of landscape pattern and structure matrices. Landscape Ecology 10 (1): pp. 23-40.

Jaeger, A.G.J. 2000. Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation. Landscape Ecology 15: 115-130.

Báldi A. 1998. Az ökológiai hálózatok elmélete: iránymutató a védett területek és az ökológiai folyosók tervezéséhez. Állattani Közlemények 83: 29-40.

Szabó Sz. 2009. Tájmetriai mérőszámok alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata a tájanalízisben. Habilitációs értekezés, Debrecen, 109 p.

8. fejezet - Fuzzy modellek

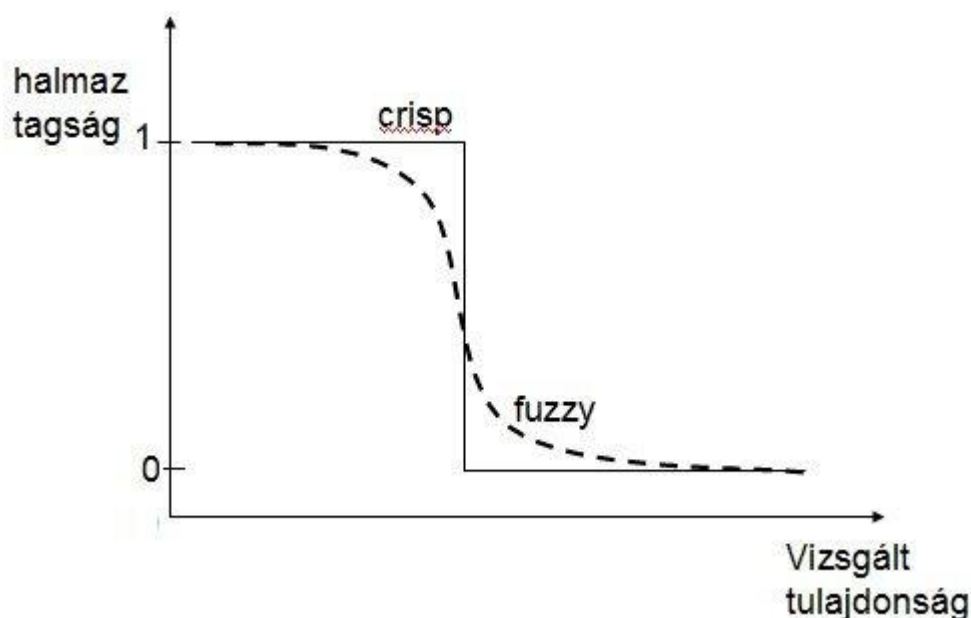
A fejezet céljai: Ebben a fejezetben megismerkedünk a fuzzy halmazokkal, ezen belül az elméleti háttérrel, a halmazok típusaival és a gyakorlati alkalmazásokkal. Konkrét példákkal pedig a geoinformatikai alkalmazási lehetőségeket tekintjük át.

Szükséges ismeretek, fogalmak: crisp és fuzzy halmazok, Boole logika, szigmoidális függvények, OpenStreetMap

1. 8.1. A fuzzy halmazok általános bemutatása

A fuzzy halmazok eredete Lofti A. Zadeh 1965-ben írt tanulmányához köthető, amiben azt állította, hogy bizonyos jelenségeket, eseményeket ne diszkrét formában kezeljünk konkrét határokkal (crisp), hanem ún. lágy határú (fuzzy) halmazokként (8.1. ábra).

8.1. ábra - A crisp és fuzzy halmazok



A módszer magyarázatához vissza kell nyúlni a Boole-algebrához, mely csak azt a helyzetet képes kezelni, hogy valamely elem (ez származhat az élet bármely területéről, későbbi példáinkban a rászteres geoinformatikából, ahol az elem egy pixel) vagy tagja egy halmaznak vagy nem. A határok merevek, ami bizonyos helyzetekben teljesen (átment valaki egy vizsgán vagy nem; van jogosítványa vagy nincs; ott van valami vagy nincs stb.), más esetekben – ha kritikákkal is –, de még elfogadható (hány ember szállhat be biztonságosan egy liftbe; mennyi lehet a megengedett sebesség személygépkocsival lakott területen belül; mennyi az egészségügyi határérték a szennyezőanyagokra). Sokszor azonban – amellett, hogy merev határokat alkalmazunk – a fuzzy lágy határai kézenfekvőbbek lennének.

Először nézzük meg a merev rendszerekre hozott példák kritikáját. Egy liftben elfogadható, ha megadunk egy maximális befogadóképességet, mert az emberek nem fogják ott helyben kiszámítani, hogy mekkora tömegűek együtt és a maximált létszámmal biztosítjuk a biztonságos terhelést. Annak az esélye, hogy csupa olyan ember száll be a liftbe, akik tömege a kalkulált átlagérték felett van, viszonylag kicsi és a rendszert úgy tervezték, hogy még ez se okozzon problémát. A települések belterületén több esetben a gyalogosok biztonsága szempontjából sok a megengedett 50 és 30 km/h, azonban a közlekedők biztonsága mellett biztosítani kell a dinamikus előrehaladást is. Ez esetben is egy olyan felső határt kell betartani, ami bár átléphető (annak tudatában, hogy ezért büntetés is járhat), de a tapasztalat alapján kevesebb baleset történik, mint a korábbiakban (kb. az 1990-es évekig érvényben lévő) megengedett 60 km/h óra mellett. A környezetvédelemben gyakran alkalmazott egészségügyi határértékeket is úgy határozták meg, hogy garantálja azt, hogy betartva őket az emberek

környezeti eredetű terhelése is minimális lesz. Ha valahol, vagy valamiben mégis több a koncentráció, mint a megengedett érték, sokszor akkor sem történik baj (kivételek persze vannak, gondoljunk az évről évre ismétlődő CO-mérgezésekre), de kell egy betartandó határ, mely irányadó és számon kérhető. Vagyis (majdnem) minden merev halmazzal szemben is meg tudunk fogalmazni valamilyen kritikát, ugyanakkor fontos az egyszerűség is a betartás, betarthatóság és ellenőrizhetőség érdekében.

Ezekből a példákból is láttuk, hogy újra és újra felmerül a kérdés, hogy akkor pontosan mi is számít egy halmaz határának. Egy, a matematikai statisztikából vett példával nézzük meg, hogy milyen következményei lehetnek annak, ha a határokat mereven kezeljük. Fischer nevéhez fűződik a sok tudományterületen alkalmazott 95%-os valószínűség, ami azt jelenti, hogy 100 esetből 95-ször igaz az állításunk. De mi a helyzet a 94%-os valószínűséggel? Ez klasszikus értelemben már „nem szignifikáns”, azaz a nullhipotézist megtartjuk. Helyesen tesszük mindezt? Ha mereven kezeljük a szignifikancia határát, akkor igen. Sokáig tartotta magát ez a nézet, mára azonban nem véletlenül írjuk ki a szignifikancia pontos szintjét a $p < 0,05$ vagy $p > 0,05$ helyett, amik mögött nem látjuk a valódi értékeket. Vagyis, ha egy konkrét számhoz mérjük az elfogás/elutasítás határát, akkor azt kockáztatjuk, hogy elutasítunk, vagy megtartunk egy helyes hipotézist (vö. első és másodfajú hiba), ahol a 95% alatti valószínűséget akár kis elemszámú adatsorok, vagy hibás mérések is okozhatják. Ha viszont rugalmasan kezeljük és elfogadjuk, hogy 90%-tól már van bizonyíték a nullhipotézis elfogadása ellen, akkor közelebb járunk a valósághoz.

A fuzzy halmazoknak éppen az a lényege, hogy nem merev határokat húzunk, hanem megadjuk a halmazbeli tagság alsó és felső határát. Képzeld el, hogy létezik egy klub (azaz egy halmaz), amibe csak magas embereket fogadnak be tagként (a halmaz elemei). Ha merev határt alkalmaznak és azt önkényesen pl. 190 cm-nél húzzák meg, akkor a 189 cm magas emberek kimaradnak a klubból (Kóczy és Tikk, 2001). A fuzzy halmazok alkalmazásával ezt úgy lehet elfogadhatóbbá tenni, hogy meghúzzunk egy olyan alsó határt, melytől már be lehet lépni a klubba, de nem adunk meg hozzá minden jogosultságot: azaz pl. 180 cm-től tag lehet mindenki, de magasabb tagdíjat kell fizetni, vagy a gyűléseken önálló indítványt nem lehet előterjeszteni. 200 cm-től (mint a teljes tagság határától) viszont már nem kell tagdíjat fizetni és a gyűléseken ingyenes számukra a vacsora.

Ezekből az egyszerű példákból kiindulva számtalan tudományterület alkalmazza és sok olyan helyen találkozhatunk vele a gyakorlati életben is, ahol nem is sejtjük: képfeldolgozási eljárásokban, háztartási gépekben, szennyvízelvezetésben, a mozdonyok lassításában, úrkutatásban, haditechnikában (Kóczy és Tikk, 2001). A továbbiakban a környezet- és táj kutatásban alkalmazható lehetőségeket mutatjuk be. Célunk az, hogy a hallgatók tisztában legyenek a fogalmi háttérrel és alkalmazni tudják ezeket az ismereteket saját szakterületükön belül.

2. 8.2. A fuzzy halmazok típusai

Minden hagyományos Boole logikát követő megközelítés 1-et rendel azokhoz az elemekhez, melyek a halmaz tagjai, 0-at pedig a kívül eső elemekhez. A fuzzy halmazok esetében ez egy 0 és 1 intervallumba eső számérték, mely arányos a halmazbeli tagság mértékével (0: nem tagja a halmaznak; 1: teljes értékű tagja a halmaznak; a kis érték kismértékű halmazhoz tartozást jelez, a nagy érték nagymértékűt). Az átmenet fokozatos és az érték az ún. tagsági függvénnyel írható le, az általa definiált halmaz pedig a fuzzy halmaz (Kóczy és Tikk, 2001).

A függvények segítségével többféleképpen tudjuk definiálni a halmazok elemeihez tartozó értékeket. A főbb típusokat, melyek a legtöbb geoinformatikai szoftverben (pl. IDRISI, TAS, Whitebox GAT, SAGA GIS) is elérhetők, a következőkben ezek közül az IDRISI szoftver fuzzy-modulját ismertetjük (Eastman, 2012 nyomán). Rendszerint 2-4 értékkel kell megadnunk az egyes függvények alakját (lásd 8.2 – 8.5. ábrák):

- a: a halmazhoz tartozás kezdeti értéke (nagyobb, mint nulla),
- b: a halmaztagság értéke eléri az 1-et,
- c: a halmaztagság értéke 1 alá csökken,
- d: a halmazhoz tartozás megszűnik, értéke eléri az 1-et.

Ezek segítségével meg tudunk adni monoton növekvő, monoton csökkenő és szimmetrikus lefutású görbéket. Monoton növekvő görbénél a b-c-d értékek megegyeznek, ugyanígy a monoton csökkenő görbénél az a-b-c értékek ugyanazok. Mind a 4 érték megadása akkor szükséges, ha a halmazbeli tagságnak nemcsak egy irányban van határa, azaz adott elem veszíthet az értékéből, vagy el is veszítheti a tagságát meghaladva a határértéket (vagy a határérték alá csökkenve).

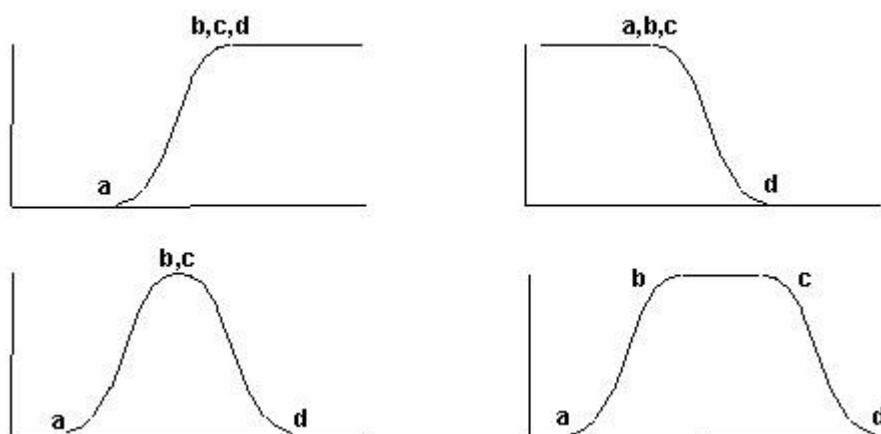
A leggyakrabban alkalmazott függvények a következők. Sigmoidális. A halmazhoz tartozás mértékét koszinusz függvénnyel írjuk le. A függvény által meghatározott görbe a klasszikus összetett lejtőkhöz hasonlít, melyek alsó része konkáv, felső része konvex és a kettő között félúton található az inflexiós pont (2. ábra). Gyakran alkalmazott függvénytípus.

Lineáris. A függvénnyel lineáris szakaszokat definiálunk. Gyakran alkalmazzák egyszerűsége és az eredmények nyomon követhetősége miatt (3. ábra).

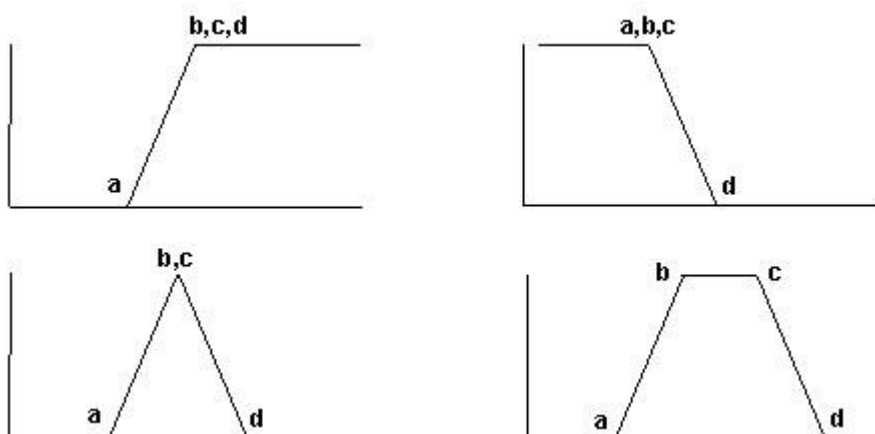
J-shape. A függvény lefutása valóban J-alakú, konkáv. Fontos tulajdonsága, hogy csak megközelíti a nullát, de nem éri el csak a végtelenben. Ez esetben az „a” és „d” pont nem a nulla értéket adja meg, hanem az inflexiós pontot, melynek értéke 0,5 (4. ábra). Ezen tulajdonságai miatt a földtudományokban kevésbé használják.

Felhasználó által beállított. A korábbi lehetőségektől eltérően, jóval több pontban is megadhatunk töréspontokat (egyenes szakaszokat definiálva), ami még inkább illeszkedhet az igényeinkhez és akár egy sokszoros feltételrendszernek (14-5. ábra).

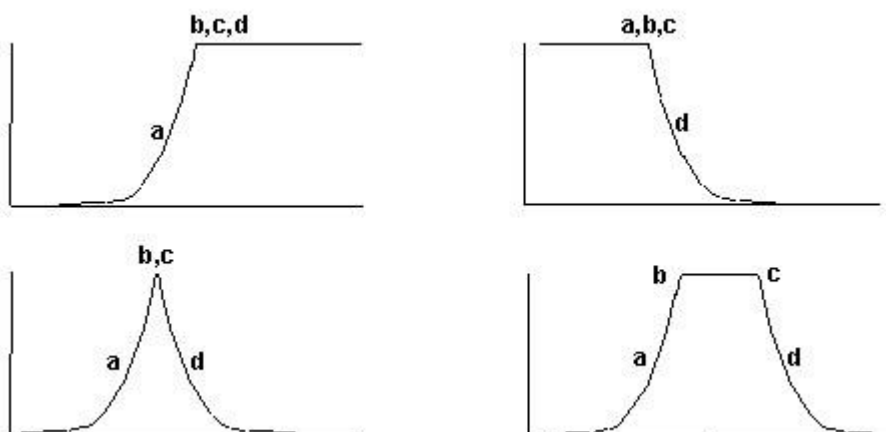
8.2. ábra - Sigmoidális függvények lefutása és paraméterei



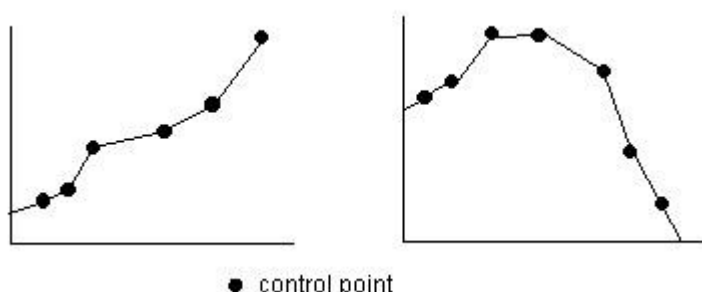
8.3. ábra - Lineáris függvények lefutása és paraméterei



8.4. ábra - J-alakú függvények lefutása és paraméterei



8.5. ábra - Egyedileg definiált fuzzy függvény



3. 8.3. Fuzzy modellek a földtudományokban

A földtudományokban igen fontos, hogy megfelelően tudjuk kezelni a mérési bizonytalanságokat. El kell fogadnunk azt a tényt, hogy az eredményeket, amiket a műszereink mutatnak, számos külső körülmény befolyásolja. Először is minden műszernek van alsó és felső méréshatára, mely alatt és felett az eredmények nem megbízhatók. Másodszor, a mérés során is lehet olyan feltétel, aminek a pontos végeredményhez teljesülnie kell és sokszor ezeket nem tudjuk, hogy kontrollálták-e. Egy olyan egyszerű mérés, mint a pH meghatározása is magában rejti a hibák lehetőségét: a folyadékokban, szuszpenziókban a H_3O^+ -ionok aktivitásának a mérése a pH-mérők üveg- és gélelektrodáinak alkalmazásával egy egyensúlyi folyamat eredményeként számszerűsíthető. Ha nem várjuk ki azt az időt, míg az elektród felületén kialakul a folyadékra jellemző egyensúlyi helyzet, rossz eredményt olvasunk le. A végén egy adattá válik egy táblázatban, amivel dolgozunk. Sosem tudjuk meg, hogy a végleges értéket olvasták le a laboratóriumban (amire akár 10 percet is várni kell), vagy egy közbülsőt (amit lehet, hogy fél perc után írt ki a műszer). Mindezekon túl, számos hibát lehet elkövetni magával a mintavétellel és a mérések minden szakaszában. Sok esetben nem is áll rendelkezésünkre olyan adat, amire valójában szükségünk lenne (pl. szivárgás modellezésekor több mélységből szivárgási tényező 3 irányban), így meg kell elégedni valamilyen kompromisszum jellegű megoldással. Ezekben az esetekben hasznos lehet a fuzzy megközelítés, számolva a mérési hiba varianciájával vagy a rendelkezésre álló adat hiányosságaiból következő problémákkal.

A fuzzy halmazok igen jól implementálhatók geoinformatikai környezetbe. A térbeli jelenségek esetében is számos olyan feladat merül fel, ahol a fuzzy modell alkalmazása jobbá teheti a kapott végeredményt.

3.1. 8.3.1. Fuzzy halmazok földtudományi felhasználása a hidrogeológiai védőterületek kijelölésének példáján

Vegyük példaként a hidrogeológiai védőterületek kijelölését. A kijelölés alapja az elérési idő, mely az az időtartam, amely alatt egy adott pontból a vízcsepecske eljut a vízkivételig. A belső védőövezetben a vízkivételi hely környezetében a 20 napos elérési időt kell alapul venni. Ha ez a távolság kisebb, mint 10 m, biztonsági okokból akkor is legalább 10 méteres távolságot kell megtartani. Ez akkor azt jelenti, hogy pl. 11 méteres távolságtól már bármilyen tevékenységet lehet végezni? Valójában nem, mert a belső védőövezet után

következik a külső védőövezet (6 hónapos elérési idő, minimum 200 m), majd a hidrogeológiai védőövezetek következnek. Ebben a sorrendben – akár mint egy fuzzy modellben – egyre többféle tevékenységet engedélyez a szabályozás. Fuzzy megközelítéssel ezeket a távolságokat is be tudjuk állítani és akár finomíthatjuk is a távolság függvényében.

A következő példában nézzük meg, mindez hogy néz ki a gyakorlatban. Az IDRISI-ben beállítottuk a védőterületek határait a következő paraméterekre mind a hagyományos Boole-alapú, mind a fuzzy módszerhez (8.6. ábra).

Szigmoidális modell:

- maximális védelem (belső védőterület): 20 m;
- nem védett terület (hidrogeológiai védőzóna külső határa): 800 m.

Lineáris modell:

- maximális védelem (belső védőterület): 20 m;
- nem védett terület (hidrogeológiai védőzóna külső határa): 800 m.

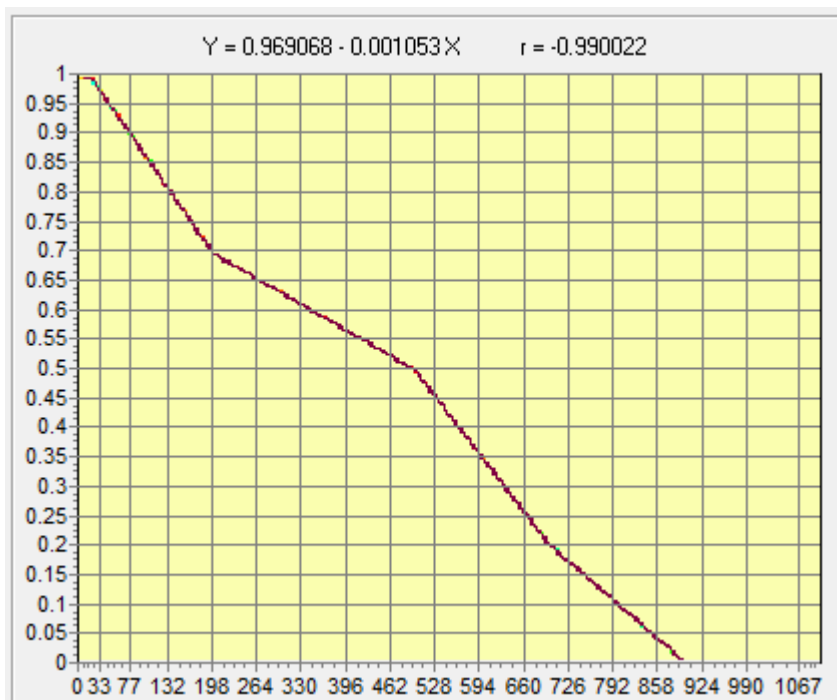
J-shape modell: - maximális védelem (belső védőterület): 20 m;

- nem védett terület (hidrogeológiai védőzóna külső határa): 800 m.

Egyedileg beállított, a védőterületeken alapuló modell:

- belső védőterület: 20 m;
- külső védőterület: 200 m;
- hidrogeológiai védőzóna (A): 500 m;
- hidrogeológiai védőzóna (B): 700 m;
- hidrogeológiai védőzóna (C): 800 m.

8.6. ábra - Példa a fuzzy halmazok alkalmazására hidrológiai védőterületek kijelölése kapcsán



3.2. 8.3.2. Döntéstámogatás: optimális helyszín kiválasztása

Sokszor kerülünk olyan feladat elé, hogy több térképfedvény felhasználásával meg kell mondanunk azt a helyet, mely bizonyos előre definiált szempontok alapján a legoptimálisabb. A hagyományos (crisp) ÉS/VAGY műveletekkel közelítve a feladat megoldását csak azt tudjuk megállapítani, hogy hol van a szempontjaink szerinti optimális terület határa és nem lehet figyelembe venni a belső heterogenitását, textúráját, illetve a távolsággal való változó megfelelést a kritériumnak, vagy csökkenő/növekvő valószínűségeket.

Példánkban tételezzük fel, hogy egy (elméleti) madárfaj erősen kötődik a vízhez, 3 km-nél ritkán távolodik el tőle, valamint a forgalmas utakat elkerüli kb. 500 m-es távolságban. Mindemellett kedveli a sűrű növényzetet. Keressük meg az optimális élőhelyét a fajnak. Mind a hagyományos, mind a fuzzy alapú megoldási lehetőségeket nézzük meg (8.7.-8.10. ábrák).

A megoldás során egy LANDSAT felvétel (mellékelve, LANDSAT Program, 2008) NDVI értékeiből átosztályozással megadjuk a vízfelületeket (-1 és -0.2 közötti értékek esetünkben jól visszaadják a vízfelületeket). Az OpenStreetMapről letöltött fedvény adja meg az utak rétegét. Ezekből előállítjuk a puffer zónákat a hagyományos megoldáshoz, illetve a távolság rétegeket a fuzzy halmazok bemenő adataként. Ezt követően a út-távolság fedvényre beállítjuk az 500 m-es távolságot. Mivel a vízfelületek is és a sűrű növényzet egyaránt fontos a szóban forgó madarak számára, csak egyedileg definiált fuzzy halmazzal tudjuk megadni a halmazbeli tagságot:

- (-1)- (-0,2) között 1, mivel ezek jórésben a vízfelületek (ezen a mintaterületen);
- (-0,2)-0 között 0,5 mivel itt még vizes foltok előfordulnak, a halmaztagságot is magasabb szinten tartjuk;
- 0-0,2 között 0,2 a gyér növényzet miatt; majd három lépésben növeljük a területek halmazbeli tagságának az értékét a teljes tagságig;
- 0,2-0,5 között 0,5;
- 0,5-0,7 között 0,8;
- 0,7 fölött 1.

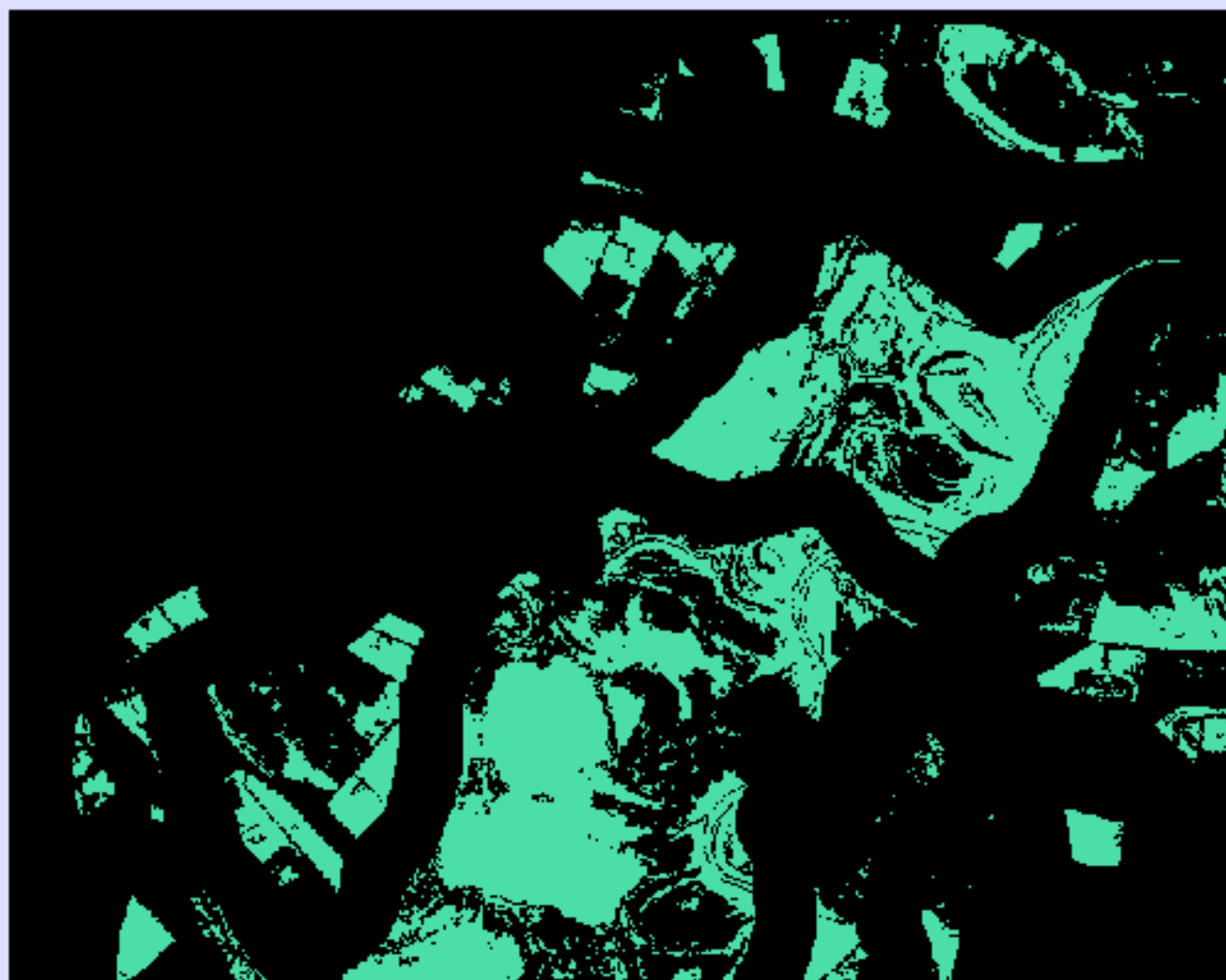
8.7. ábra - Vízimadarak optimális élőhelyének keresési folyamata hagyományos módszerrel



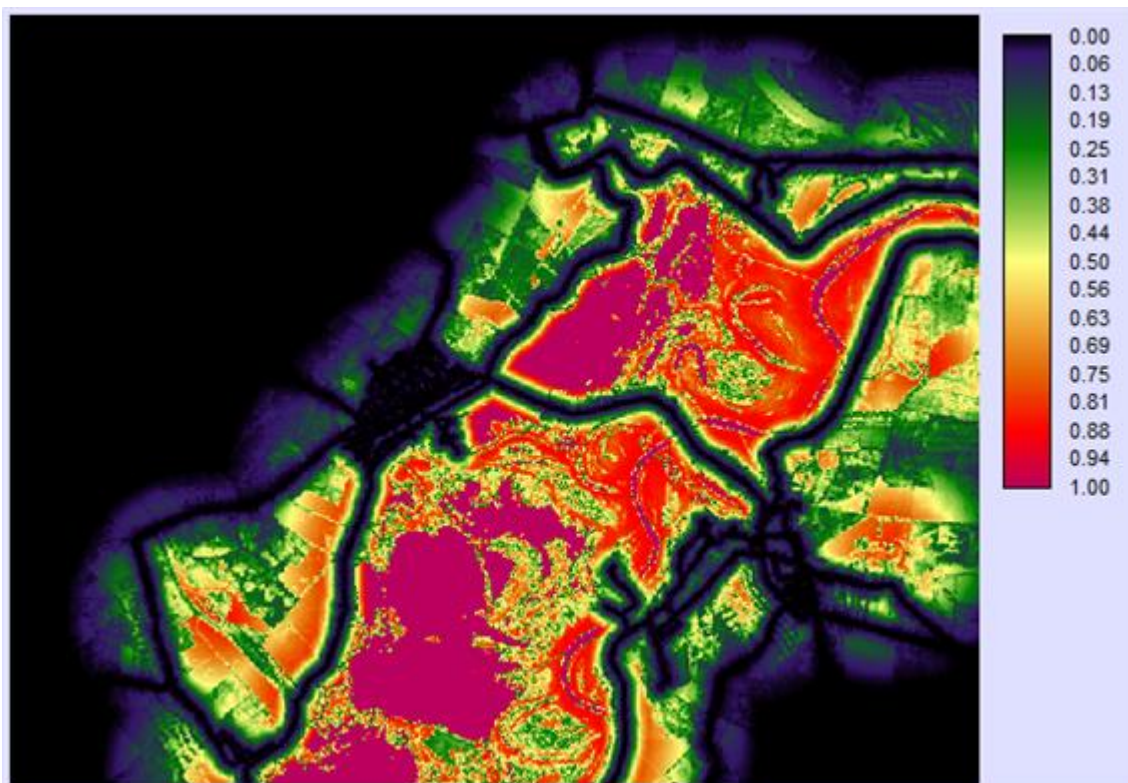
8.8. ábra - Vízimadarak optimális élőhelyének keresési folyamata fuzzy módszerrel



8.9. ábra - A hagyományos (crisp) megközelítés eredménye



8.10. ábra - A fuzzy halmaz alapú megközelítés eredménye

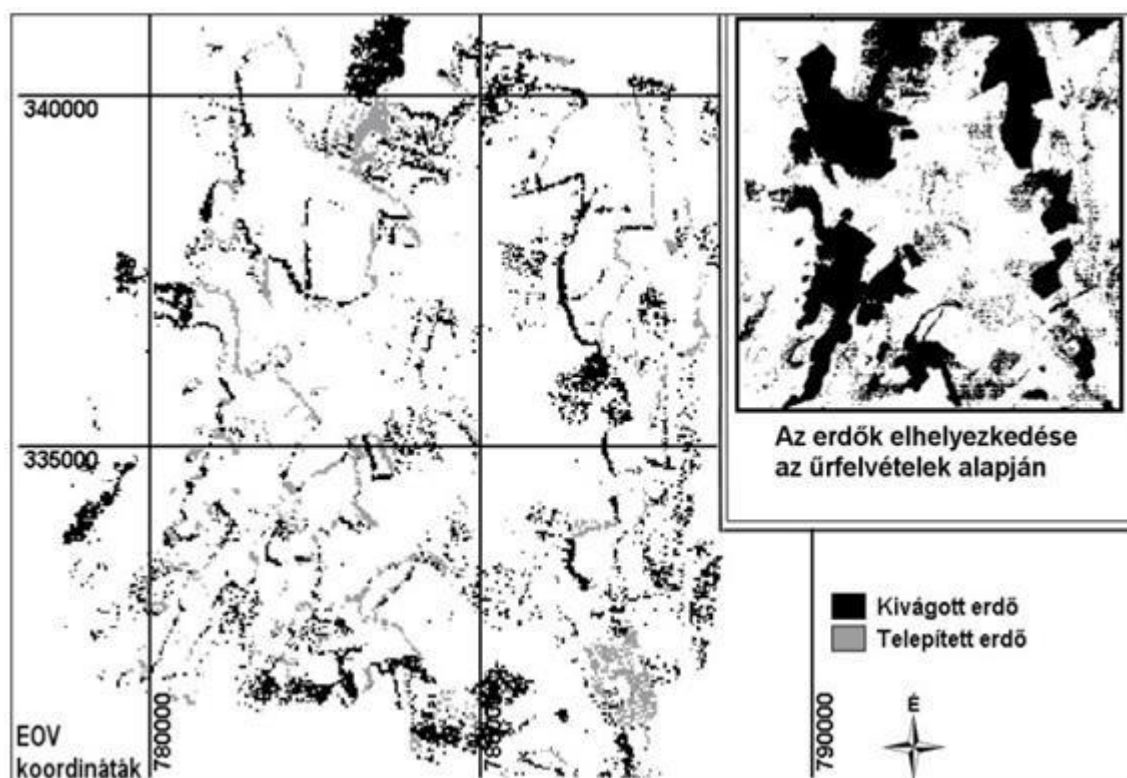


3.3. 8.3.3. Térképek összehasonlítása fuzzy alapon

A geoinformatika egyik fő alkalmazási területe a tájhasználat változásának vizsgálata. Ezek a vizsgálatok azonban több problémát is felvetnek: (1) mennyire pontos a tájfolt határa és (2) mennyire pontos a vetületbe illesztése a vizsgált térképeknek.

Különböző időpontok között lezajlott változásokat rendszerint kereszttabulációval (Kappa Index) vizsgáljuk (lásd 7. fejezet). Ez azonban feltételezi azt, hogy a folthatárok minden esetben hasonló módszerrel kerültek kijelölésre és azt is, hogy nem találunk egymás felett elcsúszó poligonokat amiatt, hogy az (orto)rektifikáció hibája túl nagy volt és az azonos helyeket jelölő pixelek nem fedik egymást (8.11. ábra).

8.11. ábra - Helytelenül georeferált műholdfelvételek miatt keletkező hiba (Szabó, 2003)

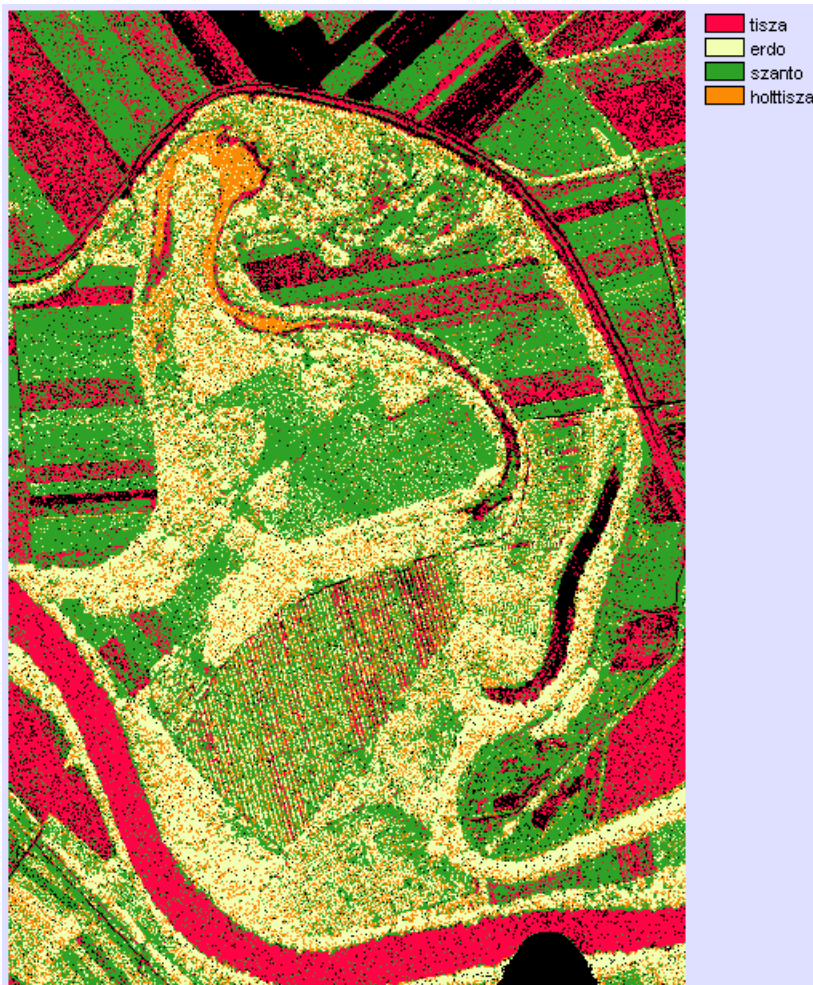


Sajnos ezek a feltételek rendszerint soha nem teljesülhetnek, mivel a régi térképek, vagy légifotók hiba nélkül nem rektifikálhatók (mivel sok esetben nehéz megfelelő illesztő pontokat találni), így az összehasonlítások eredménye sem lesz mentes a hibáktól. Ezeknek a hibáknak a csökkentésében, a valósághoz közelebbi eredmények elérésében segít ez esetben is a fuzzy alapú megközelítés: ha elmoszuk a foltok határait és nem éles vonalakként kezeljük őket, a fentebb említett hibák is csökkenni fognak. A fuzzy alapon definiált átmeneti sáv szélességétől függően akár teljesen megszüntethetők ezek a hibák, azonban ennek a kisebb foltok is áldozatul eshetnek (azaz pl. kis erdei tisztások tűnhetnek el az átmeneti sávban). Jelenleg egy szoftver, Map Comparison Kit képes az ilyen jellegű összehasonlításra a Fuzzy Kappa mutatóval (Visser és Nijs, 2006).

A Fuzzy Kappa a hagyományos Kappa Indexhez hasonlóan pixelenkénti összehasonlítás alapján számol, azonban a határt fuzzy alapon húzza meg a szomszédos kategóriák pixelei között (1: teljes egyezés, 0: teljes különbözőség).

Példánkban 2 légifotóról interpretált és szándékosan nem szűrt (azaz eléggé szórt pixeles) ellenőrzött osztályba sorolás eredményét vetjük össze (8.12 és 8.13. ábrák). A felvételeket 2 méteres felbontással vetettük össze, ahol a rektifikációs hiba miatt a pixelek nagy valószínűséggel nem voltak fedésben. Ezt bizonyítja a két felvétel Kappa Indexe (0,214), ami arra utal, hogy a két (ránézésre igen hasonló) térkép hasonlósága csak esetleges. Meg kell jegyeznünk azt is, hogy az is természetes, ha a két időpontban különbséget találunk: annak ellenére, hogy két egymást követő évről van szó, a felvételek készítési időpontja (adott éven belül) még ilyen kis időtávon belül is fontos lehet. A növényzet fejlettsége még, ha dátum szerint ugyanabban hónapban és napon volt is a felvételezés időpontja, akkor sem feltétlenül látjuk ugyanazt a képet, továbbá állapota függ a korábbi időszak csapadékmennyiségétől. Mindez hatással lehet a növények színére, ami automatikus osztályozásnál hibához vezethet (vizuális interpretációnál a probléma kezelhető). Jelen esetben azt szeretnénk megtudni, hogy milyen mértékű a változás a pixelek „elcsúszása” nélkül. A Fuzzy Kappa értékét pixelszám alapján kell állítani, melyet fel kell szorozni a 2 méteres felbontással, ha távolságokkal szeretnénk számolni. A keresési sugár – mely jelen esetben a határok közötti lágy átmenetért felel – alapbeállítása 4 pixel, a felezési távolság 2 pixel. Ezekkel a beállításokkal hasonlóan rossz eredményt kapunk a hagyományos Kappa Indexhez (0,255). Vagyis a vetületbe illesztés hibája több, mint 8 méter. 10 pixeles keresési sugárral és 2 pixeles felezési távolsággal a Fuzzy Kappa 0,203, azaz ezekkel a beállításokkal rosszabb lett az eredmény. 5 méteres felezési távolsággal azonban már 0,600 a Fuzzy Kappa. 20 pixeles keresési távolsággal és 10 méteres felezési távolsággal viszont már 0,852. Amennyiben 40 méteres a keresési sugár 20 méteres felezési távolsággal, még elképzelhető, akkor az eredmény is megfelelő (8.14.-8.16. ábrák).

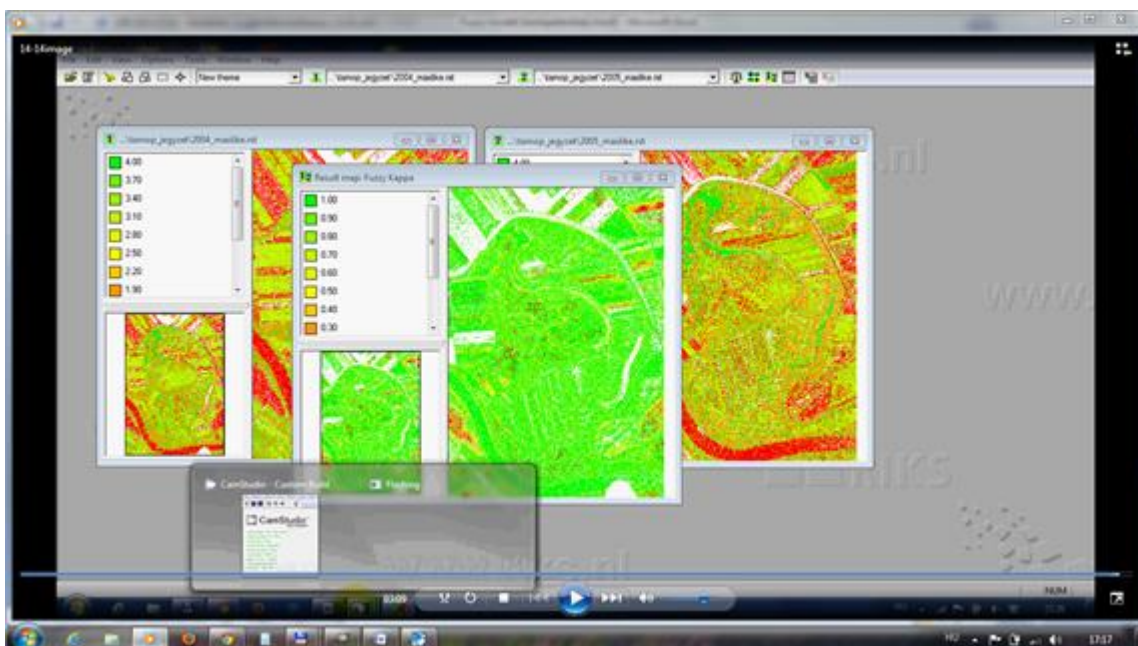
8.12. ábra - Egy Tisza menti terület felszínborításának interpretációja egy 2004-es légifotóról



8.13. ábra - Egy Tisza menti terület felszínborításának interpretációja egy 2005-ös légifotóról



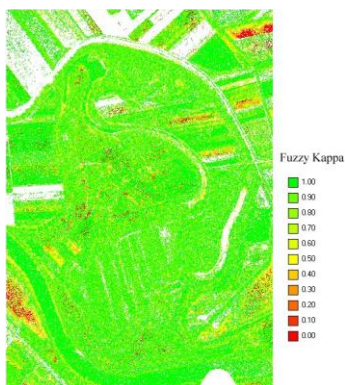
8.14. ábra - Két térkép összehasonlítása Map Comparison Kit szoftverrel (video)



8.15. ábra - A hagyományos, Kappa Index-en alapuló összehasonlítás eredménye



8.16. ábra - A lágy határokkal dolgozó Fuzzy Kappán alapuló összehasonlítás eredménye



4. Ellenőrző kérdések

1. Mi a fuzzy modell?
2. Milyen típusai vannak? Jellemezze az egyes típusokat!
3. Mi alapján választjuk ki a fuzzy függvényt?
4. Mi a Fuzzy Kappa? Hol használják?
5. Keressen példákat a fuzzy halmazok alkalmazására a gyakorlatban!

5. Irodalomjegyzék

Zadeh, L.A. 1965. Fuzzy sets. Information and Control 8:338-353.

Kóczy L.T., Tikk, D. 2001. Fuzzy rendszerek. Typotex, Budapest, 137 p.

Eastman, J.R. 2012. IDRISI Selva Manual. Clark Labs, Clark University, 322 p.

NASA Landsat Program 2008. Landsat TM scene P187R27_5T19870708, USGS, L1G, Sioux Falls, 07/08/1987

Visser, H., de Nijs, T. 2006. The Map Comparison Kit. Environmental Modeling & Software 21:346-358.

Szabó G. 2003. Changing of the forested area in a sample area using statistical and satellite database. In: Z Badań Nad Wpływem Antropopresji Na Środowisko, Sosnowiec, pp. 78-82.

9. fejezet - Fraktálmodellek a földtudományokban

A fejezet céljai: áttekintjük a parttagoltság meghatározásának hagyományos természetföldrajzi módszereit, majd az Angol-sziget partvonalának hossz mérésére tett kísérleteink alapján arra a következtetésre jutunk, hogy ez a hossz nem határozható meg egyértelműen. A méréseinkből levezetünk egy olyan értéket, amely a természetben tapasztalt egyszerűbb és bonyolultabb formák kvantitatív jellemzésére egyaránt alkalmas, ez a fraktáldimenzió. Olyan dimenzió-számítási módszerre is látunk gyakorlati példát, amely alkalmas magasabb dimenziókban – a térben – a fraktálok vizsgálatára. Elemezzük, hogy a térképészetben és térinformatikai elemzésekben milyen szerepe lehet a fraktáldimenzióknak.

Szükséges ismeretek, fogalmak: parttagoltság, térképi hossz mérések, Steinhaus-paradoxon, legjobban illeszkedő egyenes, topológiai dimenzió

1. 9.1. Parttagoltság meghatározása

Mindenki számára ismert az a tény, hogy Norvégia partvonala tagoltabb, mint mondjuk az Ibériai-félsziget partvonala. Arra azonban már kevesebben tudnának válaszolni, hogy mi alapján mondjuk ezt. Egyik csipkézettebb, a másik kevésbé? Egyiken sok az öböl, félsziget, másikon kevesebb? A fent említett két példa esetén ez elég nyilvánvaló, de mit tudnánk mondani pl. Izland és az Angol-sziget, vagy éppen Borneó és Új-Guinea esetében? Van-e olyan módszerünk, amellyel eldönthető, illetve számszerűsíthető egy sziget, vagy akár egy földrész parttagoltsága? A módszerek sokfélesége azt mutatja, hogy igazán jó módszer nincs.

A fiktív partvonalak módszere olyan fiktív partvonalakkal hasonlítja össze a valódi partvonal hosszát, amelyeket vagy belülről, vagy kívülről rajzolunk a sziget partvonalára úgy, hogy azok kisimítsák a partvonal egyenetlenségeit (lehetőleg mindenhol konvexek legyenek). A módszer természetesen rendkívül szubjektív.

Az azonos parttávolságok módszerével mérve a sziget (vagy kontinens) területét a sziget azon részének területével hasonlítjuk össze, amelyet a parttól egy megadott távolságra futó izovonal határol körbe. Ez a megadott távolság a sziget méretétől függ, más lesz Eurázia, Grönland és a Szentendrei-sziget esetében. Ennek meghatározására nincsen megfelelő módszer.

Nagyon egyszerűnek tűnne, ha a sziget területét és kerületét hasonlítanánk össze, a probléma csupán az, hogy két hasonló sziget esetén, ha az egyik területe kétszer akkora, mint a másiké, a parttagoltsága közel másfélszerese lenne.

A legelterjedtebb módszer a parttagoltság mérésére a legkisebb kerület módszere. A sziget parttagoltságát ekkor a sziget partvonalhosszához és a szigettel megegyező területű kör kerületéhez a hányadosa adja. Mivel az azonos területű síkidomok közül a körnek a legkisebb a kerülete, a parttagoltságra mindig egy egynél nagyobb értéket kapunk (szabályos kör alakú sziget esetén egyet is kaphatunk). Kontinensnyi méretekben teljesen következetesen akkor járnánk el, ha olyan gömbi kör kerületével hasonlítanánk össze a kontinens partvonalának a hosszát, amely által körülzárt gömbsüveg felülete egyezik meg a kontinens területével. Kisebb méretekben természetesen síkban is elég dolgoznunk.

Feladat: Határozzuk meg Celebesz parttagoltságát a legkisebb kerület módszerével (9.1. ábra, animáció)! a.) Milyen hosszú a sziget partvonala (Ksz)? b.) Mennyi a sziget területe (Tsz)? c.) Mekkora annak a körnek a sugara, amely területe megegyezik Celebesz területével (r)? d.) Mekkora ennek a körnek a kerülete (Kk)? e.) Mekkora Celebesz parttagoltsága (Pt)?

9.1. ábra - Parttagoltság meghatározása Celebesz példáján (animáció)

Határozzuk meg Celebesz parttagoltságát a legkisebb kerület módszerével!

- a.) Milyen hosszú a sziget partvonala (K_{sz})?
- b.) Mennyi a sziget területe (T_{sz})?
- c.) Mekkora annak a körnek a sugara, amely területe megegyezik Celebesz területével (r)?
- d.) Mekkora ennek a körnek a kerülete (K_k)?
- e.) Mekkora Celebesz parttagoltsága (Pt)?

a.) $K_{sz} = 4000 \text{ km}$

b.) $T_{sz} = 189070 \text{ km}^2$

c.) $r = \sqrt{\frac{T_{sz}}{\pi}} \quad \rightarrow \quad r = 245 \text{ km}$

d.) $K_k = 2\sqrt{\pi T_{sz}} \quad \rightarrow \quad K_k = 1539 \text{ km}$

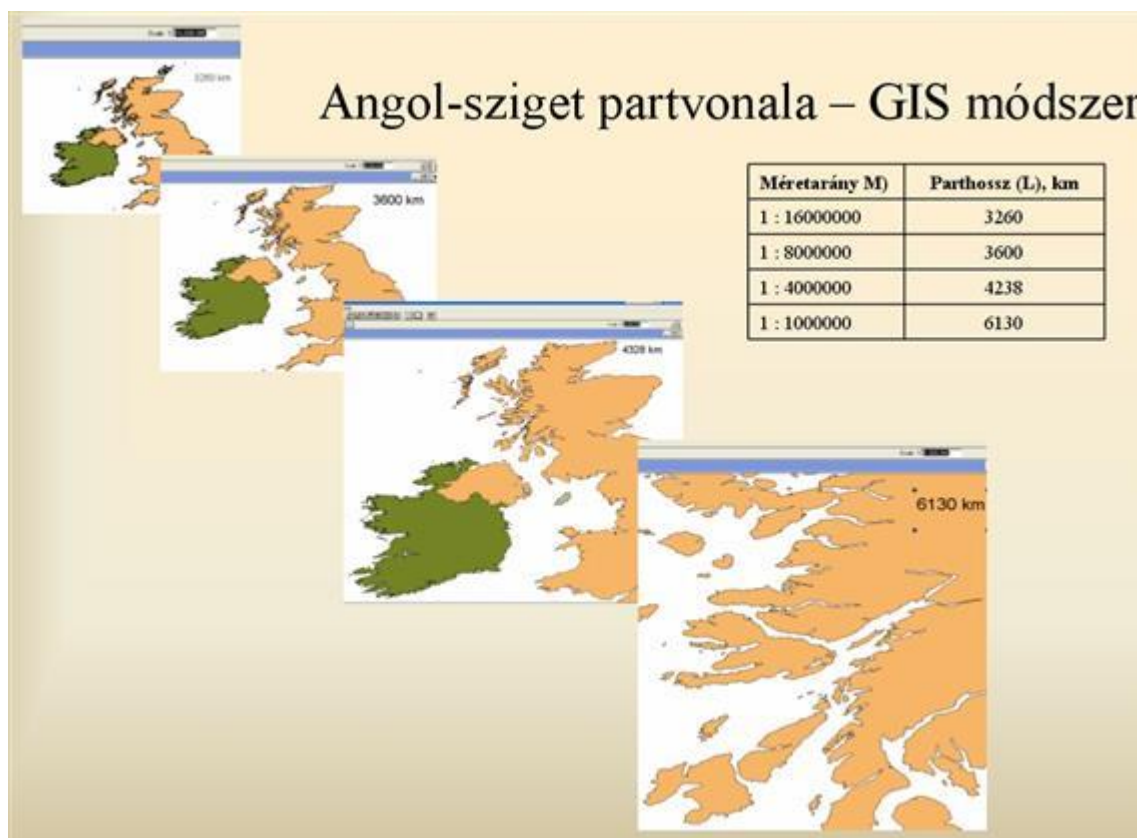
e.) $Pt = \frac{K_{sz}}{K_k} \quad \rightarrow \quad Pt = 2,6$

2. 9.2. Partvonalmérési probléma

Milyen hosszú a brit tengerpart? – kérdezte Benoit Mandelbrot amerikai kutató a Science tudományos folyóiratban 1967-ben megjelent cikkében. A válasz nem adható meg egyértelműen egy valamilyen (pl. km) hosszúságegységben kifejezett számértékkel. A mérés végeredménye attól függ, hogy milyen pontossággal, milyen méretarányú térképen végezzük el a hosszmérést. A mérések méretarányfüggését korábban (már a XIX. sz. végén) is többen megállapították: ha valamely természetes határvonal hosszát nagyméretarányú térképről, majd pontos műszerrel állapították meg, a hossz növekedését tapasztalták. Ezt a jelenséget nevezzük "Steinhaus paradoxon"-nak. Évmilliók tektonikus tevékenysége, a szüntelenül működő erózió és szedimentáció rendkívül csipkézetté, egyenetlenné, vagyis tagolttá formálta a partvonalat. Sorra véve az egyre nagyobb méretarányú térképlapokat egyre több részlet, kacsaringó (öböl, fok, abráziós fülke, stb.) tárulkozik föl. Mérhetünk a terepen is (1:1 méretarány), hogy a sziklák szabálytalanságait is figyelembe vegyük, vagy akár nagyítóval a kézben a kőzet ásványi alkotói közötti hézagokat is lemérhetjük. Ez a küzdelem természetesen az eredeti cél szempontjából már kilátástalan és értelmetlen is, de a kérdés jogos: miért ne mérhetnénk? Van-e megoldás, létezik-e egy olyan kvantitatív módszer, amellyel megadható egy, a partvonalat jellemző érték, léptéktől függetlenül?

Mérjük meg különböző méretarányú térképeken az Angol-sziget partvonalának hosszát (9.2. ábra)!

9.2. ábra - Angol-sziget partvonalhossza geoinformatikai mérési módszer alapján

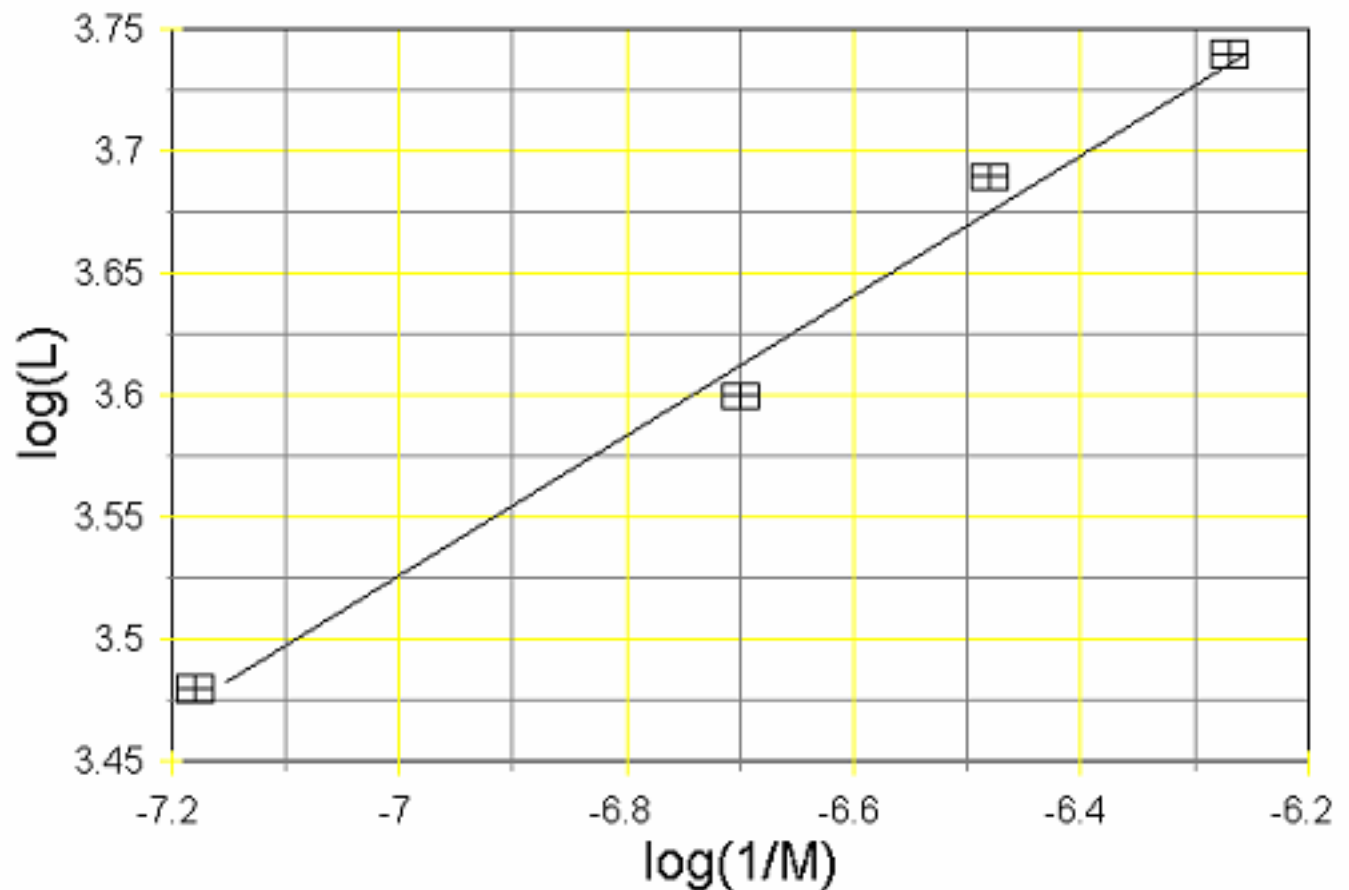


9.3. ábra - Partvonalhossz mérés eredménye és az értékek logaritmusai

<i>Méretarány (M)</i>	<i>Parthossz (L), km</i>	<i>$\log(1/M)$</i>	<i>$\log(L)$</i>
1:15 000 000	3000	-7,18	3,48
1:5 000 000	4000	-6,70	3,60
1:3 000 000	4900	-6,48	3,69
1:1 875 000	5512	-6,27	3,74

Ábrázoljuk a méretarány és a partvonal hosszának logaritmusait egy ún. *log/log* diagramon. A *log/log* ábrázolás megmutatja, hogyan változik a partvonal hossza ($\log(L)$) a méretarány ($\log(M)$) függvényében. A 9.3. ábra utolsó két oszlopának adatait grafikusán ábrázolva a 9.4. ábra mutatja.

9.4. ábra - Partvonalhossz mérés eredményének log/log diagramja



Keressük meg a kapott ponthalmazra a legjobban illeszkedő egyenest a *legkisebb négyzetek módszerével*.

A legjobban illeszkedő egyenest a következő alakban keressük:

$$\log(L) = d * \log(M) + b$$

Innen:

$$L = 10^b * M^d$$

Azaz L parthosszúság egyenes arányos a méretarány d-edik hatványával.

Figyeljük és jegyezzük meg a d (meredekség) és a b (függőleges tengelymetszet) értékeit a számítással vizsgált esetben:

d = 0,29,

b = 5,6.

Például M=1:1 méretarányban (terepen) mérve, $L = 10^{5,6} = 398\,000$ km!

Ha $M=1/n$ helyettesítést elvégezzük, akkor kapjuk, hogy

$$L \sim (1/n)^d$$

vagyis ha n tart 0-hoz ("végtelen nagy méretarányban ábrázolunk"), akkor

$$(1/n)^d \rightarrow \infty$$

Azt kaptuk, hogy ha a méretarányt minden határon túl növeljük, akkor a partvonal hossza végtelen!

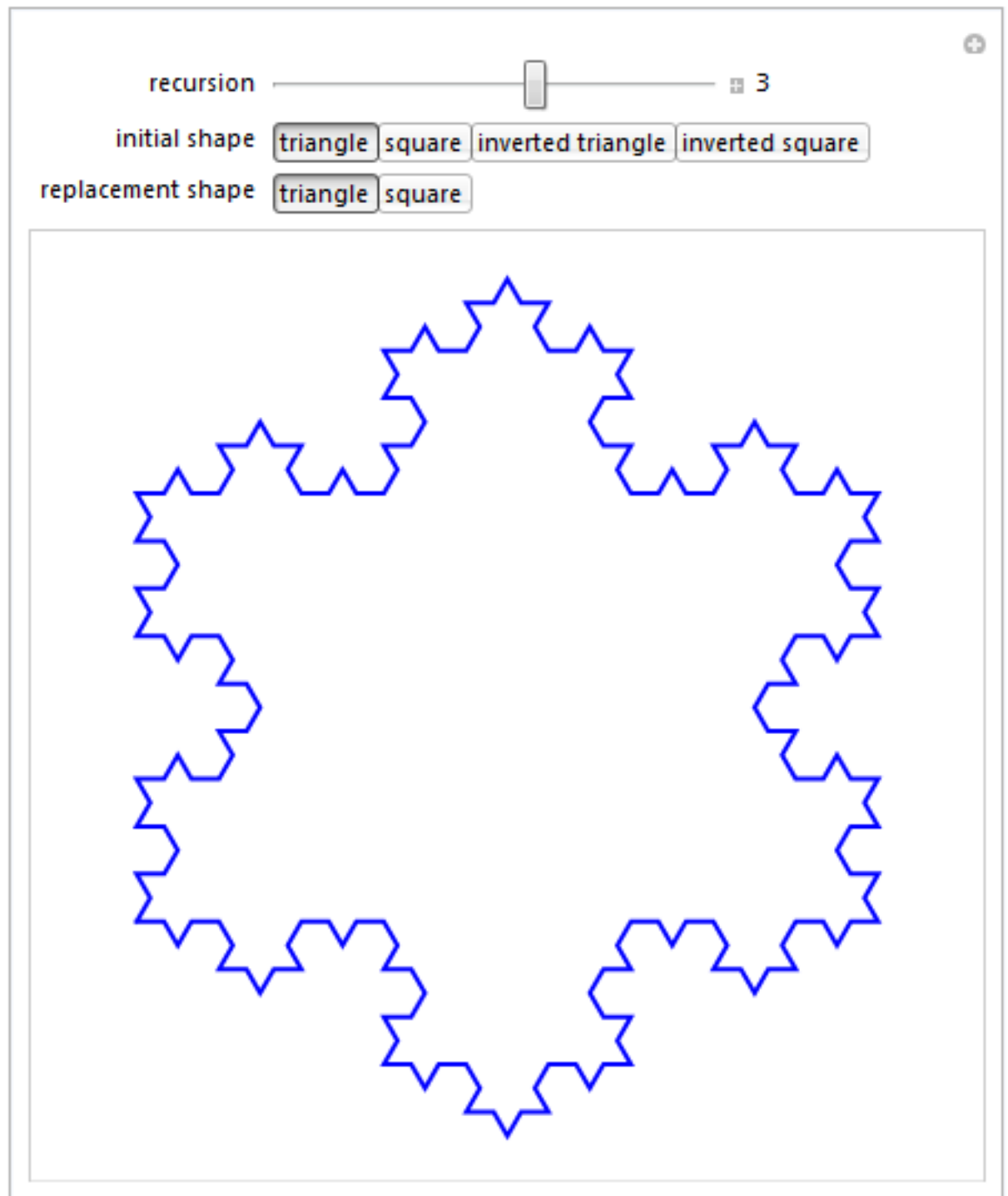
3. 9.3. Fraktálok, a fraktáldimenzió

A természet számtalan olyan objektummal rendelkezik, amelyek többszöri nagyítás után is részletesen struktúráltak, még egy erős mikroszkóp alatt is "gyűröttek" maradnak. A tudósok csak az utóbbi évtizedekben ismerték föl, hogy ezekkel az alakzatokkal érdemes foglalkozni, s megszületett egy újfajta geometriai objektum, a fraktál (a latin *frangere*, törni igéből, ld. Stewart 1991). A fraktálgeometria a természet egyesülési, elágazási vagy törési folyamatainak mindegyikében megjelenő minták szimmetriájára mutat rá és rendkívül alkalmas azoknak a természeti jelenségeknek a modellezésére, amelyek több hosszúsági skálán is szabálytalanságot mutatnak.

A fraktálok két csoportra oszthatók: szabályos (9.5-9.6. ábrák, animációk) és véletlen fraktálokra. A természetben előforduló fraktálok a második csoporthoz tartoznak, jellemző tulajdonságuk az önhasonlóság, vagyis az objektum egy része az egész objektumhoz – statisztikai értelemben – hasonló. Bizonyos szempontból a folyamatok és a jelenségek invariánsak a skála-függő transzformációkra, mint például az egyszerű kicsinyítés vagy nagyítás. A statisztikai önhasonlóság, amely esetén az azonosság valószínűségi jelleggel érvényesül, igen sok természeti jelenséggel összefüggésben megjelenik, például tengerek partvonala (9.7.ábra), talajok pH profilja, folyóhálózatok (9.8.ábra) stb.

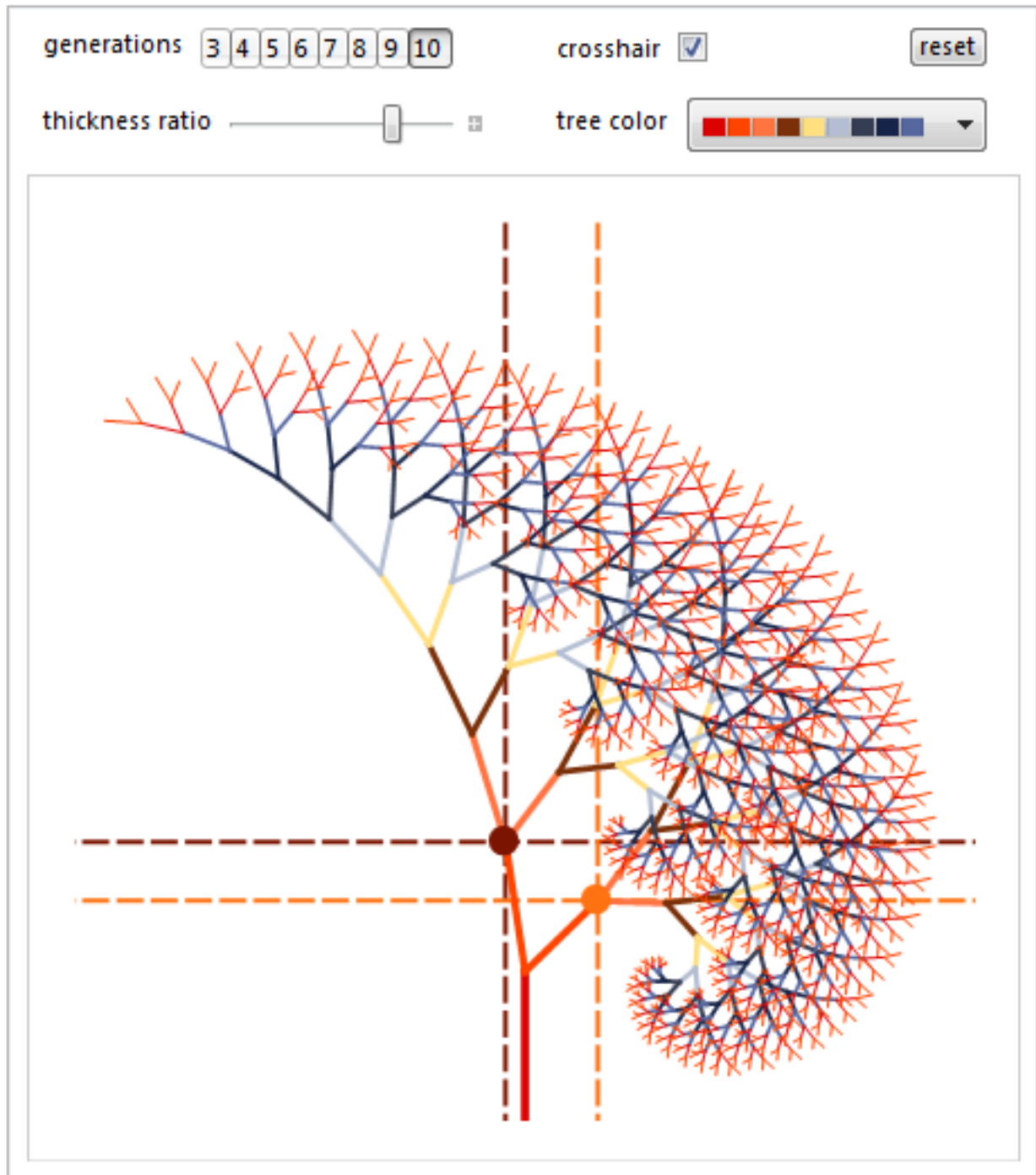
9.5. ábra - Koch-féle hópehelygörbe előállítás(forrás, animáció)

Fun with Koch Snowflakes

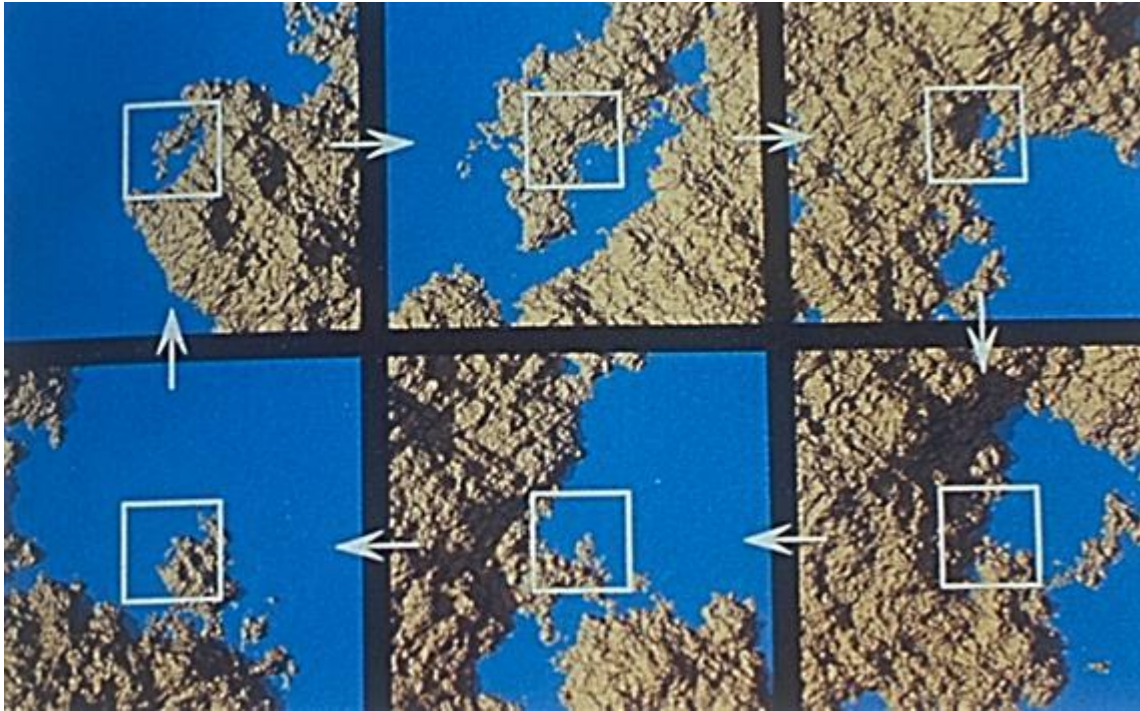


This Demonstration shows several recursively generated shapes including the Koch snowflake.

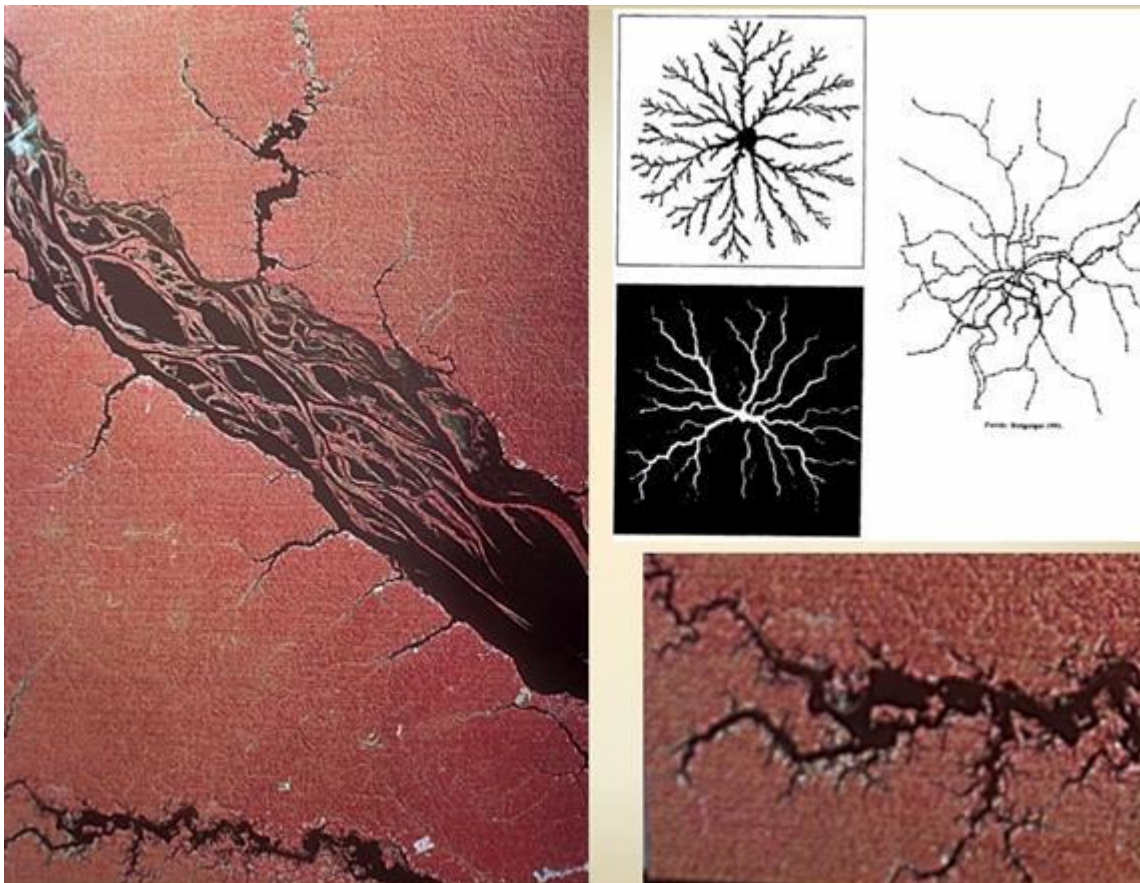
9.6. ábra - Mandelbrot és julia halmazok(forrás, animáció)



9.7. ábra - Tengerpart: az önhasonlóság legegyszerűbben vizuálisan vizsgálható. Ha valamely jelenség önhasonló, bármely részletét felnagyítjuk, annak megkülönböztethetetlenül hasonlítania kell az egész jelenségre, illetve akármely más részletére; ha egy természeti jelenség önhasonló, akkor annak méretaránya meghatározhatatlan. Az ábrázolt önhasonló alakzatról, tengerpartról készített képen nem tudjuk eldönteni, hogy egy teljes partvonalat, vagy csupán egy öböl részletét látjuk, így nincs vizuális támpontunk a kép méretarányának becslésére sem (Peitigen, 1986).



9.8. ábra - Folyóhálózat fraktálrajzolata



Fontos megjegyeznünk, hogy a természetben előforduló fraktál nem lesz minden lépték mellett fraktál alakzat, hanem e helyett általában csak a hosszúsági skála 10- vagy 100-szoros nagyításáig. A geomorfológiában fokozottan igaz, hogy a fraktálmodellek csak bizonyos típusú felszínformák, csak bizonyos hosszúsági skálán történő kvantitatív leírására alkalmazhatók. Erősen behatárolja továbbá a fraktálanalízis alkalmazását a

folyamat-függő geomorfológiai tanulmányokban az a tény, hogy nem létezik kölcsönösen egyértelmű megfeleltetés a fraktáldimenzió és a felszíninformáló folyamatok között.

A mindennapi életben elfogadtuk, hogy olyan háromdimenziós térben élünk, ahol a pont dimenziója nulla, a vonalé egy és a síké kettő. A továbbiakban kiderül, hogy a fraktáلالakzatokhoz – így a brit partvonalhoz – hozzárendelt dimenziók törtek lesznek, pl. 1,29-1,31. 1961-ben Richardson, brit fizikus és meteorológus több országra megvizsgálta a partvonalmérési problémát és azt kapta, hogy létezik egy D szám, amely Nagy-Britannia Ny-i partjára 1,25 és Ausztrália partvonalára $D = 1,14$.

3.1. 9.3.1. Cellaszámlálási dimenzió

A Mandelbrot-féle fraktál dimenzióinak a földtudományokban legelterjedtebb változata a cella-számlálási (box-counting) dimenzió. Előnye, hogy viszonylag egyszerűen és automatikusan számolható, programozható, továbbá magasabb dimenziós terekben is alkalmazható, pl. a klasszikus 3D-ban a cellákat hosszúsággal, szélességgel és magassággal rendelkező kockákkal helyettesítjük. Az eljárás lényege a következő (ld. Szabó 1997): a meghatározandó struktúrát (pl. hópehely, vagy a partvonal rajzolata) egy s oldalnagyságú rácshálóba helyezzük, majd egyszerűen megszámláljuk azokat a cellákat, amelyek tartalmazzák a struktúra bármely részét. Ezzel megadjuk N értéket. Ez a szám természetesen attól függ, hogy mekkorának választottuk s -t, ezért $N(s)$ -t írunk, majd több lépésben csökkentjük s értékét és megadjuk a hozzá tartozó $N(s)$ -t. Ezután ábrázoljuk a kapott számpárokat egy $\log(N(s))/\log(1/s)$ diagramban, és az ábrázolt pontthalmazra a már megismert módszerrel illesztünk egy egyenest. Ennek az egyenesnek a meredeksége (D) lesz cella-számlálási (box-counting) dimenzió.

Feladat: Határozzuk meg a Brit-szigetek cella-számlálási (box-counting) dimenzióját (D)! Hasonlítsuk össze az előző fejezetben, (1) egyenletben definiált és számítással kapott d együttható és D cella-számlálási dimenzió értékét!

9.9. ábra - Cella-számlálási dimenzió meghatározása egy sziget példáján(animáció)



-1

Ment

Reset

Lista elemei :

{{0.080987, 1.4}, {0.265996, 1.9}}

1.43811

Log(N(s))

1.9



9.10. ábra - Cellaszámlálás eredménye az Angol-szeigetre

s	$N(s)$	$\log(1/s)$	$\log(N(s))$
1	2	0	0,30
1/2	6	0,30	0,78
1/4	13	0,60	1,11
1/8	34	0,90	1,53
1/24	141	1,38	2,15
1/32	209	1,51	2,32

A 9.10. ábra utolsó két oszlopának adatai alapján a regressziószámítás eredménye: $D = 1,31 \sim 1+d$.

Végezetül néhány partvonal fraktáldimenziója, amelyeket az utóbbi két évtizedben határoztak meg ezzel a módszerrel: Japán ria partjára $D = 1,12 - 1,39$; Norvégia déli partjára $D = 1,52$. A legnagyobb fraktál dimenziót Ausztráliában, Queensland parti zátonyain 2 m-es vízmélységben lévő partvonalon mérték: $D = 1,9 - 2,0$.

4. 9.4. Fraktálok alkalmazása a geoinformatikában

A fraktálok gyakorlati szerepe leginkább a kartográfiában jelentkezik. Segítségükkel a hagyományostól eltérő, de rendszerezett szempontok szerint vizsgálhatjuk a különböző objektumok változásait, amelyek egyrészt a fejezetben korábban ismertetettek értelmében a méretarány-változás, a különböző méretarányú térképek alkalmazása során jelentkezhetnek. Másrészt a térképi generalizálás okozhatja az első látásra nehezen magyarázható eltéréseket, mert mint láttuk pl. egy bonyolultabb határ-, vagy partvonal hosszúsága gyorsabban növekszik az egyre nagyobb méretarányú térképeken, mint ahogyan azt a megfelelő méretarányok hányadosai megadják.

A kartográfiában alkalmazott hagyományos topológiai dimenzió (TD) valójában nem alkalmas az alakváltozás leírására, míg a fraktáldimenzió (FD) kifejezi a vonalak, felületek „bonyolultságát”, jellemzi az objektumok változásának mértékét generalizálás közben. A fraktáldimenzió egy új és egységes módszert biztosít a vonalak és felületek metrikus információinak számszerűsítésére. Néhány jellemző érték:

- egyenes, „sima” vonal: $TD=FD=1$
- enyhén görbült vonal: $TD=1$; $FD \geq 1$
- erősen görbült vonal $TD=1$; $FD \gg 1$
- síkot teljesen "kitöltő" vonal: $FD \sim 2$
- a legtöbb természetes kartográfiai vonal fraktáldimenziója 1,15 és 1,30 közötti érték
- felületek ($DT=2$): $2 \leq FD \leq 3$

Skálázás

Nem feltétlenül azonos az ön hasonlósággal, azonban a szakirodalom gyakran felcseréli a két fogalmat. Képzeljünk el egy tájat, amelyet egyrészt egy felület, másrészt egy szintvonalas térkép reprezentál. A szintvonalas térképen (amelynek koordinátái két dimenziósak) a táj jellege nem változik, ha a tengelyeket eltoljuk; az eltolás következtében ugyanis nem módosul a szintvonalak jellege, a szintvonalak ennél fogva jó példái az egyszerűen skálázott fraktáloknak. A 3 dimenziós koordinátákkal rendelkező felületen nem

cserélhetjük fel sem az x , sem az y tengelyt a z tengellyel a táj jellegének alapvető változása nélkül, mivel a z tengely más skálázási paraméterrel rendelkezik, mint az x és az y tengely. A Föld felszínének felületekkel történő reprezentálása példa a nem egységes (vagy multi-) skálázott fraktálokkal történő ábrázolásra. Azok az alakzatok, amelyek statisztikailag invariánsak a különbözően skálázott koordinátákkal történő transzformálásra, önaffin alakzatoknak tekinthetők: a Föld felszíne példa az önaffin fraktálokra, azonban nem példa az önhasznós fraktálokra. A szintvonalak, amelyek a felszín vízszintes metszetei, a statisztikailag önhasznós jelenségekre szolgálnak példaként (mivel az egyes szintvonalakhoz állandó z érték tartozik). Mivel a Föld felszín önaffin és nem önhasznós, azok a módszerek, amelyek a felszín alapján határozzák meg a fraktáldimenziót más eredményhez vezetnek, mint a felszínt jellemző szintvonalakból kiinduló módszerek.

Hosszak és a területek mérésének hibái

A méretarány (skála), mivel kapcsolatban van a generalizálással és a felbontással, jelentős befolyást gyakorol a hossz- és területmérésre. A pontok jellemzésével, a hosszak és területek becslésével összefüggő kérdések kapcsolatban vannak az egyes jelenségek fraktáldimenziójával. A területek becslése - különösen raszteralapú rendszerek esetén - igen gyakran a pixelek megszámlálásán alapszik;

- a területbecslés hibája ilyenkor az objektum határvonalára által metszett pixelek számának a függvénye,
- az egynél nagyobb fraktáldimenziójú határvonalak a pixelméret csökkenésével (azaz a felbontás növekedésével) egyre összetettebben jelennek meg,
- minél bonyolultabb a határvonal, azaz minél nagyobb a dimenziója, annál kevésbé nő a hiba a cellamérettel,
- a pixelalapú területbecslés hibája függ a jelenség tájbeli eloszlásától is: egy "tömör" jelenség területének a hibája lényegesen kisebb egy "szétszórt" jelenség területének hibájánál;
- a területmeghatározás százalékos hibája $(1-D/4)a$, ahol az a paraméter a pixel területe, D a határvonal fraktáldimenziója,
- a középhiba erősen tagolt területen $0,5a$ értékkel, míg egyszerűbb sima határvonalú területen $0,75a$ értékkel arányos.

5. Ellenőrző kérdések

1. A szigetek parttagoltságának meghatározására melyik a legelterjedtebb „hagyományos” módszer?
2. Mekkora egy 314 km² területű és 628 km hosszúságú „sima” partvonallal rendelkező sziget parttagoltsága a legkisebb kerületek módszerével számolva?
3. Melyek a fraktálok alaptípusai?
4. Ismertessen fraktáltulajdonsággal rendelkező földrajzi alakzatokat, jelenségeket!
5. Mi a kapcsolat egyes jelenségek hosszának és területének mérési hibája és fraktáldimenziója között?

6. Irodalomjegyzék

Fokasz N.: Káosz és fraktálok. Új mandátum, 1999.

GIS Figyelő: 47. Fejezet – Fraktálok. Szerkesztette: Brian Klinkenberg, University of British Columbia, magyar változat: Detrekői Ákos, Budapesti Műszaki Egyetem.

Korvin, G. 1992. Fractal Models in the Earth Sciences. Elsevier. Amsterdam. P. 396.

Peitgen, H.O., Richter, P.H. (1986) The beauty of fractals. Berlin: Springer-Verlag

Stewart I. 1991. A matematika problémái. Akadémiai Kiadó. 279.

Szabó I.L. 1997. Ismerkedés a fraktálok matematikájával. Polygon Könyvtár. Szeged. P. 65.

10. fejezet - Mesterséges neurális hálózatok, neurális modellek

A fejezet céljai: a mesterséges neurális hálózatok felépítésének, típusainak és működésének áttekintése, valamint a neurális modellezés alapjaival, a hálózatok tanításának lépéseivel ismerkedünk meg. Egy gyakorlati példán keresztül kapunk betekintést a hálózatok geoinformatikai alkalmazásába.

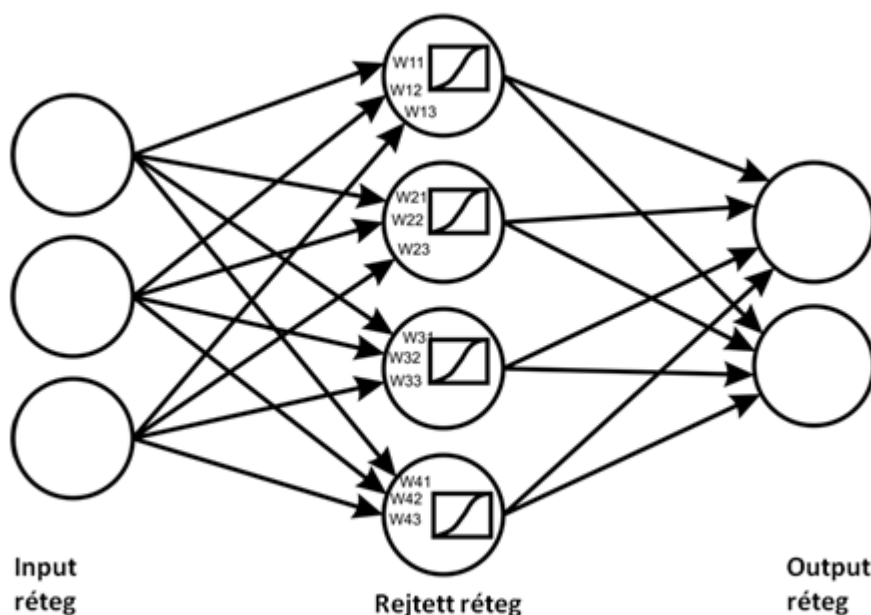
Szükséges ismeretek, fogalmak: emberi agy vázlatos működése, neuron, felügyelt és felügyelet nélküli tanulás, verifikáció, koordináta transzformáció

1. 10.1. Mesterséges neurális hálózatok áttekintése

A mesterséges neurális hálózatok (ANN) az emberi agy működéséhez hasonlóan funkcionáló számítási modellek. Az emberi gondolkodást tanulmányozva a kutatók felismerték, hogy a külvilág ingereit az érzékeforrásokból az idegsejtek egy olyan bonyolult hálózaton továbbítják, melynek kereszteződéseiben lévő csomópontok a különböző összeköttetésekből érkező információt feldolgozzák és a feldolgozott értékeket számtalan további idegszálon keresztül újabb csomópontok felé továbbítják, míg el nem érik a kérdéses ingerre adandó választ felelős agyi egységeket. A számtalan részfeldolgozáson átesett inger által kiváltott válasz részben örökletes tényezőktől függ, részben pedig az egyén tapasztalatától, illetve a tanulástól. Bizonyos bemeneti hatásokra a rendszer 'behuzalozottan' (előre programozottan) működik, míg más bemeneti adatok esetén a válasz függ az egyén tapasztalataitól, korától, iskolai végzettségétől, stb.

A nem orvosi kutatások szempontjából az a lényeges, hogy ez a struktúra adaptive, azaz válaszával képes a bemeneti adatokhoz tanulással alkalmazkodni (Sárközy, 1998). Sematikusan a 10.1. ábrán tanulmányozhatjuk egy több bemeneti réteggel rendelkező ANN szerkezetét.

10.1. ábra - ANN szerkezete



Az ANN-ek alkalmazása két lépésből tevődik össze. Az első fázis a tanítás, amelyhez egy bemeneti és a hozzá tartozó kimeneti adatbázist használunk. A tanítás olyan iteratív eljárás, melynek során a hálózat által számított eredmények fokozatosan megközelítik a kívánt, valós értékeket. Az eljárás eredményeként nyert "tanított hálózat" alkalmazásával a szimulációs fázisban új bemeneti adatok felhasználásával kapjuk meg az outputokat.

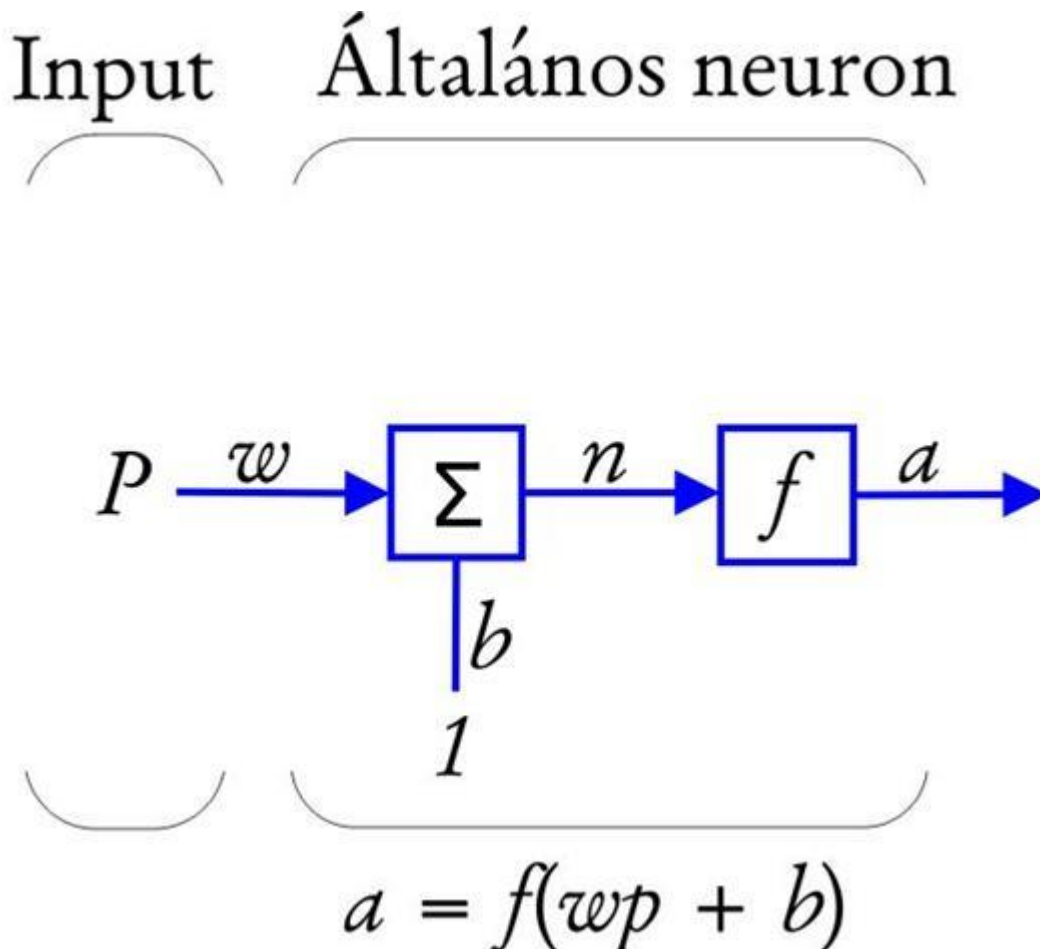
A neurális hálózatok alkalmazása több lépésben történik:

1. Hálózat szerkezetének megtervezése (rétegszám, neuronok száma, aktivációs függvény típusának megválasztása)
2. Tanító és tesztadatok kiválasztása
3. Hálózat tanítása
4. Tesztelés
5. Szimuláció
6. Validáció

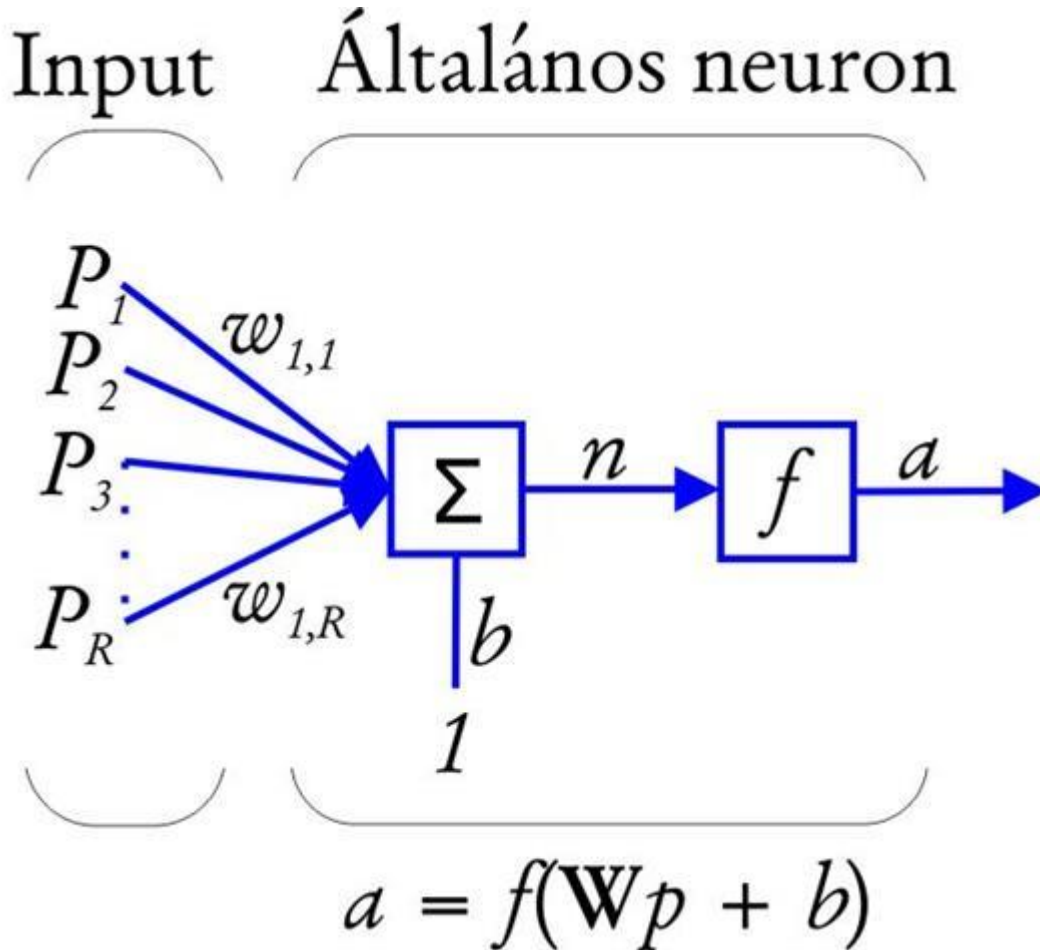
2. 10.2. Mesterséges neurális hálózatok felépítése

Az ANN-ok alapelemei az egyes neuronok (10.2. ábra). A bemenő p skalár és w súly, valamint a b bias (eltolás) és 1 konstans szorzatainak összege képezi a neuronba bejövő jel súlyozott összegének n értékét (net). A neuronba belépett, összegződött n értéket egy f aktivációs függvény alakítja át a kimeneti értékévé (Paláncz, 2011). Az aktivációs függvény által átalakított jel adódik át a következő neuronnak (10.2. ábra).

10.2. ábra - Neurális hálózat sematikus működési modellje egy neuronnal és egy bemeneti jellel (Hagan et al. 1996 alapján)



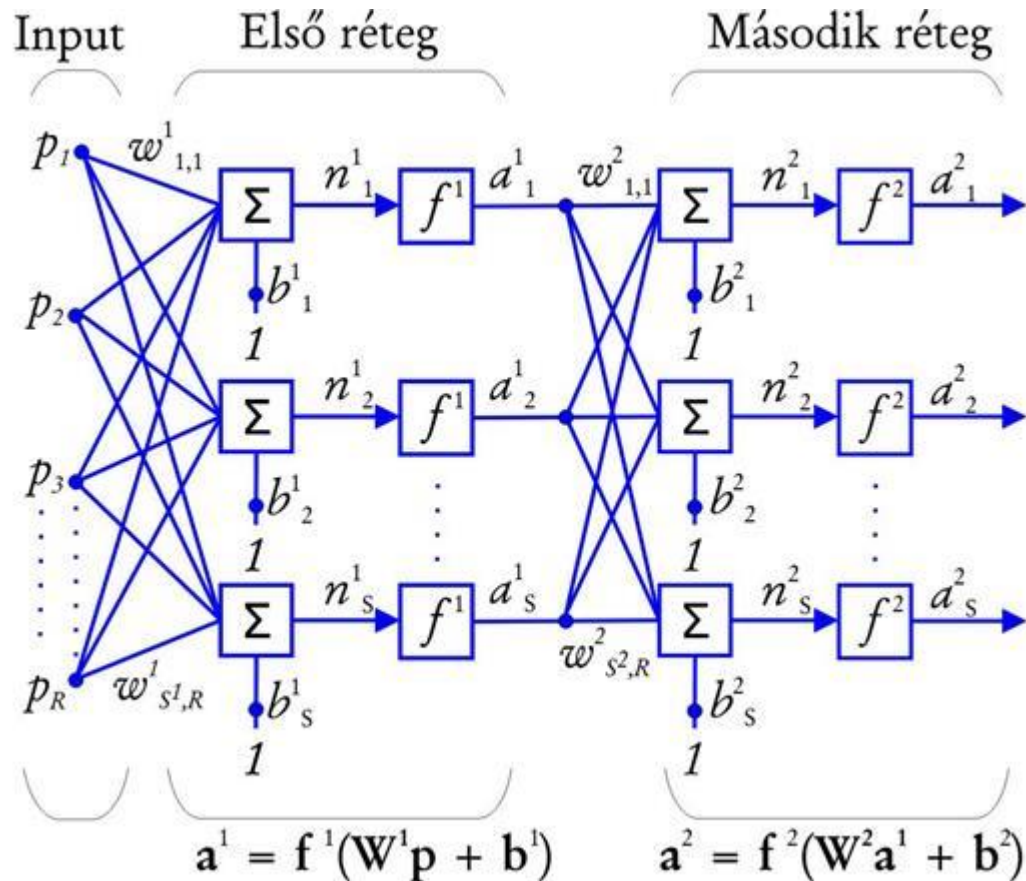
10.3. ábra - Neurális hálózat sematikus működési modellje egy neuronnal és többszörös bemeneti értékkel (Hagan et al. 1996 alapján)



Valójában a neuronoknak többszörös bemeneti értékei vannak (10.3 ábra). R különböző bemeneti érték esetén minden egyes $p_1, p_2, \dots, p_R$ input a hozzá tartozó $w_{1,1}, w_{1,2}, \dots, w_{1,R}$ súllyal szorzódik, ahol az első index a végponton lévő neuron sorszáma, a második a kezdő neuron sorszáma. A $w_{1,1}, w_{1,2}, \dots, w_{1,R}$ súlyok képezik a w súlyvektort, az inputok vektora p . Ekkor a *net* inputot az $n = w_{1,1} p_1 + w_{1,2} p_2 + \dots + w_{1,R} p_R + b$ összeg adja, vagy vektoros formában: $n = \mathbf{w} \cdot \mathbf{p} + b$.

A valós problémák megoldására általában nem elegendő egy neuron, hanem párhuzamosan dolgozó (azonos rétegen belül egymással kapcsolatban nem lévő) neuronokból álló rétegek kombinációjának eredményeként születő neurális hálózat szolgáltatja a megoldást (10.4. ábra). A legegyszerűbb ANN-ok egy bemeneti, egy rejtett és egy kimeneti réteget tartalmaznak (10.1. ábra). A bemeneti és kimeneti rétegek ismertek, míg a rejtett rétegeket ismeretlen értékű neuronok halmazai alkotják, amelyek nem állnak kapcsolatban a modell környezetével.

10.4. ábra - Neurális hálózat sematikus működési modellje két, S számú neuronból álló réteggel és többszörös bemeneti értékkel (Hagan et al. 1996 alapján)



10.5. ábra - Az első réteg súlymátrixa

$$\mathbf{W}^1 = \begin{bmatrix} w_{1,1}^1 & w_{1,2}^1 & \dots & w_{1,R}^1 \\ w_{2,1}^1 & w_{2,2}^1 & \dots & w_{2,R}^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{S,1}^1 & w_{S,2}^1 & \dots & w_{S,R}^1 \end{bmatrix}$$

Minden réteg saját aktivációs függvényvel, súlymátrix-szal és bias-szal rendelkezik (10.5. ábra). A 10.4. ábrán az első réteg a rejtett, míg a második a kimeneti réteg. A második réteg ($\mathbf{a}^2 = \mathbf{f}^2(\mathbf{W}^2 \mathbf{a}^1 + \mathbf{b}^2)$) inputja az első réteg outputja. Így a hálózat outputját az $\mathbf{a}^2 = \mathbf{f}^2(\mathbf{W}^2 \mathbf{f}^1(\mathbf{W}^1 \mathbf{p} + \mathbf{b}^1) + \mathbf{b}^2)$ összefüggés adja meg. A hálózat komplexitása és számítási képessége a rejtett rétegek és a rétegekben lévő neuronok számától függ.

3. 10.3. ANN-ok típusai

Az ANN-ok megkülönböztetését számos szempont alapján elvégezhetjük. Mivel a rejtett réteg elemei egyaránt kapcsolódnak a bemeneti és kimeneti réteg minden egyes neuronjához, így ezen kapcsolatok topológiája alapján két fő típust határozhatunk meg, az *előrecsatolt* (*feedforward*) és a *visszacsatolt* (*recurrent*) hálózatot. Ezek között a különbség az, hogy míg a visszacsatolt hálózat reprezentációjaként előálló irányított gráf hurokkal rendelkezik, vagyis visszacsatolja az eredményt, addig az előrecsatolt nem. Nyilvánvalóan az idő és az időbeli késleltetések ebben a típusban fontos szerepet játszanak. Példák mindkét típusra:

- Előrecsatolt (*feedforward*): MLP (Multi Layer Perceptron). A többrétegű hálózat a bemeneti és kimeneti rétegei között aktív és rejtett műveletvégző neuronkapcsolatokat használ. A betanítása *felügyelt típusú*, a kimeneti hibájának meghatározása adja a túltanulás esetleges kockázatának rátáját. Ha túltanul az osztályozó, akkor a tesztadatok jóval nagyobb számban térnek vissza az eredeti bemeneti adatok számánál. A hálózat alkalmazásánál elsődleges szempont a rejtett és aktív rétegek száma, valamint az azokon elhelyezkedő perceptronok száma. A gyakorlatban ez a túlbecslés és az alábecslés útján történik (Zaletnyik, 2003).

- Visszacsatolt (*recurrent*): legelterjedtebb típusai a Kohonen-féle SOM (self-organising maps), vagyis Önszervező Térképek (Kohonen, 2001). A *felügyelet nélküli* eljárás lényege hogy az n dimenziós bemenő

adatokat szabályos kétdimenziós tömbökre képezi le, és a leképezés eredményét grafikusán és numerikusan ábrázolja. A hasonló mintákat a kiviteli réteg szomszédos elemeihez társítja, vagyis a minták input-térben való eloszlásán kívül, a köztük lévő topológiát is megtanulja. Az önszervező térkép egyszerre végzi az adatok klaszterezését és dimenzió csökkentését is. Ezért különböző típusú problémák megoldására alkalmas, és olyan módszerek mellett is alternatívát jelenthet, mint a főkomponens analízis, vagy a k-közép klaszterezés.

További csoportosítási lehetőségként különbséget tehetünk *felügyelt és felügyelet nélküli tanulási* módok között:

- *felügyelt tanulás* esetén a training-halmaz egyaránt tartalmazza az input-, és az output-mintákat. Egy iterációs folyamat során a neuronok közötti kapcsolatok súlya úgy változik, hogy az adott bemeneti mintához a megfelelő eredményt rendeljük;
- *felügyelet nélküli tanulás* esetén csak az input-mintahalmaz ismert, a kimeneti neuronok pedig versengenek bizonyos hasonlósági szempontok alapján a bemeneti mintákért. A nyertes neuronok súlyvektora a hozzátársított bemenet értéke alapján változik. Az ilyen típusú hálók segítségével szabályszerűségek deríthetők fel a mintaadatok eloszlásában.

3.1. 10.3.1. A hálózatok tanítása

Tanításnak, vagy tanulásnak nevezzük azt a folyamatot, amikor a neurális hálózatot a felhasználó, egy adott probléma megoldására, valamely adott algoritmus alkalmazásával felkészíti. A tanulás valójában egy konvergens iteratív eljárás, amikor a rendszer meghatározza a legkedvezőbb súlyokat, paramétereket a tanító adatok alapján úgy, hogy a hálózat számított kimeneti értékei minél jobban közelítsék meg a kívánt kimeneti értékeket.

A hálózat tanulása nagymértékben függ a súlyok kezdeti értékétől. A tanítás iterációs lépései során az aktuális súlyokat valamilyen korrekcióval módosítják, a megfigyelt hálózati hibák alapján. Ez a folyamat addig tart, amíg a hálózat eléri egy hiba minimumot. Ekkor befejeződik a tanítás. Mivel itt egy minimum kereséséről van szó, ezért érdemes a többszöri inicializálás és újra tanítás, mert lehetséges, hogy egy másik kezdeti súlyfelvétel után jobb eredményt ér el a hálózat. Említsük itt meg a tanítási módszerek két típusát

- *Delta szabály (Widrow és Hoff)*: az egyik legegyszerűbb módszer, ahol a számított w_{new} új súly a w_{old} régi súly értékének és az elvárt t_i valamint a számított a_i kimenet különbségének egy 1-nél kisebb konstans (η : tanulási ráta) szorosának összege.

$$w_{new} = w_{old} + \eta(t_i - a_i)$$

A η tanulási ráta érték szabályozza a súly értékének változását, így a tanulási sebességet. A tanítás első lépésében a kiinduló súlyértékek véletlen számok. Az iteráció mindaddig folytatódik, amíg a súlyok el nem érik a kívánt értéket.

- *Backpropagation* (hibavisszaterjesztés) algoritmus: a többrétegű (MLP) előre csatolt hálózatok leggyakrabban alkalmazott tanítási algoritmus. A tanulás során tanuló inputokat kap a háló. Ha a kimenet és a kívánt érték között eltérés van (hiba lép fel), akkor a súlyokat úgy módosítjuk, hogy a hiba csökkenjen. Egy többrétegű hálóban minden egyes bemenetet több súly köt össze egy kimenettel, és ezen súlyok mindegyike több mint egy kimenet értékének kialakításában vesz részt. A hibavisszaterjesztési algoritmus nem más, mint a kimeneti hiba ésszerű szétosztása az egyes súlyok kimenetre gyakorolt hatásai közt.

Túltanulás (over-fitting) jelensége lép fel, amikor a tanulási folyamat során nem az általános összefüggéseket, hanem az adott minta sajátosságait tanulja meg a modell. Ennek elkerülése érdekében kettéosztjuk a mintát tanulási és tesztelési részmintákra. A tesztmintákat nem használjuk fel a tanítás során, de ismertek az összetartozó be és kimeneti értékeik. A tanulási mintán tanított modell eredményeit összehasonlítjuk a tesztelési mintán elért eredményekkel (*verifikáció*). Ha a pontosság hasonló a tanulási mintához, akkor a modell elfogadható. Ha viszont a tesztelési mintán mért hibaarányok jelentősen meghaladják a tanulási mintán mért szintet, akkor bizonyítást nyer a túltanulás, új modellt kell készíteni. A túltanulás elkerülését alapvetően a tanuló ciklusok számának helyes megválasztása biztosíthatja. Ez gyakorlatban számos kísérletezést és folyamatos nyomon követést takar. Az eredmény eléréséhez ugyanakkor rendkívül fontos, mivel sem az elégtelenül megedzett, sem a túltanult neurális háló nem alkalmas előrejelzésre.

Megfelelően sok neuron felvétele esetén a neurális hálózatok alkalmasak pl. interpolációra, vagyis tökéletesen meg tudják tanulni a tanítópontok adatait. A neurális hálózattól azt várjuk el, hogy ne csak a tanítópontokban,

hanem a tanítópontok között is jó közelítést adjon. A tanítópontok mellett ezért szükség van tesztpontokra is, hogy minősíteni tudjuk a hálózatokat. Ha nincsenek tesztpontjaink az ellenőrzéshez, akkor viszont könnyen túltaníthatjuk a hálózatot. A túltanítás itt azt jelenti, hogy míg a tanítópontok hibája egyre csökken, addig a tesztpontok hibája egyre nagyobb lesz, a hálózat túlzottan illeszkedik a tanítópontokra (Zaletnyik, 2003).

4. 10.4. ANN-ok alkalmazása

A tudomány számos területén sikerrel alkalmazzák az ANN-okat, amelyek a gyakorlati felhasználás szempontjából a következő tulajdonságokkal jellemezhetők (Altrichter et al., 2006, Hagan et al., 1996; Retter, 2006):

1. Az ANN-ok GIS alkalmazásának előnyei:

- lényegében függetlenek az adatok statisztikai eloszlásától;
- akkor is alkalmazhatóak, ha a vizsgált probléma, a hatótényezők közötti kapcsolatok nem minden részletében ismertek és feltártak;
- nincs szükség az egyes tényezők súlyának definiálására;
- eltérő típusú, különböző karakterisztikával rendelkező adatok is lehetnek a bemenő adatbázisban,
- pontos becslésekre képesek bonyolult, nemlineáris input/output kapcsolatok esetében is;
- hiányos és rosszabb minőségű bemenő adatbázis esetén is eredményesek lehetnek;
- nagyméretű adatbázisokat is képesek kezelni;
- a tanítási fázis után bármely más modellezési eljárásnál gyorsabban dolgoznak.

2. Az ANN-ok GIS alkalmazásának hátrányai:

- a hálózat tanítása minden esetben szükséges;
- számításigényesek a tanítási fázisban;
- a súlyok kezdeti véletlenszerű megadása eltérő kimeneteket eredményez;
- a hálózati paraméterek egy része, pl. a rétegek és a neuronok száma csak tapasztalati úton határozható meg;
- nem eredményeznek mélyebb betekintést a vizsgált rendszerbe és nem tárnak fel újabb kapcsolódásokat a faktorok között: “fekete doboz”-ként viselkednek.

Számos üzleti, ingyenes.pl. SNNS és nyílt forráskódú programcsomag – matematikai (*Matlab*, *Mathematica*) és GIS szoftverek (pl. *IDRISI*, *ENVI* és *ArcGIS*) is – rendelkeznek ANN modullal. A következő feladat megoldásához a *Fast Artificial Neural Network (FANN)* programot használjuk.

4.1. 10.4.1. Koordináta-transzformáció WGS84 és EOVRendszerek között ANN-tal

A modell WGS84 földrajzi koordinátákból EOVRXYZ koordinátákat számol előrecsatolt ANN-tal, a bemeneti és a kimeneti rétegben egyaránt 3 neuronnal, a rejtett rétegben pedig 10 neuronnal (10.6. ábra).

10.6. ábra - A megoldás folyamatábrája (animáció)



Mesterséges neurális hálózat betanítása és szimulációja

Az adatok előkészítésének fázisában két ASCII file-t hozunk létre. Az első file a tanító állomány, amely az összes rendelkezésre álló adatpár 70 %-a, és a WGS84, valamint a hozzá tartozó EOVS koordinátákat tartalmazza 0 és 1 közötti értékek sorozataként. A maradék 30 %-át az adatpároknak a második file-ban tároljuk, ez lesz a teszt állomány. Amikor a tanítás során a hálózattal számított transzformációs hiba kisebb lesz, mint az előre megadott küszöbérték, a tanított hálózatot elmentjük. Ezzel a ANN-ünk képessé vált az új WGS84 koordináták átszámítására. A koordináták egyelőre 0-1 közötti értékeként tárolódnak, a megfelelő formátum előállításához szükséges még egy Python program (WGS84 formátumhoz), valamint egy további Python program (EOVS formátumhoz). A tanítást a training video, a szimulációt a simulation video mutatja be.

5. Ellenőrző kérdések

1. Az ANN szerkezetileg milyen rétegekből épül föl?
2. Melyek az ANN alkalmazásának lépései?
3. Az ANN-oknak milyen típusait ismerjük?
4. Hogyan történik az ANN tanítása?
5. Melyek az ANN GIS alkalmazásának előnyei és hátrányai?

6. Irodalomjegyzék

Altrichter M., Horváth G., Pataki B., Strausz Gy., Takács G. Valyon J. 2006. Neurális hálózatok. Elektronikus könyv. Panem Kft. Budapest

Hagan M.T., Demuth H.B., Beale M.H., 1996. Neural Network Design, Boston, MA., PWS Publishing, 734 p.

Kohonen T., 2001. Self-Organizing Maps, Springer Verlag Berlin, 501 p.

Paláncz B., 2011. Mesterséges Intelligencia Építőmérnököknek, MIÉ, Budapest

Retter Gy., 2006, Fuzzy, Neurális Genetikus, Kaotikus Rendszerek, Budapest: Akadémiai Kiadó, 425 p.

Sárközy F. 1998. Mesterséges neurális hálózatok mint GIS függvények. Geomatika a geodézia elméletében és gyakorlatában szemináriumon elhangzott előadás szerkesztett szövege. Sopron

Zaletnyik P. 2003. WGS-84 – EOVS koordináta transzformáció neurális hálózattal. TDK dolgozat. BME

11. fejezet - Térbeli terjedés, diffúziós modellek

A fejezet céljai: a diffúzió általános fogalmának meghatározása, a geográfiai térbeli folyamatok típusainak megismerése, a tér- és időbeli terjedés matematikai leírásához szükséges fogalmak áttekintése és Hägerstrand diffúziós alapmodelljén keresztül néhány földrajzi alkalmazás bemutatása.

Szükséges ismeretek, fogalmak: expansió, relokáció, trendfelület, logisztikus növekedés, Monte Carlo szimuláció, sztochasztikus modell, Brown-mozgás

1. 11.1. A diffúzió fogalma

A diffúzió mindennapi jelentése: áramlás, szétterjedés, keveredés, elegyedés. A fizikában és kémiában a anyagi részecskék hőmérséklet-, vagy koncentráció-különbség hatására bekövetkező mozgása. A diffúzió mind az élő szervezetekben, mind az élettelen természetben alapvető folyamat, az anyagszállítás legáltalánosabb módja.

A geográfusok számára a terjedés olyan térbeli folyamatot jelent, amelynek során valamely „új jelenség új helyen” jelenik meg. A globalizáció korában leggyakrabban vizsgált természeti-társadalmi diffúziók: populáció-, járvány-, információ-, innováció-terjedés, stb. A térbeli terjedési folyamat időbeli változásának (dinamikai) vizsgálata egyrészt lehetőséget ad a folyamat jelenlegi térbeli mintázatának elemzésére, másrészt a jövőre vonatkozóan előrejelzéseket készíthetünk a folyamat várható tér- és időbeli viselkedését illetően.

2. 11.2. A térbeli terjedés típusai

Az alábbiak szerint csoportosíthatjuk a térbeli terjedési folyamatokat (11.1. ábra):

1. Expanziós, szomszédsági (a): a folyamat során az anyag, információ, stb. a kiindulási helyén is megmarad és új területek adódnak a forráshelyhez. Pl. szennyeződésterjedés.

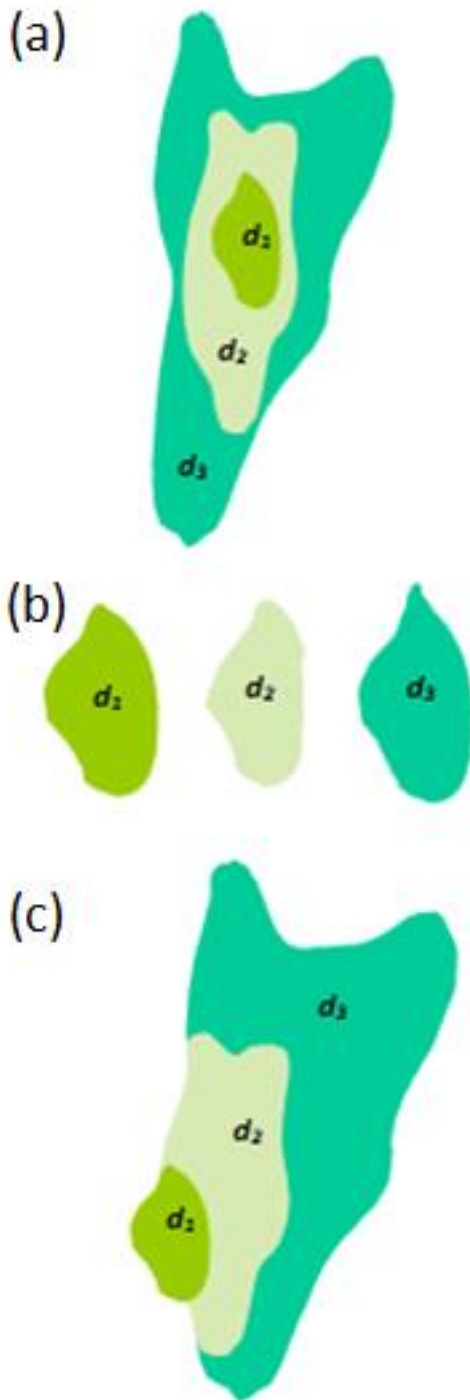
a. Ragályos, járványszerű: átmeneti típus a természeti és társadalmi terjedési folyamatok között.

b. Hierarchikus, kaszkád: társadalmi folyamatokra jellemző típus. Jellemzően „fentről” a nagyobb központokból indul a diffúziós folyamat „lefelé”, az alsóbb szintek irányába.

2. Relokációs, áthelyeződéses (b): a migráció, a társadalmi csoportok helyváltoztatása az alaptípusa. Az új területre áthelyeződéssel a csoportok elhagyják a kiindulási területet.

3. Vegyes expanziós és relokációs (c): tipikus példája az erdőtűz terjedése.

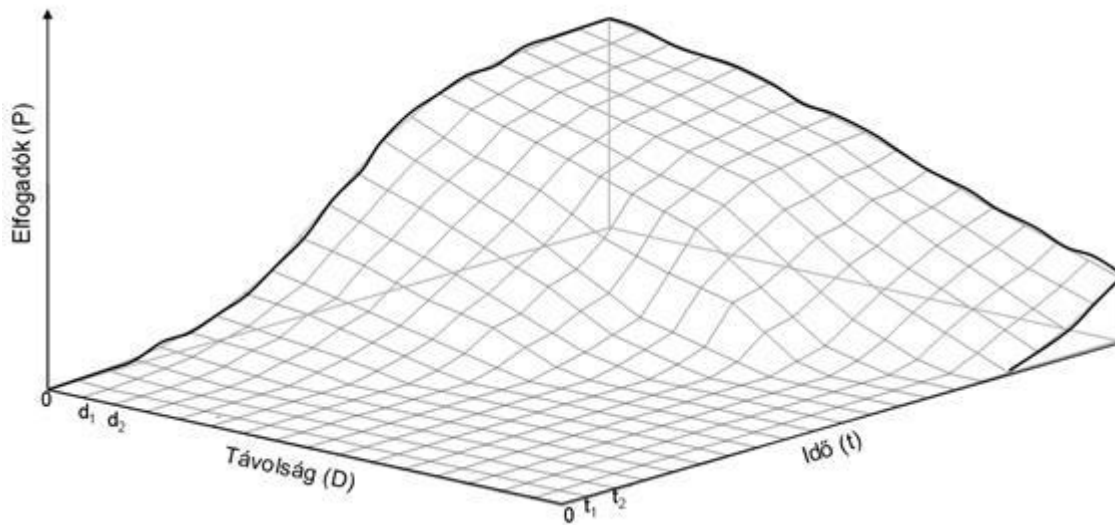
11.1. ábra - A térbeli terjedés típusai (Haggett, 2006 alapján)



3. 11.3. Diffúziós hullámok időben és térben

A földrajzi diffúziós hullámok terjedésének elméletével először *Torsten Hägerstrand* svéd geográfus foglalkozott az 1950-es évektől kezdve született tanulmányaiban. Elemezte a járványok, a mezőgazdasági innovációk terjedésének folyamatát, térbeli és időbeli változását. Munkássága az USA-ban további elméleti kutatásokat indukált, valamint számos gyakorlati alkalmazási példát dolgoztak ki az amerikai geográfusok. A diffúziós folyamatok idő- és térbeli terjedési görbéit vizsgálva a grafikonok képe hullámformájú. A terjedést három dimenzióban (D : távolság, t : idő, P : elfogadók száma) ábrázolva kapjuk a trendfelületeket (11.2. ábra). A P -t sík metszetgörbéi jellegzetes 'S' alakú, ún. *logisztikus görbék*. Ezeket matematikailag a *logisztikus függvényekkel* írhatjuk le.

11.2. ábra - A térbeli terjedés három dimenziós ábrázolása: trendfelület (Nemes Nagy, 1998 alapján)



4. 11.4. Növekedés behatárolt környezetben, a logisztikus modell

Az N egyed eltartására képes környezetben a népességszám növekedést (populáció: P) a logisztikus növekedési modell írja le. Alkalmazzuk ezt a modellt az információterjedés leírására. Legyen egy N lélekszámú népességben P azon egyéneknek a száma, akik már ismerik az információt, ekkor $N-P$ azok száma, akik nem. Feltehetjük, hogy a terjedés sebessége arányos azok számával, akik már ismerik az információt, és azokéval is, akik majd még ezután fogják megismerni.

$$\frac{dP}{dt} = r(N - P)P,$$

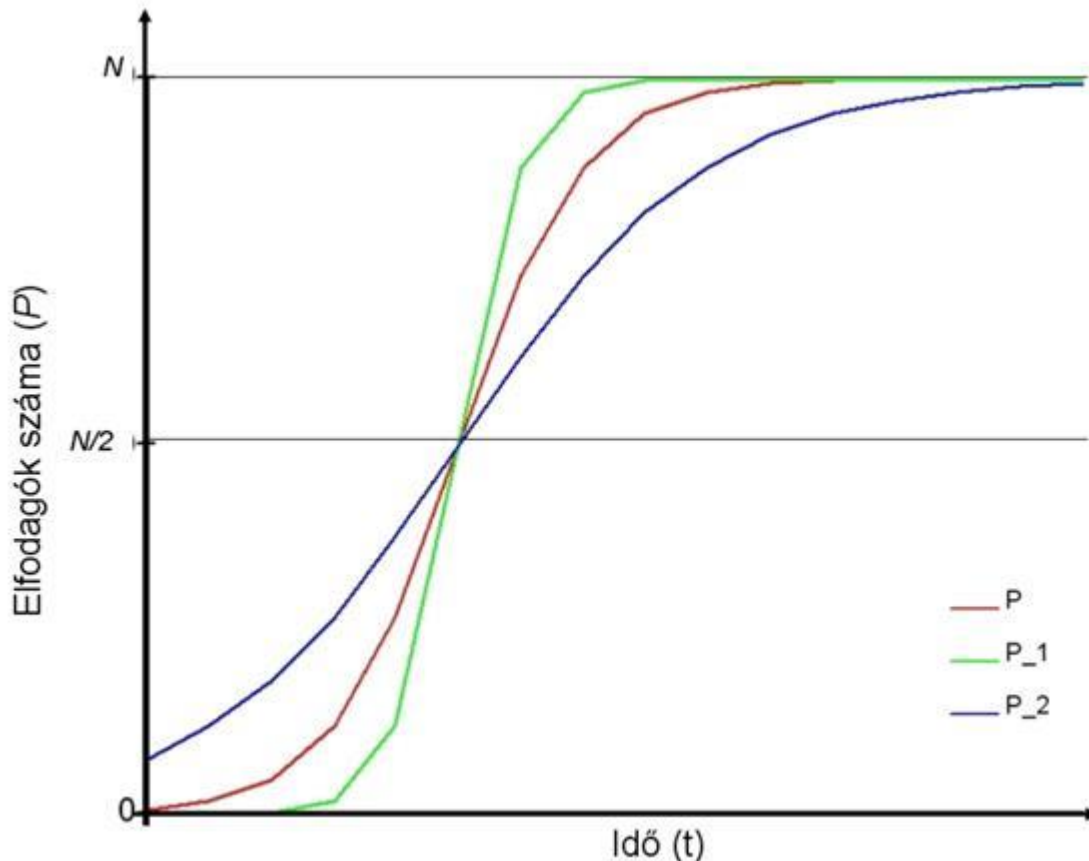
ahol t idő, $r > 0$ állandó, a növekedési ráta: $r(N-P)$ értékét határozza meg. A ráta értéke csökken, ahogy P közeledik N -hez. Az ún. egyensúlyi egyeneseket a $P=0$ és $P=N$ értékeknél vannak, ezek határozzák meg a függvény alsó és felső korlátját. $P=N/2$ -nél a görbének inflexiós pontja van (Thomas, 2006): addig egyre növekszik az információterjedés sebessége, onnantól pedig egyre inkább csökken, vagyis a folyamat lassan indul, gyorsulva eléri sebessége maximumát, majd a felső határértékhez közeledve újra lelassul (11.3. ábra).

A folyamatot leíró függvény a következő:

$$P(t) = \frac{N}{1 + e^{a-bt}},$$

ahol $P(t)$ az információt t idő után elfogadók száma, a konstans, b a görbe meredeksége. A b értéket az határozza meg, hogy milyen gyorsan terjed az információ, a P_1 görbe egy gyorsabb, míg a P_2 egy lassabb folyamatot leíró görbe (3. ábra).

11.3. ábra - Logisztikus függvény



5. 11.5. Hägerstrand szimulációs modellje: mezőgazdasági innovációk terjedése

A múlt század húszas éveiben a svéd kormány támogatta azokat a gazdákat, akik az addig szokásos, korlátozások nélküli legeltetési módszert (amellyel pl. a marhagulyák károkat okoztak a friss erdőtelepítésekben) fölváltották intenzívebb legelőhasználati módszerekkel. Ennek lényege az volt, hogy elkerített és feljavított legelőkre korlátozták az állatok mozgását, így védve a fácsemetéket és egyéb mezőgazdasági területeket.

Hägerstrand először egy általános, elméleti térbeli diffúziós modellt készített (Haggett, 2006), majd a fenti problémára szimulációk futtatásával alkalmazta.

5.1. 11.5.1. Sztochasztikus szimuláció

Hägerstrand feltételezte, hogy az információ a forrástól, akit nevezzünk feladónak, az üzenet átvevőjéhez közvetlen, szóbeli kommunikációval jut el (személyes, vagy telefonon történt megbeszélés során). Az információ átadásának valószínűsége a távolsággal exponenciálisan csökken (11.4. ábra). A sztochasztikus modell legfontosabb alapszabályai a következők (részletesebben lásd: Haggett, 2006):

1. A vizsgált területet 5×5 km²-es cellákra osztotta, amelyekben cellánként egy ember helyezkedik el.
2. Az információ átvételével egy időben megtörténik az innováció elfogadása.
3. Minden egyes iteráció során egy üzenetet közvetít a feladó attól függetlenül, hogy az átvevő rendelkezik-e már az információval, vagy sem.

Az információk átadásának valószínűségét az ún. MIF-ek (átlaginformációs mezők) szabályozzák. A cellák (11.5. (a) ábra) tartalmazzák a valószínűségek értékeit (a mezővel lefedett területen kívül a valószínűség 0) és az ezek alapján generált kumulatív valószínűségeket (11.5. (b) ábra). A mezők számításának módszerét az 11.6. ábra animációjának segítségével tanulmányozhatjuk.

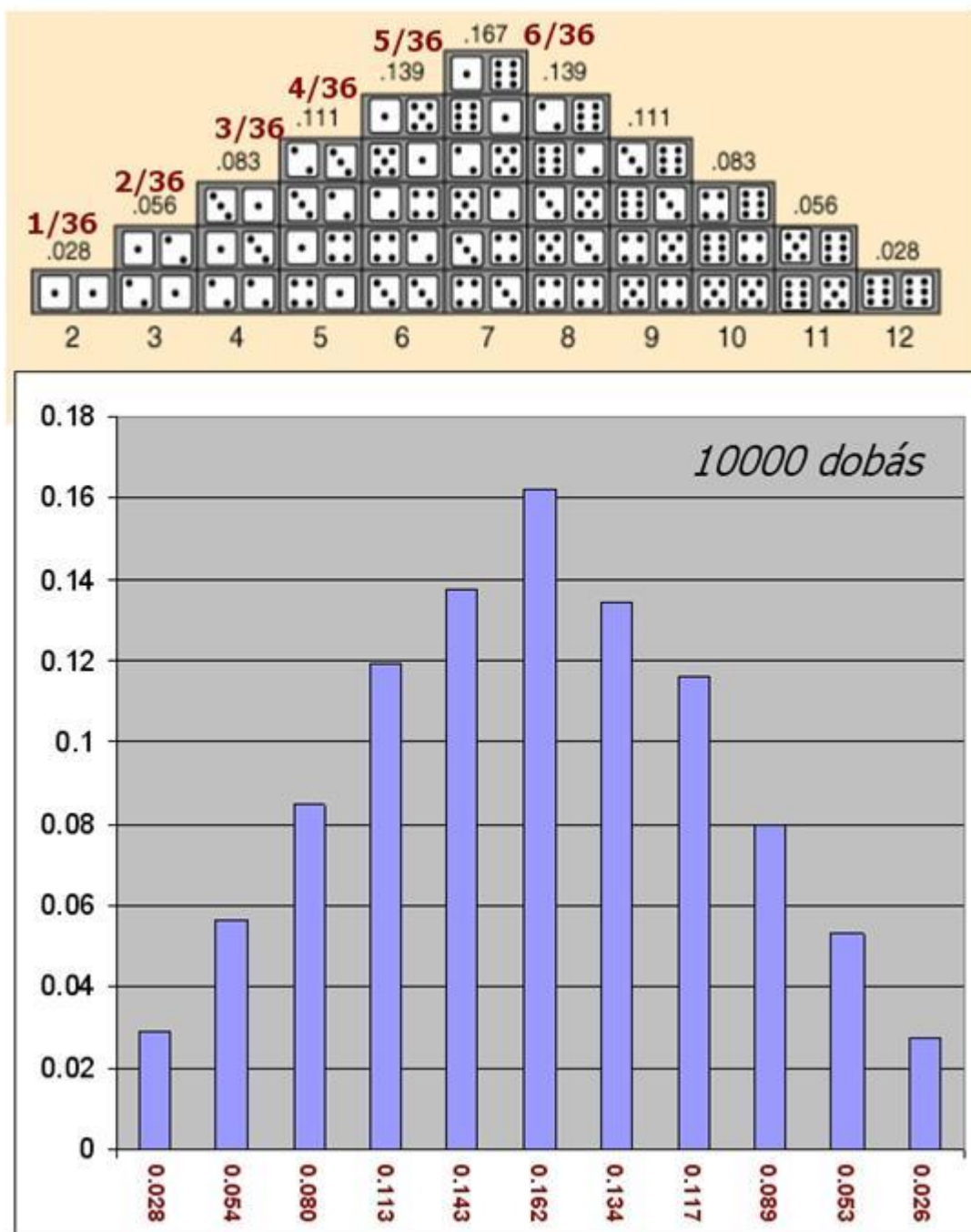
A szimuláció folyamata bármikor megállítható, viszont ha már minden egyes cellába eljutott az üzenet, akkor a diffúziós folyamat leáll. Nagyszámú (több száz, akár több ezer) szimulációs sorozat - amelyeket realizációknak nevezünk - lefuttatása minden esetben kissé eltérő térbeli mintázatot ad, de összegük a kiindulási valószínűségeket adja vissza (ld. Kockadobás, ismert kiindulási valószínűség esetén 11.4. ábra).

5.1.1. 15.5.1.1. Monte Carlo módszer

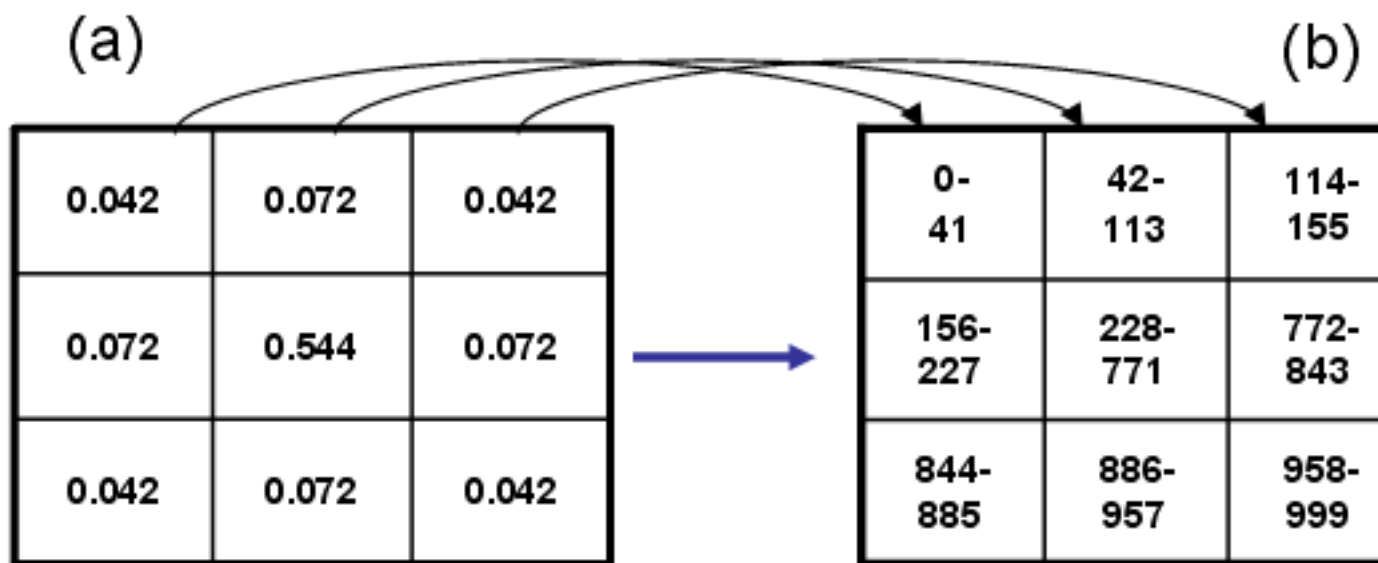
A tudomány történetében az első, Monte Carlo szimuláció elvén nyugvó, a π szám értékének meghatározására elvégzett *Buffon tűje* kísérletet tekinthetjük.

Számítógéppel a II. Világháború alatt a Manhattan program keretében *Teller Ede* és munkatársai végeztek sztochasztikus szimulációkat az atombomba előállításához nélkülözhetetlen neutron diffúzió vizsgálatára. Az elnevezés is a csoport egyik tagjától ered, aki rajongott a szerencsejátékokért (11.4. ábra). A sztochasztikus szimulációs módszereket Monte Carlo szimulációknak is szokták nevezni, melynek alapjait *Neumann János* magyar származású matematikus dolgozta ki. A sztochasztikus rendszerek sajátosságait az 1. fejezetben ismertettük. Ebben az esetben is a vizsgált rendszert egy *fekete doboznak* tekinthetjük, amelyen belül az információ terjedését véletlen események sorozataként kezeljük.

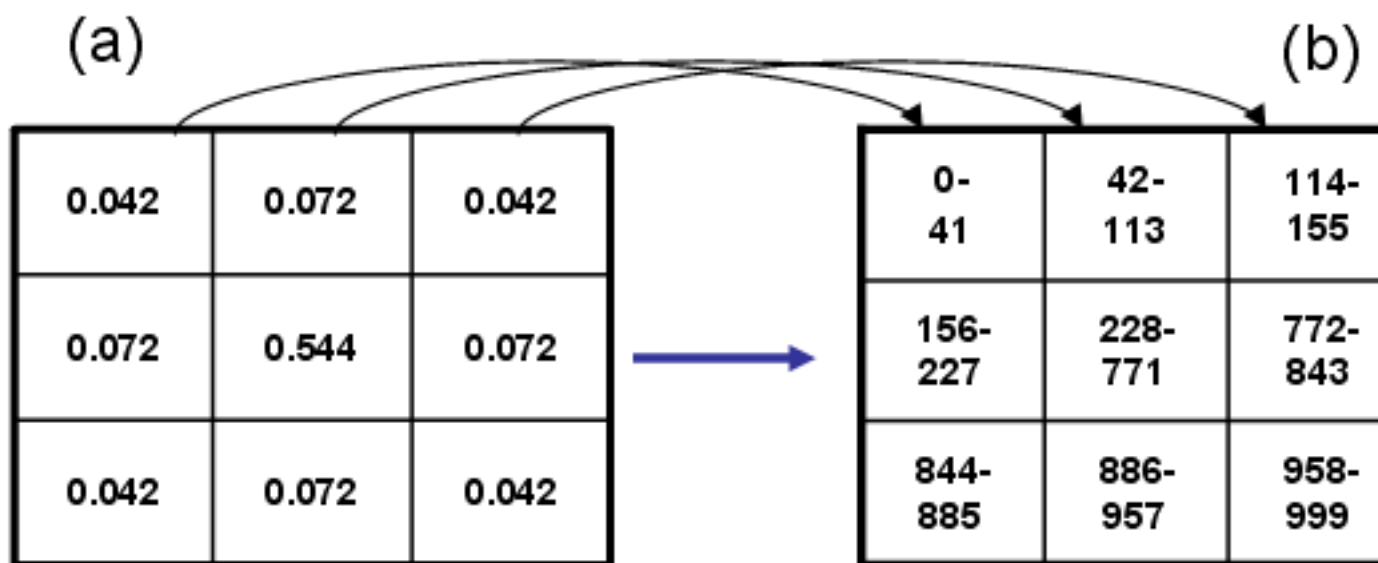
11.4. ábra - Két kockával történő dobás elméleti és 10000 dobás után a tapasztalati valószínűségei



11.5. ábra - Az átlaginformációs (MIF) mező cellái. (a) az információ terjedésének valószínűségi értékei a középső cellától számítva; (b) az információ terjedésének kumulatív valószínűségi értékei



11.6. ábra - Az átlaginformációs (MIF) mező cellái. (a) az információ terjedésének valószínűségi értékei a középső cellától számítva; (b) az információ terjedésének kumulatív valószínűségi értékei



6. 11.6. Módosított Hägerstrand modell és további alkalmazások

Hägerstrand alapmodellje nagyon sok egyszerűsítést tartalmaz. Valós folyamatok szimulációs modellezéséhez a szabályok módosítására van szükség. A módosítások egy része csak a cellák szerkezetét érinti: a cellák alakja, elrendezése a lefedett valós terület ismeretében egyszerűen változtatható, pl. hatszög alakú cellák alkalmazása. Egy terület „méhsejt”-ekkel történt lefedésére példa a MÉTA program alaptérképe. Kissé összetettebb, bár számítógéppel könnyen megoldható átalakítása az alapmodellnek, amikor a az egyes cellákhoz tartozó népesség-, vagy egyedszámot alakítjuk a valóságnak megfelelően. További átalakítást jelent, ha a modellbe határokat és korlátokat építünk be, amelyek a diffúziós folyamatok akadályaként funkcionálnak (ld. Haggett, 2006). Ezen változtatások megvalósításához a geoinformatika (GIS) számos megoldási lehetőséget kínál.

6.1. 11.6.1. Járványterjedés

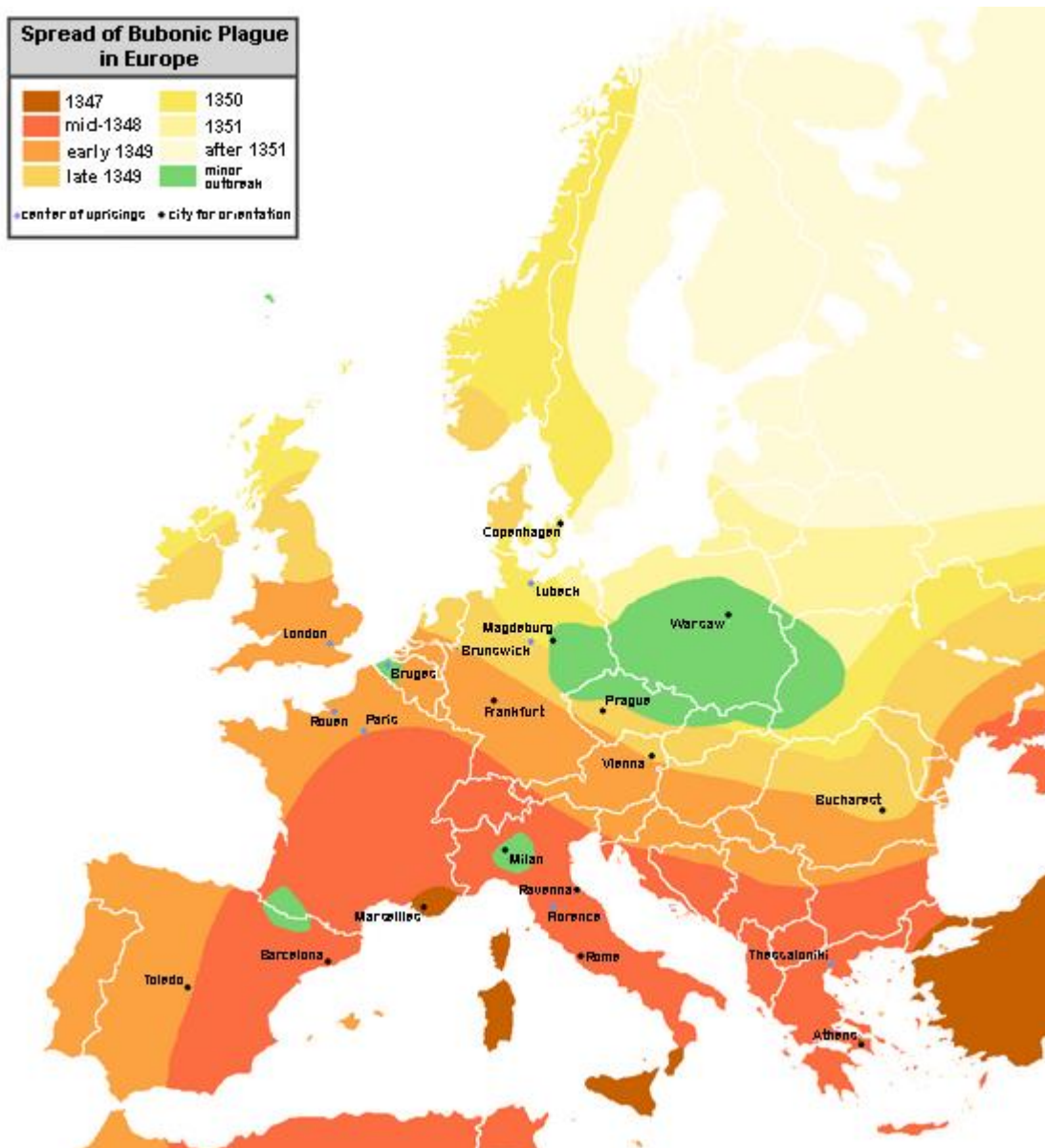
Tanulmányozzuk az 7. ábrát, amely a középkori pestisjárvány európai elterjedését ábrázolja! Választ kaphatunk a következő kérdésekre: mely központokból, milyen irányban és milyen átlagos sebességgel terjedt a halálos kór (Röst, 2010)?

SIR modell

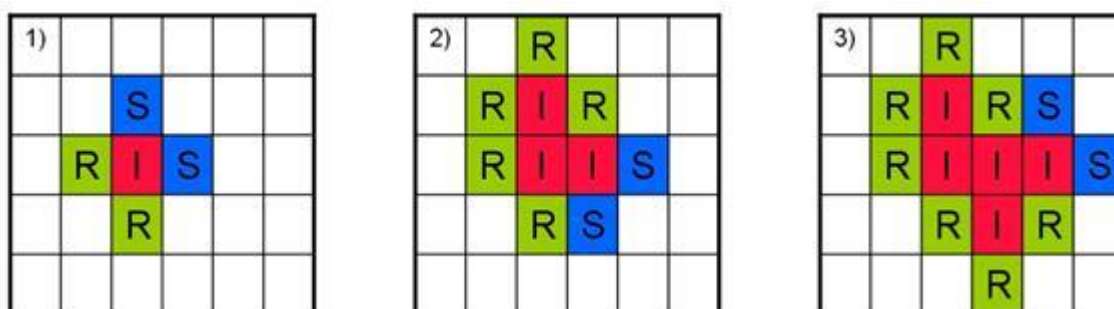
A járványterjedés térbeli modellezésére alkalmas az ú.n. Eden modell módosítása (amelynek egy tumornövekedésre kidolgozott változata a következő interaktív animáción tanulmányozható (forrás).

Az alapmodellen (használjuk újra Hågerstrand alapmodelljét!) módosításokat kell végrehajtanunk (Kun, 2011). Jelölje I (Infected: fertőzött), S (Susceptible: fogékony) és R (Recovered: gyógyult) az egymástól megkülönböztetett személyek csoportjait. A vírusterjedést újra egy rácsmodellben ábrázoljuk: minden mezőben egy ember helyezkedik el. A folyamat egy I fertőzött egyedtől indul, aki a vele közvetlenül érintkező szomszédjának adja át a fertőzést, amennyiben a szomszéd az S csoportba tartozik. A gyógyult egyedek irányába nyilvánvalóan nem terjedhet a fertőzés (11.8. ábra). Amennyiben az I fertőzött egyed p valószínűséggel adja tovább a fertőzést, $1-p$ a valószínűsége, hogy a közvetlen szomszéd immunis. A beteg egyedek által alkotott mintázat összefüggő és a mintázat, valamint a betegségterjedés jellemzői a p értéktől függenek. Létezik olyan p_c kritikus érték, amely alatt a fertőződés néhány lépés után megáll, felette pedig a járvány elindul. A $p = p_c$ esetet a 9. fejezetben, a fraktálmintázatok vizsgálata során már tárgyaltuk.

11.7. ábra - Középkori pestisjárvány európai elterjedése 1350 körül



11.8. ábra - A járványterjedési modell algoritmusá. (1) A fertőzött egyedet a piros szín jelöli. A betegség a vele közvetlenül érintkező két kékkel jelölt egyedre terjedhet tovább. Két szomszéd immunis. (2) Két további egyed megbetegedett, öt szomszéd viszont immunisnak bizonyult. További két beteg egyed fertőzőképes, a betegség a kékkel jelölt egyedekre terjedhet tovább. (3) Öt beteg egyed van, amelyeket az immunisak szinte teljesen körbezárnak. A terjedés további irányai a két kék egyed felé mutatnak.

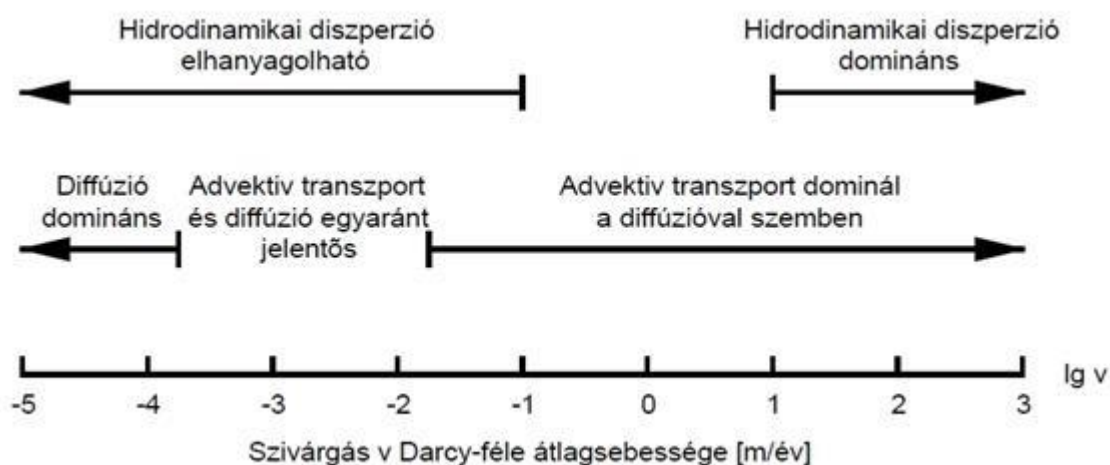


6.2. 11.6.2. Szennyeződés terjedése

A vízben oldható szennyezőanyagok terjedésének egyik alapvető folyamata a szennyezőanyag térbeli szóródása. A szóródás kémiai folyamata a különböző koncentrációjú oldatok között a részecskék diffúziós mozgása, amely a koncentráció-különbség kiegyenlítődéig tart. A folyamatot Fick I. törvénye írja le (Kovács, 2004). Talajvízben oldott szennyeződés esetén a diffúzió csak akkor meghatározó folyamat, ha a szivárgás sebessége kicsi (11.9. ábra). Áramló talajvízben a hidrodinamikai transzportfolyamatok határozzák meg a szennyezőanyagok szóródását, hatásuk mellett a diffúziós anyagáram szerepe elhanyagolható.

Valamely szennyezőanyag porózus közegbeli szóródása diffúzió hatására véletlen jellegű, sztochasztikus folyamat. A teljes szennyezőanyag-tömeget kisebb egységekre bontják, majd a részecskék sztochasztikus mozgásait a „véletlen bolyongás” (ld. Brown-mozgás interaktív szimulációja) módszerével szimulálják (Monte Carlo szimuláció, forrás).

11.9. ábra - A diffúzió, az advektív transzport és a hidrodinamikai diszperzió okozta anyagáramok a szivárgási sebesség függvényében (Kovács, 2004)



7. Ellenőrző kérdések

1. Értelmezze a diffúzió fogalmának különböző jelentéseit (tudományos, köznapi)!
2. Melyek a térbeli terjedés alaptípusai? Ismertessen földrajzi példákat!
3. Mutassa be a népességszám növekedésének logisztikus modelljét?
4. Melyek a Hågerstrand alapmodell legfontosabb szabályai?
5. Ismertesse a járványterjedés SIR modelljét!

8. Irodalomjegyzék

- Haggett, P.: Geográfia. Globális szintézis. Typotex Bp. 2006.
- Kovács B.: Hidrodinamikai és transzportmodellezés I. Miskolc 2004.
- Nemes Nagy J.: A tér a társadalomtudományban. „Ember-Település-Régió”, Bp. 1998.
- Kun, F.: Számítógépes modellezés és szimuláció. Elektronikus tananyag, Debreceni Egyetem 2011.
- G. B. Thomas, Jr., Weir, Maurice. D.; Giordano, F.: Kalkulus. Typotex Bp. 2006.
- Röst Gergely előadása: Matematikával a járványok ellen Szabadegyetem, SZTE. 2010.

12. fejezet - Folyamatmodellezés térinformatikai környezetben I.

A fejezet céljai: ebben a fejezetben a folyamatról, mint GIS fogalomról kapunk áttekintést, megismerkedünk a folyamatmodellezés lehetséges céljaival, a prediktív folyamatmodellezés módszereivel, várható pontosságával, megbízhatóságával.

Szükséges ismeretek, fogalmak: statikus és dinamikus modellek, prediktív modellezés, nyílt forráskódú szoftverek, objektumorientáltság

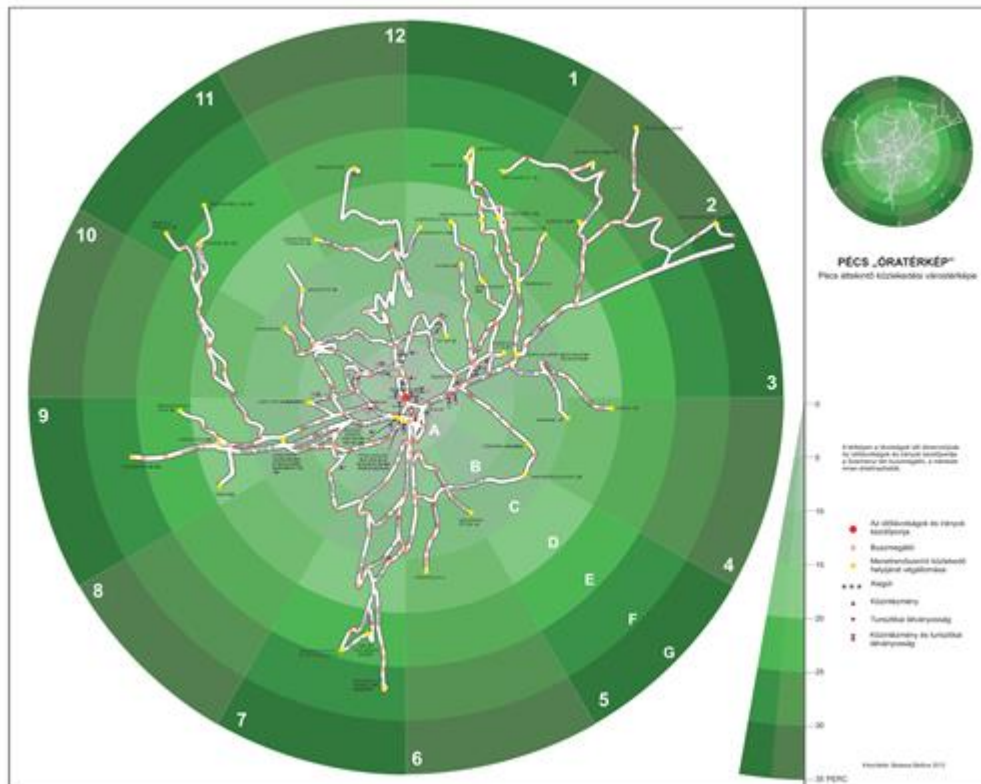
1. 12.1. Statikus és dinamikus modellek

A legegyszerűbb geoinformatikai modellek közé tartoznak a *statikus modellek*, melyek egy adott térbeli problémát mindig egyetlen időpillanatban, vagy szűk intervallumban vizsgálnak és ábrázolnak, így a hely és a hozzá kapcsolt attribútum jelenti a vizsgálat tárgyát. A statikus modelleknél tehát az időbeliségnek nincs szerepe, az idő, mint paraméter nem jelenik meg a modellben. A *dinamikus modellek* ezzel szemben társadalmi vagy természeti jelenségek időbeli változásának, lefolyásának elemzését teszik lehetővé. Ilyen esetben a modell szempontjából fontos attribútumokhoz idő paraméter is kapcsolódik, illetve a rendszert képező adatok idősorok formájában alkotnak adatbázist.

2. 12.2. A folyamat, mint GIS fogalom

Geoinformatikai értelemben folyamat alatt olyan időbeli változásokat értünk, ahol a térbeliségnek is fontos szerepe van, illetve fordítva is igaz: minden térbeli változás folyamat, ahol a változás időparaméterrel jellemezhető. Ez a változás lehet természetes jelenség, antropogén hatás vagy mindkettő közös eredménye, vizsgálata pedig a jelen és a jövő mellett a múlt megértésének szempontjából is hasznos lehet. A korszerű geoinformatikai eszközök segítségével modellezhetünk légköri (pl. meteorológia), felszíni (pl. talajeroszió) és felszín alatti (pl. szennyeződések terjedése) folyamatokat, továbbá helyhez kötött társadalmi jelenségeket is, pl. szuburbanizáció, közlekedés (12.1. ábra).

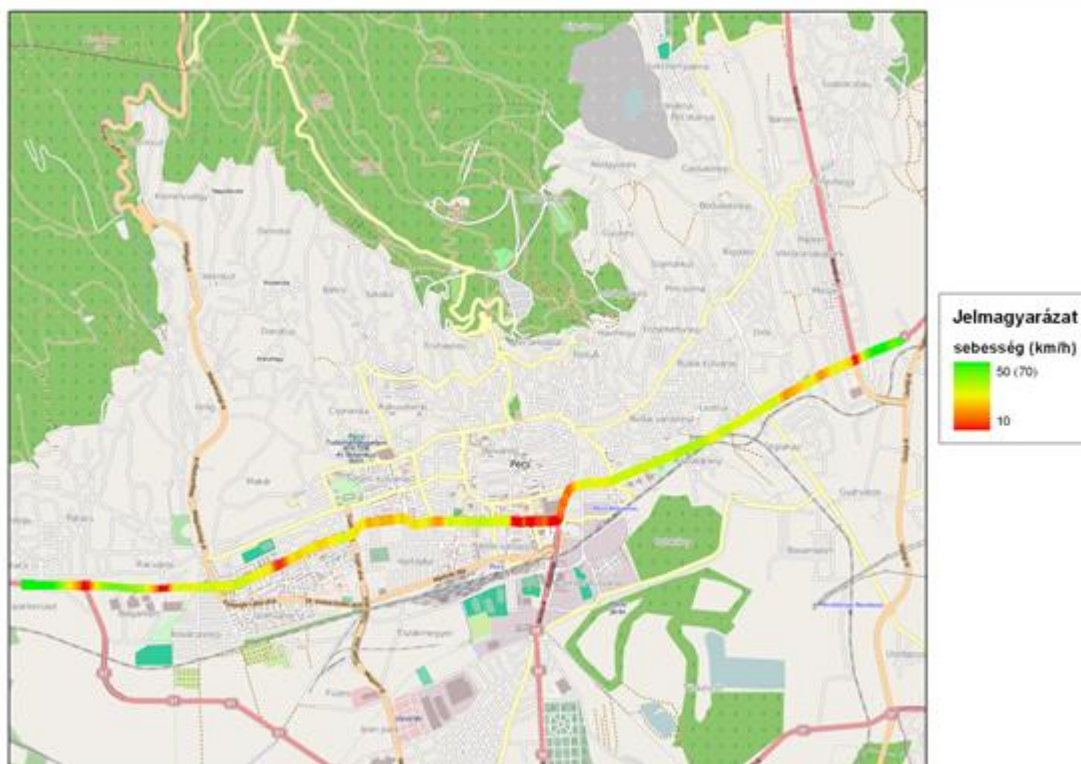
12.1. ábra - Időléptékes térkép tömegközlekedési elérési idők modellezésére Pécs városában (Készítette Balassa Bettina, PTE-TTK)



3. 12.3. A folyamatmodellezés lehetséges céljai

A folyamatmodellezés egyik legegyszerűbb esete a vizsgált folyamat térbeliségének elemzése. Ennek segítségével képet kaphatunk az adott jelenség által érintett területek nagyságáról, kiterjedéséről, földrajzi elhelyezkedéséről, valamint a folyamatot jellemző attribútumok térbeli változásáról. Ez utóbbi azért fontos, mert általa lehetőségünk nyílik kijelölni azokat a területeket, ahol a folyamatot leíró adatok kiugró értéket (pl. szélsőérték vagy ellentmondásos érték) vesznek fel. Az így kijelölt területeket alaposabban, több szempontból is meg lehet vizsgálni, hogy feltárássra kerüljön az extremitás vagy anomália oka (12.2. ábra). Az ilyen vizsgálatok tehát meglévő vagy már lezajlott folyamatok okainak meghatározására használhatók.

12.2. ábra - Főútvonal belterületi szakaszán való átlagos áthaladási sebesség modellezése GPS-es mérések alapján

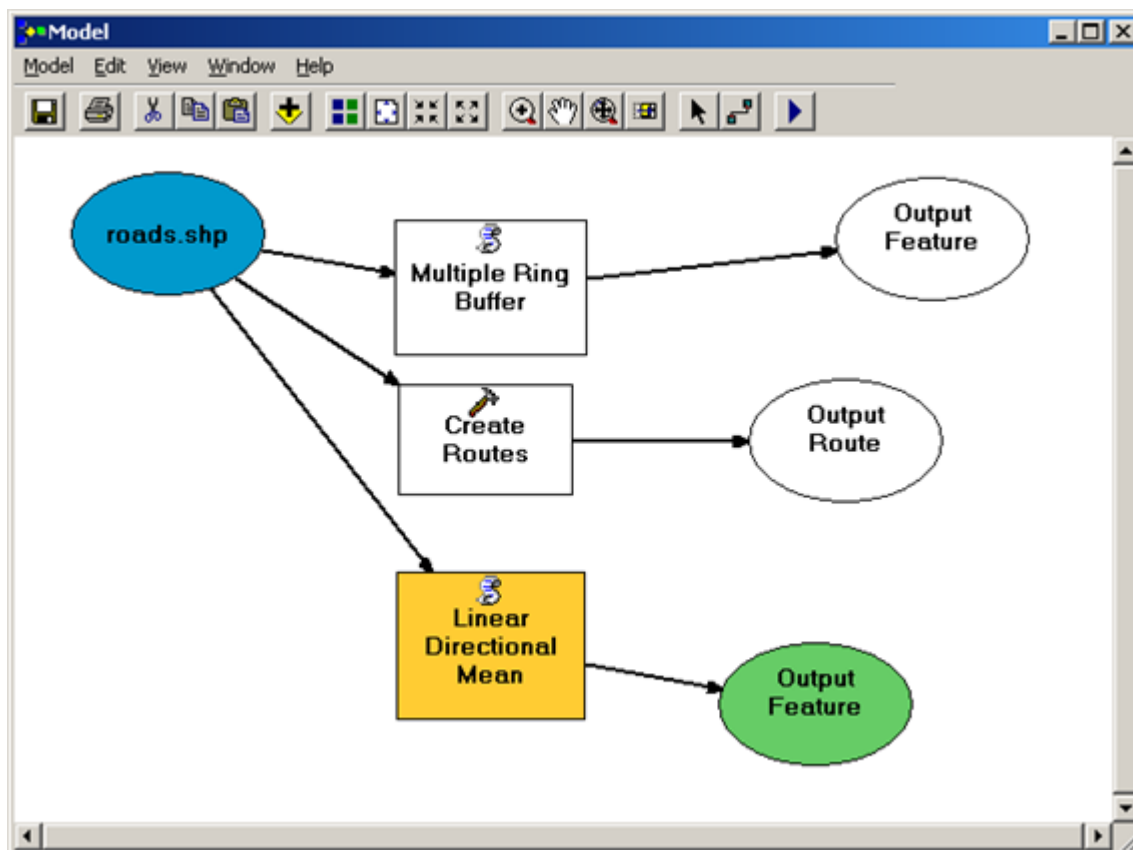


A folyamatmodellezés valódi jelentősége a modell alapú előrejelzésben rejlik. Ebben az esetben a rendelkezésre álló adatok alapján próbáljuk megbecsülni később bekövetkező vagy már jelenleg is zajló folyamatok alakulását, épített és természeti környezetre, vagy társadalomra gyakorolt hatását. A modell koncentrálna a folyamat várható térbeli alakulására (pl. városrészek fejlődésének modellezése), de akár hangsúlyos lehet a folyamat időszükséglete is (pl. villámárvizek modellezése). A valóságot kellően pontosan közelítő prediktív (előrejelző) modellek igen nagy társadalmi, természeti és gazdasági jelentőséggel bírnak.

4. 12.4. A prediktív folyamatmodellezés módszere

A jövőre vonatkozó következtetések levonására, előrejelzések készítésére alkalmas folyamatmodellek működése matematikai függvényeken keresztül valósul meg. A függvények számára bemenetként a hely-, és idő attribútumok mellett az objektumokra jellemző kvalitatív és kvantitatív attribútumok szolgálnak, a függvények működését pedig azok paraméterezésével lehet befolyásolni. A modell minősége nagyban függ a felhasznált függvényektől, hiszen a valóság leírása matematikai formulákkal mindig közelítés formájában történik, ennek pontossága pedig a felhasznált adatok mellett a matematikai megfogalmazáson is múlik. Ebből a szempontból léteznek nyitott és zárt „fekete dobozként” viselkedő modellező szoftverek (12.3. ábra). Előbbiek csoportjába azon programok tartoznak, melyekben a felhasznált függvények szabadon módosíthatók, vagy legalábbis a dokumentáció részletesen ismerteti a modellezés során alkalmazott matematikai formulákat (pl. nyílt forráskódú szoftverek), utóbbiak esetében a szoftver készítője nem hozza nyilvánosságra a modellező függvények pontos leírását, így a felhasználó csak kísérleti úton tudja vázlatosan visszafejteni a modell működését. Ez abból a szempontból hátrány, hogy bizonyos területek vagy jelenségek a megszokottól eltérő, speciális modellt igényelnek, melyet az átlagos folyamatokra optimalizált függvények kevésbé képesek valósághűen modellezni.

12.3. ábra - ArcGIS ModelBuilder – modellezést segítő eszköz az ArcGIS vektoros geoinformatikai szoftverben

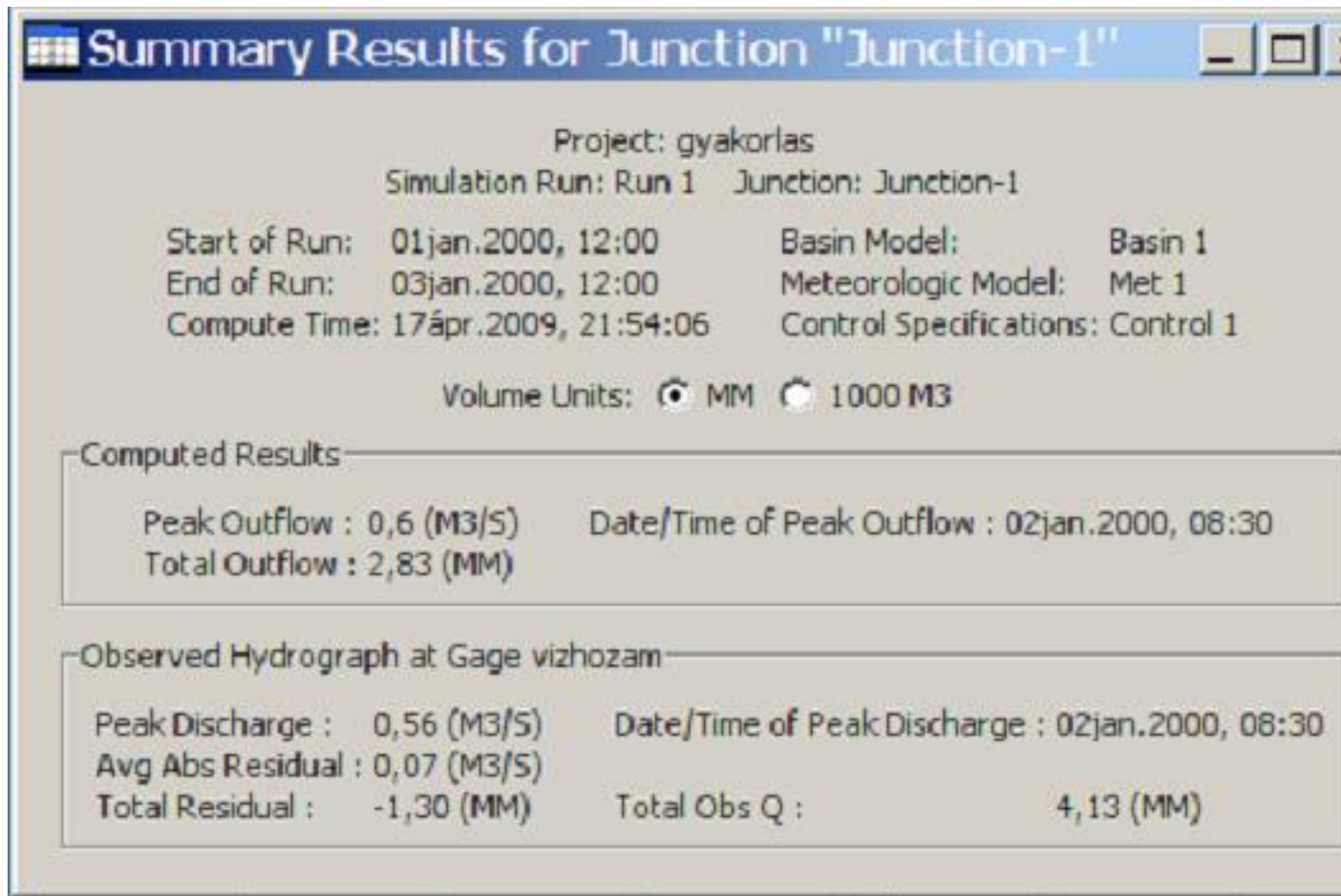


A függvények paraméterezésével gyakorlatilag a vizsgált terület vagy folyamat egyedi tulajdonságai állíthatók be. Például egy közúti közlekedési modellnél nem mellékes, hogy a vizsgált útszakasz lakott területen belül vagy kívül fekszik, a járművek autópályán, főúton vagy szűk utcákban haladnak, milyen az útburkolat stb. A komolyabb modellező szoftverek el is várják az ilyen típusú változó paraméterek megadását.

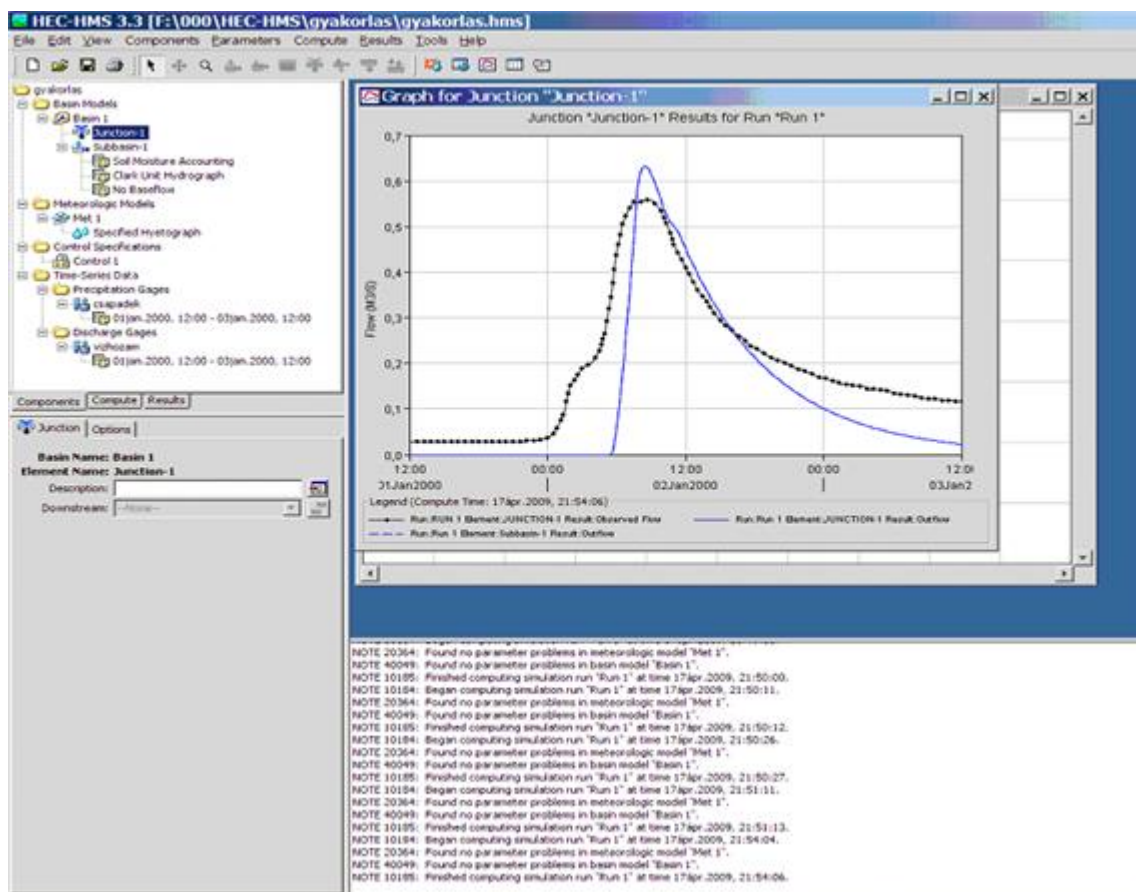
A prediktív modellek esetében a modellezés folyamata három fázisból áll:

1. Először meg kell határozni, hogy melyek azok a leíró attribútumok, amik relevánsak a modell szempontjából. Például egy lefolyási modellnél a lejtőszög és a csapadékmennyiség fontos bemenő adat, a napsugarak beesési szögére vonatkozó információk viszont csak speciális esetekben lehetnek hasznosak.
2. A következő lépésben a kiválasztott attribútumok felhasználásával célszerű lefuttatni az algoritmust múltbeli folyamatok modellezésére. A már lezajlott folyamatra vonatkozó térbeli és időbeli adatok ismeretében könnyen összevethető a modell a valósággal. Ha a valóságtól távolálló eredményt kapunk a modellezés során, akkor két lehetőségünk van a modell finomítására: a függvény paraméterezésén kell változtatni, vagy a felhasznált bemenő adatokat kell gondosabban kiválasztani (12.4. ábra).
3. Amennyiben az archív adatsorokra épülő modellünk jól közelíti a múltbeli folyamatok lefutását, meg kell határozni azokat a jelenben elérhető vagy mérhető adatokat, amikre szükség van a prediktív modellhez. Ezek biztosításával folyamatosan, jó közelítéssel lehet előrejelzéseket adni egy adott folyamat várható térbeli és időbeli lezajlására vonatkozóan. Mivel a bemeneti adatok az idő függvényében ritkán tekinthetők konstansnak, sokkal inkább sztochasztikusnak, így legtöbbször az előrejelzés távlatától függ a modellünk pontossága is. Egy-egy újabb folyamat lezajlása után a friss adatok birtokában célszerű a 2. lépést megismételni és finomítani a modellt (12.5. ábra).

12.4. ábra - HEC-HMS hidrológiai modellező szoftver – a modellezett és a mért eredmények számszerű összevetése



12.5. ábra - HEC-HMS hidrológiai modellező szoftver – új mérési eredmények és a modell összevetése: vízhozam változása az idő függvényében



5. 12.5. A folyamatmodellezés várható pontossága, megbízhatósága

A modell várható pontosságára és megbízhatóságára nézve az alábbiak vannak hatással:

- bemenő adatok kiválasztása,
- bemenő adatok pontossága, gyakorisága,
- modellezési elv,
- modellező szoftver/algorithmus megválasztása és paraméterezése,
- prediktív modell esetében az előrejelzés időtávlat.

A modell működése szempontjából alapvető fontosságú a bemenő adatok helyes megválasztása: a releváns attribútumok kijelölésén túl azok térbeli és időbeli felbontására is ügyelni kell. Például egy villámárvíz modellezésénél nem mindegy, hogy mekkora felbontású domborzatmodellel dolgozunk, vagy a gyors lefutás miatt milyen intervallumonként mért csapadékadatokra hagyatkozunk. A felhasznált szoftver kiválasztására is hatással van a modell megbízhatóságára, ugyanis vannak olyan modellezési feladatok, amiket univerzális GIS szoftverekkel nem lehet kellően pontosan kivitelezni, mivel nem kezelik a probléma megoldásához szükséges morfológiai, geológiai, hidrológiai, meteorológiai stb. paramétereket.

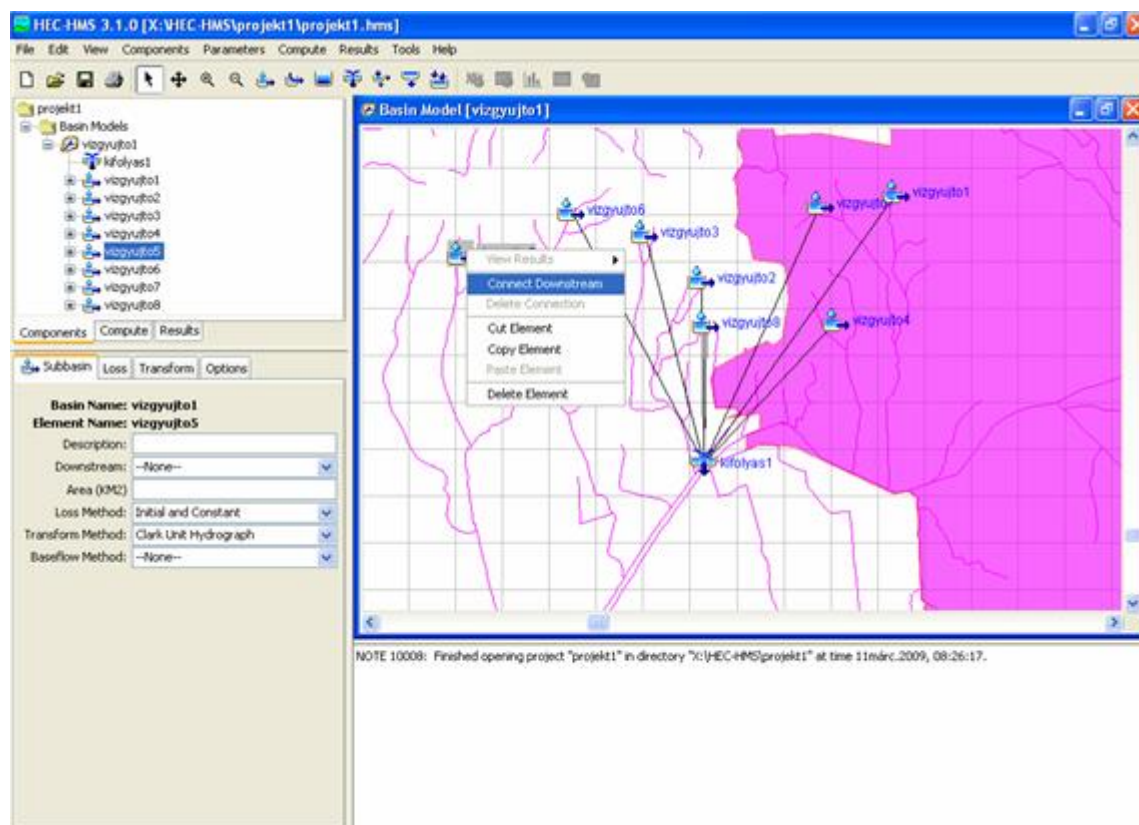
6. 12.6. A vektoros GIS környezet előnye: objektumorientáltság

A folyamatmodellezés -jellegéből adódóan- objektumok attribútumainak térbeli és időbeli változását vizsgálja, emiatt kézenfekvő a vektoros adatstruktúra alkalmazása. A raszteres modellekkel szemben a teret nem valamely szempont alapján osztályozzuk, hanem minden egyedi funkcióval bíró térbeli entitást önálló objektumnak

tekintünk, az objektumok között pedig funkciójuktól függően kapcsolatokat jelölünk ki, melyek hatással vannak a modell viselkedésére. Például egy hidrológiai modellezésnél a forrás, a patak, és akár a patakmeder is lehet önálló objektum, melyek kölcsönhatása megfelelő függvények segítségével beépíthető a modellbe.

Egy vektoros környezetben a térbeli objektumokhoz mindig adatbázis társul. Ennek köszönhetően egy-egy objektum térhez és időhöz kötött attribútumokkal is egyaránt felruházható, az ezek közötti kapcsolatokat pedig az objektumok sajátos tulajdonságai által tudjuk értelmezni. Például két patak összefolyása után az új vízhozam a két eredő vízhozam összege lesz, vagy a vízgyűjtő és a patak objektuma között egyértelmű a folyásirány stb. Az objektumorientált adatbázis a bővíthetőség szempontjából is előnyös: modellünket újabb attribútumokkal tudjuk komplexebbé tenni, miközben az adatstruktúrán nem kell változtatni (12.6. ábra).

12.6. ábra - HEC-HMS hidrológiai modellező szoftver – speciális kapcsolatok az objektumok között, pl. vízgyűjtők és kifolyási pont összekapcsolása a modellben



7. Ellenőrző kérdések

1. Mitől lesz dinamikus egy GIS modell?
2. Hogyan definiálná a folyamatot, mint geoinformatikai fogalmat?
3. Mit jelent a prediktív folyamatmodellezés?
4. Mitől függ a folyamatmodellezés eredményének pontossága?
5. Miért előnyös vektoros környezetben modellezni a folyamatokat?

8. Irodalomjegyzék

Detrekői Ákos – Szabó Gyula: Térinformatika, Nemzeti tankönyvkiadó, Budapest, 2002

13. fejezet - Folyamatmodellezés térinformatikai környezetben II.

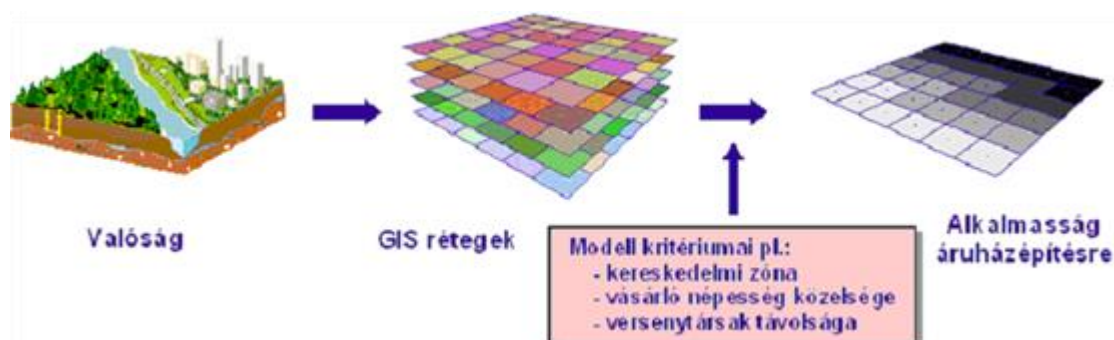
A fejezet céljai: megismerkedünk a térinformatikai rendszerek (GIS) eszköztárainak segítségével készített modellek három nagy csoportjával, az ArcGIS program térbeli elemző eszköztárával (geoprocessing), az eszközök használatával, a ModelBuilder eszközzel, amelynek használatát mintaal alkalmazásokon keresztül sajátítjuk el.

Szükséges ismeretek, fogalmak: folyamatmodellek, térbeli elemző eszköztár, Python script, process, láthatósági elemzés

1. 13.1. Modellezés GIS környezetben

Földrajzi környezetünkről, az abban megfigyelhető különféle rendszerek felépítéséről és működéséről – a modern adatgyűjtő technológiáknak köszönhetően – nagy mennyiségű adat áll rendelkezésünkre. Ezek döntő része a tér bizonyos részéhez kapcsolódik, térbeli vetülettel rendelkezik. Az ilyen téradatok kezelésére, elemzésére és megjelenítésére földrajzi információs rendszereket (FIR/GIS) használhatunk. A vizsgált rendszerek felépítését és működését leíró modellek a valóságot leegyszerűsítve, sokszor földrajzi rétegek kombinálásával adnak választ komplex térbeli kérdésekre (13.1. ábra).

13.1. ábra - A valós világ modellezése GIS rétegekkel alkalmasság vizsgálat céljából A komplex valóságot leegyszerűsítve a legfontosabb jelenségeket reprezentáló GIS rétegekkel modellezhetjük, melyek alapján a megadott kritériumrendszernek megfelelő területek kijelölhetők

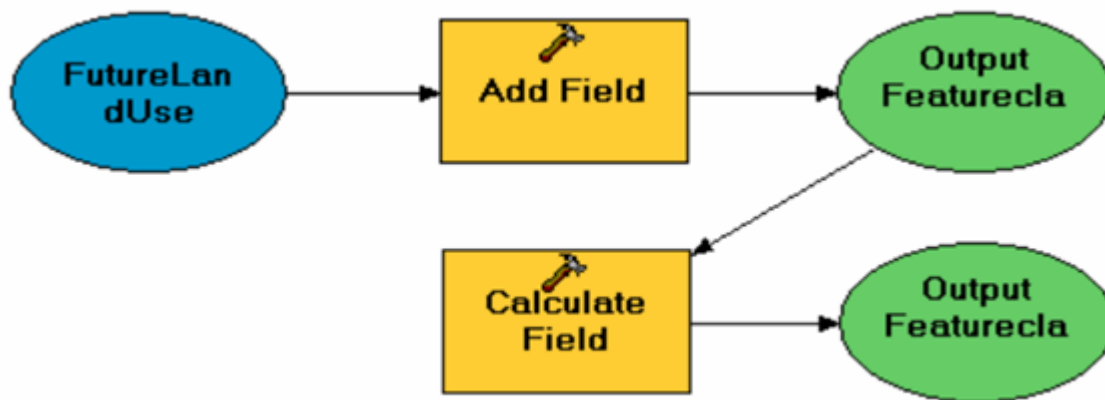


A modell bemeneti (input) paraméterei között megtalálható egy vagy több, térben változó jelenség esetén a GIS eszköztárak növelik a modellezés hatékonyságát. A térbeliség mellett a dinamikus modelleknél az időtényezővel is számolni kell (ld. Folyamatmodellezés – 12. fejezet), miközben a statikus modellek azonos időpillanatra vonatkozó input és output értékekkel dolgoznak.

2. 13.2. Modell típusok

A GIS eszköztárak segítségével készített modelleket három nagy csoportba oszthatjuk. Több lépésből álló munkafolyamatok leírására, hatékony futtatására ismétlődő műveleti (repetitive tasks) modelleket építhetünk. Ezekkel felgyorsíthatók és leegyszerűsíthetők a különböző bemeneti adatsorokon végrehajtott azonos geoinformatikai feladatok. Tulajdonképpen minden – több eszköz összefűzéséből felépülő modell ilyennek tekinthető (13.2. ábra).

13.2. ábra - Ismétlődő művelet sorok hatékony végrehajtása egymással összefűzött eszközökkel A modell futása során, az input adaton végrehajtott Add Field műveletet követően, értéket is számol az új mezőbe

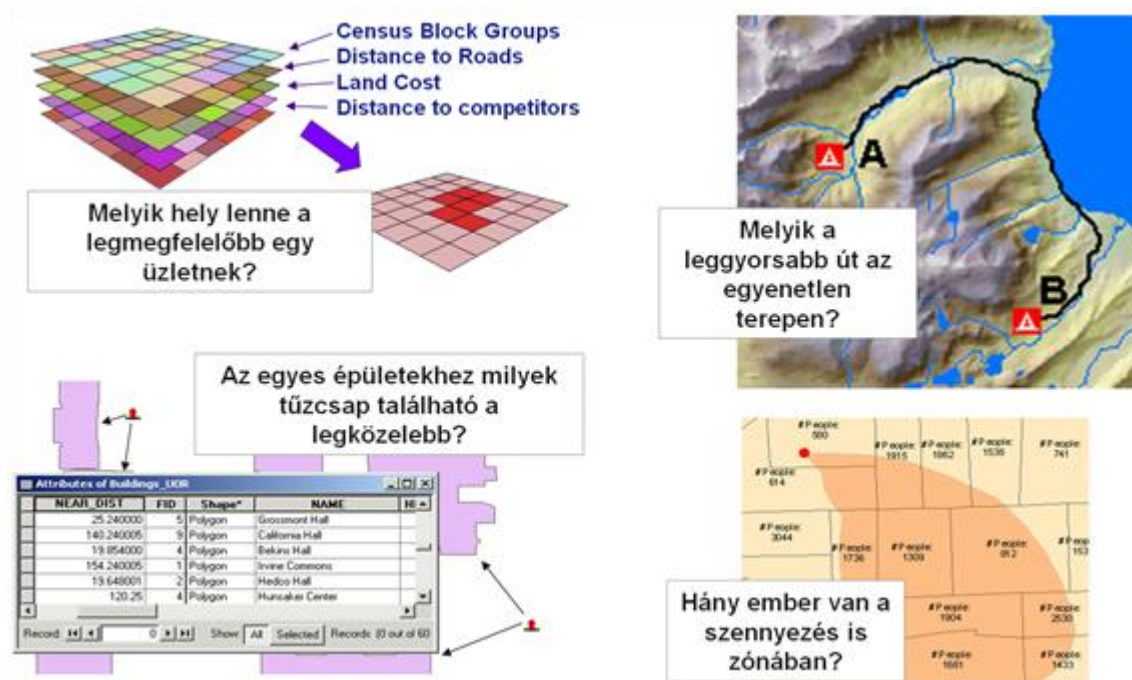


A modellek második nagy csoportját az alkalmassági modellek (suitability models) alkotják. Ezek megadott kritériumok alapján határolják le vagy értékeli a megadott céloknak megfelelő területeket. Az egyes bemeneti paraméterekhez – kritériumok – egy-egy GIS rétek kapcsolódik, ami a vizsgált földrajzi jelenséget – adott méretarány mellett, leegyszerűsítve – reprezentálja (13.3.ábra). A modellek harmadik nagy csoportját az – idő tényező figyelembe vételével – a folyamat modellek (process models) jelentik (ld. Folyamatmodellezés – 12. fejezet).

3. 13.3. Geoprocessing eszköztár

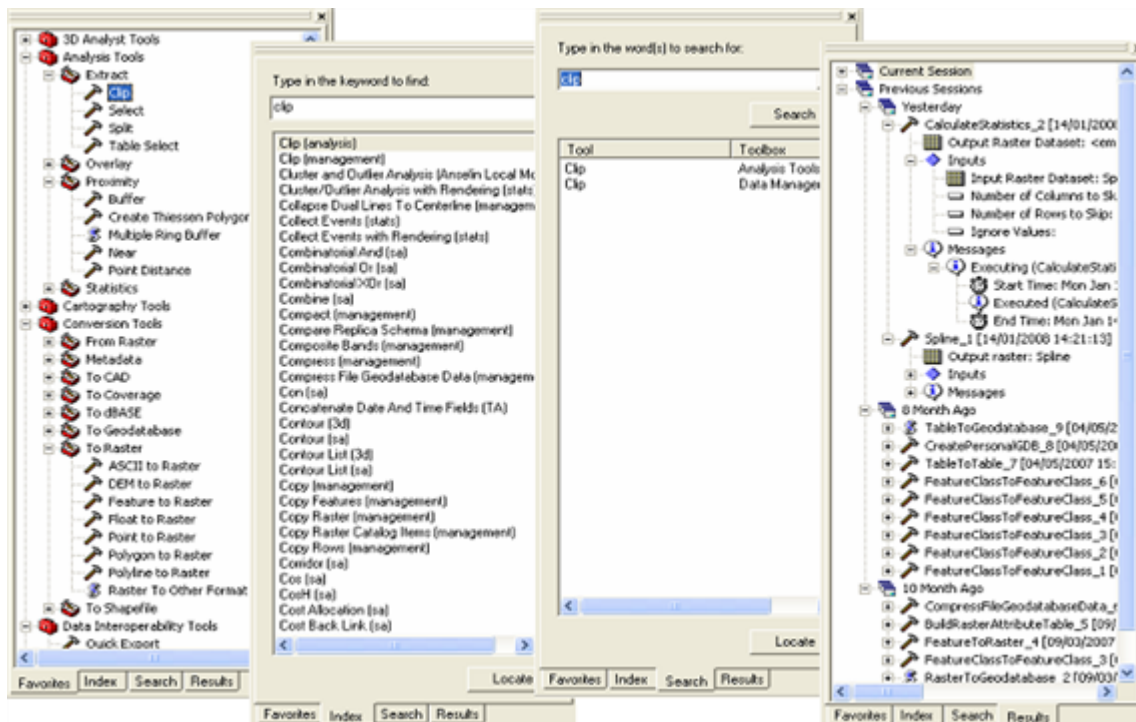
Az ESRI ArcGIS szoftverekben épített modellekhez felhasználhatjuk a program által kínált változatos térbeli elemző eszköztárat (geoprocessing). A rendelkezésre álló eszközök (tools) egy része a bemeneti adatok előfeldolgozását teszi lehetővé (pl. vetületi és formátum konverziók), nagyobb részük azonban az új információk előállítását, a kiértékelést szolgálja. Ez utóbbiak segítségével választ kaphatunk olyan térbeli kérdésekre, mint például, hogy hol építsünk fel egy áruházat; hogyan juthatunk el leggyorsabban – a domborzati viszonyait is szem előtt tartva – A-ból B pontba; az egyes épületekhez melyik tűzcsap található a legközelebb; vagy mekkora területet – és azon hány lakót – érint egy esetleges szennyezés (13.3. ábra).

13.3. ábra - Különböző térbeli problémák, melyek megoldására modelleket építhetők. Ilyen például egy üzlet megfelelő helyének kiválasztása GIS rétegek és megadott kritériumok alapján; egyenetlen terepen a leggyorsabb útvonal megkeresése A és B pontok között; adott épületekhez legközelebbi tűzcsapok kijelölése; vagy egy szennyezés által érintett terület és népesség lehatárolása.



Az ArcGIS Geoprocessing eszközei hierarchikus struktúrát alkotnak. Ennek legmagasabb szintjén a Toolbox-ok állnak, melyek a rendszer alapkiépítésének vagy valamely kiegészítésének (Extension) részét képezik. Ezen belül az eszközkészletek (toolset-ek) tartalmazzák az egyedi eszközöket. A katalógusban kulcsszavak alapján kereséseket indíthatunk (13.4. ábra).

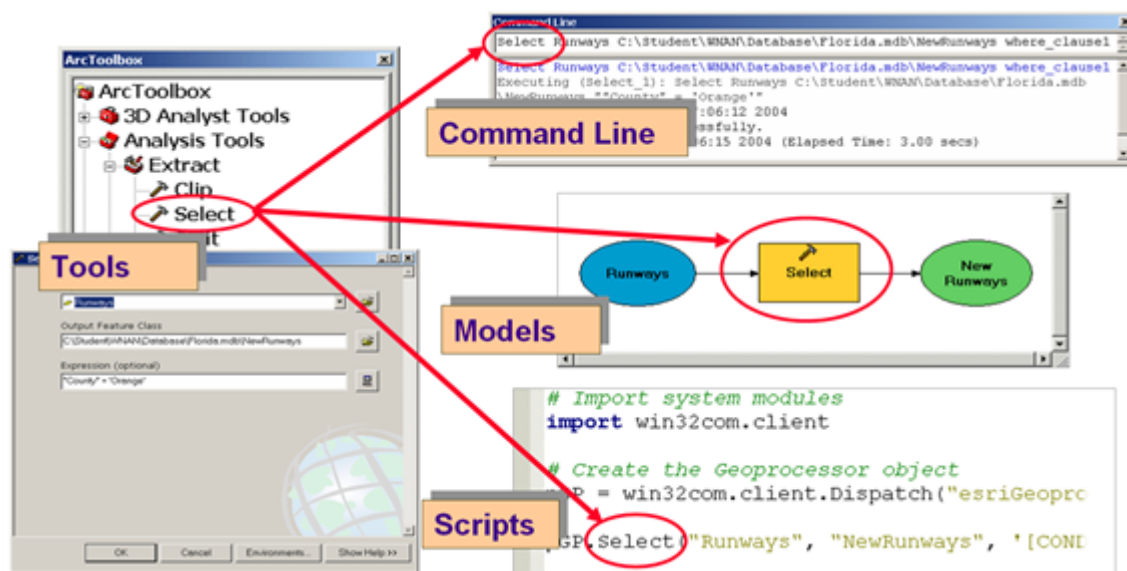
13.4. ábra - Az ArcToolbox felépítése, kereső és előzmény funkciói Az ArcToolbox-ban a geoprocessing eszközök hierarchikus struktúrában böngészhetők, kulcsszavak és nevük alapján kereshetők, illetve a korábban futtatott folyamatok input és output paramétereit visszanezhetők



3.1. 13.3.1. Eszközök futtatása

Az eszközöket különbözőképpen érhetjük el és használhatjuk. Legegyszerűbben az eszköztárból (Toolbox), a dialógusablakban megjelenő kötelező és opcionális paramétereket megadva futtathatók. Az egyes eszközök dialógusa eltérő, de minden esetben tartalmaznak Súgó részt a beállítások megkönnyítése érdekében. A nagyobb szakértelmet igénylő parancssorból történő futtatással az eszközök elérése meggyorsítható. Ebben az esetben szükséges a tool paramétereinek pontos ismerete. A modellépítés során az egyedi eszközöket grafikus felületen tudjuk összefűzni és paraméterezni. A teljes modell futtatásával az azt felépítő valamennyi eszköz lefut. A tool-ok felhasználásának legsokoldalúbb és leghatékonyabb módját a Python programnyelven írt script-ek jelentik (13.5. ábra). Bármelyik módszert is választjuk, az eszköz(ök) futása során folyamatos visszajelzést kapunk a folyamat állapotáról, beleértve az esetlegesen felmerülő hibákat, figyelmeztetéseket. Fontos kiegészítő funkció a műveleti előzmények rögzítése, amely lehetővé teszi a korábbi futtatási beállítások visszaállítását vagy módosítását, meggyorsítva ezzel például a modellek érzékenységvizsgálatát. A geoprocessing eszközök működését ún. környezeti beállításokkal (environmental settings) szabályozhatjuk. Definiálható többek között az alapértelmezett mentési hely (workspace), a kimeneti koordináta rendszer, a raszterek felbontása és mentési formátuma, a térbeli kiterjedés, stb.

13.5. ábra - A geoprocessing eszközök futtatásának lehetséges módjai. A Select eszköz futtatható dialógusablakban és parancssorban, illetve felhasználható modellekben valamint script-ekben is. Utóbbi két esetben más eszközökkel összefűzve komplex műveletsorok hozhatók létre alapján kereshetők, illetve a korábban futtatott folyamatok input és output paraméterei visszanezhetők



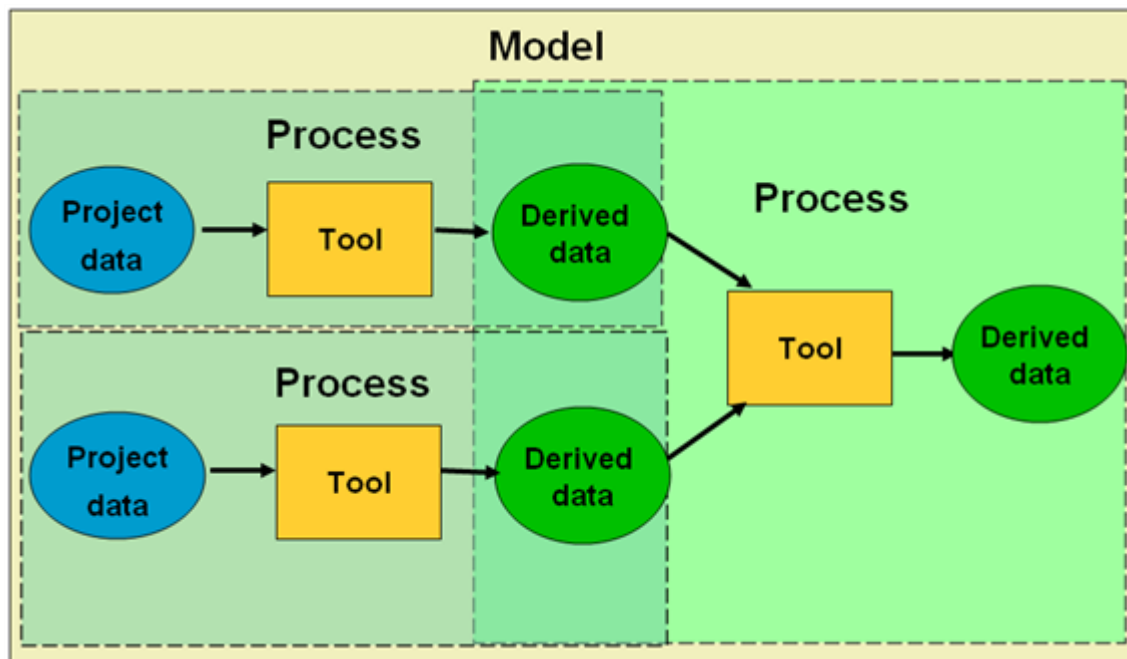
4. 13.4. ModelBuilder

Az ArcGIS ModelBuilder-ben – a geoprocessing eszköztár felhasználásával – grafikus felületen építhetünk és futtathatunk modelleket. Az egyedi eszközök összefűzésével felgyorsíthatók az elemzési műveletek, a bemeneti paraméterek módosításával a modelleket egyszerűen újravégzethetjük, így vizsgálva a kimenetek eltéréseit. A grafikus felületen a komplex szerkezetű modellek is könnyen értelmezhetők, a munka grafikusán is jól dokumentálható. Az ArcGIS-ben készített modelleket – a rendszer eszközhöz hasonlóan – toolbox-okban tároljuk. A saját eszköztárak önálló (tbx) fájlba menthetők vagy a projektben (mxd) tárolhatók. Ezzel lehetővé válik a modellek megosztása is.

4.1. 13.4.1. Folyamatok kezelése

A modellek folyamatokból (process) épülnek fel. Az egyes process-ek egymásba kapcsolódva adják a teljes műveletsort. Az egyik folyamat eredménye egy következő bemeneti adatát képezi. A kapcsolatok irányát nyílak jelzik. A műveleti ágakon elágazások (if-else) és összevonások is definiálhatók. Minden process-t egy eszköz és annak bemeneti adatai vagy változói – valamint eredményei építenek fel. A ModelBuilder-ben az eszközöket téglalap, az adatokat és változókat ellipszis jelöli (13.6. ábra). A modellben a teljes geoprocessing eszköztár felhasználható.

13.6. ábra - Egymásba kapcsolódó folyamatok egy modellen belül. Az eszközöket téglalap, az input és output adatokat ellipszisek jelölik



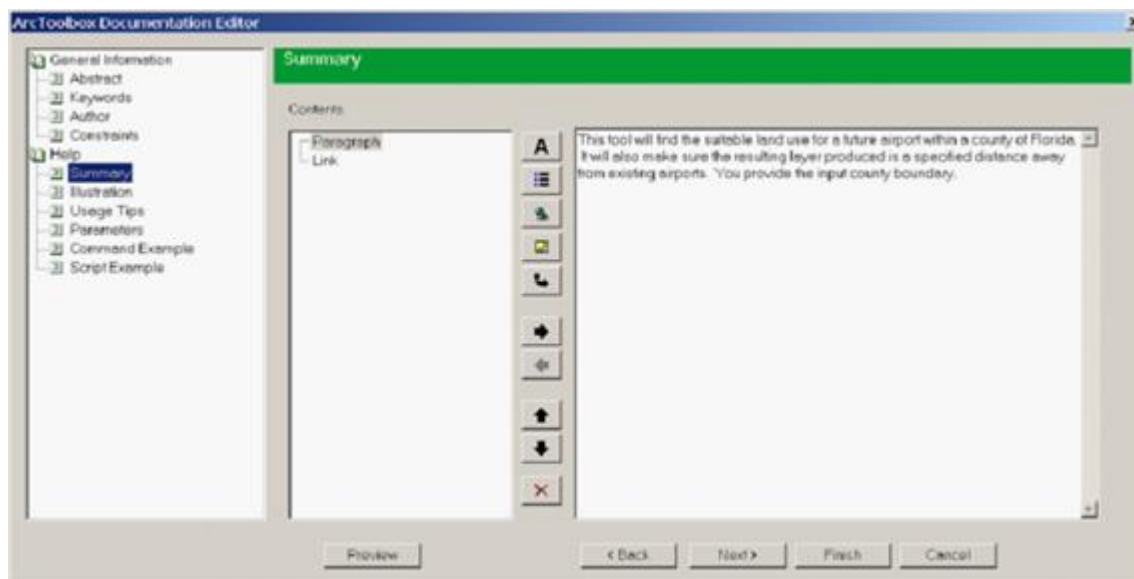
A modell futtatása szempontjából a folyamatok három különböző állapotát kell elkülöníteni, melyet az alakzatok megjelenítése is tükröz. A kitöltés nélküli alakzatok a process „nem futtatható” (*Not ready to run*) állapotát jelzik. Ennek leggyakoribb oke, hogy az adott eszköz paraméterei nem érvényesek, például nem létező adatra történt hivatkozás vagy valamely egyéb kötelező paraméter nem kapott érvényes értéket. Az eszközök dialógusának ModelBuilder-ben történő megnyitásával ezek definiálhatók, leellenőrizhetők. A modell validálásával a folyamatok „futtatható” (*Ready to run*) állapotba hozhatók. Ezt grafikusán az alakzatok színezése jelzi. A teljes modell csak abban az esetben futtatható, ha az azt felépítő minden egyes process futtatható állapotba került, azaz a modell érvényes. Az egyes process-ek egyedileg vagy egyetlen lépésben is futtathatók. Ezzel a folyamatok „lefuttatott” (*Already run*) állapotba kerülnek, amit a színes alakzatok árnyékolása is jelez. A validálással a korábban már lefuttatott modellt visszaállíthatjuk *Ready to run* vagy *Not ready to run* státuszba.

Az elkészített modellt az ArcToolbox-ból is elérhetjük és futtathatjuk. Ekkor a felhasználó a megnyíló dialógusablakban az előzőleg modell paraméterként definiált inputváltozókat és adatelérési utakat módosíthatja, a modellt különböző beállításokkal futtathatja. A modell paraméterként külön meg nem adott eszköz opciók mindig a ModelBuilder-ben definiált értékeket veszik fel.

5. 13.5. Modellek dokumentálása és megosztása

A tesztelt és működő modellek a digitális információk egyik legfontosabb formái, azokban gyakorlati és elméleti tudományos ismeretek könnyen értelmezhető formában tárolhatók. Ahhoz, hogy modelljeinket másokkal is megoszthassuk olyan kiegészítő információkkal – metaadatokkal kell őket ellátni, melyek segítik felhasználásukat. A modellek esetében jelenleg nem léteznek olyan részletes metaadat standardok, mint a téradatoknál. Az ArcGIS a modellek dokumentációs felületén lehetőséget biztosít ezen információk megadására (13.7. ábra). A szerzői adatok mellett rövid összefoglalót, kulcsszavakat és kikötéseket rögzíthetünk. A dialógusablak Súgó panelén megjelenő tartalom a szöveges részek mellett magyarázó ábrákkal is színesíthető. A fejlettebb felhasználási módok – mint a parancssori futtatás és a script-ek – példákkal támogatottak.

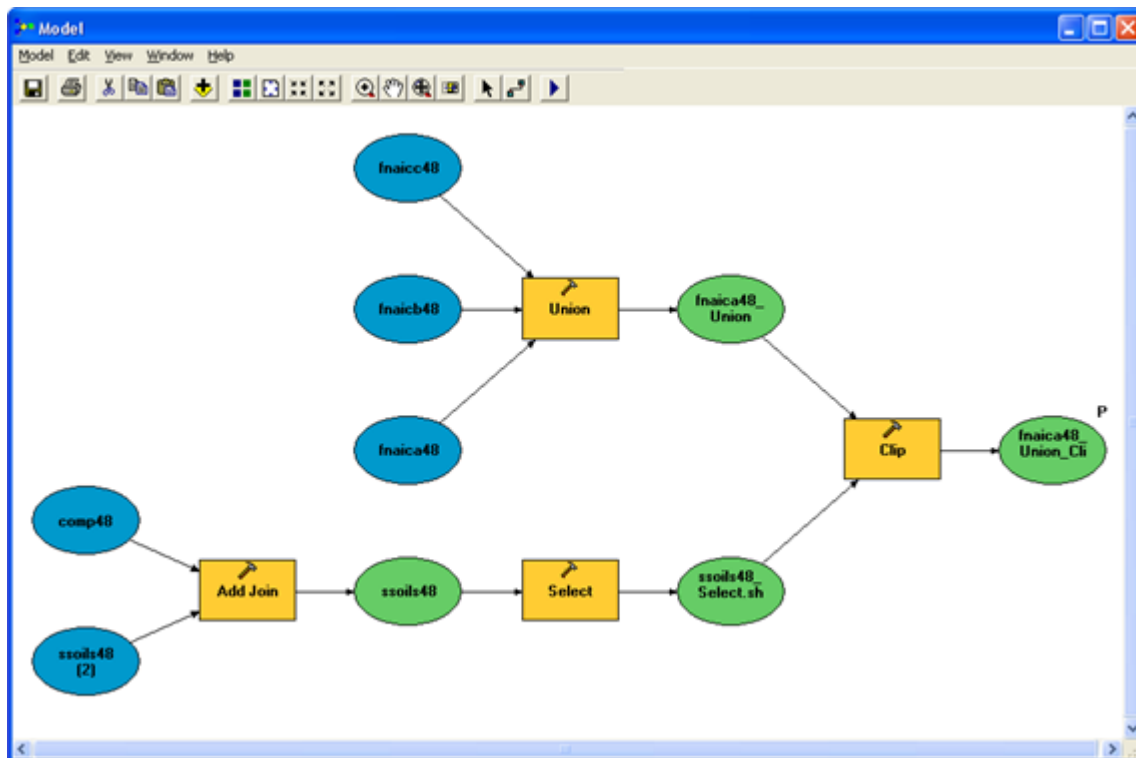
13.7. ábra - Modell dokumentáció szerkesztése A panelen rögzíthetők a modell metaadatai, mint a rövid szöveges összefoglaló, a kulcsszavak vagy a szerző. Az eszköz súgó szerkesztése során szöveges és ábrákkal illusztrált bejegyzések tárolhatók.



6. 13.6. Példa alkalmazások

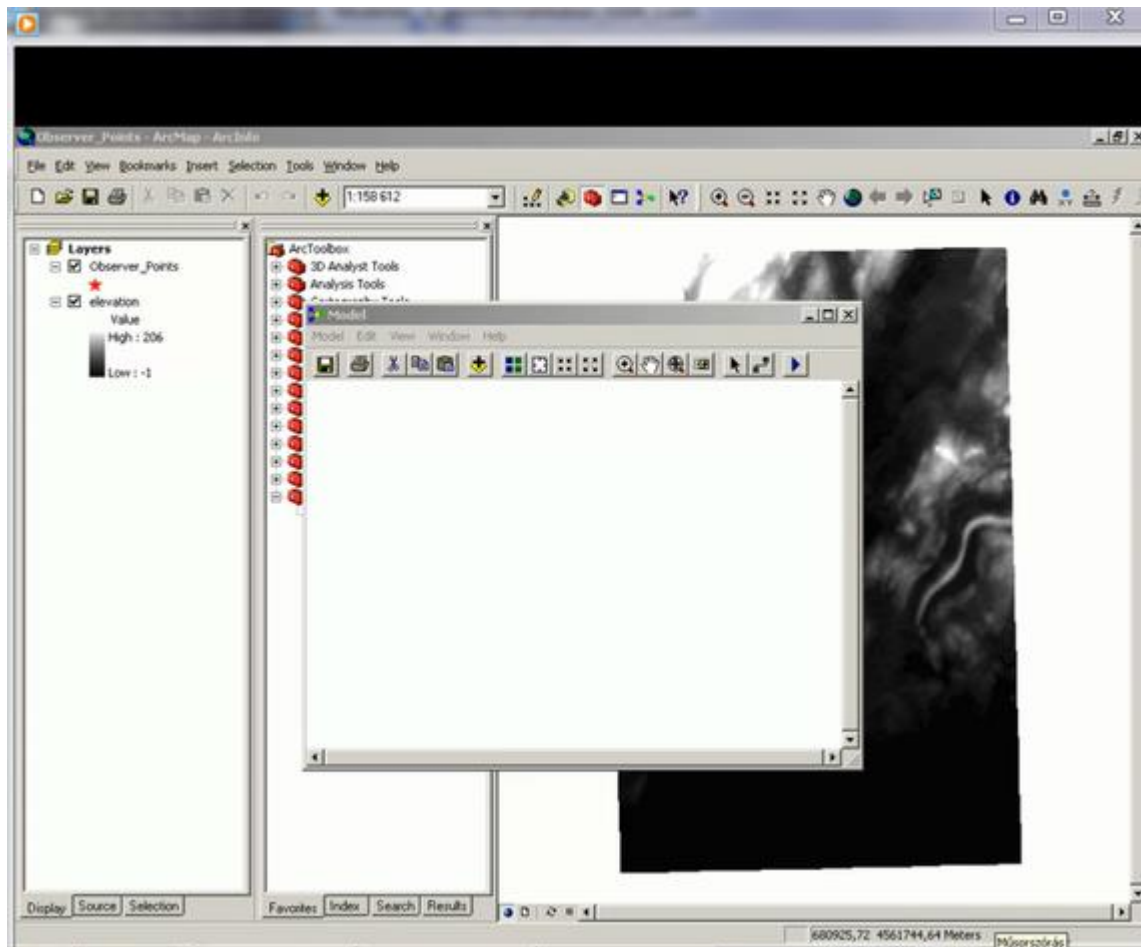
A következőkben egy egyszerű alkalmasság vizsgálat példáján keresztül mutatjuk be a modellépítés folyamatát (animáció). Olyan területek kijelölése a feladat, melyek egy kritériumrendszer minden feltételének megfelelnek. Jelen esetben a talajtulajdonságok és a terület védett jellegét vesszük csak figyelembe. A modell első lépésben adatkezelési eszközök felhasználásával egyesíti a talaj poligonok attribútumtábláját a talajparamétereket tartalmazó önálló táblával (*Add Join tool*), illetve a különböző típusú, külön-külön shape állományban tárolt védett terület rétegeket (*Union tool*). A *Select* eszköz a megadott feltételeknek megfelelő talaj objektumok leválogatását és új rétegre mentését végzi el. A két műveleti ágat a *Clip* eszköz egyesíti: kivágja a védett területekből a korábban leválogatott talaj poligonokat (13.8. ábra). A modellben látható P jelzi azokat a modell paramétereket, melyek dialógus ablakból történő futtatáskor a felhasználó által szabadon változtathatók. A fenti modell létrehozásának részletes lépéssora megtalálható a gyakorlati mellékletben.

13.8. ábra - A létrehozott modell grafikus diagramja. A példaalkalmazásban létrehozott modell grafikus diagramján láthatók a felhasznált eszközök – Add Join, Select, Union, Clip – és azok kapcsolódásai

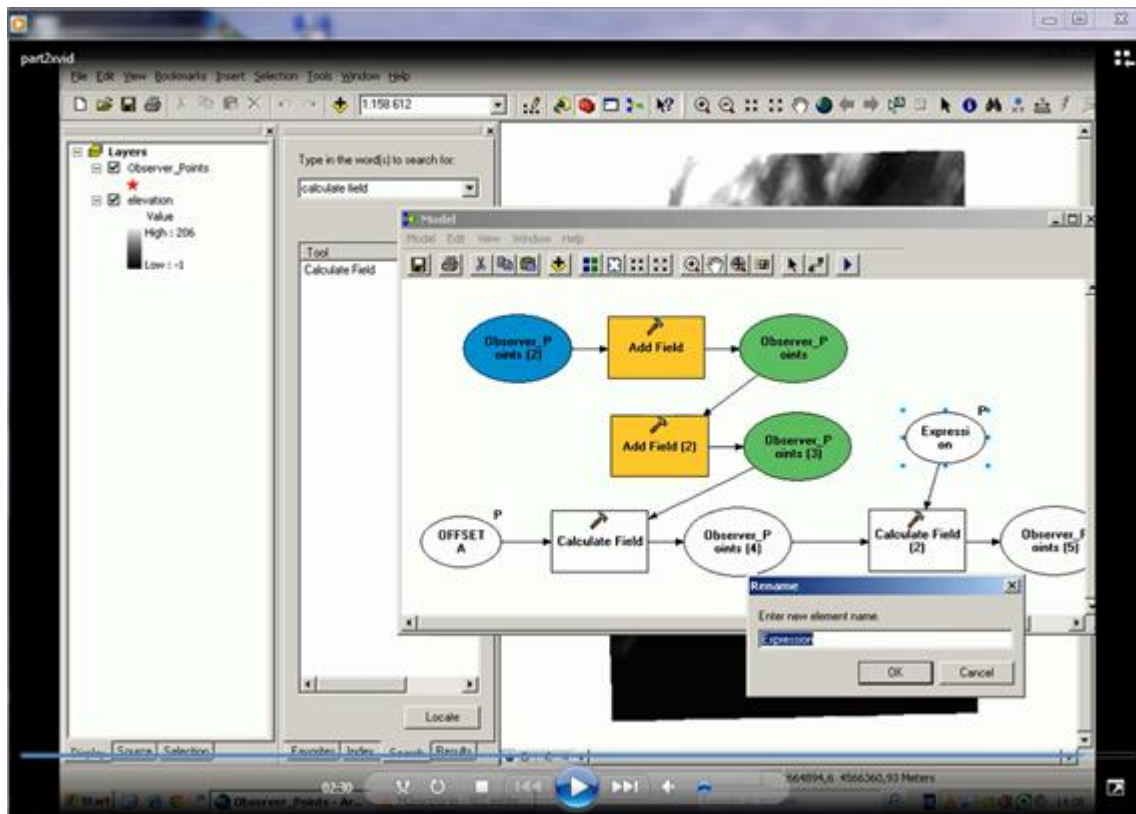


A fejezethez kapcsolódó videóban(13.9.-13.13. ábrák, videók) egy láthatósági elemzést végző modell felépítésének folyamata követhető nyomon. A pont objektummal reprezentált megfigyelési (observer) pontból egy változatos domborzatú felszín látható és kitakart részeit különíthetjük el.

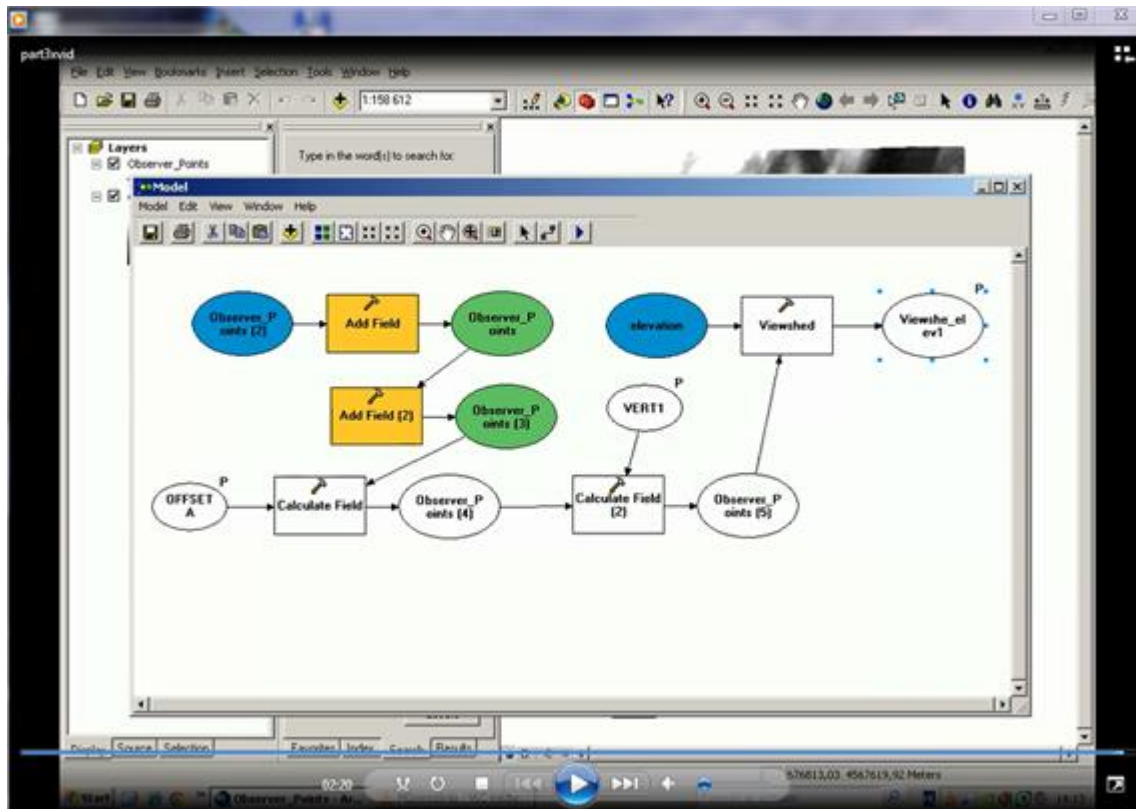
13.9. ábra - Egy láthatósági elemzést végző modell felépítésének folyamata 1. rész (video)



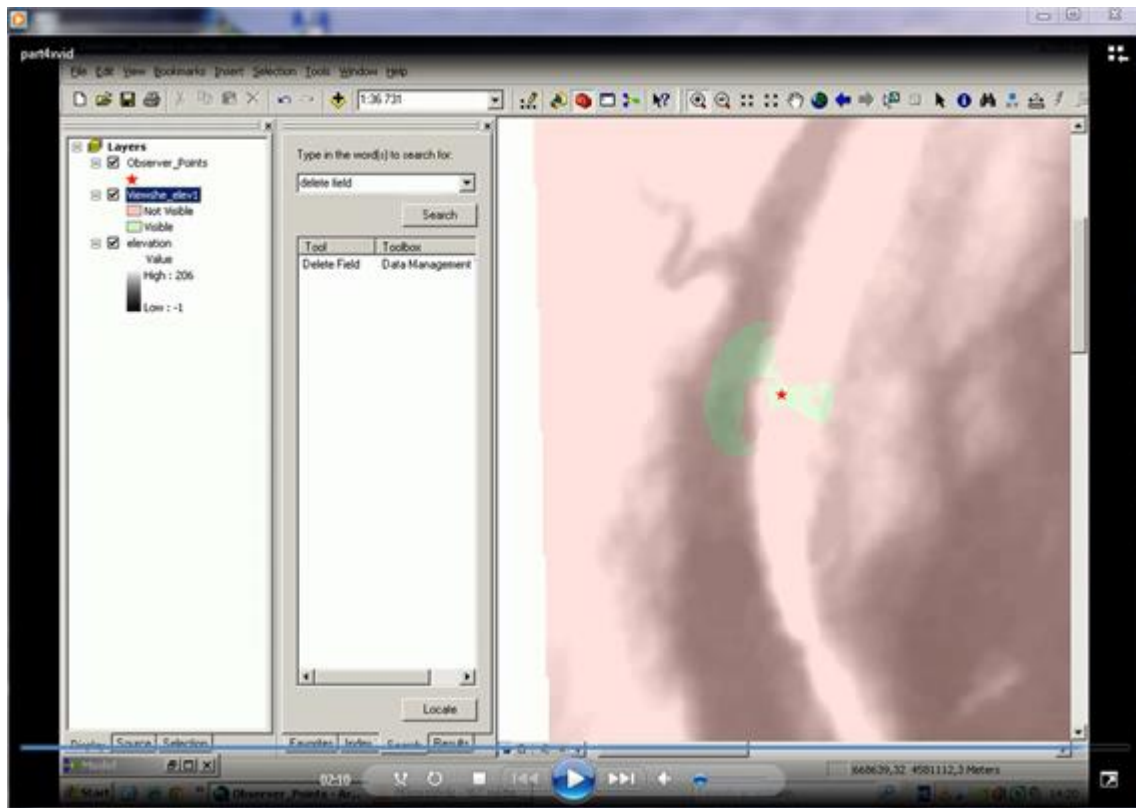
13.10. ábra - Egy láthatósági elemzést végző modell felépítésének folyamata 2. rész (video)



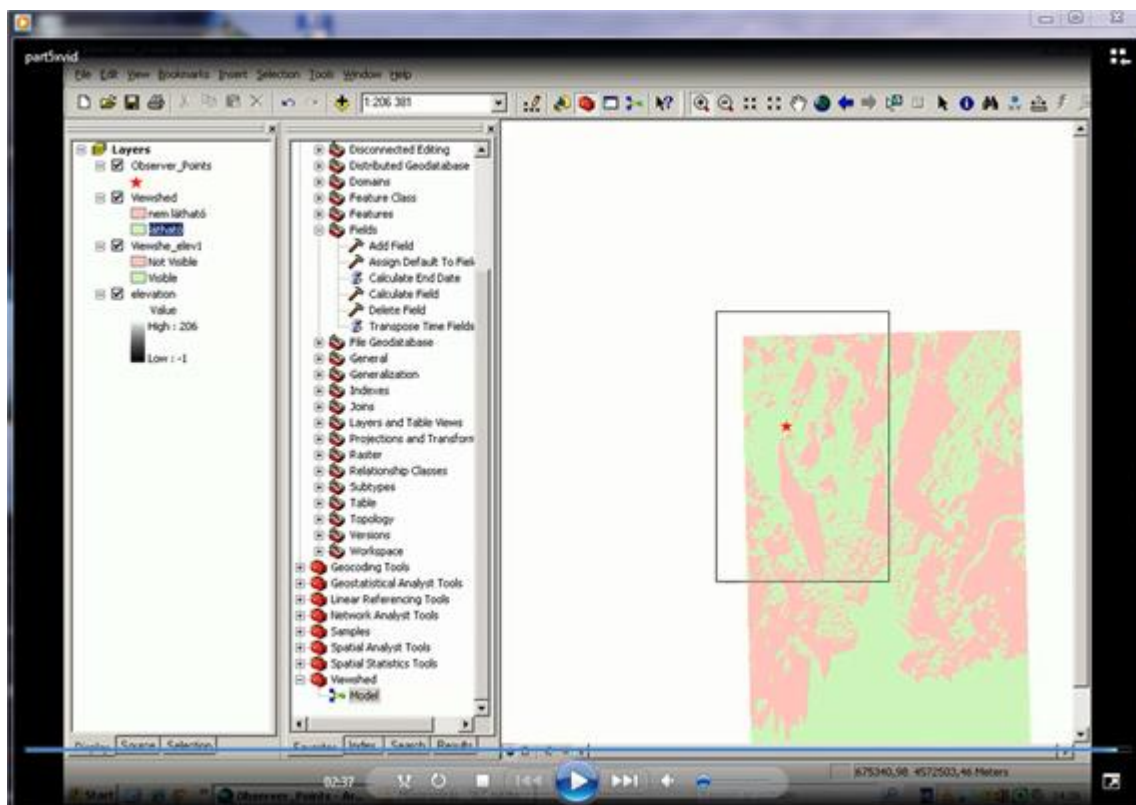
13.11. ábra - Egy láthatósági elemzést végző modell felépítésének folyamata 3. rész (video)



13.12. ábra - Egy láthatósági elemzést végző modell felépítésének folyamata 4. rész (video)



13.13. ábra - Egy láthatósági elemzést végző modell felépítésének folyamata 5. rész (video)



7. Ellenőrző kérdések

1. Hogyan kereshetünk és futtathatunk eszközöket az ArcToolbox-ban?
2. Sorold fel a Geoprocessing eszközök lehetséges futtatási módjait!
3. Hogyan épül fel egy ArcGIS modell?
4. A process-ek milyen állapotait különböztetjük meg? Mi jelzi ezeket?
5. Miért szükséges a modellek megfelelő dokumentálása? Mi a szerepe a metaadatoknak?

8. Irodalomjegyzék

Goodchild, M.: Environmental modeling with GIS / M. Goodchild, B.O. Parks, L.T. Steyaert. New York, NY ; Oxford : Oxford University Press, 1993.

Zeiler, M.: Modeling Our World: The Esri Guide to Geodatabase Design Redlands, CA : ESRI, 1999.

DeMers, M.N.: GIS modeling in Raster – New York : Wiley, 2002.

14. fejezet - Térbeli modellek

A fejezet céljai: ebben a fejezetben áttekintjük a 2,5D és a 3D modelleket, a raszter- és vektoralapú domborzatmodelleket és a tetrahedronokból álló, valóságos térfogatot modellező rendszert.

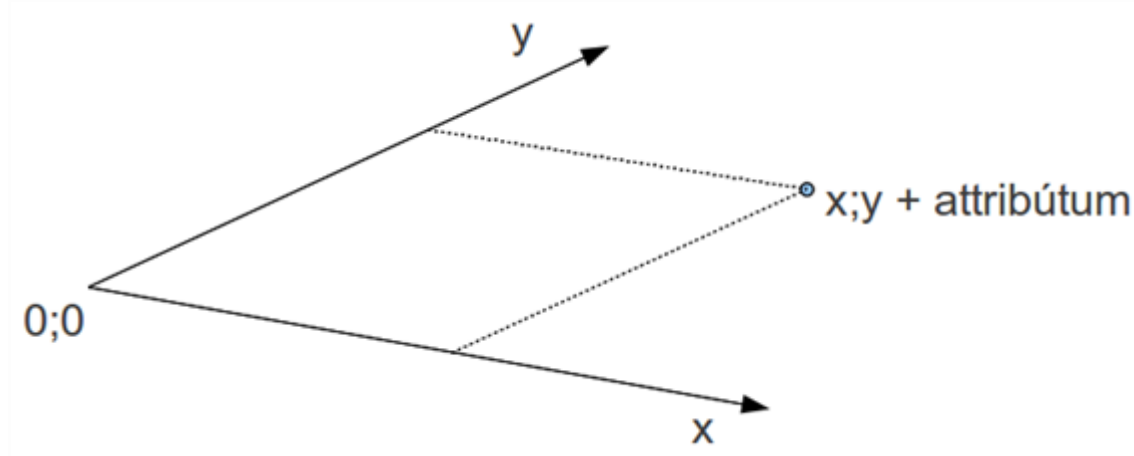
Szükséges ismeretek, fogalmak: TIN, Delaunay-háromszögek, geotiff, izofelület, voxel

1. 14.1. A 3D modell meghatározása

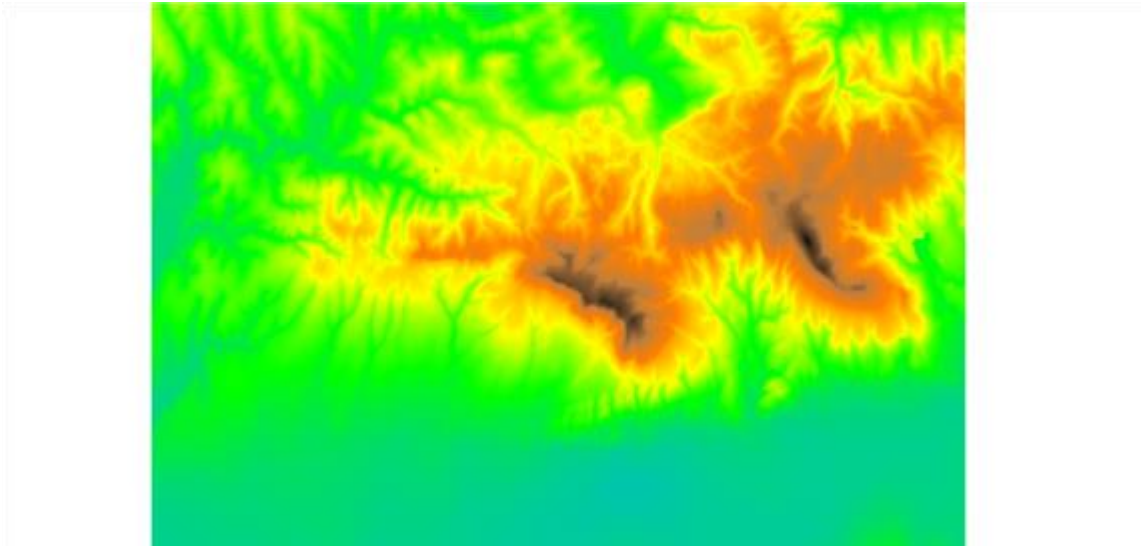
1.1. 14.1.1. 2,5D modellek

A szokásos térképek és egyéb térképi ábrázolások általában két dimenziósak (2D). Ez azt jelenti, hogy az ábrázolt terület minden egyes pontjának térképi helyét egyértelműen meghatározza két térdimenzió, például a földrajzi szélesség és a földrajzi hosszúság értéke. Ezen kívül minden egyes ábrázolt ponthoz rendelünk még legalább egy szakadatot (attribútum adatot) is (14.1. ábra). Ez utóbbi adat az, amelynek értékét ábrázolja a térkép. Így például, domborzati térképek esetében minden ponthoz rendelünk két koordinátát, szakadatként pedig az adott pont tengerszint feletti magasságát és ennek aktuális értéke határozza meg az adott pont színét: minél alacsonyabb, annál zöldebb és minél magasabb, annál sötétebb barna (14.2. ábra). Ha ezt az adatbázist (mert hiszen minden térkép végül is felfogható egy adatbázisként. *Ne feledjük, hogy az adatbázis fogalom nem egyenlő az adattáblával!*) úgy ábrázolnánk, hogy az egyes pontok látszó helyét a magasságuk szerint módosítanánk, akkor egy szemléletes, mondhatni “térbeli” képét kapnánk a területnek (14.3. ábra). Igen gyakran ezt a megjelenítési módot nevezik - hibásan! - 3D-nek. A bemutatott eljárással csak úgynevezett “2,5D” modellhez jutunk. Ez az elnevezés persze matematikai szempontból hibás, de nem is ez a lényeg: arra céloz csupán, hogy valójában ez egy speciálisan megrajzolt 2D modell, amely így 3D hatást nyújt. Így, minthogy félúton van a 3D és a 2D modell között, általában 2,5D-nek nevezzük.

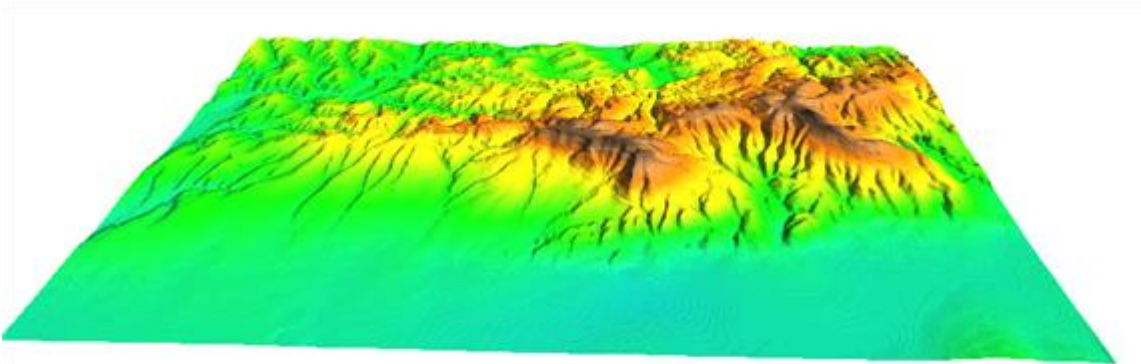
14.1. ábra - A kétdimenziós modell



14.2. ábra - Kétdimenziós terepmodell – a hagyományos domborzati térkép. A Mecsek nyugati- és középső része a Pécsi-síksággal



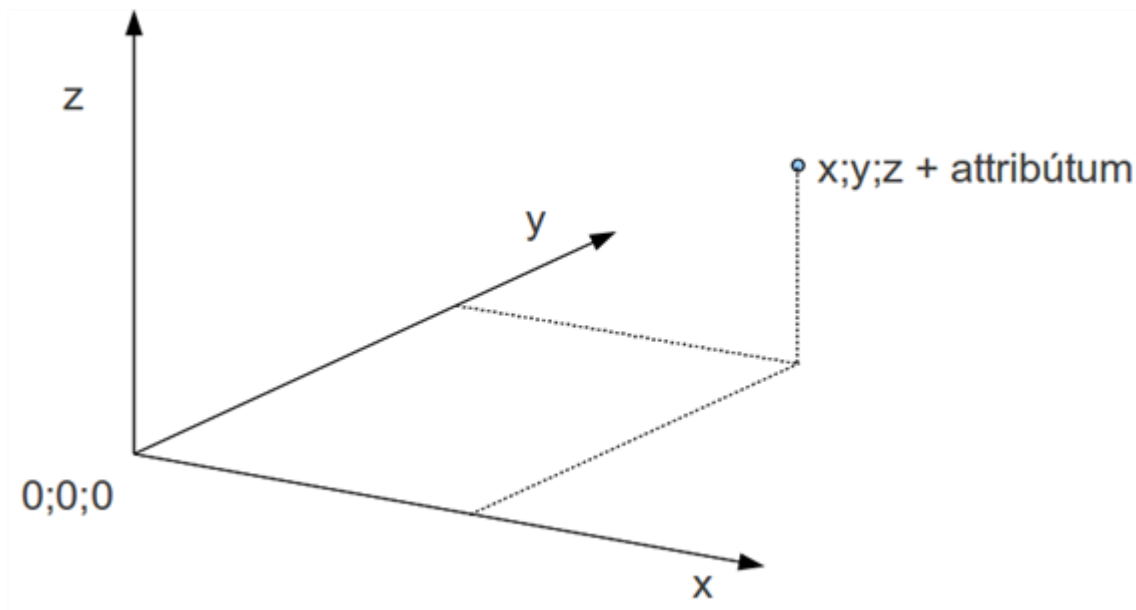
14.3. ábra - Három dimenziós látszati kép 2 dimenziós térképből: 2,5D modell. Kétszeres túlmagasítással, 5500 méter magasból, délkeleti megvilágításban, délről szemlélve a 2. ábrán látható területet (video)



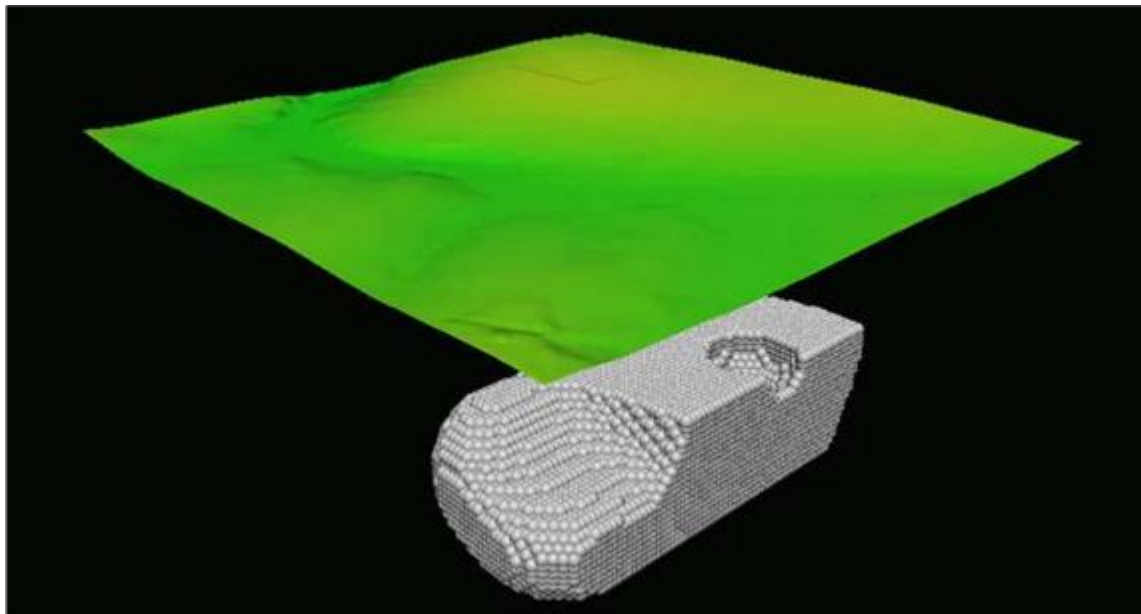
1.2. 14.1.2. Valós 3D modellek

A valós 3D modell olyan, hogy minden egyes pontjához három térdimenzió tartozik és egy szakadat: például, földrajzi szélesség és hosszúság, tengerszint feletti magasság, közet neve. Fontos különbség tehát, hogy nem attól lesz valami 3D modell, hogy attribútum-adatként a magasságot tartalmazza, hanem attól, hogy minden pontját három térbeli koordináta írja le és e mellett még minden ponthoz rendelünk egy szakadatot is (14.4. ábra). Mivel a 14.2. ábrán bemutatott modell esetében ez nem teljesülhet, az nem is lehet 3D. Valós 3D modellre példa az 14.5. ábrán látható modell.

14.4. ábra - A három dimenziós modell



14.5. ábra - Példa a valós 3D-re. Egy felszín alatti tömeg elhelyezkedése a GRASS-ban megjelenítve (forrás)



2. 14.2. A térbeli modellek felépítése

Valódi 3D modelleket leginkább bányák, barlangok, földtani és légköri jelenségek vizsgálatához használják, de nem nélkülözhető a vastagabb víztömegek (tengerek, tavak) viselkedésének modellezésekor sem.

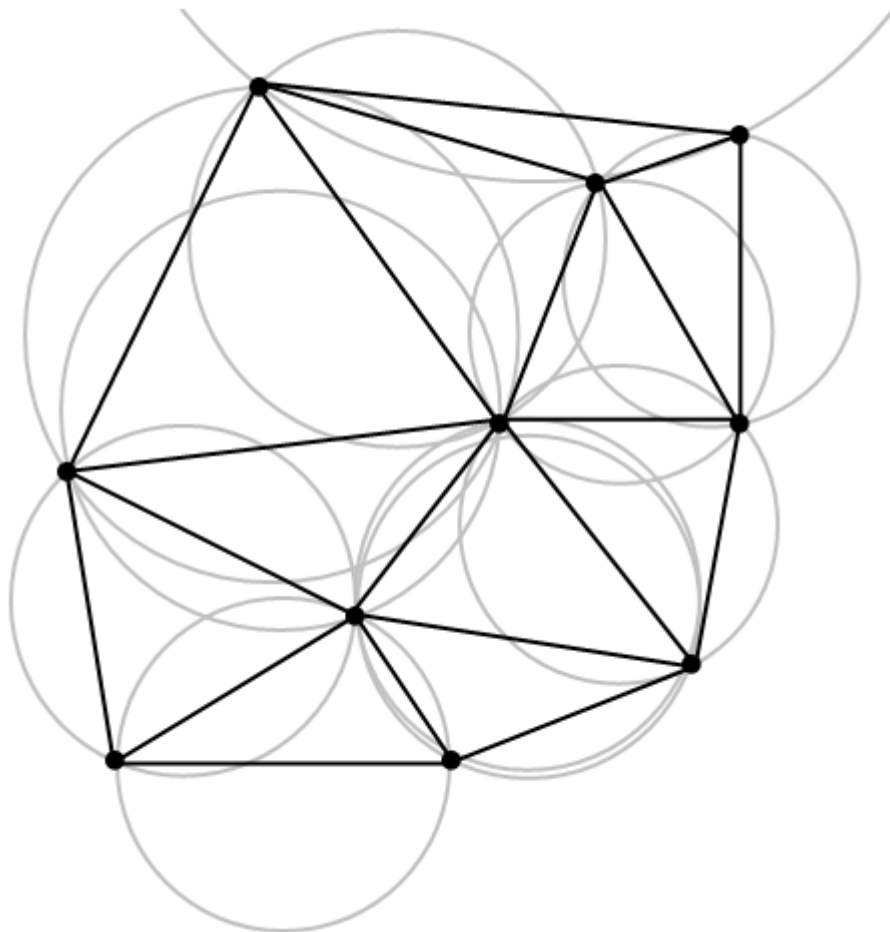
Míg az általános célú térinformatikai rendszerek általában képesek a 2,5D modellek kezelésére és azok elemzésére, addig valódi 3D-t már csak néhány professzionális GIS kezel és persze az egy-egy adott igény kielégítésére képes célszoftverek (pl.: légköri modellező környezetek).¹.

A 2,5D modellek között raszteres és vektoros felépítésűek is találhatók. A 2,5D raszteres modellek a megszokott raszteres modellekkel teljes mértékben megegyeznek. A vektoros 2,5D modellek sajátossága, hogy általában úgynevezett TIN szerkezetűek. A TIN (Triangulated irregular network – szabálytalan háromszög

¹A "hagyományos", kereskedelmi szoftverekhez (ArcGIS, Mapinfo stb.) általában (kiegészítő csomagban) megvásárolható valamilyen 3D modellező. A GRASS, a vezető térinformatikai célú szabad szoftver alapértelmezésben képes valódi 3D modellek kezelésére.

hálózat) olyan, az ábrázolandó felszint folytonosan és átfedés mentesen különböző háromszögek építik fel. Az egyes háromszögek síkja egymáshoz képest szöget zárhat be. Minél kisebbek a háromszögek, annál pontosabban lehet ezzel az eljárással modellezni a felszínt.² A TIN készítésének alapja a Delaunay-háromszögelés. Ezen eljárás alapja igen vázlatosan az, hogy minden egyes pontra egy olyan kört illesztünk, mely másik két pontra is illeszkedik és megköveteljük, hogy e kör területe minimális legyen. E három pontot ezután összekötjük egymással, vagyis létrehozunk egy háromszöget. Az eljárást addig ismételjük, míg mindegyik pontot össze nem kötöttük két másikkal (14.6. ábra).

14.6. ábra - Delaunay-háromszögek készítése pontfelhőből



Ezen eljárás nagyon szerencsés tulajdonsága, hogy nem alakulnak ki olyan háromszögek, amelyek nagyon keskenyek és hosszúak lennének, így TIN-ként használva jól közelítik a valós felszínt.

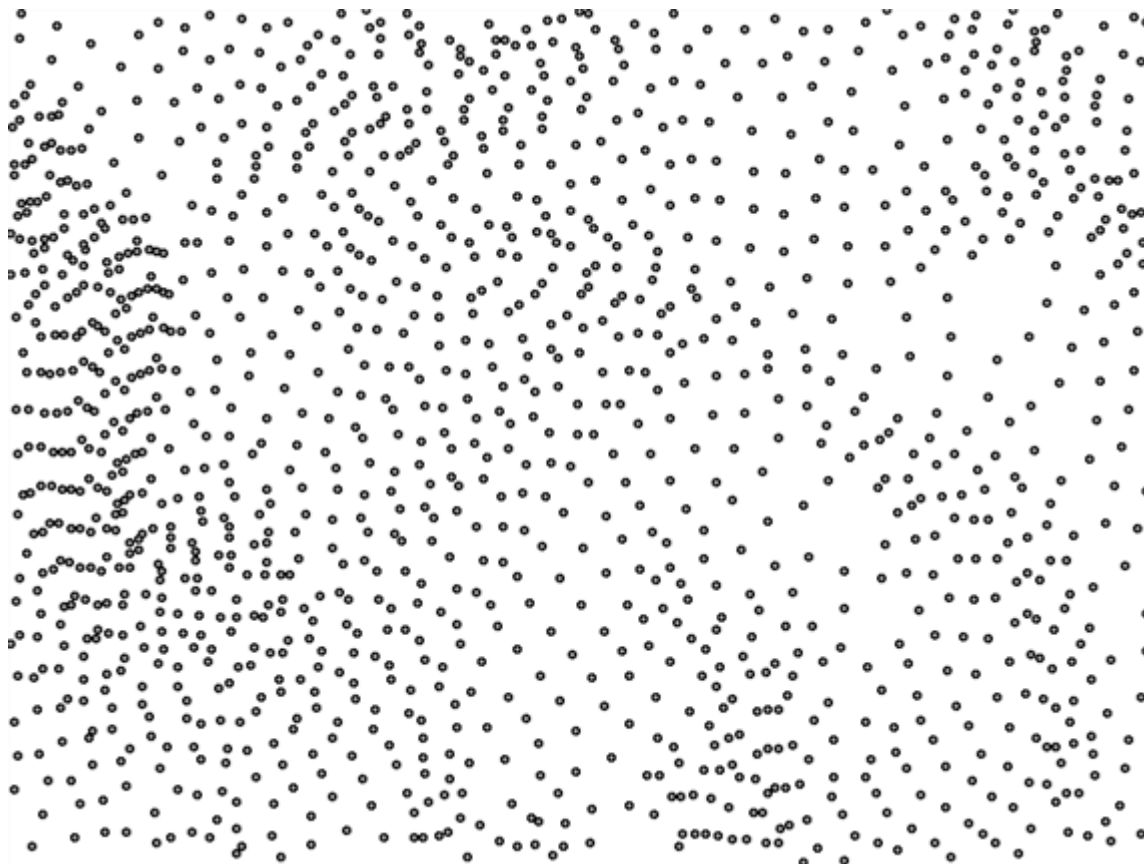
Az elkészült háromszögháló csomópontjai az eredeti pontokkal egyeznek meg, az azokat összekötő élek pedig a Delaunay-háromszögek. Az élek olyanok, hogy egy attribútumtáblából mindegyikükhöz tartozik egy maximum és egy minimum érték is, így már 3D látszati kép készülhet belőlük.

Ezt az eljárást használjuk például akkor, amikor valamilyen forrásból csak pontszerű értékek (például magassági értékek) állnak rendelkezésre (14.7. ábra). Ebből a pontfelhőből készíti el a szoftver a Delaunay-háromszögeket, vagyis a TIN-t. Ez még csak kétdimenziós, mert bár az egyes élekhez már tartozik minimum és maximum magassági érték is, de a monitoron még csak egyszerű háromszög hálózatnak látszik (14.8. ábra).

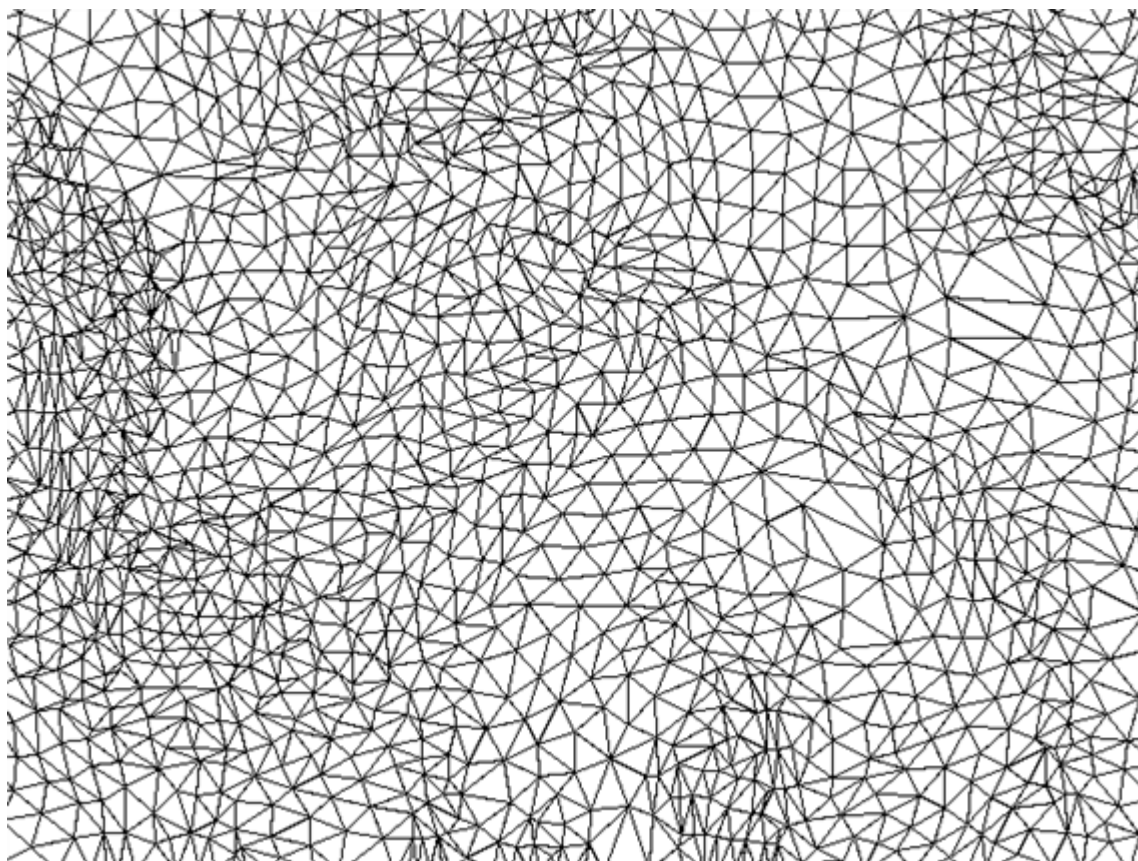
A 3D látszati képet (vagyis a 2,5D modellt) általában a térinformatikai szoftver egy következő lépésben (és általában egy külön modullal) készíti el (14.9. ábra).

²Érdekességként megemlíthető, hogy a számítógépes játékok zöme ezzel az eljárással hozza létre a – virtuális – tájképet, és nem véletlen, hogy a grafikus processzorok teljesítményét is gyakran jellemzik azzal, hogy mennyi háromszöget képesek egy másodperc alatt kiszámolni.

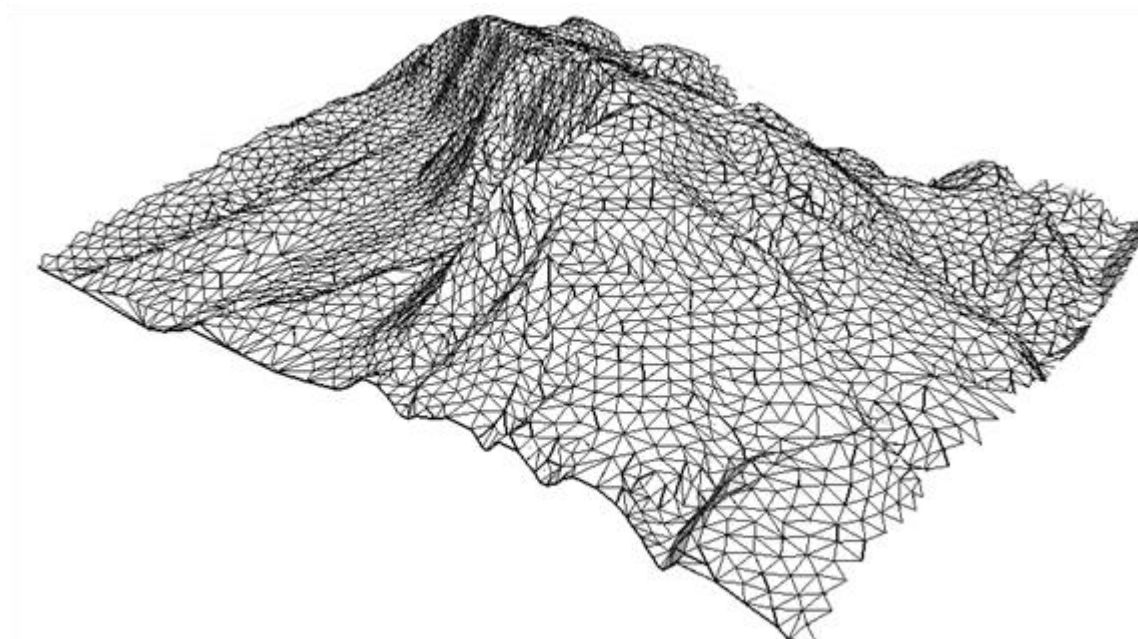
14.7. ábra - Magassági értékek pontszerű adatokként a Jakab-hegy (Mecsek) DK-i részén



14.8. ábra - A 14.7. ábra pontjaira illesztett Delaunay-háromszögek. Síkbeli kép, noha a hálózat ritkulása és sűrűsödése már mutatja a domborzatot is.



14.9. ábra - A 14.7. ábrán látható magassági pontok alapján, a 14.8. ábra Delaunay-háromszögeiből készült 3D látszati kép. Az ábrázolt terület nagyobb, mint az ábrák területe. A Jakab-hegy a Mecsekben, 3-szoros túlmagasítással, dél-keletről.



3. 14.3. Digitális magassági modellek (DEM)

DEM céljára a vektoros TIN modell és a raszteres magassági modell egyaránt megfelelő ugyan, de nem véletlen, hogy mindkét eljárás használatban van: mindegyiknek vannak előnyei és hátrányai is.

Raszteres DEM:

- ASCII vagy geotiff formátumba mentve az adatokat, jóformán mindegyik térinformatikai rendszer képes azokat megnyitni és felhasználni.
- Konvolválható, így egyszerűen készíthetők bonyolultabb elemzések is.
- Minden, a 2,5D modelleket alapul vevő elemzési eljárás képes kiindulási alapként használni.
- Nagyon redundáns és a redundancia a felbontás javításával egyre nagyobb lesz. Ezért:
- Általában sokkal nagyobb tárhelyet igényel mint a TIN.
- Egy raszterhez egyszerre csak egyetlen szakadat és egy címke tartozhat.
- Az egyes raszterekhez tartozó adatok egyenkénti megváltoztatása, kezelése, általában viszonylag nehézkes.

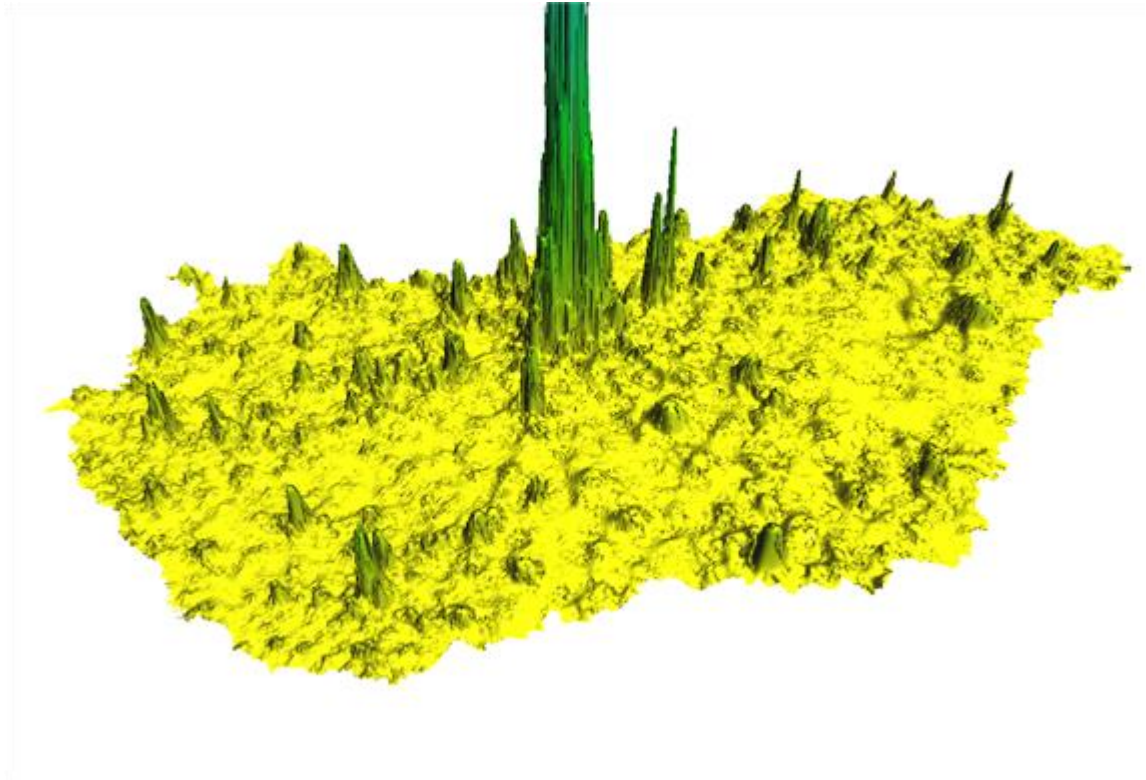
TIN (2,5D):

- Mivel a TIN nem egyéb, mint egy vektoros állomány, ezért az azt felépítő háromszögekhez, azok csúcspontjaihoz és éleihez külön-külön egyszerre több – gyakorlati szempontból tekintve: tetszőleges mennyiségű – adat tartozhat.
- Az adatok kezelése, megváltoztatása, akár tömegesen is – az adattáblában – viszonylag egyszerű, könnyen automatizálható feladat.
- A raszteres DEM-nél sokkal kevésbé redundáns, ezért:
- Általában sokkal kevesebb tárhelyet igényel mint a raszteres DEM.
- Bár shp formátumban – ami a térinformatikában igen elterjedt vektoros adattárolási eljárás – menthető, a felhasználhatósági köre mégis szűkebb, mint a geotiff-é. Ezen kívül szempont az is, hogy a geotiff képes egyetlen állományban tárolni minden adatot, az shp viszont nem.
- Nem konvolválható.

Összességében az mondható el, hogy mivel mindegyik eljárásnak vannak előnyei és hátrányai, ezért igazándiból az éppen használt szoftver-környezet és az aktuális cél dönti el, hogy melyiket érdemes használni. És persze a felhasználó ismeretei is legalább ilyen súllyal esnek latba. Általános érvényű megállapítások a felhasználást illetően nem adhatók, gyakran az egyéni tapasztalatok és felhasználói ismeretek döntenek.

A 2,5D modellek kapcsán meg kell még jegyezni, hogy koránt sem csak valós felszínek modellezésére használják őket. Ugyanígy lehetséges egyéb – virtuális – felszínek, illetve izofelületek megjelenítésére és elemzésére. Ilyenek például a légnyomás, a csapadék, vagy éppen a népsűrűségi, hullópor-koncentrációt stb. mutató adatok szemléletes megjelenítésére is (14.10. ábra).

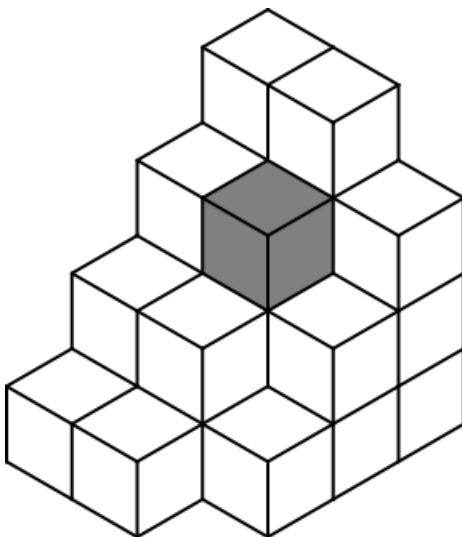
14.10. ábra - Példa nem a felszín magasságát mutató 2,5D modellre: Magyarország népsűrűsége. Budapest egyes kerületeinek a népsűrűsége túl nagy volt ahhoz, hogy jól ábrázolható legyen.



4. 14.4. A voxel modell

Valós 3D modellként általában voxelekből felépülőket használunk. A *voxel* elnevezés a *pixel* analógiájára keletkezett: a pixel a 2D kép egy képelemét jelenti (picture element), a voxel pedig a 3D kép egy térbeli, tehát térfogati elemét (*volume picture element*). A voxelek a vonatkozó térfogatot folytonosan és átfedés mentesen töltik ki, és jellemzően kocka alakúak (14.11. ábra).

14.11. ábra - A voxel modell kocka alakú térfogati elemei



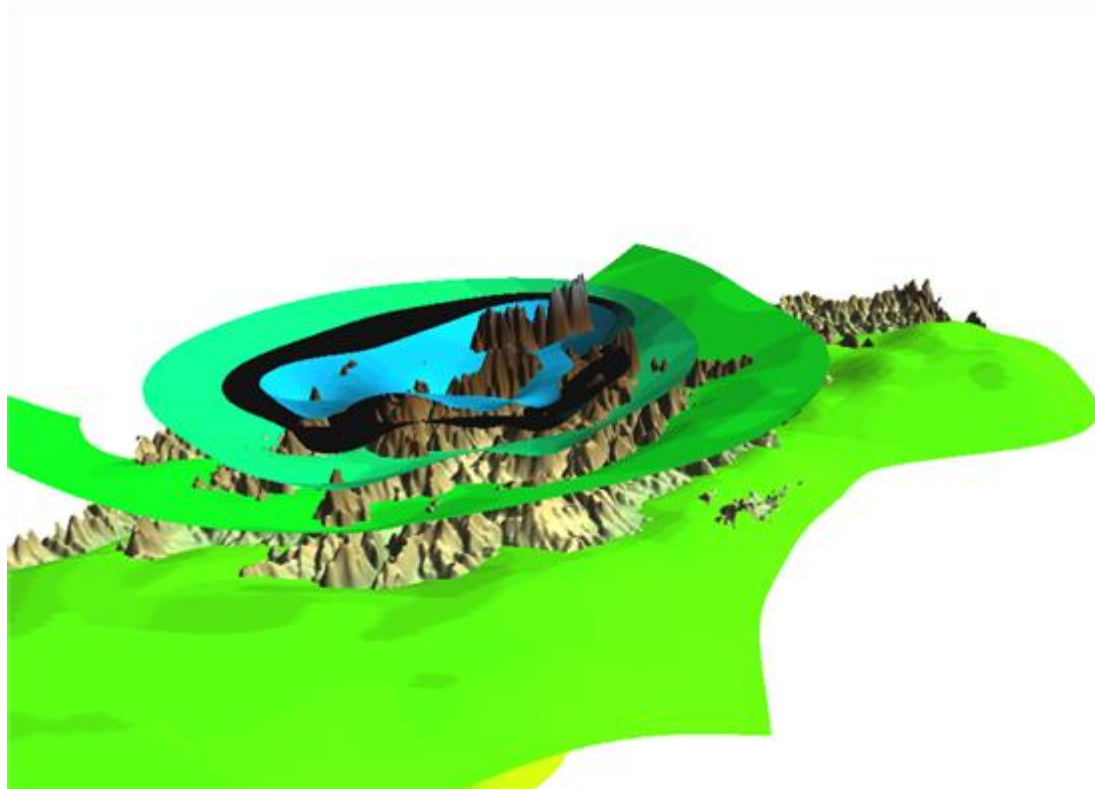
A raszterek analógiájára képzelhetők el: a modellezendő térfogatot egyenlő méretű kockákra bontjuk és mindegyik kockához rendelünk egy attribútum adatot. Ez az adat jellemzi a mért mennyiségnek az adott voxelen belüli értékét. Így például, ha egy adott légköri tömeget voxelekre bontva modellezünk, akkor minden egyes kockához hozzárendelhetjük az kocka térfogatában jellemző hőmérsékletet.

Fontos sajátosság – a raszterekhez és a pixelekhez hasonlóan – hogy egy voxelnek egyszerre csak egy szakadata van.

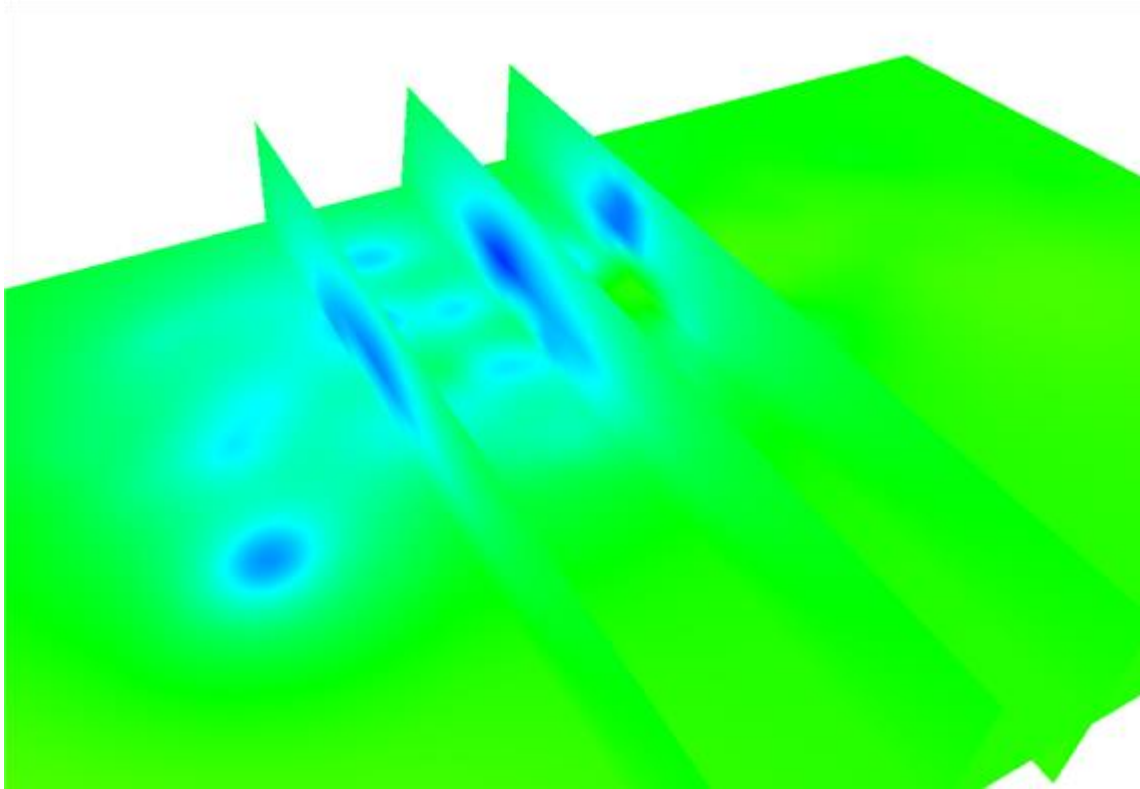
A voxelekből felépülő modell belső struktúrája csak akkor válik láthatóvá, ha legalább egy metszetet készítünk róla. Ez érthető is, hiszen kívülről nézve a voxelekből felépülő térfogat átlátszatlan, általános esetben leginkább úgy nézne ki, mint egy téglá. Ha erről az azonos értékeket összekötő izovonalak vagy tetszőleges síkok vagy felületek mentén metszetet készítünk, akkor az adott metszet mentén feltárul a belső szerkezete (14.12. és 14.13. ábra). Ezen a pontok válik talán leginkább érthetővé a 2,5D és a valódi 3D modell közötti különbség: a 3D modell elmeteshető egy 2,5D felszínnel (hiszen az csak egy felszín, egy üres héj), míg fordítva ez értelmezhetetlen.

A fentiekből következően voxel modellt jellemzően metszetein keresztül szoktunk vizsgálni. A voxeles modell metszete egyszerű 2D raszteres modell.

14.12. ábra - Példa a valódi 3D modellre. A várható évi átlagos csapadékösszeg térbeli eloszlása közép- és kelet-Szlovákiában. Az egyes felületek izofelületek, az azonos értékű (tehát azonos éves átlagos csapadékösszegű) pontok által alkotott felületek. Az egyes felületek alulról felfelé: 600 mm 700 mm 800 mm 900 mm 1000 mm 1100 mm. A háttérben a terület túlmagasított terepmodellje látható, ami voltaképpen egy 2,5D raszteres modell. Természetesen a felületek közötti, üresnek látszó térfogatban is várható csapadék, csak éppen nem a fent megadott értékek valamelyike.



14.13. ábra - Példa a valódi 3D modellre. A várható évi átlagos csapadékösszeg térbeli eloszlása közép- és kelet-Szlovákiában. A valós térbeli modellt ebben az esetben négy síkkal metszettük el, egy vízszintessel és három észak-déli csapású függőlegessel (a három függőleges sík a Magas-Tátra területére esik). Jól látszik az egyes metszésplokokon a várható éves csapadékösszeg térbeli eloszlása: minél sötétebb kék, annál nagyobb a csapdékösszeg. A sötétkék foltok mutatják, hogy a legtöbb csapadék a Magas-Tátrában és közvetlen közelében várható. Ettől távolodva mind vízszintes, mind függőleges irányban csökken a mennyisége. Természetesen a felületek közötti, üresnek látszó térfogatban is várható csapadék, csak ott nem készült metszet.



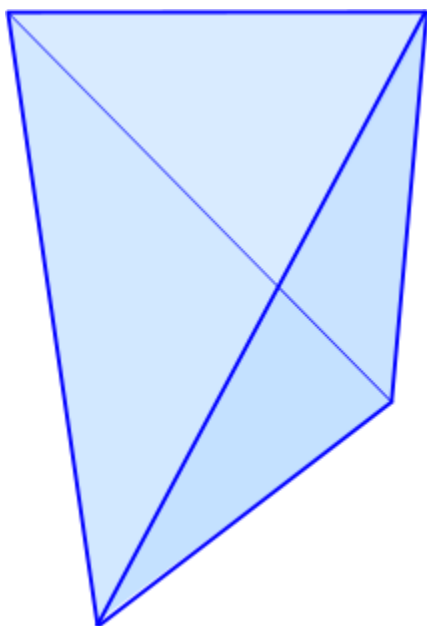
5. 14.5. A tetrahedronok

Vektor alapú valós 3D modellek is felépíthetők, ebben az esetben tetrahedronokból álló rendszer modellezi a valóságos térfogatot. A tetrahedron olyan négyoldalú test, amelynek oldalai háromszögek (14.14. ábra). A voxelekhez hasonlóan ezekből is felépíthető olyan struktúra, amelyik folytonosan és átfedés mentesen tölti ki a modellezendő teret (14.15. ábra).

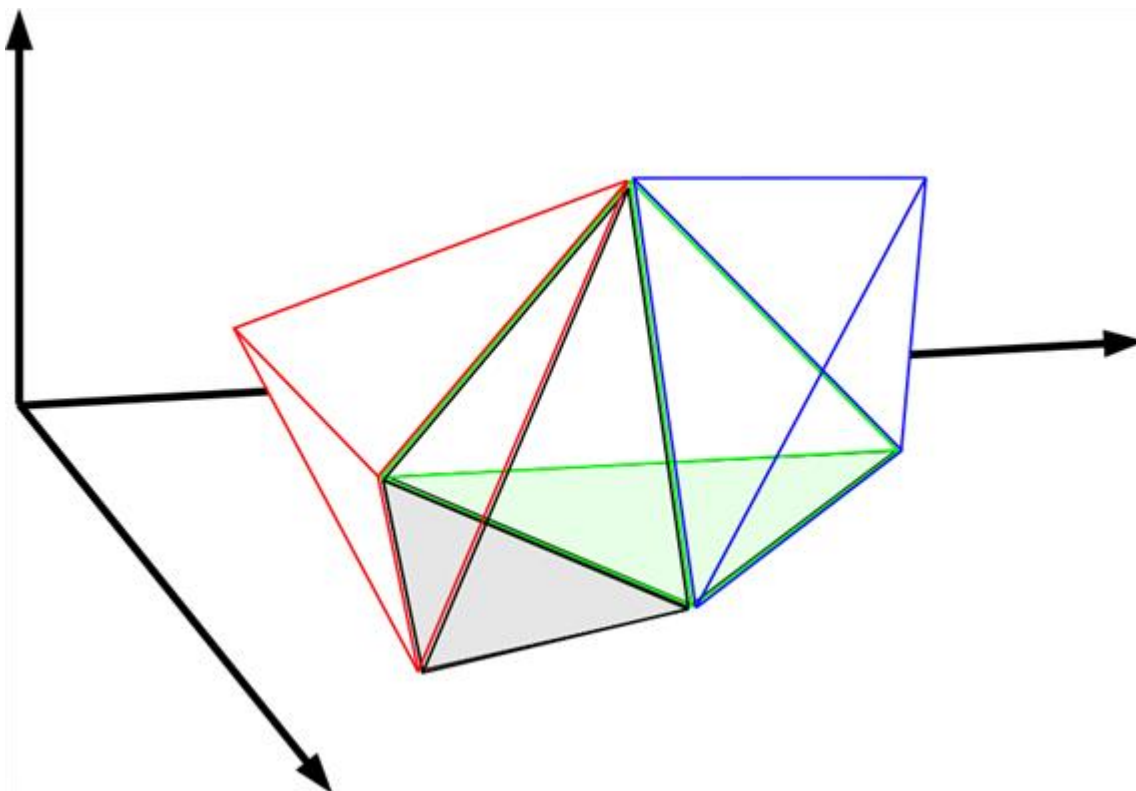
A tetrahedronokból álló struktúra a TIN-nel mutat rokonságot: az egyes elemekhez több szakadat is rendelhető, mert vektoros elemek és így a hozzájuk kapcsolt adattábla mindegyikre vonatkozóan több mezőt (tehát attribútumot) is tartalmazhat. Elkészítése hasonló a síkbeli Delaunay-háromszögekéhez, itt azonban körök helyett gömböket kell használni és a gömb felületére illeszkedő pontokat kell megkeresni.

A tetrahedronokból álló térfogat kívülről alapesetben ugyanúgy átlátszatlan, mint a voxelekből való, ezért ugyanúgy szükséges lehet a metszése. A tetrahedron alapú modell metszete 2D vektoros modell, amelyben a metszés három- vagy négyoldalú, szabálytalanul elhelyezkedő poligonokból épül fel (14.16. ábra).

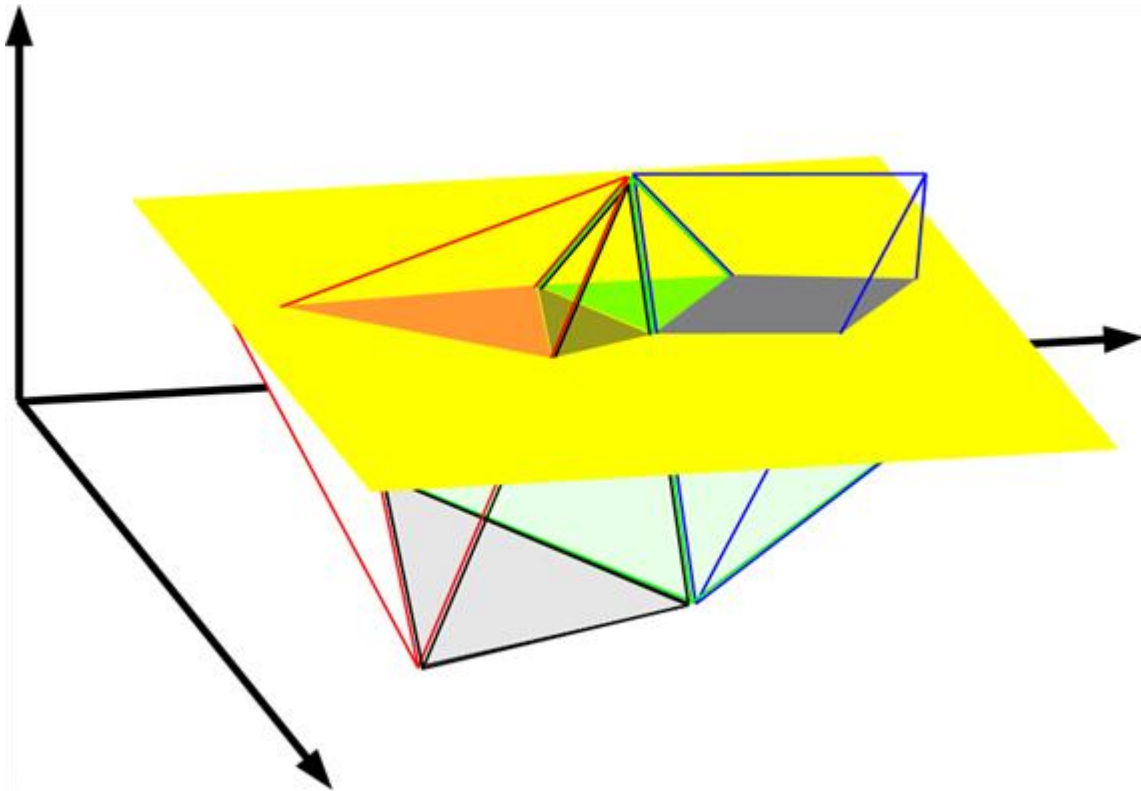
14.14. ábra - A tetrahedron. Megfigyelhető, hogy mindegyik oldala egy-egy háromszög



14.15. ábra - Térfogat kitöltése tetrahedronokkal. Négy, különböző színű tetrahedron tölti ki vonatkozó teret. A tájékozódást segíti a háttérben levő 3D koordinátarendszer tengelyeinek feltüntetése és az, hogy a képzeletbeli alapsíkra felfekvő részeket halvány színezés jelöli. A kék test ugyanaz, mint a 14.14. ábrán látható.



14.16. ábra - A 14.15. ábra tetrahedronjai síkkal elmetszve. A sík (sárga) párhuzamos az alappal, amin a tetrahedronok felfeksznek. Megfigyelhető, hogy a metszés eredménye négy poligon, melyek három vagy négy oldalúak. A poligonok színezése ugyanaz, mint a tetrahedroné, amelynek a metszésével előálltak.



6. Ellenőrző kérdések

1. Melyek a térbeli modellek típusai?
2. Ismertessen pontszelekciós eljárásokat térbeli modellek felépítéséhez!
3. Mi a voxel? Hogyan épülnek fel a valós 3D modellek?
4. Mi a vektor alapú 3D modellek alapstruktúrája?
5. Elemezze a TIN és a tetrahedron struktúrák analógiáit!

7. Irodalomjegyzék

Bódis Katalin, 2008. Digitális domborzatmodellek és alkalmazási lehetőségeik az árvízi kockázatelemzésben. PhD értekezés. Szeged, SZTE TTIK.

Sárközy Ferenc: Térinformatika. Elektronikus jegyzet

15. fejezet - Űrfelvételek radiometrikus korrekciója – modellezés raszteres adatokkal grafikus felületen

A fejezet céljai: A fejezetben be kívánjuk mutatni, hogy miként lehet grafikus felületen egyszerű és bonyolultabb modelleket készíteni. A modellalkotás elemi lépésein keresztül folyamatára megismertetjük az olvasóval, hogyan lehet gyorsan, programozási nyelv ismerete nélkül lehet modelleket készíteni. A fejezetben olyan modellt állítunk elő, mely a raszteres alapú digitális Űrfelvételek intenzitás értékeiből radiancia, majd reflektancia értékeket ad eredményül.

Szükséges ismeretek, fogalmak: távérzékelés; reflektancia; elektromágneses sugárzás; raszteres adatmodell; pixelérték; függvény; függő- és független változó

1. 15.1. Radiometrikus korrekció elméleti háttere

A műholdas távérzékelés során többnyire a Napból érkező és a Föld felszínéről visszaverődő vagy kisugárzó elektromágneses sugárzás energiáját mérik a műholdon elhelyezett érzékelő berendezések. A felvételezés ún. pásztázó technikával történik, vagyis a mozgó vagy rögzített optikai rendszeren keresztül a fókuszszíkon lévő detektorok felületére érkezik az analóg jel. A detektorok érzékenységtől függ, hogy mekkora az az adott hullámhossztartományban érkező energiamennyiség amit már, ill. még érzékelni tud a detektor. Az érzékelt energiát alakítja a fedélzeti rendszer számokká a radiometrikus felbontásnak megfelelően. A modern távérzékelésben legalább 8 biten, de esetenként 10, 11 biten is tárolják a spektrális információt. Ez azt jelenti, hogy a minimális (már érzékelhető) energiamennyiség ($L_{MIN\lambda}$) és a maximális (még érzékelhető) energiamennyiség ($L_{MAX\lambda}$) közötti intervallumban hányféle energiaszintet tud a rendszer megkülönböztetni (8 biten pl. 0-tól 255-ig). A műholdas távérzékelés során létrejövő Űrfelvétel nagy előnye, hogy minden képelem (pixel) értéke mérési eredményként jön létre, ugyanakkor a radiometrikus felbontás révén nem a felszínről visszavert energiaértéket olvashatjuk ki a pixel értékeként, hanem az ún. intenzitásértéket (DN). Az intenzitásértékek nehezen hasonlíthatók össze akkor, ha különböző évszakokban készült Űrfelvételeket akarunk összehasonlítani, hiszen a felszínborítás változása mellett változnak a besugárzási viszonyok is, így a napsugarak beesési szöge, vagy a beérkező energiamennyiség a Föld-Nap távolságának változása miatt. Az Űrfelvételek idősoros elemzéséhez tehát szükséges olyan abszolút skála használata, amely alapján két vagy több Űrfelvétel összehasonlítható egymással. Ehhez a felvételezés változó körülményeit és a detektorok változó állapotát leíró, a változásokat figyelembe vevő modell elkészítésére és alkalmazására van szükség. A modell így lehetőséget nyújt az ún. radiometrikus korrekcióra. A radiometrikus korrekció részeredménye az adott felületről visszavert összenergia-mennyiség. Végeredménye pedig az adott hullámhossztartományban a felületről visszavert összenergia, valamint a Napból induló és felületre (atmoszférikus hatásoktól mentes) beérkező összenergia hányadosa, ill. ennek 100-szorosa. Ez utóbbi értéket nevezzük reflektanciának és %-ban fejezzük ki.

2. 15.2. Modellalkotás gyakorlati lépései

A modellünknek alkalmasnak kell lennie arra, hogy figyelembe vegye a változó paramétereket, ill. részeredményként a radianciát, végeredményként a reflektanciaértéket megadja minden képelemre vonatkozóan.

2.1. 15.2.1. Radiancia értékek kiszámítása az intenzitásértékekből

A radiancia érték egyszerűen kiszámolható, ha ismert a $L_{MIN\lambda}$ és $L_{MAX\lambda}$ értéke. Ezeket általában a műholdfelvételekhez csatolt ún. metafile-okban vagy a műhold technikai adatait is tartalmazó honlapon találjuk meg. A detektorok „előregedése” miatt a detektorokra vonatkozó paraméterek időszakonként módosulnak. (Chandler-Markham, 2003).

15.1. ábra - Kalibrációs adatok Landsat 5 TM szenzorához (Chandler-Markham, 2003)

TABLE 1
L-5 TM POSTCALIBRATION DYNAMIC RANGES FOR U.S. PROCESSED NLAPS DATA

Processing Date	Spectral Radiances, LMIN _λ and LMAX _λ in W/(m ² .sr. μm)							
	From March 1, 1984				After May 5, 2003			
	To May 4, 2003							
Band	LMIN _λ	LMAX _λ	G _{rescale}	B _{rescale}	LMIN _λ	LMAX _λ	G _{rescale}	B _{rescale}
1	-1.52	152.10	0.602431	-1.52	-1.52	193.0	0.762824	-1.52
2	-2.84	296.81	1.175100	-2.84	-2.84	365.0	1.442510	-2.84
3	-1.17	204.30	0.805765	-1.17	-1.17	264.0	1.039880	-1.17
4	-1.51	206.20	0.814549	-1.51	-1.51	221.0	0.872588	-1.51
5	-0.37	27.19	0.108078	-0.37	-0.37	30.2	0.119882	-0.37
6	1.2378	15.303	0.055158	1.2378	1.2378	15.303	0.055158	1.2378
7	-0.15	14.38	0.056980	-0.15	-0.15	16.5	0.065294	-0.15

Az adott hullámhosszon, a detektoron mérhető spektrális radiancia értéke kiszámolható a következő (1) képlet alapján

$$L_{\lambda} = ((LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}) / Q_{calc}) * DN + LMIN_{\lambda}$$

ahol Q_{calc} a maximális lehetséges pixelérték a radiometrikus felbontás szerint, 8 bit esetén $255 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$

Az adott hullámhosszhoz tartozó detektor esetében az $(LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}) / Q_{calc}$ értéke konstans és a szakirodalom Grescale értéként adja meg (lásd a fejezet 15.1. ábrája), míg a $LMIN_{\lambda}$ értékét egyszerűen Brescale értéknek nevezi. Így a fenti képlet egyszerűen

$$L_{\lambda} = G_{rescale} * DN + B_{rescale}$$

alakban (2) is megadható.

2.2. 15.2.2. Reflektancia érték számítása radiancia adatokból

Az adott hullámhossztartományban (λ) a geometriai felbontásnak megfelelő területet (Landsat TM esetén $30 \times 30 \text{ m}^2$) reprezentáló pixelhez tartozó reflektancia kiszámítható a következőképpen (3)

$$Ref_{\lambda} = (\Pi * L_{\lambda} * d^2) / (ESUN_{\lambda} * \cos \Theta_s)$$

ahol

Ref_{λ} az adott λ hullámhosszon a reflektancia értéke

L_{λ} a detektoron mérhető spektrális radiancia,

d a Föld-Nap távolsága csillagászati egységben,

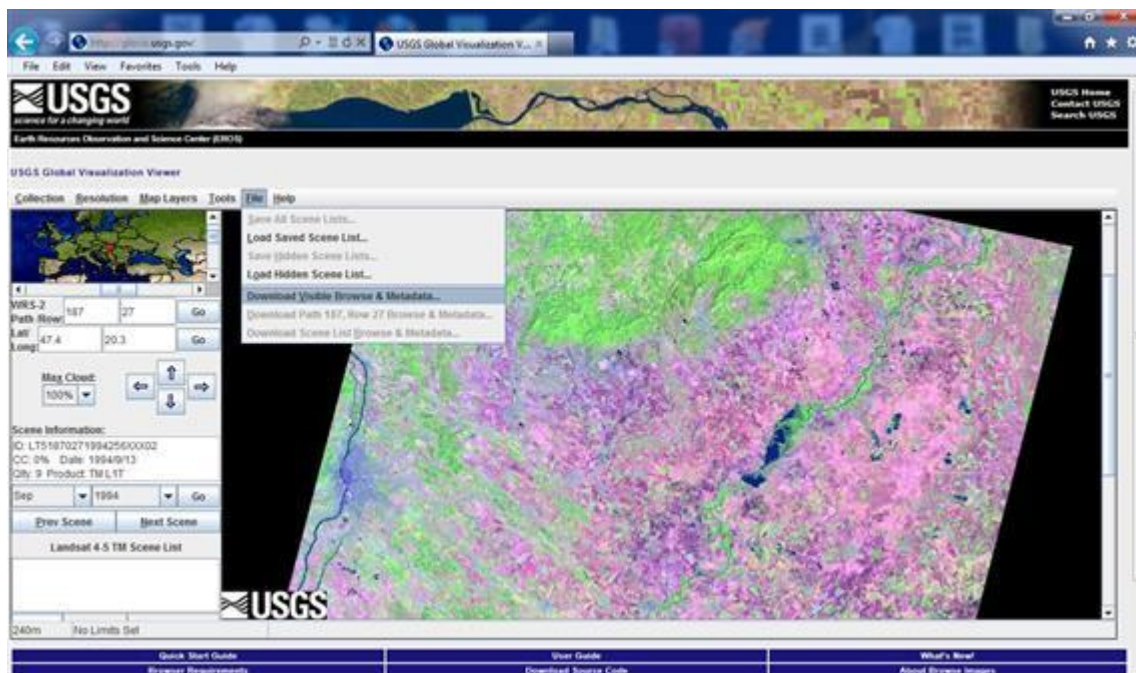
$ESUN_{\lambda}$ az átlagos külső-atmoszférikus irradiancia,

Θ_s a napsugarak beesési szöge a zenithez képest fokokban (Chandler-Markham, 2003)

A Ref_{λ} így kiszámolt értéke 0 és 1 közé eső szám, melyet 100-zal megszorozva kapjuk meg a reflektanciát %-ban.

A reflektancia számításához szükséges fenti képletből az L_{λ} (a detektoron mérhető spektrális radiancia) értékét már kiszámoltuk. A Föld-Nap távolságát a felvételezés időpontjának ismeretében lehet kiszámítani. A felvételezés időpontja szintén a metafileből olvasható ki. A Landsat felvételek pl. ingyenesen letölthetők a Glovis honlapról. Az úrfelvételhez tartozó metafile a File/Download Visible Browse & Metadata almenüből tölthető le és txt fileként egy szövegszerkesztőben megtekinthető.

15.2. ábra - Az USGS Glovis felülete a példában szereplő űrfelvétellel



A 15.2.ábrán látható 187-027-es keresőkoordinátájú 1994. szeptember 13-án készült kép első és utolsó sorának felvételezési ideje az alábbi volt a kép metaadata (link a filera) szerint:

start_time = 1994:256:08:43:25.82388

stop_time = 1994:256:08:43:52.77238

A kép közepén (szintén a metafileből)

scene_center_lat = 47.46390; scene_center_lon = 20.22891

a műhold kb. az 1994-es év 256. napján 8 óra 43 perc 39 mp-kor haladt át.

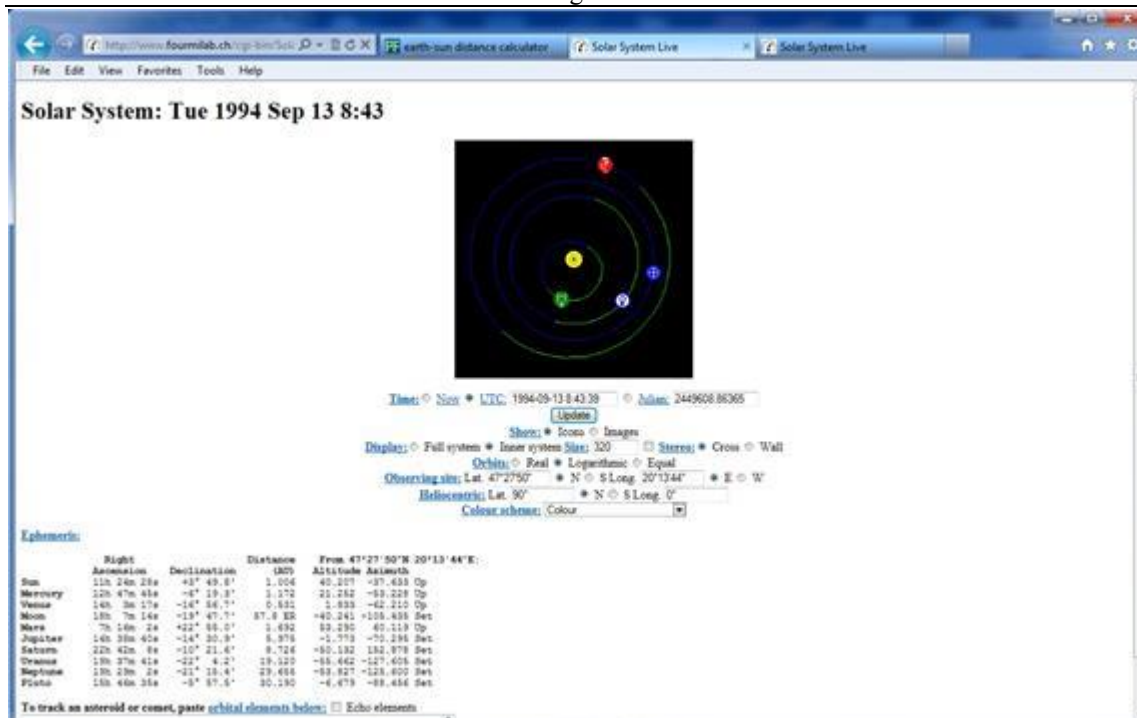
Ehhez az időponthoz tartozó Föld-Nap távolságot, ill. ezen távolság és az átlagos Föld-Nap távolság (AU=149,597,870,700±3 m) arányát megkaphatjuk, ha a következő linken elérhető honlapon (utolsó elérés: 2013. január 03.)

a megfelelő helyekre beírjuk a szükséges paramétereket (a képközéppont földrajzi koordinátáit és a képközépponton történő áthaladás idejét):

Ezekből a képkészítés idején a Föld-Nap távolsága, vagyis a képletben szereplő d értéke 1,006 AU volt (15.3.ábra).

15.3. ábra - A Föld (ill. más bolygók) és a Nap távolságát kiszámító interaktív felület

Úrfelvételek radiometrikus
korrekciója – modellezés raszteres
adatokkal grafikus felületen



A napsugarak beesési szögét szintén tartalmazza a metafile,

$\text{sun_elevation} = 40.2433155^\circ$, amit a metafile a horizonthoz képest ad meg, így a képletben szereplő θ értéke $90 - 40.2433155 = 49.7566845^\circ$

Az ESUN_λ (az átlagos külső-atmoszférikus irradiancia) értékét szakirodalomból (Chandler-Markham, 2003) olvashatjuk ki (15.4. ábra).

15.4. ábra - Az átlagos külső-atmoszférikus irradiancia (ESUN_λ) értékei $\text{W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$ -ben

TABLE II
TM SOLAR EXOATMOSPHERIC SPECTRAL IRRADIANCES

Units: $\text{ESUN} = \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$		
Model:	Chance Spectrum CHKUR	
Band	Landsat 4	Landsat 5
1	1957	1957
2	1825	1826
3	1557	1554
4	1033	1036
5	214.9	215.0
7	80.72	80.67

3. 15.3. Radiometrikus korrekció modellje grafikus felületen

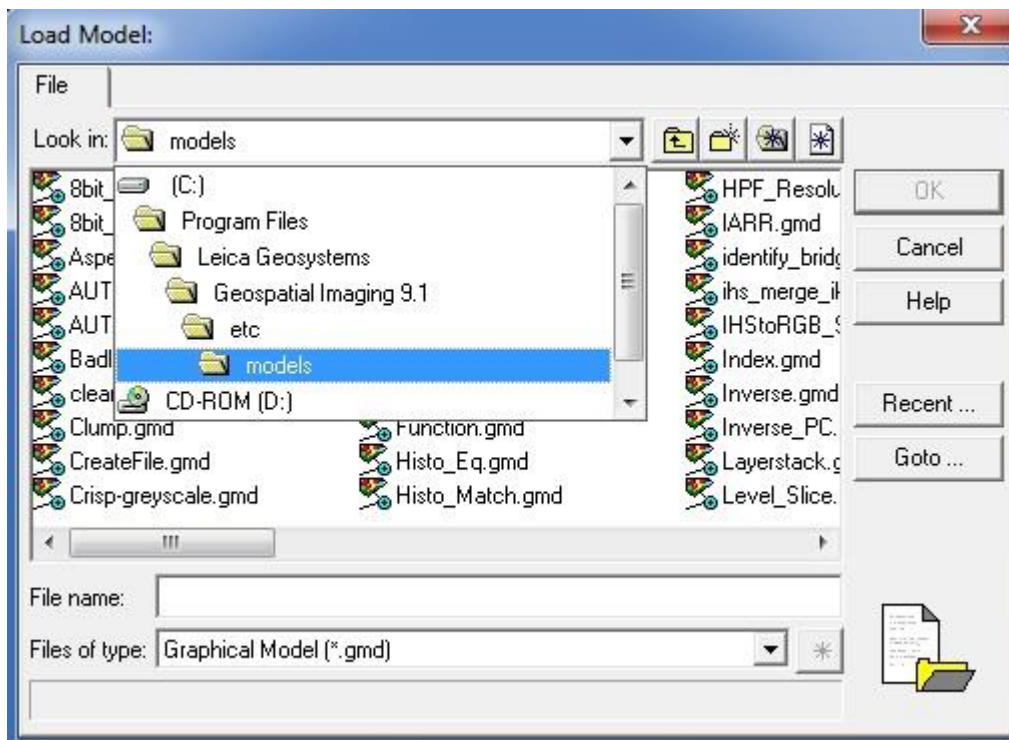
Az úrfelvétel minden képelemére ismert az intenzitás érték. Ezért az intenzitásértékből radianciát, majd reflektanciát számoló modell feladata, hogy minden bemenő képelemre, annak intenzitásértékéből és az előbb

meghatározott változók értékeinek, továbbá a képletben szereplő konstansok értékeinek ismeretében, megadja kimenő információként a képelemet (adott területet) jellemző radiancia, ill. reflektancia értéket.

3.1. 15.3.1. Beépített model megnyitása

A grafikus modellező használata megkönnyíti a az adott szoftverkörnyezetben nem kidolgozott munkafolyamat végrehajtását. Saját magunk készíthetünk modellt, melyet folyamatábraként is értelmezhetünk. Néhány beépített összetett művelet is valójában egy grafikus modell, melynek háttérben történő futtatása eredményezi a művelet végrehajtását. Az Erdas Imagine 9.1. verziójában a beépített modelleket elérhetjük a Leica Geosystems/Geospatial Imaging 9.1/etc/models könyvtárban és betölthetjük a Modeler főikon alól indítható a Model Maker-ből pl. a File/Open paranccsal (15.5. ábra).

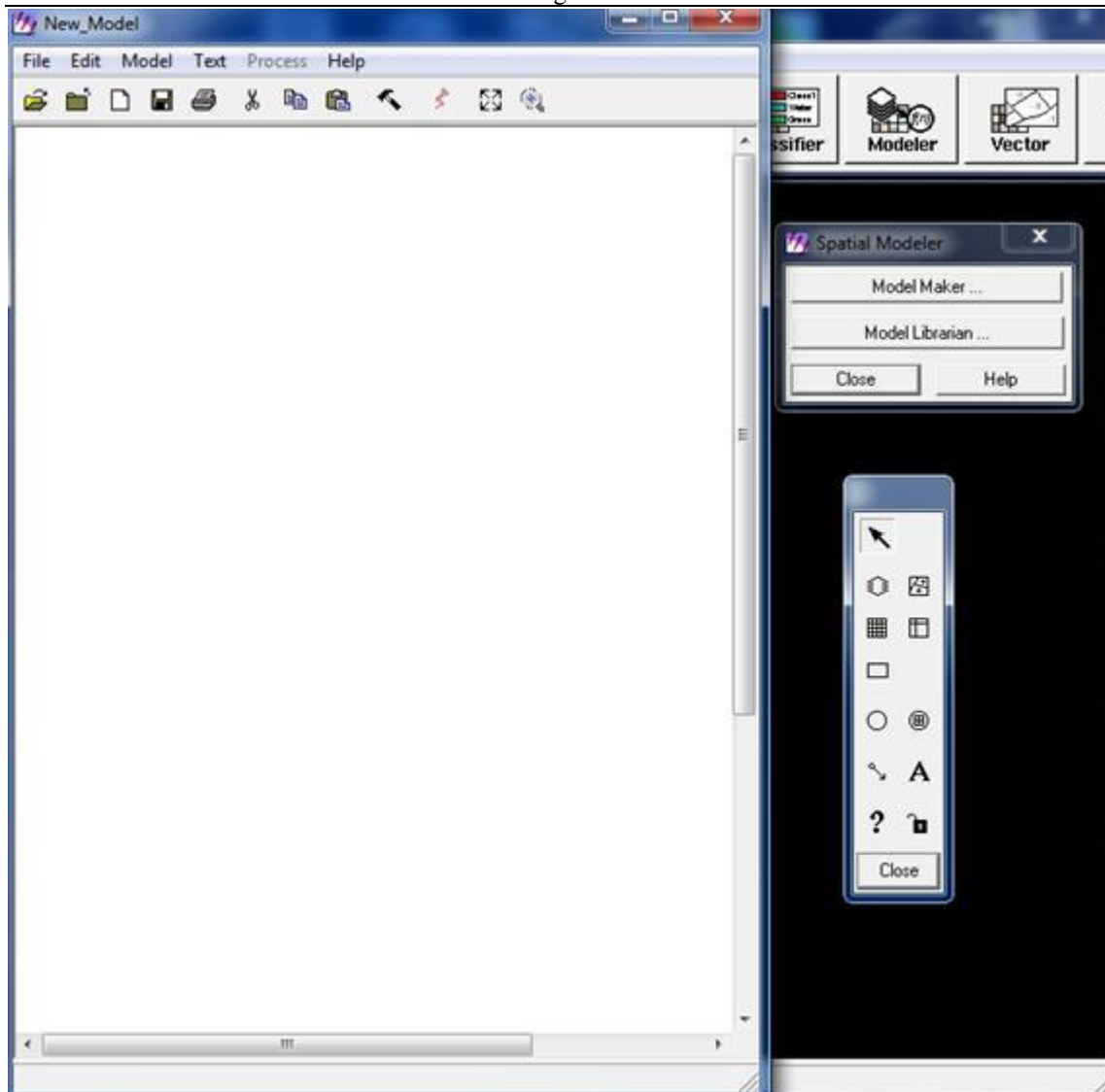
15.5. ábra - Beépített model betöltése a Modeler Model Maker menüjéből



3.2. 15.3.2. Új, grafikus modell szerkezete

Az elkészítendő modell egyszerű szerkezetű, hiszen a letöltött raszteres állományon kell pixelenként végrehajtani az ismert függvény szerinti műveletsort, majd az eredményt képként el kell menteni. Az új modell megnyitása a Modeler főikon Model Maker menüjére kattintva történik. A képernyőn megjelenik egy üres, fehér felületű ablak (New_Model) melybe a jobbra lévő Tools (Eszközök) segítségével húzható be a megfelelő grafikus eszköz (15.6. ábra).

15.6. ábra - Az Erdas Modeler Model Maker nyitófelülete és az eszközpalletta

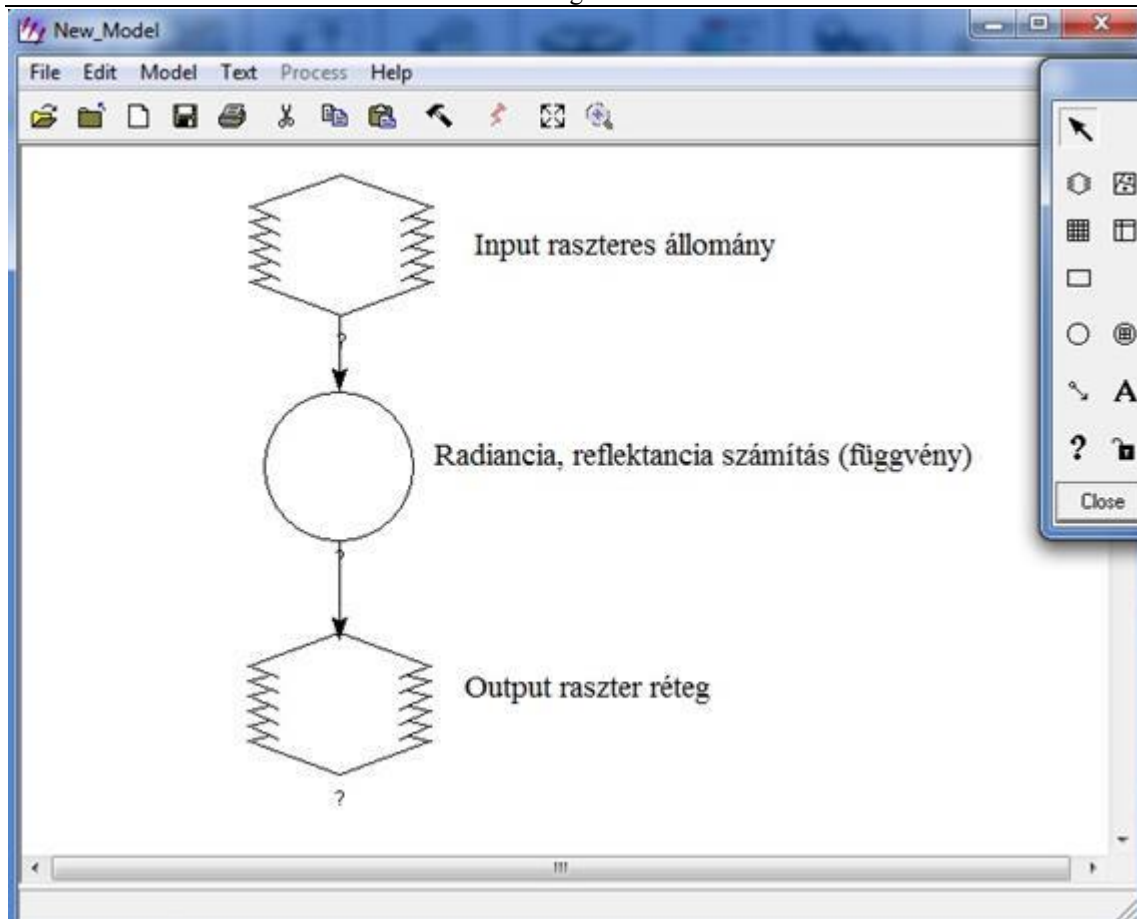


3.3. 15.3.3. Új, grafikus modell készítése a reflektanciaérték kiszámításához

Az elkészítendő modell minden részeleme ismert. Az úrfelvételt letöltöttük pl. a Glovis rendszerből a metafile-lal együtt. Az intenzitásértékekből – minden pixelre vonatkozóan – a megadott képleteknek megfelelően ki lehet számítani a radiancia és a reflektanciaértékeket. A modellalkotás folyamata 3 részre bontható:

- a, a bemenő (input) úrfelvétel megadása,
- b, a radiancia és a reflektancia értéket megadó függvény szerkesztése,
- c, a kimenő (output), raszteres adatállomány mentése képként (15.7. ábra).

15.7. ábra - Egyszerű grafikus modell az Erdas Imagine 9.1. modellezőjében

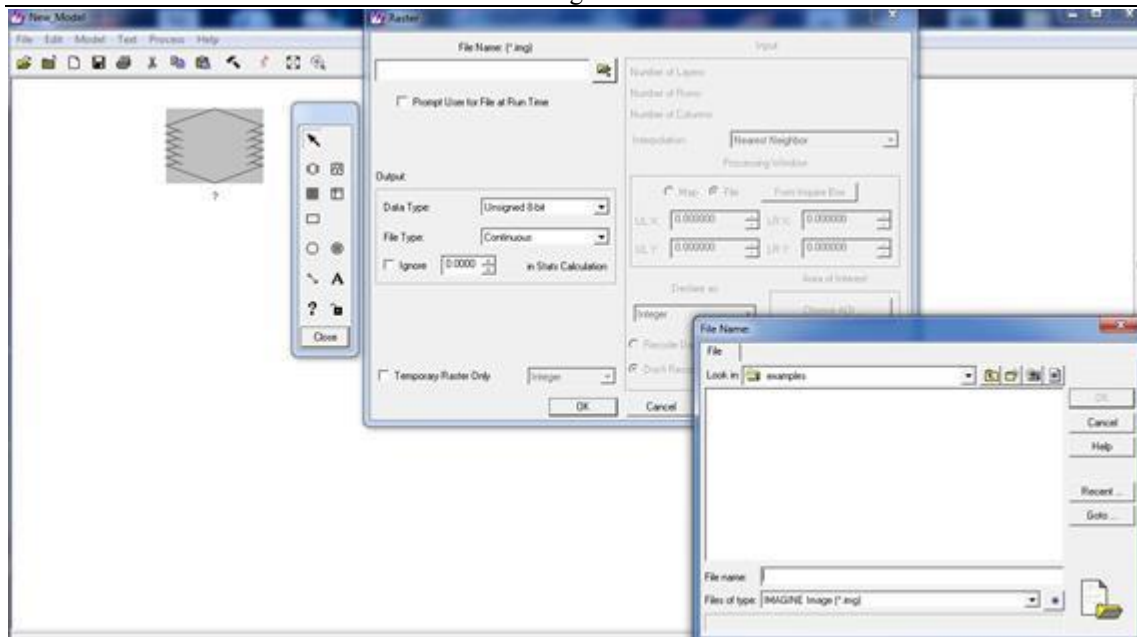


Input file megadása a grafikus modellezőben

A modell input raszteres állománya egy létező úrfelvétel, melynek felvételezési ideje meghatároz egyéb paramétereket is. Az elkészítendő modellünk nem interaktív abban a tekintetben, hogy rugalmasan alkalmazkodik bármilyen bemenő úrfelvétel változó paramétereire. Emiatt, ha változik a modell input rétege, akkor a belső függvény paramétereit is változtatnunk kell és az egész modellt más néven kell mentenünk. A bemenő raszter réteget a modell input rétegeként az Eszközpalletta (Tools) raszter ikonjának a fehér szerkesztőfelületbe történő mozgatásával tehetjük meg (15.8. ábra). A bemenő raszterréteg megadása (a raszter ábrára kattintva) történhet úgy, hogy a modell input raszterréteg nevét azonnal beírjuk a megfelelő helyre (File Name a Raster ablakban), de történhet úgy is, hogy a modell futtatása közben választjuk ki a megfelelő képet. Ez utóbbi esetben a Raster ablakban a Prompt User for File at Run Time szöveg előtt kapcsolóikonra kell kattintani!

15.8. ábra - A Model Maker input raszterréteg szerkesztőfelülete

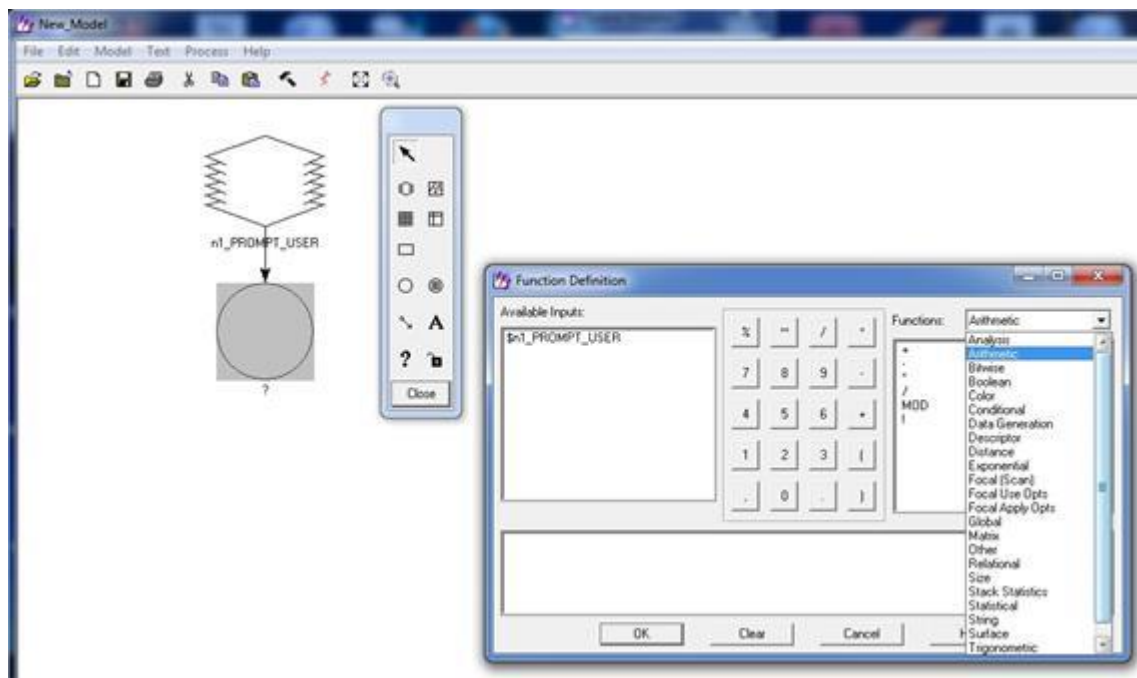
Úrfelvételek radiometrikus
korrekciója – modellezés raszteres
adatokkal grafikus felületen



Függvény megadása és szerkesztése a grafikus modellezőben

A függvény a meghatározott műveleteket a bemenő adatokon hajtja végre. A modellbe a függvényt az Eszközpaletta (Tools) függvény ikonjának a fehér szerkesztőfelületbe történő mozgatásával tehetjük meg (15.9. ábra). Ezután a Eszközpaletta (Tools) kapcsoló ikonjával összekapcsolhatjuk a bemenő raszterréteget a függvénnyel. Ugyanazzal a réteggel több függvényt is összekapcsolhatunk.

15.9. ábra - Függvény megadása a Model Maker-ben



A 15.9. ábrán a lehetséges input a felhasználó által a modell futtatása közben kiválasztott file lehet. A függvény definiálása a Function Definition ablak jobb oldalán található, nagyon sok lehetőséget tartalmazó, gördülő menü alapján történik, kezdve a legegyszerűbb aritmetikai műveletektől a bonyolultabb függvénydefiniálásig. A kiválasztott függvény megadását a megadott szintaxis segíti.

Példánkban a (2) képlet alapján a Landsat TM szenzor 1. sávjában radianciaértéket megadó függvény a következő:

$$L_{\lambda L5TM1s} = 0,602431 * \$n1_PROMPT_USER(1) - 1.52$$

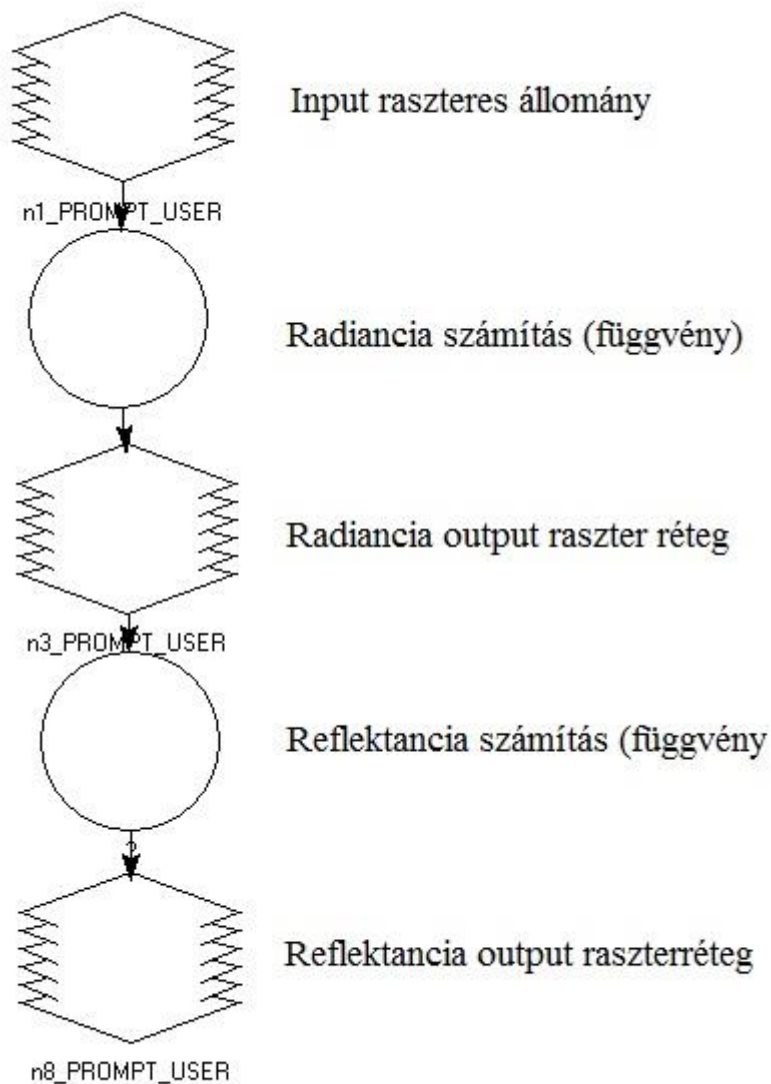
ahol a \$n1_PROMPT_USER(1) kifejezés hivatkozik a felhasználó által a modell futtatása közben megadott raszteres állomány (L5TM1s=Landsat 5 TM szenzor 1 sáv) elő rétegére.

Ebből a (3) képlet alapján

$$Ref_{\lambda} = \Pi * (0,602431 * \$n1_PROMPT_USER(1) - 1.52) * 1,006 ** 2 / (1957 * \cos(\pi / 180 * 49,7566845))$$

Amennyiben a radianciát külön is el kívánjuk menteni, akkor modellt a két függvény külön alkalmazásával kettéoszthatjuk (15.10. ábra)

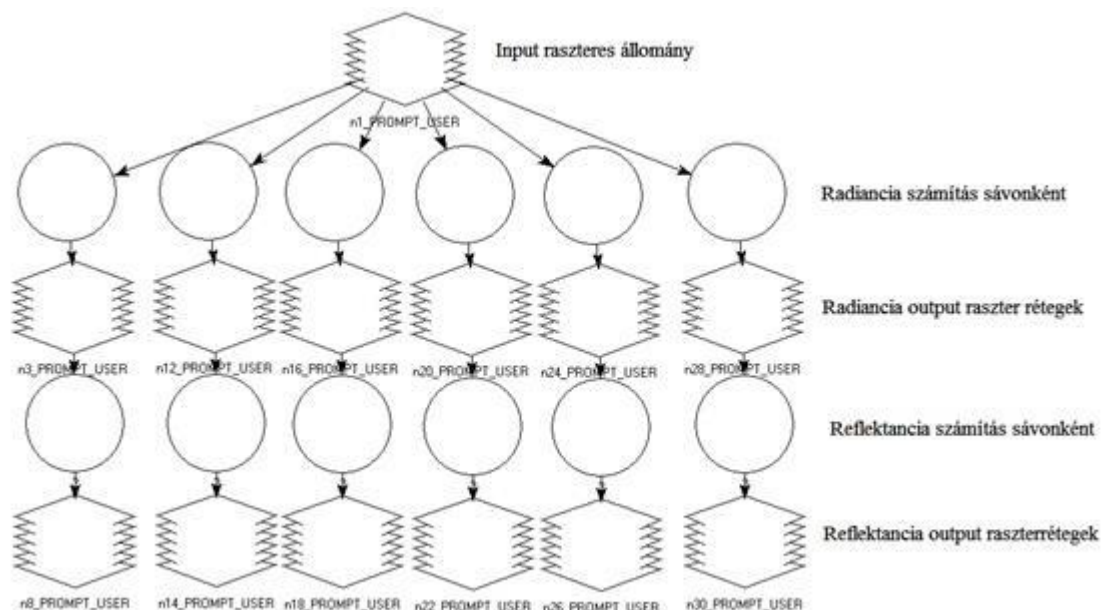
15.10. ábra - Radiancia és reflektancia értékeket számító modell szerkezete 1 sávra



Miután a radiancia és a reflektancia értékek számításakor a detektor paraméterei sávonként változnak (15.11. ábra), így a függvényeket sávonként kell beépíteni a modellbe. A Landsat TM esetében az első 5 sávban, valamint 7. sávban mérjük a földfelszínről visszavert elektromágneses sugárzást. Ezért csak ezekre a sávokra lehet reflektanciát számolni. A hőtartományú infravörös tartományban (6. sáv) a földfelszín által kisugárzott energiát mérjük, így reflektanciát nem lehet számolni ebben a sávban, de a radiancia ismeretében kiszámolható a

felszín hőmérséklete (lásd Chandler-Markham, 2003). A reflektanciát sávonként megadó modell egy 6 ágú folyamatábraként jellemezhető, és következőképpen néz ki (15.12. ábra):

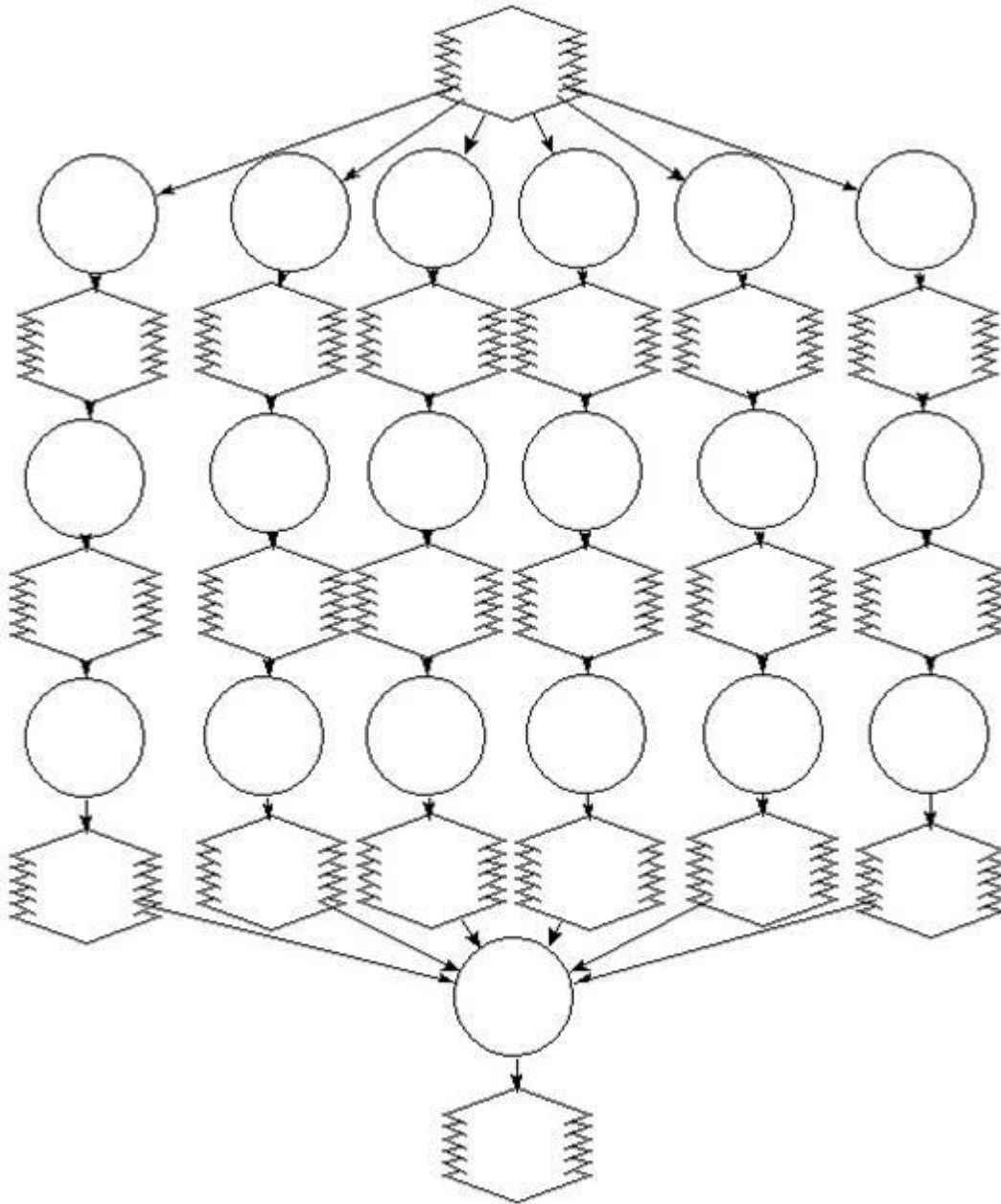
15.11. ábra - Radiancia és reflektancia értékeket számító modell szerkezete sávonként összefűzéssel



A Glovis-ból letöltött úrfelvételt a felvételezés geometriája alapján korrigálták UTM (WGS84) rendszerbe, így a képet tartalmazó raszteres állomány 4 sarkában fekete háromszög-alakú területeket találunk, ahol a pixel értéke 0. Ezek reflektanciaértéke természetesen 0 lesz. A reflektanciaérték számításában esetleg előfordulhat, hogy a kiszámított érték < 0 , ezért egy egyszerű feltételes függvény beiktatásával az ilyen pixelekhez a 0 értéket rendelhetjük. Például az 1.sáv feltételes függvénye a következő a modellünkben:

```
EITHER 0 IF ( $n8_PROMPT_USER < 0 ) OR $n8_PROMPT_USER OTHERWISE Min
```

15.12. ábra - Radiancia és reflektancia értékeket számító modell teljes struktúrája sávonként összefűzéssel



A kész modellt mentjük el, és a Process menü Run funkciójával indítjuk el a modell (a program) futását. Hiba nélküli modell futásakor csak a felhasználó által megadandó input és outfile-ok nevét kell kiválasztani vagy megadni. A kész képi állomány az Erdas Viewer-ben nyitható meg.

Megjegyzés: Az Erdas újabb verziója (v10.x) a Landsat 7 ETM+ szenzorával készített űrfelvételek radiometrikus korrekciójához tartalmaz már egy interaktív felületet. Ezzel a radiometrikus korrekció modellalkotás nélkül elvégezhető. Hasonló elven működnek az Erdas Imagine-hez külön megvásárolható Atcor2 és Atcor3 modulok, melyek a radiometrikus korrekció mellett elvégzik az űrfelvétel atmoszférikus korrekcióját is sík felszín (Atcor2), ill. digitális domborzatmodell (Atcor3) felhasználásával.

4. Ellenőrző kérdések

1. Milyen paraméterek befolyásolják a radiancia értékét?
2. Milyen paraméterek alapján számolható ki adott terület reflektanciaértéke?
3. Mit jelent az asztronómiai egység és kb. mekkora az értéke?

4. Miért nem lehet reflektanciát számolni a hőtartományú infravörös sávban mért adatokból?
5. Hogyan nevezzük az Erdas modellező modulját?
6. Milyen felületen történik a modellalkotás az Erdas-ban?

5. Irodalomjegyzék

Chander, G. - Markham, B. 2003. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41. (11) 2674-2677.